

*21 - я Международная научно-  
практическая конференция*

**ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮ-  
ТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*24 – 25 декабря  
2015 г*

**г. Харьков**

Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця  
Одесский национальный политехнический университет  
ПАО "ФЭД"  
ООО Технический Центр "ВариУс" (Днепропетровск)  
Ассоциация технологов-машиностроителей Украины  
Институт сверхтвердых материалов имени В.Н. Бакуля НАН Украины  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Институт проблем машиностроения НАН Украины  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"  
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко  
Харьковский национальный технический университет радиоэлектроники  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта  
Приазовский государственный технический университет (Мариуполь)  
Сумской государственный университет  
Национальная Металлургическая Академия Украины  
Луцкий национальный технический университет  
Юго-Западный государственный университет (Курск)  
Ульяновский государственный технический университет  
Пермский государственный технический университет  
ПАО "Мотор - Січ"  
ПАО Завод "Южкабель"  
ПАО ХМЗ "Свет шахтера"  
НТК "Эльбор-4" (Харьков)  
Гомельское ПО "Кристалл", Республика Беларусь  
Doosan Infracore, Южная Корея  
ООО GEVORKYAN, Банска-Быстрица, Словакия  
Университет "Константин Бранкузи", г. Тыргу-Жиу, Румыния  
Жешувский технологический университет, Польша  
Высшая техническая школа, Цвикау, Германия  
Международная академия по развитию технологий, Кельн, Германия  
Компания "Foxenergy", Верона, Италия  
Кафедра UNESCO "Интеллектуальное моделирование и адаптация нетрадиционных технологий  
к проблемам перспективного обучения и общественного прогресса"

## **ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**ТРУДЫ 21-й МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Харьков 2015**

**КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КОНФЕРЕНЦИИ:****Сопредседатели:**

Новиков Ф.В., д.т.н.	(Харьков)	Дитиненко С.А., к.т.н.	(Харьков)
Жовтобрюх В.А., к.т.н.	(Днепропетровск)	Клименко С.А., д.т.н.	(Киев)
Якимов А.В., д.т.н.	(Одесса)	Коломиец В.В., д.т.н.	(Харьков)
Фадеев В.А., д.т.н.	(Харьков)	Лавриненко В.И., д.т.н.	(Киев)

**Члены совета:**

Андилахай А.А., д.т.н.	(Мариуполь)	Ларшин В.П., д.т.н.	(Одесса)
Гринева В.Н., д.э.н.	(Харьков)	Малыхин В.В., к.т.н.	(Курск)
Гусарев В.С., к.т.н.	(Одесса)	Новиков Г.В., к.т.н.	(Харьков)
		Свищев В.И., д.т.н.	(Пермь)

**ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:**

Воробьев Ю.С., д.т.н.	(Харьков)	Осипов В.А., к.т.н.	(Сумы)
Дашенко А.Ф., д.т.н.	(Одесса)	Петраков Ю.В., д.т.н.	(Киев)
Деревянченко А.Г., д.т.н.	(Одесса)	Плеснецов Ю.А., к.т.н.	(Харьков)
Евстратов В. А., д.т.н.	(Харьков)	Рябенков И.А., к.т.н.	(Харьков)
Кленов О.С., к.т.н.	(Харьков)	Савченко Н.Ф., к.т.н.	(Харьков)
Клочко А.А., д.т.н.	(Харьков)	Самотугин С.С., д.т.н.	(Мариуполь)
Крюк А.Г., к.т.н.	(Харьков)	Скобло Т.С., д.т.н.	(Харьков)
Лебедев В.Г., д.т.н.	(Одесса)	Сизый Ю.А., д.т.н.	(Харьков)
Макаров В.Ф., д.т.н.	(Пермь)	Стрельчук Р.М., к.т.н.	(Харьков)
Марчук В.И., д.т.н.	(Луцк)	Тернюк Н.Э., д.т.н.	(Харьков)
Наддачин В.Б., к.т.н.	(Одесса)	Тонконогий В.М., д.т.н.	(Одесса)
Невлюдов И.Ш., д.т.н.	(Харьков)	Тришевский О.И., д.т.н.	(Харьков)
Новиков Д.Ф.	(Харьков)	Усов А.В., д.т.н.	(Одесса)
Новиков С.Г., к.т.н.	(Курск)	Худобин Л.В., д.т.н.	(Ульяновск)
Оргиян А.А., д.т.н.	(Одесса)	Шепелев А.А., д.т.н.	(Киев)
Орлов П.А., д.э.н.	(Харьков)	Шкурупий В.Г., к.т.н.	(Харьков)

**Ф50 Физические и компьютерные технологии.** Труды 21-й Международной научно-практической конференции, 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д : ЛИРА, 2015. – 275 с.  
ISBN 978-966-383-658-4

Представлены труды, в которых рассмотрены проблемы технологии машиностроения и обработки материалов; прогрессивные технологии, оборудование, инструменты и технологические системы; проблемы динамики и прочности машин, математики, механики, экономики и организации производства.

Для специалистов в области машиностроения, экономики и организации производства, научно-технических работников и студентов.

**УДК 62-65: 621.382.82**

*Труды воспроизводятся непосредственно с авторских оригиналов.*

ISBN 978-966-383-658-4

# 1. НАУЧНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.923

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ РЕЖУЩИХ ЗЕРЕН ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, **Шкурупий В.Г.**, канд. техн. наук,  
(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The results of analytical studies surface roughness during abrasive processing, including the processes of grinding and polishing abrasive. It is shown that with increasing number of operating abrasive grains (grain rivaya rassmat-cone-shaped) and decrease the slice thickness (considering the grain as a sphere), the ratio of tall surface roughness increases, reaching values  $R_{max} / R_a = 20 \dots 30$  or more. This is consistent with the experimental data-governmental obtained by abrasive polishing. Theoretically found that by grinding ratio  $R_{max} / R_a = 4 \dots 6$*

Для обеспечения высоких показателей шероховатости поверхности обрабатываемых деталей машин применяются различные методы абразивной обработки (шлифование, хонингование, абразивное полирование и т.д.). Технологические возможности этих методов обработки достаточно полно изучены [1, 2]. Вместе с тем, закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке аналитически описаны недостаточно полно и требуют проведения дальнейших исследований. В особой мере это относится к аналитическому определению отношения высотных параметров шероховатости поверхности  $R_{max} / R_a$ , которое может принимать различные значения. Так, по экспериментальным данным, при шлифовании  $R_{max} / R_a = 4 \dots 6$  [3], а при абразивном полировании отношение  $R_{max} / R_a$  может принимать достаточно большое значение, равное 30 [4]. Поэтому важно провести теоретический анализ характера изменения отношения  $R_{max} / R_a$  для различных условий абразивной обработки, моделируя зерна в форме конуса и сферы.

Для решения поставленной задачи рассмотрена расчетная схема образования шероховатости поверхности на неподвижной плоскости образца (рис. 1) в результате наложения на нее проекций  $n$  зерен, расположенных на рабочей поверхности инструмента, движущегося со скоростью  $V$  перпендикулярно неподвижной плоскости образца. Первоначально принято, что режущие зерна имеют форму конуса, одинаковые размеры и выступают на одинаковую высоту. Для аналитического описания образуемой шероховатости поверхности предложено использовать вероятностную функцию  $\Phi(y)$ , характеризующую вероятность неудаленного металла с поверхности обрабатываемого образца, т.е. определяющей долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей (рис. 1,а):

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $n$  – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания;  $B$  – ширина обрабатываемого образца, м;  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины зерна, м.

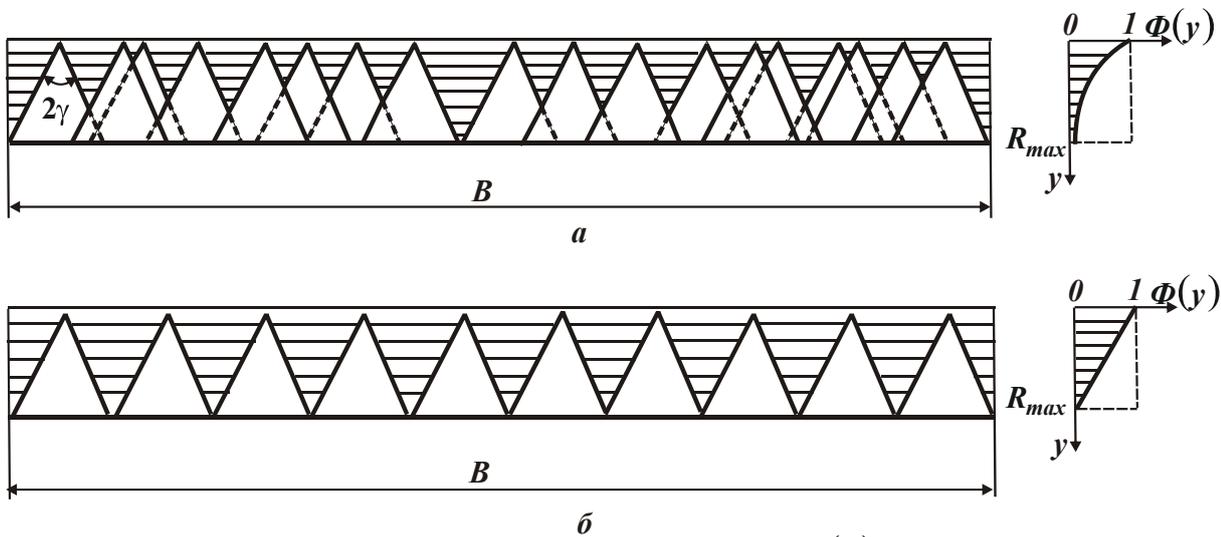


Рис. 1. Расчетная схема вероятностной функции  $\Phi(y)$  при неупорядоченном (а) и упорядоченном (б) расположении проекций зерен на плоскости образца

По физической сути функция  $\Phi(y)$  соответствует классической относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности – одному из основных параметров шероховатости поверхности [1].

В работе [5] приведено общее теоретическое решение определения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  на основе использования вероятностной функции  $\Phi(y)$  (рис. 2). Для этого первоначально определено положение средней линии  $y = a$ , которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части таким образом, что заштрихованные на рис. 2 площади  $F_1$  и  $F_2$  равны между собой. В этом случае наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению  $y=0$ , а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению  $y = R_{max}$  (высотному параметру шероховатости поверхности).

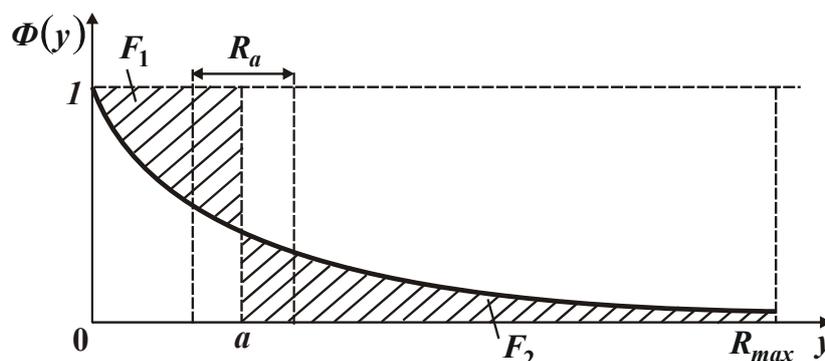


Рис. 2. Расчетная схема параметра шероховатости поверхности

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  по определению равен длине стороны прямоугольника с высотой  $\Phi(y)=1$  (рис. 2), т.е.

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot F_2. \quad (2)$$

Положение средней линии профиля  $y = a$  определяется из условия  $F_1 = F_2$ . Тогда в общем случае площади  $F_1$  и  $F_2$  аналитически опишутся:

$$F_1 = \int_0^a [1 - \Phi(y)] \cdot dy = a - \int_0^a \Phi(y) \cdot dy; \quad (3)$$

$$F_2 = \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (4)$$

Сравнивая зависимости (3) и (4), получено:

$$a = \int_0^a \Phi(y) \cdot dy + \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (5)$$

Соответственно параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определится:

$$R_a = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (6)$$

С учетом зависимости (1) и числа  $N = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max} / B$ , установленного из рис. 1,б и определяющего во сколько раз суммарная длина оснований проекций  $n$  зерен на вертикальную плоскость  $2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}$  будет больше ширины обрабатываемого образца  $B$  на уровне  $y = R_{max}$ , параметры  $a$  и  $R_a$  выразятся:

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right) = \frac{R_{max}}{N} \cdot (1 - e^{-N}); \quad (7)$$

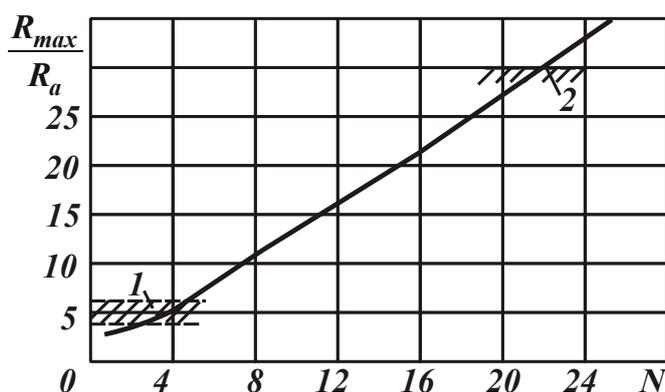
$$\begin{aligned} R_a &= 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left( e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot a}{B}} - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot R_{max}}{N} \cdot (e^{-(1-e^{-N})} - e^{-N}). \end{aligned} \quad (8)$$

Из табл. 1 и рис. 3 следует, что значения отношения  $R_{max} / R_a$ , рассчитанные на основе зависимости (8), с увеличением числа  $N$  непрерывно увеличиваются, особенно при условии  $N \geq 4$ .

Таблица 1

Расчетные значения отношений  $R_a / R_{max}$  и  $R_{max} / R_a$ 

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_a / R_{max}$	0,324	0,285	0,225	0,178	0,144	0,121	0,105	0,091	0,081	0,073
$R_{max} / R_a$	3,086	3,509	4,444	5,618	6,944	8,26	9,52	10,98	12,34	13,7
$N$	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80
$R_a / R_{max}$	0,049	0,036	0,029	0,024	0,02	0,018	0,014	0,012	0,01	0,009
$R_{max} / R_a$	20,55	27,4	34,25	41,1	48	54,8	68,5	82,2	95,9	109,6

Рис. 3. Зависимость отношения  $R_{max} / R_a$ 

от  $N$ : 1 – зона шлифования;  
2 – зона абразивного полирования

Практикой абразивной обработки установлено, что отношение  $R_{max} / R_a$  при шлифовании, как правило, принимает значения 4...6 [3]. Исходя из табл. 1 и рис. 3, это достигается для  $N=3...5$ . При абразивном полировании отношение  $R_{max} / R_a$  может принимать значение 30 [4]. Исходя из табл. 1 и рис. 3, это достигается для  $N \approx 22$ .

Следовательно, увеличение отношения  $R_{max} / R_a$  до значения

30 при абразивном полировании обусловлено увеличением числа  $N$ , т.е. увеличением количества зерен  $n$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности. Из этого вытекает, что при шлифовании в формировании шероховатости поверхности участвует значительно меньшее количество зерен, чем при абразивном полировании.

При условии  $N \geq 4$  экспонентная функция  $e^{-N} \rightarrow 0$ , поэтому вторыми слагаемыми в зависимостях (7) и (8) можно пренебречь в первом приближении:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (9)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (10)$$

Преобразуя зависимости (9) и (10) с учетом  $N = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max} / B$ , имеем:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \frac{R_{max}}{R_{max}} = \frac{R_{max}}{N}; \quad (11)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \frac{R_{max}}{R_{max}} = \frac{0,734 \cdot R_{max}}{N} \quad (12)$$

ИЛИ

$$\frac{a}{R_{max}} = \frac{1}{N}; \quad (13)$$

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{0,734}{N}. \quad (14)$$

Как следует из зависимостей (13) и (14), отношения  $a/R_{max}$  и  $R_a/R_{max}$  тем меньше, чем больше  $N \geq 1$ . Применяемое на практике отношение

$$\frac{R_{max}}{R_a} = \frac{N}{0,734}, \quad (15)$$

наоборот, тем больше, чем больше число  $N \geq 1$ . Этим показано, что отношения  $R_a/R_{max}$  и  $R_{max}/R_a$ , описываемые зависимостями (14) и (15), вполне однозначно определяются числом  $N$  (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения отношений  $R_a/R_{max}$  и  $R_{max}/R_a$

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_a/R_{max}$	0,734	0,367	0,244	0,183	0,146	0,122	0,105	0,091	0,081	0,073
$R_{max}/R_a$	1,36	2,72	4,1	5,46	6,85	8,2	9,52	10,98	12,34	13,7
$N$	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80
$R_a/R_{max}$	0,049	0,036	0,029	0,024	0,02	0,018	0,014	0,012	0,01	0,009
$R_{max}/R_a$	20,55	27,4	34,25	41,1	48	54,8	68,5	82,2	95,9	109,6

Как видно, при условии  $N \geq 4$  значения отношений  $R_a/R_{max}$  и  $R_{max}/R_a$ , приведенные в табл. 1 и табл. 2 фактически совпадают, что позволяет для практических целей использовать упрощенные зависимости (14) и (15).

Для сравнения параметров шероховатости поверхностей, образованных в результате работы инструментов с неупорядоченным и упорядоченным расположением абразивных зерен, рассмотрим расчетную схему, справедливую для упорядоченного расположения абразивных зерен, представленных в форме сферы радиусом  $R$  (рис. 4). Окружности абразивных зерен описываются:

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2. \quad (16)$$

Функция  $\Phi(y)$ , характеризующая величину неудаленного металла с поверхности обрабатываемого образца, т.е. определяющая долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей, выражается зависимостью:

$$\Phi(y) = \frac{R - x}{R} = 1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}, \quad (17)$$

$$\text{где } x = \sqrt{R^2 - (y - R)^2} = R \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}.$$

Положение средней линии профиля  $y = a$ , согласно зависимости (7) с учетом  $R_{max} = R$ , определяется:

$$a = \int_0^R \Phi(y) \cdot dy = \int_0^R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} \right] \cdot dy. \quad (18)$$

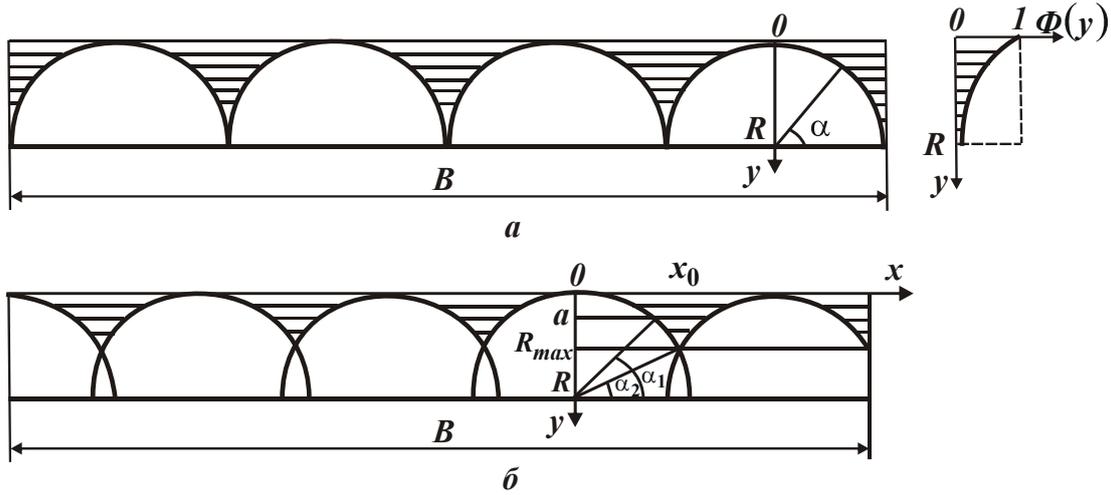


Рис. 4. Схема наложения проекций зерен на плоскость обрабатываемого образца при упорядоченном расположении зерен: а –  $R_{max} = R$ ; б –  $R_{max} < R$

Для вычисления определенного интеграла следует произвести замену переменной:  $\left(1 - \frac{y}{R}\right) = \sin \alpha$  (рис. 4,а), тогда  $dy = -R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$ . Пределы интегрирования  $y = 0$  и  $y = R$  соответственно равны:  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $\alpha = 0$ . Тогда

$$\begin{aligned} a &= R \cdot \int_0^{\pi/2} (1 - \cos \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = R \cdot \int_0^{\pi/2} \left[ \cos \alpha - \left( \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right) \right] \cdot d\alpha = \\ &= \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot R = 0,215 \cdot R. \end{aligned} \quad (19)$$

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется зависимостью (8):

$$\begin{aligned} R_a &= 2 \cdot \int_a^R \Phi(y) \cdot dy = 2 \cdot \int_a^R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} \right] \cdot dy = \\ &= 2 \cdot R \int_0^{\alpha_1} \left[ \cos \alpha - \left( \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right) \right] \cdot d\alpha = 2 \cdot R \cdot \left( \sin \alpha_1 - \frac{\alpha_1}{2} - \frac{1}{4} \cdot \sin 2\alpha \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Угол  $\alpha_1$  определяется из условия:  $y = a = 0,215 \cdot R$ . Тогда

$$\sin \alpha_1 = 1 - \frac{a}{R} = 1 - 0,215 = 0,785. \quad (21)$$

Соответственно, угол  $\alpha_1 = 52^\circ$  и зависимость (20) принимает вид:

$$R_a = 0,18 \cdot R. \quad (22)$$

Сравнивая полученное значение параметра шероховатости поверхности  $R_a$  с аналогичным значением  $R_a$ , полученным при неупорядоченном расположении абразивных зерен, т.е. на основе использования теории вероятностей [6], видно, что они совпадают при числе  $N=3$ . Следовательно, для того чтобы обеспечить параметр шероховатости поверхности  $R_a = 0,18 \cdot R$  при неупорядоченном расположении зерен, их количество должно быть больше в 3 раза, чем при упорядоченном расположении зерен. Из этого вытекает, что упорядоченное расположение зерен позволяет потенциально в 3 раза повысить производительность обработки по сравнению с неупорядоченным расположением зерен.

В табл. 3 и на рис. 5 (кривая 4) приведены расчетные значения функции  $\Phi(y)$  при упорядоченном расположении зерен. На рис. 5 также приведены расчетные значения функции  $\Phi(y)$  при неупорядоченном расположении зерен [6]. Как видно, графики 2 и 4 на рис. 5 отличаются, несмотря на то, что для них параметр  $R_a$  один и тот же и принимает значение  $R_a = 0,18 \cdot R$ .

Таблица 3

Расчетные значения функции  $\Phi(y)$  при упорядоченном расположении зерен

$y/R$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Phi(y)$	1	0,564	0,4	0,286	0,2	0,134	0,083	0,046	0,02	0,005	0

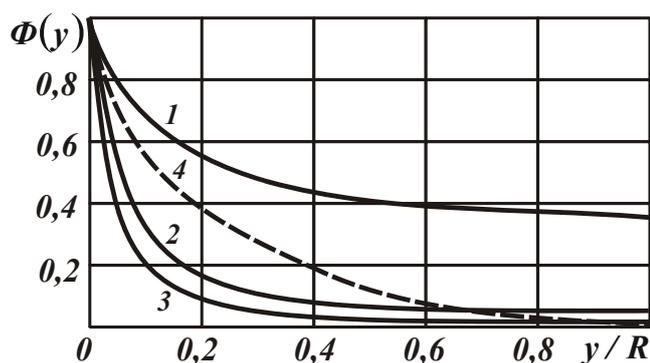


Рис. 5. Характер изменения функции  $\Phi(y)$  при неупорядоченном расположении зерен (1 –  $N=1$ ; 2 –  $N=3$ ; 3 –  $N=4$ ) и упорядоченном расположении зерен (4)

Отношение высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a / R_{max}$ , исходя из зависимости (22) с учетом  $R_{max} = R$  равно  $R_a / R_{max} = 0,18$ . Соответственно  $R_{max} / R_a = 5,55$ , что в большей мере соответствует условиям формирования шероховатости поверхности при шлифовании.

Заслуживает особого внимания случай  $0 < R_{max} < R$  (рис. 4,б). Тогда функция  $\Phi(y)$  опишется зависимостью, аналогичной зависимости (17):

$$\Phi(y) = \frac{x_0 - x}{x_0} = 1 - \frac{x}{x_0}, \quad (23)$$

где  $x = \sqrt{R^2 - (y - R)^2} = R \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}$ ;  $x_0 = \sqrt{R^2 - (R_{max} - R)^2} = R \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_{max}}{R}\right)^2}$ .

Тогда

$$\Phi(y) = 1 - \frac{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_{max}}{R}\right)^2}} = 1 - z \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}, \quad (24)$$

где  $z = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_{max}}{R}\right)^2}}$ .

Положение средней линии профиля  $y = a$  определяется зависимостью:

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} \left[ 1 - z \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} \right] \cdot dy. \quad (25)$$

С учетом новой переменной:  $(1 - y/R) = \sin \alpha$ , ее производной  $dy = -R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$  и новых пределов интегрирования  $\alpha = \pi/2$  и  $\alpha = \alpha_2 = \arcsin(1 - R_{max}/R)$  вместо исходных пределов интегрирования  $y = 0$  и  $y = R_{max}$  зависимость (25) принимает вид:

$$\begin{aligned} a &= R \cdot \int_{\alpha_2}^{\pi/2} (1 - z \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = R \cdot \int_{\alpha_2}^{\pi/2} \left[ \cos \alpha - z \cdot \left( \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right) \right] \cdot d\alpha = \\ &= R \cdot \left[ (1 - \sin \alpha_2) + \frac{z}{4} \cdot \sin 2\alpha_2 - \frac{z}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется зависимостью, аналогичной зависимости (20):

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \left[ 1 - z \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} \right] \cdot dy. \quad (27)$$

Произведя замену  $(1 - y/R) = \sin \alpha$  и соответственно  $dy = -R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$ , с учетом новых пределов интегрирования  $\alpha_1 = \arcsin(1 - a/R)$  и

$\alpha_2 = \arcsin(1 - R_{max}/R)$  вместо исходных пределов интегрирования  $y = a$  и  $y = R_{max}$ , получено:

$$R_a = 2 \cdot R \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \left[ \cos \alpha - z \cdot \left( \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right) \right] \cdot d\alpha =$$

$$= 2 \cdot R \cdot \left[ (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) - \frac{z}{2} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{z}{4} \cdot (\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2) \right]. \quad (28)$$

В табл. 4 приведены рассчитанные по зависимостям (26) и (28) значения отношений  $a/R$ ,  $R_a/R$  и  $R_{max}/R_a$  для различных значений  $R_{max}/R$ .

Таблица 4

Расчетные значения  $z$ ,  $\alpha_2$ ,  $a/R$ ,  $\alpha_1$ ,  $R_a/R$  и  $R_{max}/R_a$

$R_{max}/R$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0
$z$	3,2	2,294	1,666	1,4	1,25	1,154	1,0
$\alpha_2$ , град.	72	65	53	45	37	30	0
$a/R$	0,017	0,0341	0,0638	0,0934	0,1219	0,147	0,215
$\alpha_1$ , град.	74	69	62	58	56	54	52
$R_a/R$	0,00088	0,0055	0,017	0,0346	0,0614	0,0858	0,18
$R_{max}/R_a$	56,8	18,18	11,76	8,67	6,51	5,83	5,55

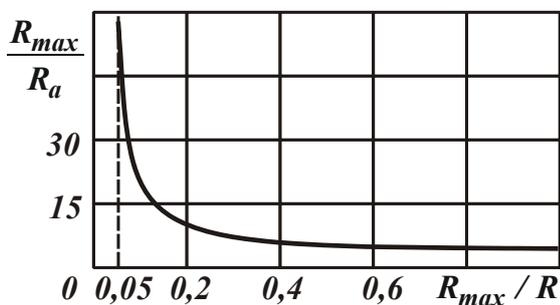


Рис. 6. Зависимость отношения  $R_{max}/R_a$  от  $R_{max}/R$

Как видно, отношение параметров шероховатости поверхности  $R_{max}/R_a$  в зависимости от отношения  $R_{max}/R$  изменяется в широких пределах, принимая при  $R_{max}/R = 0,05$  весьма большое значение  $R_{max}/R_a = 56,8$  (рис. 6). При  $R_{max}/R > 0,1$  отношение  $R_{max}/R_a$  принимает значения, которые соответствуют экспериментально установленным значениям для процессов шлифования и хонингования [1-3].

В работе [4] экспериментально установлено, что при абразивном полировании отношение  $R_{max}/R_a$  может принимать значение, равное 30. Исходя из табл. 4, это связано с существенным уменьшением отношения  $R_{max}/R \rightarrow 0,05$  вследствие существенного уменьшения толщин срезов отдельными зернами, что является особенностью процесса абразивного полирования.

Таким образом, при моделировании абразивных зерен в форме сферы можно даже при упорядоченном расположении зерен получить значения  $R_{max}/R_a$ , изменяющиеся в весьма широких пределах и соответствующие экспериментальным данным, тогда как при моделировании абразивных зерен в форме конуса при их упорядоченном расположении (рис. 1,б) отношение

$R_{max} / R_a$  принимает одно значение, равное  $R_{max} / R_a = 4$ . Следовательно, моделирование абразивных зерен в форме сферы в большей мере соответствует реальным условиям формирования шероховатости поверхности как при шлифовании, так и при абразивном полировании.

Параметр  $R_{max}$  по физической сути определяет толщину среза  $a_z$  отдельным зерном, которая принимает предельное значение при условии перехода от процесса резания к процессу трения зерна с обрабатываемым материалом. Согласно экспериментальным данным профессора Богомолова Н.И., это условие выполняется при предельных значениях  $a_z / \rho = 0,04 \dots 0,08$ , а по данным профессора Крагельского И.В. – при  $a_z / \rho = 0,14 \dots 0,17$ , т.е. в общем  $a_z / \rho = 0,04 \dots 0,17$ , где  $\rho$  – радиус округления режущей кромки зерна, мкм. Тогда в общем  $a_z \approx R_{max} = (0,04 \dots 0,17) \cdot R$ , где  $R$  – радиус абразивного зерна, мкм. Рассматривая отношение  $a_z / \rho \approx R_{max} / R$ , из рис. 6 следует, что при переходе от процесса резания к процессу трения зерна с обрабатываемым материалом отношение высотных параметров шероховатости поверхности  $R_{max} / R_a$  может изменяться в широких пределах – от 56 до 14. Из этого вытекает, что процесс абразивного полирования может протекать в этих условиях, т.к. по приведенным выше экспериментальным данным отношение  $R_{max} / R_a = 30$ , соответственно  $R_{max} / R = 0,07$ .

При шлифовании, как известно, отношение  $R_{max} / R_a$  принимает меньшие значения (на уровне 4...6), а это соответствует значениям  $R_{max} / R > 0,6$ . Очевидно, в этих условиях протекает устойчивый процесс резания. При этом также возможно протекание интенсивного процесса трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, однако он в меньшей мере влияет на отношение  $R_{max} / R_a$ .

Таким образом, установлена тесная связь отношения  $R_{max} / R_a$  с отношением  $a_z / \rho \approx R_{max} / R$ . Как следует из рис. 6, чем больше это отношение, тем меньше отношение  $R_{max} / R_a$  и выше эффективность процесса обработки с точки зрения обеспечения высокопроизводительного съема обрабатываемого материала. С уменьшением отношения  $a_z / \rho \approx R_{max} / R$  до предельного значения, при котором происходит переход от процесса резания к процессу трения зерна с обрабатываемым материалом, отношение  $R_{max} / R_a$  может принимать весьма большие значения.

Существенно увеличить отношение  $R_{max} / R_a$  можно и при обработке материалов методами пластического деформирования, т.е. когда отношение  $a_z / \rho \approx R_{max} / R$  принимает предельные значения. Так, экспериментально установлено, что при выглаживании шаром отношение  $R_{max} / R_a = 14,2$ , а параметр  $R_a = 0,1$  мкм. Приблизительно такие же значения достигаются и при тонком точении алмазным инструментом ( $R_{max} / R_a = 21,2$ ;  $R_a = 0,1$  мкм) и при абразивном полировании ( $R_{max} / R_a = 30$ ;  $R_a = 0,1$  мкм). Следовательно, обработка в

этих условиях в большей мере подчиняется закономерностям трения и пластического деформирования материала, в результате чего уменьшаются параметры шероховатости, причем, параметр  $R_a$  в большей мере, что приводит к увеличению отношения  $R_{max} / R_a$ . При струйно-абразивной обработке отношение  $R_{max} / R_a$  принимает значение 6,25, что соответствует условиям протекания устойчивого процесса резания. Однако образуемая шероховатость поверхности характеризуется достаточно большими значениями параметров  $R_a$  и  $R_{max}$ .

**Список литературы:** 1. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с. 2. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 3. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 4. Шкурупій В.Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / В.Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с. 5. Новіков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новіков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупій // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 5 (979). – С. 199-210. 6. Шкурупій В.Г. Оценка влияния зернистости абразива на шероховатость поверхности при абразивной обработке / В.Г. Шкурупій, Ф.В. Новіков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 44 (1087). – С. 184–189.

УДК 621.923

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

**Новиков Г.В.**, канд. техн. наук

(Научный Центр НТК “Эльбор”, г. Харьков)

*Theoretically substantiated conditions improve productivity and quality of the diamond abrasive machining very hard materials. The results of the implementation of the technologies developed in the production and processing of metallic materials nemetalliche-ray diamond wheels on metal bonds with an effective method of spark changes. Practical recommendations for improving the technology of diamond-abrasive treatment*

При обработке деталей из твердых сплавов, высокопрочных сталей и с износостойкими наплавочными материалами, керамик и других высокотвердых металлических и неметаллических материалов широко используются алмазные круги на прочных металлических связках с применением непрерывной или периодической электроэрозионной правки.

С целью обоснования условий максимального использования потенциальных возможностей алмазного шлифования этими кругами и выбора рацио-

нальных схем обработки, разработана формализованная физико-математическая теория процессов шлифования [1 - 3], позволяющая с единых позиций на качественно новом фундаментальном уровне аналитически описать механические и теплофизические закономерности съема материала и формообразования поверхностей при шлифовании, выявить и реализовать на практике наиболее производительные кинематические схемы шлифования. Расчетами установлено, что при постоянной площади поперечного сечения среза отдельным зерном круга  $S = const$  производительность обработки  $Q$  с увеличением глубины шлифования  $t$  изменяется по экстремальной зависимости (рис. 1а), а скорость детали  $V_{дет}$  непрерывно уменьшается (рис. 1б). Причем доказано, что минимум производительности обработки  $Q$  достигается при условии  $t \cong H_{max}$ , где  $H_{max}$  – максимальная толщина среза отдельным зерном круга. С физической точки зрения минимум  $Q$  обусловлен существованием самой короткой по длине стружки, поскольку с увеличением и уменьшением  $t$ , начиная со значения  $t \cong H_{max}$ , длина стружки возрастает.

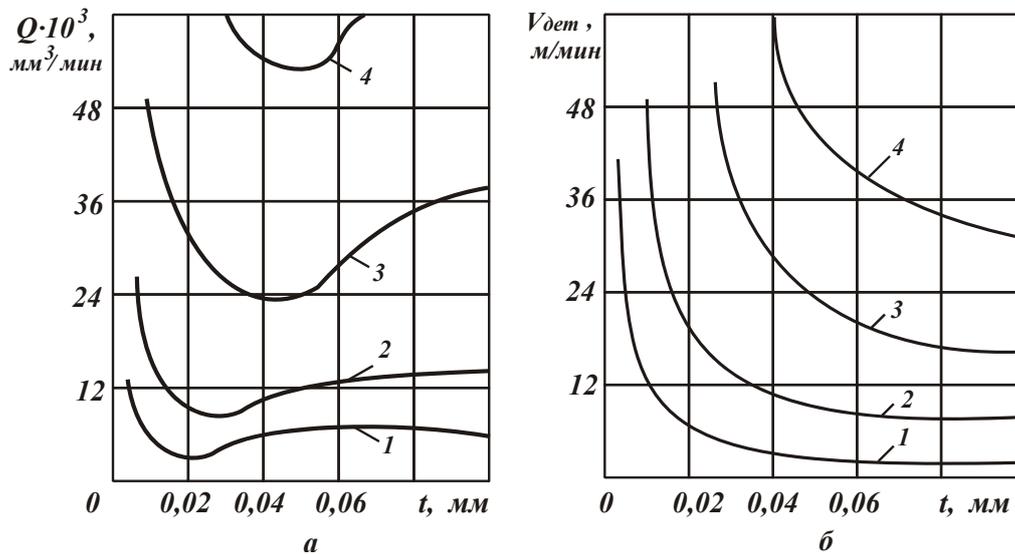


Рис. 1. Зависимости производительности обработки  $Q$  (а) и скорости детали  $V_{дет}$  (б) от глубины шлифования  $t$ : 1; 2; 3; 4 –  $S = 400; 900; 1600; 2500 \text{ мкм}^2$

Установлено, что все существующие и применяемые на практике схемы многопроходного и глубинного алмазного шлифования (исключая однопроходное шлифование пазов и канавок), как правило, реализованы для случая  $t \cong H_{max}$ , поскольку глубина шлифования находится в пределах  $(5 \dots 30) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Это собственно, и предопределяет относительно низкую производительность алмазного шлифования и нецелесообразность применения алмазных взамен обычных абразивных кругов при съеме относительно больших припусков. Следовательно, добиться существенного повышения производительности обработки можно применением кинематических схем шлифования, реализующих условия  $t < H_{max}$  и  $t > H_{max}$ , т.е. условия обработки для левой и правой ветвей зависимости  $Q$  от  $t$  (рис. 1а).

Кинематическими схемами круглого продольного шлифования, реализующими условия обработки для случая  $t < H_{max}$ , являются: 1) многопроходное шлифование с долевой продольной подачей  $S_d \approx 1$ , весьма малой глубиной шлифования и относительно большой (соизмеримой со скоростью круга) скоростью детали; 2) глубинное шлифование с  $S_d \ll 1$  и относительно большой скоростью детали. Кинематической схемой круглого продольного шлифования, реализующей условия обработки для случая  $t > H_{max}$ , является глубинное шлифование с  $S_d \approx 1$  и относительно небольшой скоростью детали. На этой основе разработан процесс высокопроизводительного глубинного шлифования с небольшой скоростью детали (0,5 – 5 м/мин), обеспечивающий съём значительных припусков (1 – 2 мм и более) за один проход круга и высокое качество обработки (отсутствие прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях). Установлено, что наибольший эффект в этом случае достигается от применения алмазных прерывистых кругов, обеспечивающих существенное снижение температуры шлифования.

Основной областью эффективного применения данного процесса стало шлифование различных твердосплавных изделий. При этом установлено, что искусственное создание на алмазном круге на металлической связке плосковершинных зерен позволяет уменьшить высоту микронеровностей и стабильно обеспечить шероховатость обрабатываемой поверхности на уровне 10 класса. Это открывает новые технологические возможности высокопроизводительного алмазного шлифования, позволяет в ряде случаев исключить из технологического цикла изготовления изделий традиционное абразивное шлифование, которое, как правило, снижает качество обрабатываемых поверхностей. Так, решена проблема повышения качества и точности обработки на операциях круглого наружного шлифования твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов (фрез, разверток, зенкеров, протяжек, сверл и т.д.) при съеме припуска до 2-х мм на сторону и обеспечении высокого уровня производительности и экономичности процесса. Для этого использованы крупногабаритные алмазные круги на металлической связке М2-01 формы 1А1 и диаметром 500 мм, характеризующиеся большой рабочей поверхностью, что в сочетании с непрерывной электроэрозионной правкой обеспечивает увеличение стойкости круга, производительности и качества обработки. Повышение режущей способности круга позволяет снизить силы и температуру резания и интенсифицировать режим шлифования за счет применения увеличенных глубин резания (переход в область глубинного шлифования). В связи с этим использована схема продольного шлифования с долевой продольной подачей, равной 0,5, глубиной шлифования 0,1...0,2 мм и скоростью вращения обрабатываемого инструмента до 5 м/мин. Выбор оптимальной долевой продольной подачи  $S_d=0,5$  связан с обеспечением качественной очистки алмазного круга от продуктов обработки, т.к. созданы условия эффективной периодической электроэрозионной правки "неработающей" половины ширины круга в процессе шлифования. Данный момент играет исключительно важную роль в обеспечении высокой режу-

щей способности круга на протяжении обработки. В особой мере это проявилось на операции шлифования длинных быстрорежущих протяжек. В связи с недостаточно высокой режущей способностью абразивного круга диаметром 600 мм и упругими перемещениями не достигалась требуемая точность обработки (не выше 0,01 мм). Применение новой технологии за счет повышения "остроты" алмазного круга позволило гарантированно обеспечить точность обработки в пределах 0,01 мм, исключить прижоги и другие шлифовальные дефекты обработки.

Разработана и внедрена также технология круглого наружного алмазного шлифования торцом круга задней поверхности крупногабаритных твердосплавных сверл с относительно небольшой скоростью вращения обрабатываемого инструмента (до 5 м/мин) и повышенной глубиной резания (до 0,15 мм). Реализация данной схемы глубинного алмазного шлифования кругом на связке М2-01 стала возможной благодаря организации эффективной электроэрозионной правки, в результате чего решена проблема повышения качества обработки, имевшая место при абразивном шлифовании. Из технологического цикла шлифования исключены абразивные круги, производительность алмазного шлифования стала выше производительности абразивного шлифования.

Разработанная технология круглого наружного и плоского алмазного электроэрозионного шлифования режущих инструментов внедрена на многих предприятиях, где ранее, например, вся номенклатура изготавливаемых твердосплавных и быстрорежущих инструментов производилась с использованием алмазного электрохимического шлифования, а также обычного абразивного шлифования. Относительно низкая производительность электрохимического шлифования и вредность работы с электролитами предопределили необходимость использования разработанных технологий алмазного электроэрозионного шлифования с повышенными глубинами резания. Благодаря возможности увеличения производительности обработки решена проблема перехода на полную алмазную обработку на всех операциях шлифования: круглого, внутреннего, плоского шлифования и заточки инструментов. Все используемые в инструментальном производстве предприятия станки (более 20 единиц) были переоборудованы под электроэрозионное шлифование, укомплектованы изготовленными нами малогабаритными специальными генераторами импульсного тока, реализующими оптимальный электрический режим обработки. В результате внедрения улучшены условия труда и экология производства, снижены потери от брака инструмента на операциях шлифования.

Для повышения эффективности электроэрозионной правки [4] алмазных кругов на металлических связках разработана специальная конструкция правящего электрода, который рабочий-шлифовщик может удерживать в руках в процессе правки. Это значительно упрощает процесс правки на станке, т.к. не требуется его модернизация с целью электроизоляции шпинделя и т.д. В результате решена проблема огранки природных алмазов в бриллианты на основе применения мелкозернистых алмазных кругов (зернистостью 10/7) на металлической связке формы 6А2. Обеспечивается точность обработки рабочей по-

верхности алмазного круга (плоскостность) в пределах 0,01 мм и относительно большое выступание алмазных зерен над уровнем связки (по сравнению с чугунными шаржированными ограночными дисками и дисками, изготовленными гальваническим методом), исключаются на обработанной поверхности (бриллианта) следы массопереноса компонентов металлической связки круга, что наблюдалось при шлифовании кругом, заправленным с помощью абразивного бруска. Решена также проблема электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке формы 1А1 150х6, используемых на операциях обдирочного круглого наружного шлифования кристаллов природных алмазов для подготовки их к огранке в бриллианты, поскольку такие круги после спекания имеют достаточно большое радиальное и торцовое биение, которое недопустимо при шлифовании природных алмазов. Разработанная технология прецизионной электроэрозионной правки этих кругов обеспечивает точность обработки в пределах 0,01 мм и качественное вскрытие алмазоносного слоя, что позволило повысить качество и производительность шлифования природных алмазов.

С высокой эффективностью решена проблема электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке формы 14ЕЕ1 при шлифовании изделий из хрусталя и стекла, поскольку существующие технологии механической правки круга не обеспечивают его высокую режущую способность, что снижает производительность и качество обработки, ухудшает условия труда рабочего в связи с увеличением сил резания в условиях ручной обработки и т.д. Электроэрозионная правка производится непосредственно на рабочем месте с периодичностью не менее 15 минут рабочим-огранщиком. Используется простое правящее устройство, которое при правке удерживается в руках рабочего. С его помощью в течение 2-3 минут правки происходит качественное вскрытие алмазоносного слоя круга и полностью восстанавливается "острие" вершины конусообразного круга. Это позволяет производить качественное и высокопроизводительное нарезание грани на изделиях. Кроме того, обеспечивается устранение биения круга на этапе подготовки его к работе, что традиционно с использованием механической правки абразивным бруском было невыполнимо. Разработанная технология электроэрозионной правки алмазного круга высокоэффективна и внедрена на ряде стекольных заводов, изготавливающих изделия из хрусталя.

Разработка эффективной технологии электроэрозионной правки крупногабаритных (диаметром до 1000 мм и выше) сборных торцовых крупнозернистых (зернистостью 315/250 и более из алмазов АС15) алмазных кругов на металлических связках типа М2-01 (и более прочных кобальтовых связках) открыла новые возможности обеспечения высокопроизводительного и высококачественного шлифования деталей из ферритов и керамик на станках мод. 3Д756 с вращающимся столом, когда оси вращения круга и стола станка не совпадают. В процессе правки, во-первых, на этапе первоначальной подготовки круга к работе (после сборки круга) устраняются значительная разновысотность расположения алмазных элементов (до 1 мм и выше) и биение круга, обеспечивается создание на круге (профилирование) заборного конуса, что необходимо для

нормального протекания процесса шлифования. Во-вторых, обеспечивается качественное вскрытие алмазного слоя круга и соответственно его высокая режущая способность. Благодаря своевременному удалению с рабочей поверхности круга затупившихся зерен, можно фактически исключить трение металлической связки круга с обрабатываемым материалом и снизить температуру и силы резания, повысить качество и производительность обработки.

Для осуществления правки круга разработаны специальные габаритные правящие устройства и специальный генератор импульсного тока, реализующий оптимальный электрический режим правки крупнозернистого алмазного круга. Правка осуществляется в течение 20 минут, обеспечивает выступание режущих зерен над уровнем связки на значительную высоту и существенно повышает стойкость круга, уменьшает количество сколов на обработанных деталях и исключает другие дефекты обработки, что повышает процент выхода годных деталей.

Периодичность правки – один раз в 7 смен, тогда как после механической правки обеспечивалась стойкость круга всего в течение 2...4 часов работы. Это требовало частых правок круга и потребления большого количества абразивных кругов, что повышало трудоемкость обработки. При этом механической правкой не достигалось достаточное выступание алмазных зерен над уровнем связки, а это приводило к интенсивному контакту металлической связки с обрабатываемой поверхностью и переносу элементов связки на обрабатываемую поверхность, что недопустимо для деталей электронной промышленности. Благодаря снижению силовой напряженности процесса шлифования в результате применения эффективной электроэрозионной правки круга удалось увеличить радиальную подачу и производительность за счет устранения ограничений обработки в связи с невозможностью прочного крепления нетокопроводных деталей из ферритов и керамик на магнитной плите стола станка, а также в связи с недостаточной прочностью и жесткостью собственно обрабатываемых тонкостенных деталей.

Разработанная эффективная технология электроэрозионной правки крупногабаритных сборных торцовых крупнозернистых алмазных кругов на металлических связках типа М2-01 при шлифовании деталей из ферритов и керамик на станках мод. 3Д756 с вращающимся столом внедрена в производство.

**Список литературы:** 1. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. ”Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 4. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Н.К. Беззубенко. – Харьков, 1995. – 56 с.

## ПЯТИОСЕВОЙ ПОРТАЛЬНЫЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР DOOSAN BM 2740U – ЛУЧШЕЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Жовтобрюх В.А.**, канд. техн. наук (ТЦ “ВариУс”, г. Днепропетровск)  
**Dooyoung Jeong**, Doosan Infracore, Южная Корея

*The substantiation of the technological capabilities of high-performance five-axis gantry machining centers DOOSAN BM 2740U, which has worked well in the high-speed processing of large aircraft parts made of materials with improved physical and mechanical properties*

Высокоскоростная механическая обработка является одним из приоритетных направлений современной технологии изготовления деталей летательных аппаратов. Внедрение такой обработки в авиационную промышленность позволяет существенно повысить производительность труда при одновременном повышении точности обработки и качества изготовления самолетных деталей. В авиационных конструкциях находят широкое применение высокопрочные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. При изготовлении деталей и узлов самолетов до 25–35 % от общей трудоемкости изготовления изделий составляют операции механической обработки на металлорежущих станках (рис. 1). Использование в конструкциях агрегатов самолета крупногабаритных монолитных деталей сложных форм из труднообрабатываемых материалов вызывает рост объема работ по механической обработке.



Рис. 1. Детали и узлы самолета, подвергаемые механической обработке

Компания Doosan (Южная Корея), ориентируясь на заказчика, постоянно разрабатывает и внедряет передовые технологии металлообработки в машиностроении, создавая оборудование отличного качества. Ежегодно компания инвестирует в свое развитие, вследствие чего появляются новые модели оборудования и решения, успешно применяющиеся на предприятиях авиационной и космической промышленности для обработки резанием сложных деталей.

Пятиосевой порталный обрабатывающий центр Doosan VM 2740U (рис. 2) специально спроектирован для обработки авиационных деталей сложной формы за один установ, что позволяет улучшить качество получаемых изделий, а также снизить себестоимость их изготовления по сравнению с традиционной обработкой на нескольких станках. Обрабатывающий центр Doosan VM 2740U уже в базовом исполнении оснащен целым набором дополнительных опций, позволяющих выполнять высокоскоростную прецизионную обработку целого ряда традиционных для аэрокосмической отрасли деталей. Точность позиционирования по трем линейным осям сохраняется постоянной при самом нагруженном режиме работы благодаря системе термокомпенсации. Кроме того, все линейные оси в стандарте оснащены прецизионными роликовыми направляющими и оптическими линейками.



Рис. 2. Обрабатывающий центр Doosan VM 2740U

Портальная конструкция станка с двумя симметрично расположенными фиксированными колоннами повышенной жесткости обеспечивает стабильные условия обработки без вибрации за счет сбалансированного распределения веса, а также эффективного рассеивания тепла, выделяемого в процессе обработки.

Универсальная высокоскоростная поворотная головка с прямым приводом позволяет выполнять непрерывную обработку деталей больших габаритов в течение длительного времени. Одновременная 5-ти осевая обработка позволяет значительно сократить время, необходимое для обработки деталей со сложным профилем.

Конус шпинделя станка (HSKA63) оснащается Dual contact system – системой, которая фиксирует инструмент по двум поверхностям. Контакт осу-

ществляется не только по боковой поверхности, но и по торцу оправки, придавая системе фиксации инструмента дополнительную жесткость и обеспечивая высокую точность обработки на скоростях до 18000 об./мин и выше. Эта система помогает свести к минимуму вибрации, шум и потери мощности, обычно характерные для высокоскоростной обработки. Dual contact system входит в комплект стандартной поставки.

Интересна также опробованная временем функция Heat displacement Control – Doosan Heat Control Device.

Для обеспечения точности обрабатываемых деталей в условиях массового производства (непрерывный график работы оборудования, коэффициент использования оборудования 0,9–0,95, повышенные режимы резания, частые переходы от черновой обработки к чистовой и обратно) станки оснащаются системами обратной связи с датчиками линейных перемещений (абсолютными измерительными линейками) HEIDENHAIN (Германия). С этой целью, для контроля тепловых деформаций и смещений оси Z Doosan использует свою разработку – Heat Control Device. Информация о температурных колебаниях в режиме реального времени с датчиков, расположенных на шпинделе и станине, поступает в операционную программу. При этом изменение кинематических и термических характеристик, а также влияние нагрузки на точность в процессе обработки определяются линейными датчиками и учитываются системой управления, что позволяет достигать высочайшей точности позиционирования станка – до  $\pm 3$  мкм. Обрабатывающий центр Doosan VM 2740U управляется системой ЧПУ Heidenhain iTNC 530. Данная стойка отличается оптимизированной системой управления перемещением по траектории, коротким временем обработки кадра и специальными стратегиями обработки штампованных деталей. Цифровая архитектура и встроенное цифровое управление приводами с интегрированным преобразователем обеспечивают высокую скорость обработки при высочайшей точности контура, что особенно необходимо при обработке 2D-контуров или 3D-форм. Динамический контроль столкновений (опция DCM) системы iTNC 530 постоянно контролирует рабочую зону станка на предмет возможных столкновений рабочих органов станка с зажимными приспособлениями. Адаптивное управление подачей (опция AFC) автоматически регулирует контурную подачу в зависимости от мощности шпинделя и других параметров. Такой набор опций и возможностей станка позволяют оптимизировать время обработки, контролировать инструмент и щадить механику станка. С учетом всех вышеперечисленных особенностей, обрабатывающий центр Doosan VM 2740U позволяет поднять обработку авиационных деталей на качественно новый уровень.

**Список литературы:** 1. Жовтобрюх В.А. Разработка и внедрение эффективных технологических процессов механической обработки / В.А. Жовтобрюх // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 92-105. 2. Жовтобрюх В.О. Розробка ефективних технологій високошвидкісної механічної обробки деталей гідравлічних систем / В.О. Жовтобрюх, Ф.В. Новіков // Труды 19-й Международной научно-практической конференции “Физические и компьютерные технологии”. – Харьков: ГП ХМЗ “ФЭД”, 2014. – С. 66-75.

## ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

**Жовтобрюх В.А.**, канд. техн. наук  
(Технический Центр “ВариУс”, г. Днепропетровск)

*New constructions of cutting tools for high-speed machining of hard materials that reduce power and heat intensity of the cutting process, increase productivity and quality of treatment*

Многие авиа- и энергостроительные предприятия испытывают все возрастающее давление рынка, связанное с глобальным масштабом конкуренции и повышением себестоимости обработки более качественных, но труднообрабатываемых материалов. Возрастает спрос на новые инструментальные решения по эффективной обработке изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, без больших дополнительных инвестиций. Решением являются инновационные режущие инструменты, которые не только превосходят по техническим характеристикам применявшиеся ранее, но и снижают затраты на производство [1]. Так, одна из крупнейших металлообрабатывающих компаний мира TaeguTec (Южная Корея), отвечает на этот вызов рынка расширением серии инструмента ChaseMold и новыми геометриями пластин, соответствующими потребностям клиентов в аэрокосмической и энергетической отраслях на операциях обработки деталей, изготавливаемых из вязких и труднообрабатываемых материалов (рис. 1).

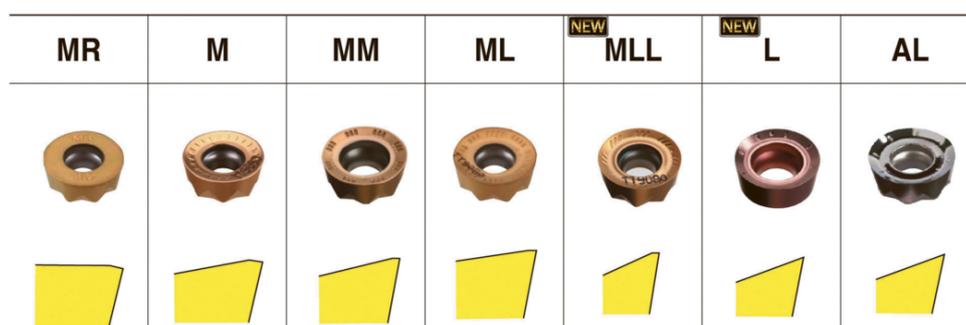


Рис. 1. Новые геометрии пластин

Одна из новинок металлорежущего инструмента ChaseMold - стружколомающая геометрия MM серии пластин RYM(H)X – позволяет значительно снизить процент бракованных изделий при производстве дорогостоящей продукции авиационной промышленности. Благодаря таким особенностям, как усиленная режущая кромка и увеличенный передний угол (рис. 2), стружколом MM обеспечивает ощутимое снижение силы резания и предотвращает скол пластин на ответственных операциях механической обработки деталей. Выбор пластин с геометрией MM – это стабильная обработка и мягкое резание труднообрабатываемых и вязких материалов, таких как нержавеющие стали и сплавы на основе титана, широко используемые в аэрокосмической и энергетиче-

ской отраслях, а также при производстве пресс-форм и штампов. Геометрии пластин MLL и L (рис. 3) оптимальны для обработки жаропрочных суперсплавов (HRSA), таких как сплавы на основе титана, кобальта и никеля. Пластины с этой геометрией режущей кромки отличаются более позитивным передним углом, способствующим повышению эффективности процесса резания и снижению усилий резания, а уникальный дизайн насечек не допускает налипание вязких материалов на переднюю поверхность пластины.



Рис. 2. Стружколом MM



Рис. 3. Геометрии пластин MLL и L

Пластины ChaseMold со стружколомом L весьма эффективны для механической обработки деталей из жаропрочных сплавов, например, инконеля и титаносодержащих материалов, а вот стружколомающая геометрия ML - бесспорный лидер на операциях изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов при высоких режимах резания, т.е. в условиях высокоскоростной обработки. Серия испытаний вышеописанных разработок TaeguTec с аналогичными продуктами мировых производителей инструмента подтвердила их превосходство. Новые пластины серии ChaseMold значительно превосходят ближайших конкурентов при обработке инконеля и титановых сплавов.

Таблица 1

Результаты испытаний инструмента ChaseMold при обработке титана BT22

	Серия ChaseMold
Деталь	Кронштейн
Обрабатываемый материал	Титан BT22
Станок	5-ти осевой обрабатывающий центр
Корпус фрезы	Модульная головка $\varnothing 32R6$ TERY 332-M16-12
Пластина	RYMX 1205-ML TT3540
Скорость, м/мин	35
Обороты, об./мин	350
Подача, мм/мин	150
Глубина резания, мм	2
Ширина резания, мм	1 – 32
Стойкость 1 кромки, мин	307 мин

В 2015 году в производственных условиях ведущего украинского предприятия аэрокосмической отрасли была успешно испытана серия ChaseMold, показав положительные результаты (табл. 1) при обработке титана BT22 (рис. 4): достигнуто увеличение стойкости инструмента при высоком качестве обрабатываемых поверхностей.



Рис. 4. Шасси из титана VT22

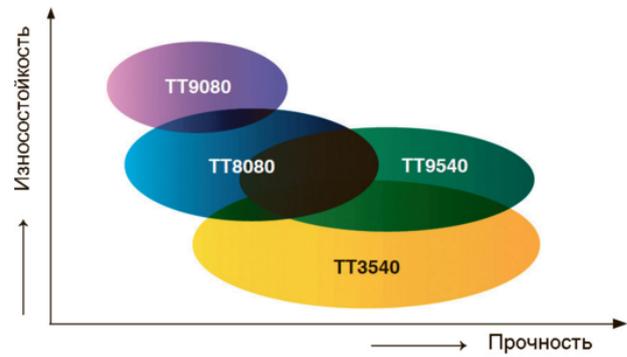


Рис. 5. Показатели износостойкости и прочности новых инструментальных материалов

Успех гарантировал новый сплав TT3540 (рис. 5). Этот уникальный инструментальный материал был специально разработан специалистами TaeguTec для аэрокосмической отрасли с целью эффективного фрезерования труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные, нержавеющие и титановые сплавы. Новые инструменты в ряду ChaseMold превосходно зарекомендовали себя при обработке титановых сплавов в США, также широко используемых там для аэрокосмической отрасли.

Режущие пластины имеют PVD покрытие и являются самым современным решением в ряду фрезерных сплавов. Еще одна полезная новинка от инженеров компании TaeguTec – два новых типа пластин RYMX универсальной серии инструмента ChaseMold (рис. 6).



Рис. 6. Новые типы пластин RYMX



Рис. 7. Пластины типа RYMX 12



Рис. 8. Пластины типа RYMX 16

Ранее потребителям инструмента TaeguTec уже предоставлялась возможность использовать 8 режущих кромок на пластинах типа RYMX, но при этом глубина резания должна была находиться в пределах заданного значения. Как только глубина резания превышала рекомендованную, эта возможность просто сокращалась вдвое – рабочими оказывались только 4 режущие кромки. Для повышения эффективности обработки разработаны и запущены в производство пластины типа RYMX 12 с 6-ю режущими кромками для глубины резания до 2,5 мм (рис. 7) и RYMX 16 с 7-ю кромками для глубины резания до 3,5 мм (рис. 8). Более того, новые пластины снижают расходы на инструмент, поскольку устанавливаются на стандартные корпуса фрез серии ChaseMold – торцевые и концевые фрезы, а также модульные головки.

**Список литературы:** 1. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.

УДК 621.923

## **СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ В МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ**

**Гуцаленко Ю.Г.**, старш. науч. сотр.

(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

**Аракелян А.А.**, магистр-исследователь

(ООО GEVORKYAN, Банска-Быстрица, Словакия)

*In article questions of the formation of surface roughness in the presence of erosive micro-fracture treated surface under the action of electrical discharges in terms of a diamond-spark grinding are described. The possibilities of using the erosive effects of microvolume material removing from the treated surface in its microrelief smoothing are shown*

**Введение. Экспериментальный опыт.** Алмазно-искровое шлифование (АИШ) сопровождается эрозированием обработанной поверхности, выступающей катодом в ее электрическом взаимодействии с металлофазами режущего инструмента [1]. Следы импульсных электрических разрядов вытягиваются на ней вдоль вектора скорости резания с образованием микролунок [2]. Обобщение данных микроскопических исследований и изучение информации об объемно-габаритных размерах этих лунок [2, с. 124] позволяет моделировать их вытянутыми полуэллипсоидами вращения [3], геометрические характеристики которых определяются электроэрозионной стойкостью обрабатываемого материала [1], кинематико-геометрическими и электрическими режимами АИШ [4] (рис. 1, а). Опыт АИШ обычно свидетельствует о некотором повышении шероховатости обработанной поверхности по сравнению с обычной алмазной обработкой [2]. Это связывается с присущей АИШ возможностью поддержания зна-

чительно более стабильной высоты режущего рельефа при существенном уменьшении удельной работы связки в процессе шлифования за счет ее принудительного удаления анодным эрозированием с образованием микролунок под действием электрических разрядов (рис. 1, б; кривая  $k_F^*$ ).

Обычной практикой достижения в цикле финишной электроэрозионной алмазно-абразивной обработки шероховатости обработанной поверхности, соответствующей обработке без тока и пониженной по сравнению с АИШ на заданную глубину шлифования, является включение в цикл завершающей операции бестокового выхаживания [2].

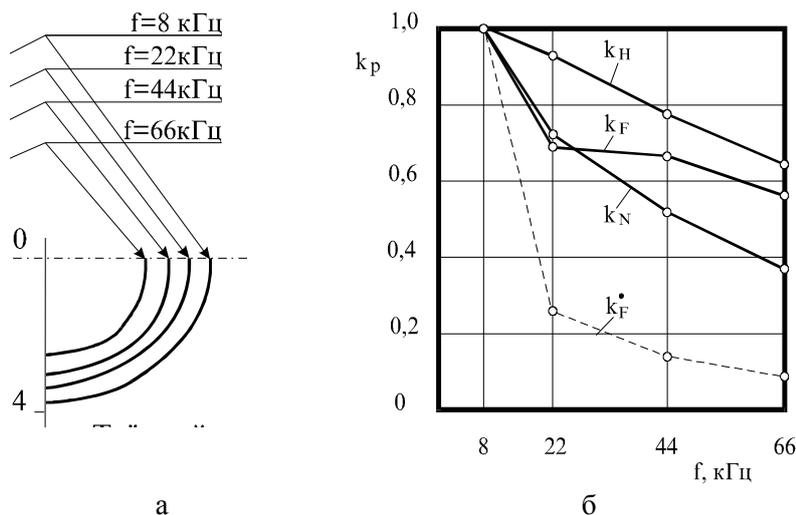


Рис. 1. Поперечное сечение, мкм (а) и относительное изменение  $k_p$  глубины  $H$  ( $k_p = k_H$ ), площади  $F$  ( $k_p = k_F$ ) и количества  $N$  ( $k_p = k_N$ ) эрозионных лунок в эллипсоидной модели на поверхности твердого сплава марки ВК8 в зависимости от частоты  $f$  следования электрических импульсов АИШ; кривая  $k_F^*$  –  $k_F$  для анодного контртела электрического контакта в виде шлифовального круга со связкой из медно-оловянистого сплава марки М2-01

В идентичных режимных условиях обычного алмазного шлифования, в отсутствие электроэрозионного разрушения стружек в процессе их отделения от шлифуемой поверхности и после него, в случае развитого режущего рельефа (после правки), межзеренное пространство является своего рода галтовочной микрикамерой, в которой роль шлифовально-полировального инструмента, непрерывно частично удаляемого и возобновляемого, играют сколы сверхтвёрдого абразива и, главным образом, заторможенные стружки и продукты их диспергирования. Рабочей зоне АИШ эти явления также присущи, но в гораздо меньшей степени, что и проявляется, как правило, менее сглаженным микрорельефом обработанной поверхности. Однако эрозионные образования (лунки) на поверхности детали после АИШ изменяют общую картину и показатели шероховатости по сравнению с обычным шлифованием в общем случае неоднозначно. При относительно малых эрозионных нарушениях поверхности (по глубине вторжения в микрорельеф сопоставимых по высоте с его высотой) шероховатость обработанной поверхности может заметно снижаться; при этом наблюдается эффект эрозионного сглаживания рельефа.

**Предлагаемый подход.** В работе [5] рассмотрен геометрический механизм сглаживания шероховатости обработанной АИШ поверхности по сравнению с ведением рабочего процесса алмазным шлифовальным кругом с идентично развитым рельефом, специально сформированным предварительно или автономной правкой в цикле шлифования. Графическая интерпретации некоторого момента реализации этого механизма, заключающегося в объединении объемной выборки припуска механическим резанием и электрической эрозией, и, причем, с превышением уровнем глубины эрозионных лунок уровня впадин следов механического резания (рис. 2), дает представление о безусловной возможности такого сглаживания.

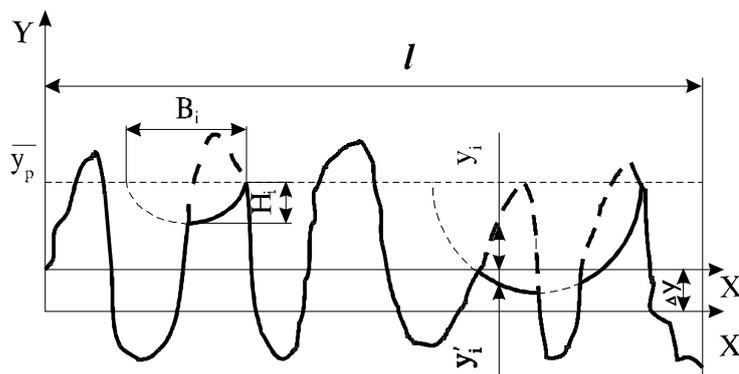


Рис. 2. Формирование эрозионно сглаженной шероховатости обработанной поверхности при АИШ с понижением  $\Delta y$  средней линии профиля поверхности от уровня X к уровню X' в результате электроразрядных воздействий со следами глубиной  $H_i$

Рассматриваемая геометрическая модель (рис. 2) опирается на физическое ожидание того, что эрозионные следы движущихся пятен каналов разрядов (электрических контактов) занимают энергетически наиболее выгодные положения, с возможно минимальным зазором (сопротивлением в контакте), и потому, во-первых, минимально пересекаются (каждая последующая лунка формируется вне уже состоявшихся, если такая ситуация возможна) и, во-вторых, эрозия начинается с наибольших выступов профиля [6].

В тематически наиболее близких к данной предшествующих работах автора ([5], [6], [7]) техническая идеология формирования эрозионно сглаженной шероховатости обработанной поверхности при АИШ с понижением средней линии профиля поверхности в результате электроразрядных воздействий на нее связывается с выполнением операции бестокового выхаживания.

Теоретические и обширная экспериментальная практика указывают на высокую технологическую рациональность выхаживания, в особенности в технологиях АИШ [2]. Помимо размерно-геометрических аспектов заслуживает внимание известное рассмотрение выхаживания с функциональных позиций упрочнения обрабатываемой поверхности в одном ряду с такими специальными операциями как обкатка и дорнование [8].

Существенные возможности понижения электроэрозионного влияния на шероховатость обработанной поверхности предоставляет также реализация ки-

нематико-геометрической схемы АИШ с повышенной скоростью перемещения обрабатываемой поверхности относительно инструментальной, когда энергия электрических разрядов реализуется с удлиненными и потому менее глубокими эрозионными следами. Характерным примером в этом направлении является технологическая практика внутришлифовального станка-полуавтомата модели 3М227ВРФ2 (3М227ВЭРФ2) с конструктивно обеспечиваемой частотой вращения изделия до 1200 об/мин.

Настоящей работой преследуется цель альтернативно обратить внимание исследователей и практиков прогрессивного технологического метода АИШ на целесообразность рассмотрения при проектировании и подготовке процессов с его использованием присущих ему возможностей получения сглаженной шероховатости обработанной поверхности без включения заключительным технологическим переходом бестокового выхаживания.

Разработка метода АИШ изначально была обращена на повышение производительности алмазно-абразивного формообразования изделий из труднообрабатываемых токопроводящих материалов, в особенности твердосплавных [9]. Более чем сорокалетний опыт развития и практики донныне непревзойденного метода высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки таких материалов неизменно свидетельствует о его конкурентноспособности на мировом рынке техники и технологий механообработки.

Несмотря на то, что предпочтительность АИШ как метода механического процессирования наивысша именно в отношении труднообрабатываемых материалов, как правило, отличающихся присутствием в их составе металлов повышенной электроэрозионной стойкости, характерным примером чего являются твердые сплавы, результаты анализа исследовательского опыта (рис. 1,а) указывают на прагматичность предлагаемого альтернативного подхода к организации и проведению финишных технологических операций АИШ со сглаживанием шероховатости обработанной поверхности без выхаживания.

**Заключение.** С практической реализацией предложенного подхода связывается, во-первых, сокращение времени операционного цикла АИШ до достижения заданной шероховатости, и, во-вторых, минимизация потерь развитости режущего рельефа шлифовальных кругов по сравнению с конвенциональными подходами к организации рабочих циклов АИШ.

**Список литературы:** 1. Фукс М.Я., Беззубенко Н.К., Б.М. Свердлова. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовской обработки. – Киев: Вища шк., 1979. – 160 с. 2. Кобзарь Л.Е., Фадеев В.А., Беззубенко Н.К. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование. Харьков: ХГПУ, ХНПО «ФЭД» – 1995. – 152 с. 3. Гуцаленко Ю.Г. Влияние микроэрозионных явлений на шероховатость поверхности // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Вып. 65. Харьков: ХГПУ – 1999. – С. 145-152. 4. Гуцаленко Ю.Г. Расчет электроэрозии при алмазно-искровом шлифовании по данным микроскопической визуализации // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Вып. 66. Харьков: ХГПУ – 1999. – С. 54-58. 5. Гуцаленко Ю.Г. Модель сглаживания шероховатости поверхности при алмазно-искровом шлифовании // Современные инновации в науке и технике: Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 17 апр. 2014 г. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. Т. 1. – С. 325-328. 6. Гуцаленко Ю.Г. Физико-технологические предпосылки разработки процессно-ориентированной интегрированной системы управления микрогеометрическим качеством алмазно-искрового шлифования // Каче-

ство, стандартизация, контроль: теория и практика. Киев: АТМ України – 2015. – С. 29-31. 7. Гуцаленко Ю.Г. Особенности и возможности формирования микрогеометрии обработанной поверхности алмазно-искровым шлифованием // Високі технології в машинобудуванні. Вип. 1 (25). Харьков: НТУ «ХПИ» – 2015. –С. 50-58. 8. Ящеріцин, П. І. Технологічне спадкування експлуатаційних параметрів деталей машин // Вісник ЖДТУ. – 2003. – № 2 (26). – С. 206-209. 9. Гуцаленко Ю.Г. Исторический опыт и современные перспективы алмазно-искрового шлифования // Техника и технологии: пути инновационного развития: Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 30 июня 2014 г., посвящ. 50-летию Юго-Зап. гос. ун-та. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 264-270.

УДК 621.923

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

**Гуцаленко Ю.Г.**, старш. науч. сотр.

(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

**Янку К.**, докт. техн. наук

(Университет "Константин Бранкузи", г. Тыргу-Жиу, Румыния)

*Perspective directions for an applied use of the technological method of diamond-spark grinding that are being associated with the working-out of new and modernization of existing machines and tools including with the diamond abrasives of an enhanced initial integrity, high-speed processing, final shaping of high-quality ceramics after spark plasma sintering and formation of hard white layers in steels are presented*

**Введение.** Современные подходы к организации и реализации технических систем и технологий шлифования интегрируют достижения прикладной механики, физических наук, материаловедения и других смежных отраслей изучения и развития материального мира. Уже историческим и вместе с тем современным примером такой интеграции является метод алмазно-искрового шлифования (АИШ), шагнувший в мир техники и технологий из основанной М.Ф. Семко харьковской научной школы физики процессов резания [1]. Сущность метода [2, 3] заключается в целенаправленной инициации электрических разрядов в зоне резания введением в нее дополнительной энергии в форме импульсов тока определенной мощности, формы, продолжительности и частоты, а также использовании разрядных эффектов в скользящих (стружечных) электрических контактах постоянного тока, в том числе с наложением ультразвуковых колебаний, в среде простых, технически и экологически безвредных смазывающе-охлаждающих жидкостей.

Эта разработка, в эпоху СССР координируемая госкомитетом по науке и технике на отраслевом уровне как приоритетная [4], продолжает развиваться в новом веке, реально оставаясь конкурентоспособным источником эффективных комбинированных рабочих процессов и технологических решений такого рода в современной экспериментальной и широкой промышленной алмазно-абразивной

практике изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов.

Нынешний этап исследования и развития метода АИШ [5] преимущественно связан с разработкой новых и модернизацией существующих станков и инструментов, в том числе с алмазными абразивами повышенной исходной целостности, высокоскоростной обработкой, окончательным формообразованием высококачественной керамики после ее искрового плазменного спекания и формированием высокотвердых белых слоев в сталях.

**Современные технологические подходы и перспективы.** Основу привлекательности реализации разработок в тематическом поле АИШ для машиностроительных, приборостроительных, станкоинструментальных и других предприятий (через создание специальных и модернизацию (расширение технологических возможностей) универсальных шлифовальных станков и производственных модулей, комплектующих такие станки и модули инструментов из сверхтвердых материалов и электрофизических систем специального (дополнительного) энергообеспечения; их эксплуатацию) составляют существенное повышение производительности алмазного шлифования и заточки (в 1,5-3 раза), режущей способности и стойкости инструмента, вероятности бездефектной обработки, сокращение удельных энергозатрат на механическую обработку, повышение фондоотдачи производственного оборудования и производственных площадей, высвобождение обслуживающего персонала - при дополнительных затратах на модернизацию станка и оснащение его источником (генератором) дополнительной энергии общим объемом дополнительных затрат 20 – 25% стоимости обычного оборудования.

В современной теории и практике резания материалов основные перспективы повышения производительности обработки и ее качества связываются с повышением скоростей взаимодействующих в формообразующем контакте тел. АИШ кругами с алмазно-металлическими композициями, испытывающими в зоне резания понижающее уровень металлической связки и тем самым обновляющее режущий рельеф воздействие электрических разрядов, является эффективным способом реализации скоростной обработки, проверенным в экспериментальной и промышленной практике. Характерным примером в этом направлении является разработка внутришлифовального алмазно-эрозионного станка-полуавтомата модели 3М227ВРФ2 (3М227ВЭРФ2), благодаря конструктивно обеспечиваемой частоте вращения изделия до 1200 об/мин и повышенном до 120 мм допустимом диаметральном размере обрабатываемых поверхностей предоставляющего возможность осуществления производительной обработки с увеличенными длинами срезов, разрешаемой физическими явлениями в зоне резания при АИШ, с ее увеличением в 1,5-2 раза при повышении стойкости круга в алмазно-эрозионном режиме в 10-15 раз [3].

Важным фактором при этом является известное из классической физики влияние уже относительно небольших электрических токов на постоянные упругости и другие характеристики металлов.

В первых фундаментальных исследованиях Г. Вертгейма в этом направлении, результаты которых были опубликованы им в Париже в 1848 г. [6], элек-

трические токи в несколько десятков ампер, т. е. сопоставимые с характеристикой современных серийных широкодиапазонных генераторов импульсов, применяемых для энергетического обеспечения электроразрядных процессов в зоне АИШ [3], существенно меняют свойства металлов, а именно уменьшают их сопротивление на разрыв при заметном снижении их модуля упругости. Это, в частности, свидетельствует в пользу электрического тока в зоне резания с позиций облегчения процесса массового микрорезания обрабатываемой поверхности абразивными зернами круга при АИШ.

Современную актуализацию внимания к АИШ в контексте фактора скорости механического взаимодействия обрабатываемого и обрабатывающего тел в условиях ударно-волнового влияния электрических разрядов, сопровождаемого эрозионными эффектами термического разрушения, привлекает гипотеза о потенциальной возможности реализации нового подхода к совершенствованию технологического метода АИШ путем смещения производящего воздействия в область энергий разрушения металлических связей при высокоскоростной обработке [7]. Эта гипотеза поддерживается экспериментально выявленной тенденцией повышения удельного расхода алмазов с повышением скорости резания в ее обычном скоростном диапазоне в условиях действия электрических разрядов при АИШ [8]. Этот феномен АИШ несомненно связан не только собственно с механикой процесса, но и с ее активацией высокоскоростными, до нескольких сотен метров в секунду и более, ударно-волновыми процессами развития электрических разрядов в зоне резания, дополнительно разгоняемых относительным перемещением обрабатывающего и обрабатываемого тел, в подвижном рабочем контакте которых они формируются и проистекают с захватом и взрывным испарением микрообъемов связки в пятнах каналов разрядов.

Использование известных возможностей АИШ в формировании в поверхностных слоях обрабатываемых металлов и сплавов повышенного уровня сжимающих напряжений и прочностной наследственности (по сравнению с технологической альтернативой конвенционального алмазного шлифования) [2] технологически привлекательно в постпроцессах современного высокоскоростного термофрикционного формообразования изделий с повышенными требованиями к микро- (шероховатость) и макроразмерной геометрической точности, ограничено обеспечиваемыми собственно термофрикционной обработкой, обычно практикуемой как предварительное формообразование с образованием в приповерхностном слое стали, под микроскопом визуализируемом как белый, измененной микроструктуры повышенной твердости.

По результатам дюраметрии – со значительным, например, практически двукратным превышением микротвердости в сопоставлении с характеристикой основного металла: 8,2-11,2 ГПа, с модальным значением распределения по глубине до 0,6 мм примерно 10 ГПа, при средней микротвердости основы 5,3 ГПа (марганцовистая Сталь 65Г ГОСТ 14959-79 режущих лезвий деревообрабатывающих ножей после закалки в воде и низкотемпературного отпуска в воздухе, с «подстройкой» его режима из условия перекрытия глубины отпущенного слоя формируемым последующей термофрикционной обработкой бе-

лым слоем (БС) – во избежание появления между БС и основным металлом зоны разупрочнения сорбито- и троститоподобной структуры, до значений микротвердости порядка 3-3,5 ГПа в контексте приводимого здесь примера) [9].

В отличие от известного опыта формирования БС в сталях посредством собственно АИШ, по толщине обычно соизмеримых с глубиной шлифования или немного превосходящих ее, термофрикционная обработка осуществляется с большей интервенцией обрабатываемого тела в обрабатываемое (в экспериментальной практике [9] по кинематической схеме плоского шлифования – с глубиной и скоростью продольного среза соответственно 0,7 мм и 21 мм<sup>2</sup>/с) и оставляет после себя БС с толщинами повышенной твердости, вызывающими углубленный потребительский интерес.

АИШ предварительно подвергнутых ТФО стальных поверхностей органично поддерживает доставшееся ему в финишной операции прочностное наследие предыдущей операции. Адекватность АИШ рассматриваемой физической состоятельности ТФО, проявляющейся повышенной твердостью ее объектов, в их окончательном формообразовании следует из электроразрядных эффектов, обеспечивающих скоростной импульсный нагрев шлифуемых поверхностей до температур фазовых превращений, аналогично ТФО вплоть до формирования высокотвердого приповерхностного БС. В пятне электрического контакта, максимально покрывающем обрабатываемую поверхность в технологиях двойного скоростного АИШ (с повышенными скоростями рабочих движений и шлифовального круга, и обрабатываемой заготовки [3]), – вплоть до плавления и даже частичного испарения металла с обрабатываемой поверхности, с последующим достаточно быстрым ее охлаждением, особенно под влиянием СОТС эффективных составов и техники подачи. Как и теплофизический результат экстремальной механики ТФО, появление или эффективное (после ТФО) поддержание упрочненного поверхностного БС после АИШ также является следствием присущих этому методу экстремальных условий реализации с вовлечением обрабатываемой (шлифуемой) стальной поверхности в теплофизическое последствие разрядного разрешения электрической напряженности зоны шлифования.

При этом, по-видимому, не следует рассматривать формирование БС как целенаправленной технологической наследственности АИШ сталей вне маршрутной комбинации с предварительной ТФО. Хотя бы потому, что технологическая идеология рационального АИШ всегда исходит из максимального использования режущего потенциала выступающих над уровнем связки круга зерен сверхтвердых абразивов при минимизации фрикционных эффектов вообще и, особенно, вне их режущих контактов [3].

При осуществляемом в рабочих процессах АИШ комбинировании алмазного шлифования с электроразрядным воздействием возможно более направленно регулировать параметры качества обрабатываемого слоя, чем в традиционных технологиях, в том числе управлять формированием как структур вторичной закалки, так и структур отпуска [3].

Исходя из условий и задач использования изделия, с целью повышения равномерности напряженного состояния БС, стабилизации тем самым прочностных характеристик готового изделия, повышения его надежности и безопасности в эксплуатации, технологический маршрут его производства можно рекомендовать заключить проведением операции низкотемпературного отпуска после чистовой обработки шлифованием. Или включить в цикл АИШ выжигание без тока предварительно правленным кругом, проведение которого сопровождается относительно незначительным (по сравнению с ТФО) нагревом поверхности обработки, эквивалентным влиянию низкотемпературного отпуска.

Наряду с показанными перспективными приложениями метода АИШ к высокоскоростной обработке и финишной поддержке ТФО постпроцессированием, он предоставляет также возможность улучшения структуры и повышения плотности токопроводных SPS-нанокерамик, в особенности тугоплавких, в рабочих постпроцессах окончательного формообразования методом АИШ, как и после ТФО преследующих основной целью обеспечение надлежащего размерного и микрогеометрического качества готовой продукции. На такую возможность, согласующуюся с теоретическими представлениями [10] об участии электрических разрядов в подавлении пористости токопроводных керамических консолидатов технологий SPS (Spark Plasma Sintering [11] – искровое плазменное спекание), указывает современный опыт НТУ «ХПИ» в обработке спеченного по технологии SPS наномонокристалла вольфрама, когда оптимальные физико-механические свойства по критерию напряженного состояния шлифованного материала в поверхностном слое наблюдаются при некотором внутреннем значении напряжения в экспериментальном диапазоне напряжений токопровода в зону шлифования [12], по-видимому, соответствующем оптимуму Пашена-Пеннинга в физико-геометрическом рассмотрении с позиций подобия [10] условий возбуждения электроразрядных эффектов в порах во всем объеме спекаемого консолидата (SPS [13]) и в приповерхностном слое шлифуемого твердого тела (АИШ [12]). Обострение кризисных явлений в условиях глобальной конкуренции товаров особенно стимулирует как заинтересованность производителей в энергоэффективных производственных технологиях высококачественной обработки, так и пользователей к повышению их функционально-эксплуатационных показателей.

Метод АИШ как технологическая парадигма по обоим группам требований (производителей и потребителей продукции), кроме рыночной популяризации представлений о его возможностях на современном уровне, нуждается также в дальнейших разработках обеспечивающих его осуществимость технических систем, в особенности специализированных для реализации метода элементов этих систем.

**Расширение технологических возможностей технических систем.** Эффективная поддержка конструкторской, технологической и организационной подготовки производства (у производителя станков и инструментов) является одним из реально востребованных направлений современного периода в развитии разработки метода и средств реализации АИШ [1].

В конвенциональных подходах к организационно-техническому обеспечению операций АИШ подводом в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов как в специальном станкостроении, так и при специальной модернизации универсального оборудования его потребителями предусматривается электроизоляция шпинделя станка [3]. При этом в базовую конструкцию вводятся новые (нетокопроводные) элементы (детали), служащие необходимым барьером электрическому току в функционально запрещенных направлениях, но повышающие степень сборочной сложности технической системы. Инструмент (шлифовальный круг) как объект барьерных технических решений, обеспечивающих нетокопроводность его контакту с посадочным местом на металлической планшайбе станка, до недавнего времени [14] в известной исследовательской и производственной практике не рассматривался.

Решение задач приспособляемости универсальных станков (инструмента) в шлифовальном станкостроении и на механообрабатывающих предприятиях (в инструментальном производстве шлифовальных кругов) к их использованию в технологиях АИШ предлагается обеспечивать в результате применения специально разработанных диэлектрических покрытий на прочную основу базовых деталей (элементов конструкции), конструктивно требующих электроизоляции [3], в традиционном исполнении изготавливаемых из конструкционной стали (планшайба) и конструкционных сплавов (несущий корпус инструмента).

Высокие диэлектрические свойства специально разработанных [15] покрытий сочетаются с высоким сопротивлением износу при периодической смене инструмента в связи с полным использованием или при переустановках шлифовальных кругов из-за несоответствия их характеристик необходимым для следующей операции. Повышенная износостойкость предлагаемых производственной практике электроизоляционных композиций на основе семейства эпоксидно-диановых смол (ЭДС), подготавливаемых и наносимых на поверхность по специальному регламенту, обеспечивается использованием в качестве наполнителя диэлектрических порошков триоксида алюминия  $Al_2O_3$  или диоксида кремния  $SiO_2$  с возможным варьированием массовой доли как диэлектрических порошков, так и эпоксидных групп (по техническим условиям ГОСТ 10587-84 содержание собственно эпоксидных групп в ЭДС может составлять от 14 до 22 %, соответственно с понижением вязкости и повышением технологичности использования в поверхностно распределенных отвердевающих покрытиях).

Это решение повышает контактную жесткость посадки инструмента на планшайбу, а с ней и потенциальную точность обработки по сравнению с функционально альтернативным использованием промежуточных текстолитовых втулок и прокладок, обычно применяемых на предприятиях-потребителях универсальных шлифовальных станков в модернизационной практике электроизоляции от корпуса инструмента-круга и обрабатываемых деталей.

По результатам сравнительных испытаний износостойкость композитного покрытия на основе ЭДС с 20 % содержанием массовой доли эпоксидных

групп и 30 мас. %  $Al_2O_3$  на 60-70% выше, чем у такого же, но без алюмооксидного порошкового наполнителя, при полуторакратном превышении твердости ( $H_v = 204$  МПа, по Виккерсу) и прочности на сжатие ( $\sigma_{сж} = 135$  МПа). В сочетании с высоким уровнем необходимой противозлектрической защиты отдельных элементов станочно-инструментальных систем шлифования (удельное электрическое сопротивление разработанного покрытия  $\rho = 1014$  Ом·м) это позволяет эффективно расширять их технологические возможности успешной реализацией АИШ и других электрофизикохимических технологий.

Инверсия задачи электроизоляции металлического корпуса шлифовального круга от стальной планшайбы шлифовального станка в сторону измененного конструктивного решения инструмента может быть также решена с использованием специальных диэлектрических покрытий, например, путем поверхностного электролитического оксидирования материала корпуса в ускоренном микродуговом режиме по аналогии с разработанной для титановых имплантов технологией [16]. Выбор материала корпуса шлифовального круга при этом должен учитывать электроизоляционные свойства его потенциальных оксидов. Перспективность алюминия и его сплавов в этом применении [14], помимо известных диэлектрических перспектив, привлекательна также облегчением по массе конструкции корпуса шлифовального круга по сравнению со стальными альтернативами.

Конструктивно задача принуждения зоны шлифования к участию в электроразрядной цепи АИШ при соответственно организованном токоподводе к участникам электрического контакта, помимо организации токоподвода, в принципе, может решаться одним лишь рациональным использованием электроизоляционных материалов в производстве отдельных деталей станочно-инструментальных систем без изменения их конструкции, как это показано в работе [17] на примере с использованием торцевых планетарно-шлифовальных головок.

Такой подход к универсализации металлорежущего оборудования и алмазно-абразивных инструментов на металлических связках для возможности их использования в процессах электрофизикохимической обработки, как конструктивно максимально облегченный, несомненно заслуживает повышенного внимания практических специалистов, особенно по мере появления новых изоляционных материалов повышенной прочности и износостойкости.

Поверхностная металлизация зерен из сверхтвердых абразивов в инструментах АИШ способствует повышению эффективности обработки [18]. Современным усилением этой защиты, способствующим морфометрической сохранности зерен в доэксплуатационный отрезок их жизненного цикла, является включение детонационных ультрадисперсных алмазов (УДА) в состав металлопокрытия [19]. С одной стороны, поскольку объемное содержание УДА в практике таких покрытий невелико (примерно 2 % [20]), что весьма значительно (до 25 раз) уступает объемной доле алмазов шлифовального порошка в составе алмазно-металлической композиции рабочей части инструмента, то вклад металлопокрытия с УДА в съем обрабатываемого материала уже поэтому не конку-

рирует с работой алмазной основы исходно металлопокрытых зерен. В эту же сторону свидетельствует разница примерно в тысячу раз между толщинами единичного среза: эффективной при применении в условиях алмазно-искрового шлифования (АИШ) обычных синтетических алмазов (до 3 мкм) [21] и следующей из наноразмерной малости УДА (среднее значение внешнего радиуса алмазной оболочки ок. 3 нм) [22]. С другой стороны, выступая в известной [23] роли мощного структурообразователя, заметно усиливающего функциональные свойства покрытия на этапе инструментального производства, УДА в его составе на зернах рабочей поверхности шлифовального круга в операционном технологическом использовании являются вместе с тем очагами повышенного износостойкого сопротивления вскрытию алмазной режущей основы зерен.

Электрофизические возможности АИШ позволяют эффективно решать задачу эксплуатационного разрушения металлопокрытия УДА, выполнившего свою защитную функцию и требующего вскрытия в рабочих процессах управляемого АИШ для введения в процесс массового микрорезания алмазной режущей основы исходно металлопокрытых зерен [24].

Конечный продукт детонационного синтеза УДА содержит углерод (от 84,0 до 89,0 масс. %), водород (от 0,3 до 1,1 масс. %), азот (от 3,1 до 4,3 масс. %), кислород (от 2,0 до 7,1 масс. % [22]). Газовую среду содержат внутренние и межчастичные закрытые полости. Кроме того, кислород присутствует в продуктах окисления атомов углерода на поверхности УДА, происходящего вследствие взаимодействия с газовой средой взрывной камеры.

Можно предположить, что протекание электрического тока в объеме металлопокрытия алмазного зерна в будет сопровождаться интенсификацией плотности электрического поля вокруг полых наночастиц УДА, воспринимаемых аналогично порам в технологиях электроконсолидации керамики под давлением по методу SPS [25], с повышенной вероятностью электроразрядной атаки таких частиц, инициацией в них озона, реализующего повышенную окислительную активность захватом углерода, и т. д. [26].

В аналитико-синтетических конструкциях общей картины искрово-разрядных проявлений АИШ с участием металлопокрытых алмазных зерен, содержащих УДА в составе покрытия, не следует исключать и возможности возникновения известных в природе газоздушных сред локальных полей статического электричества, энергия которых может освобождаться посредством искровых разрядов [27], с адресацией этой возможности невакуумированным закрытым пространствам под алмазной оболочкой УДА с постразрядной механической деформацией и разрушением последней.

Можно использовать и перегрев всплесками электрического тока до известной температурной зоны графитизации (примерно от 1000 °С для УДА), по выбранному времени и мощности воздействия в полном объеме разрушительно критичной только для тонких (средняя толщина ок. 0,7 нм [22]) оболочек ультрадисперсных алмазных фрагментов детонационной природы.

Принятие во внимание и использование рассмотренных технологических возможностей АИШ в освобождении зерен круга от металлопокрытия с УДА

является важным дополнительным источником повышения эффективности обработки инструментами из сверхтвердых абразивов с доэксплуатационно сохраненной исходной целостностью единичных зерен.

**Заключение.** Современный уровень развития и перспективы использования метода АИШ в высокопроизводительном и высококачественном формообразовании поверхностей изделий из труднообрабатываемых высокофункциональных материалов стимулируют дальнейшее развитие и имплементацию предлагаемых по результатам разработок НТУ «ХПИ» рассмотренных модернизационных подходов к универсализации технических систем для расширенной практической реализации этого метода как у производителей техники, так и потребителей технологий АИШ, как в отношении станочных систем, так и инструментов шлифования.

**Список литературы:** 1. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование: обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков: ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 2. Калашников А.Т. Исследование физических особенностей и технологических возможностей алмазно-искрового шлифования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.03 – обработка материалов резанием / Харьк. политехн. ин-т; науч. рук.: М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко. – М., 1976. – 22 с. 3. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструмент. – Харьков, 1996. – 468 с. 4. Коньшин А.С. Шлифовальные станки в двенадцатой пятилетке // Механизация и автоматизация производства. – М.: Изд-во "Машиностроение". – 1987. – № 4. – С. 6-9. 5. Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов: Отчет о НИР (заключит.) / Нац. техн. ун-т «Харк. политехн. ин-т»; рук. А. Грабченко; отв. исп. Ю. Гуцаленко. – Харьков, 2014. – 518 с. – № ГР 0113U000425. – Инв. № 0215U001303. 6. Wertheim G. Memoire sur l'equilibre des corps solides homogenes // Annales de Chimie. – Paris. – 1948. – Т. 23. – Р. 52-95. 7. Гуцаленко Ю.Г. Особенности электроэрозионного разрушения металлов при высокоскоростном алмазно-искровом шлифовании // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матер. міжнар. наук.-практ. конф. 15-16 трав. 2003 р. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003. – С. 17-26. 8. Гуцаленко Ю.Г. Влияние скорости резания на расход алмазов при круглом наружном алмазно-искровом шлифовании твердого сплава ВК 6 // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й междунар. наук.-техн. конф., 03-07 июня 2013 г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2013. – С. 70-74. 9. Гуцаленко Ю.Г., Погребной Н.А., Волков О.А. Поддержка алмазно-искровым шлифованием упрочнения сталей термофрикционной обработкой // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 12-й междунар. наук.-техн. конф., 04-08 июня 2012 г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2012. – С. 83-85. 10. Физика и практика электроконсолидации под давлением вольфрамокарбидных материалов и композитов [электронный ресурс]: доклад / Ю.Г. Гуцаленко [НТУ «ХПИ»] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМПНМ, 20-23 мая 2013 г. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (32 с.: 26269538 байт). – Режим доступа: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/gutsalenko.pdf>. 11. Recent Advanced Spark Plasma Sintering (SPS): Technology, Systems and Applications in Japan [электронный ресурс]: доклад / М. Tokita [SPS R&D Center, NJS Co., Ltd; Japan] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМПНМ, 20-23 мая 2013 г. – М.: Нац. ис-

след. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (65 с.: 9987534 байт). – Режим доступа: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf>. **12.** Стрельчук Р.М. Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфраму: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т»; наук. консультант М.Д. Узунян. – Х., 2011. – 193 с. **13.** Гуцаленко Ю.Г. Применение закона Пашена для определения давления горячего прессования при электроконсолидации наноструктурной тугоплавкой керамики // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф., 03-07 июня 2013 г., г. Ялта. – Киев: АТМ України, 2013. – С. 67-70. **14.** Гуцаленко Ю. Г. Станкоинструментальные электроизоляционные покрытия поддержки алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев, Е. К. Севидова, И. И. Степанова // Високі технології в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 1 (25). – С. 59-63. **15.** Братан С.М. Покрытия для электроизоляционной защиты планшайбы шлифовального станка / С.М.Братан, К.Янку, Ю.Г.Гуцаленко, Е.К.Севидова // Вісн. СевНТУ: зб. наук. пр. – Вип. 151/2014. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – С. 28-31. **16.** Спосіб формування біоінертного покриття на імплантатах із титану та його сплавів: патент на корисну модель 58763 Україна: МПК (2011.01) С 25 D 11/00 / О.К. Севидова, І.І. Степанова, А.А. Симонова, І.Д. Рой. – №u201011436, заявл. 27.09.10; опубл. 26.04.11, Бюл. №8. **17.** Гуцаленко Ю.Г. Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2010. – Вип.106: Техн. сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 134-140. **18.** Малыхин В. В. Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / Харьков. политехн. ин-т. – Харьков, 1985. – 262 с. **19.** Бабенко Е. А. Повышение работоспособности алмазных кругов на полимерных и керамических связках: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». – Харьков, 2014. – 203 с. **20.** Козуб П. А. Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі хімічно осадженого нікелю та нанодисперсних алмазів : патент на корисну модель № 72585 Україна : МПК С23С 16/00, С23С 20/00, С23С 30/00 / П. А. Козуб, О. Я. Лобойко, Г. І. Гринь, Т. А. Довбій, Є. О. Бабенко, Г. М. Резніченко, Л. В. Мухіна, Л. М. Бондаренко. – № u 2012 00854; заявл. 27.01.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16. **21.** Стрельчук Р. М., Стороженко Д. С., Узунян М. Д. Исследование и анализ процесса микрорезания наноструктурных твердых сплавов // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – Вып. 83. – С. 255-263. **22.** Верещагин А. Л. Свойства детонационных наноалмазов. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. – 134 с. **23.** Барабошкин К. С. Исследование процесса формирования текстуры детонационных наноалмазов для разработки и создания высокоэффективных композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 – технология и переработка полимеров и композитов / Федерал. гос. унитар. предприятие «Федерал. науч.-произв. центр “Алтай”». – Бийск, 2006. – 136 с. **24.** Gutsalenko Yu., Iancu C., Bratan S. Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools // Fiability & Durability [Târgu-Jiu: ”C-tin Brâncuși” Univ. of Tg-Jiu]. – 2015. – Supplement No. 1[(14)]. – PP. 3-8. **25.** Геворкян Э. С., Гуцаленко Ю. Г. Особенности и место электроконсолидации прямым действием переменного тока в системе методов субмикро- и нанопорошкового спекания под давлением // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – 2010. – № 49. – С. 144-161. **26.** Геворкян Э. С., Гуцаленко Ю. Г. Генезис экспансии семикарбида вольфрама в вольфрамокерамических инструментальных композитах горячего прессования с электроконсолидацией нанопорошков на монокарбидной // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – 2010. – № 53. – С. 19-30. **27.** Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М. : Наука, 1992. – 536 с.

## НАСТРОЙКА СТАНКОВ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ПО МЕТОДУ КОПИРОВАНИЯ

**Лищенко Н. В.**, канд. техн. наук

(Одесская национальная академия пищевых технологий)

**Ковальчук А.Н.**, канд. техн. наук

(ПАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера")

**Ларшин В.П.**, докт. техн. наук

(Одесский национальный политехнический университет)

*The characteristics of the basic parameters of the stock to be removed and the parameters of its distribution along the valley profile are given when profile gear grinding takes place*

Шлифование зубьев по методу копирования профиля шлифовального круга (7...6 степени точности) выполняется одним двусторонним или двумя односторонними фасонными кругами. Недостатком этого метода долгое время являлась потребность в большом количестве специальных шаблонов, делительных дисков, а также сложная переналадка станка [1]. Преодолеть этот недостаток удалось за счет мехатронных станочных систем, числового программного управления (ЧПУ) и применением фасонных алмазных правящих дисков, расположенных слева и справа от профильного шлифовального круга и работающих поочередно. Кроме того, горизонтальная компоновка зубошлифовального станка, при которой плоскость шлифуемого зубчатого колеса (ЗК) является горизонтальной, оказалась удобной для оснащения его измерительной системой с тактильным датчиком.

Распределение мгновенной глубины резания по профилю шлифовального круга на первых технологических переходах является несимметричным по отношению к оси симметрии профиля круга (рис.1). При увеличенном припуске на левой стороне шлифуемой впадины и, соответственно, левой стороне профиля круга его правая сторона является недогруженной (рис.1, а); при увеличенном припуске на правой стороне впадины и круга (рис.1, б) – наоборот, левая сторона левой стороне профиля круга недогружена. Таким образом, смещение оси профиля круга относительно оси впадины можно оценивать либо в тангенциальном направлении, т.е. по касательной к делительной окружности, и тогда это смещение является приращением тангенциальной глубины резания, либо по приращению угла  $\Delta\alpha$ , которое ему пропорционально (рис.1, в). Таким образом, одна синусоида погрешности окружного шага (по мере синусоидального изменения угла  $\Delta\alpha$  в полярной системе координат с центром, совпадающим с осью зубчатого колеса) создает две синусоиды распределения припуска, соответственно по левой и правой стороне профиля впадины зубчатого колеса.

Наладка зубошлифовального станка предназначена для оптимального выравнивания припуска на левой и правой стороне впадины, что при синусоидальном законе расположения его может быть точно выполнено только в неко-

торых впадинах по периферии зубчатого колеса. Во всех остальных впадинах происходит перераспределение припуска (с левой стороны профиля круга на его правую сторону или, наоборот) по мере выполнения цикла зубошлифования, равного одному обороту делительного диска (на станке с ЧПУ делительный диск является виртуальным). При любом выбранном способе наладки станка имеются характерные экстремальные (минимальные и максимальные по каждой стороне впадины), а также одно единственное максимальное из максимальных значений слева и справа значение припуска (максимора припуска), которое подлежит распределению по технологическим переходам зубошлифования, и определяет время обработки. Местоположение впадины зубчатого колеса с максиморой припуска определяет впадину, в которой тангенциальное  $z_{\max}^{\tan}$  и радиальное  $z_{\max}^{\text{rad}}$  значения суммарного припуска являются самыми максимальными (рис.1, в). Эта впадина также подлежит определению при наладке станка на обработку.

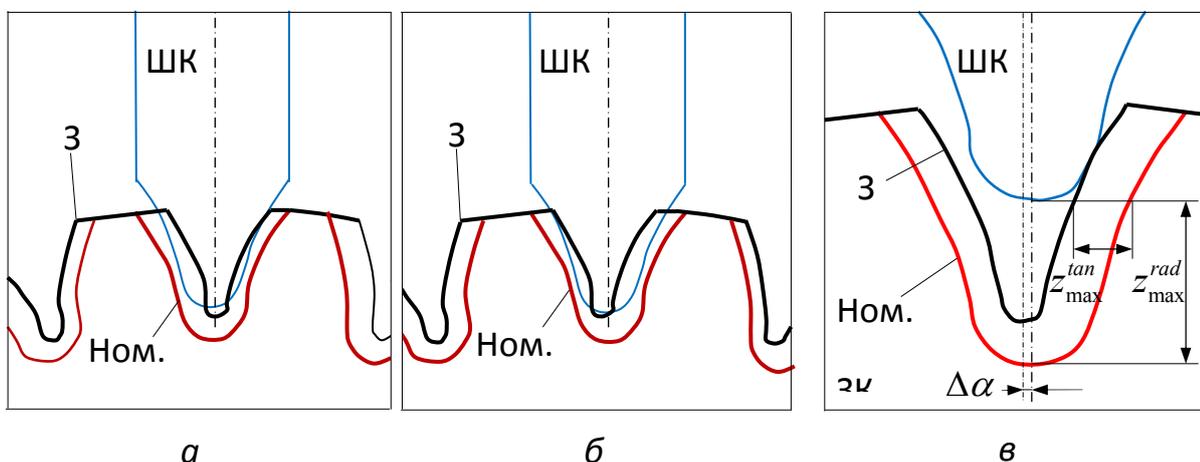


Рис. 1. Взаимное расположение профиля шлифовального круга (ШК) и профиля впадины заготовки (З) при увеличенном припуске на левой (а) и правой (б) стороне впадины, а также в момент касания круга и заготовки (в) [2]

Известен способ настройки зубошлифовального станка, основанный на контроле ЗК перед зубошлифованием [3]. В соответствии с этим способом выравнивают максимальные значения припусков по левой и правой стороне впадин ЗК. Для этого ЗК устанавливают на планшайбе контрольного приспособления (КП) и с помощью блока для выверки биения базовой поверхности контролируемого колеса (блок входит в состав КП и содержит индикатор радиального биения) измеряют биение базовой поверхности колеса – удвоенный эксцентриситет. Сектор с максимальным биением отмечают на ЗК, затем в зону фиксатора каретки КП для радиального перемещения и ориентации ЗК подводят впадину, расположенную в секторе с максимальным биением базовой поверхности. Угловое положение делительного диска фиксируют фиксатором делительного диска. Ось ЗК смещают на величину эксцентриситета, т.е. устраняют эксцентриситет (аналогичную настройку делает рабочий-зубошлифовщик при установке ЗК на станке). Отсчет перемещения ЗК при устранении эксцен-

триситета производят по указанному индикатору. После этого ЗК закрепляют на планшайбе КП и начинают цикл измерения припуска по левой и правой стороне впадин ЗК. В результате измерения на диаграммной ленте регистрирующего устройства будет вычерчена совмещенная диаграмма распределения припуска по обеим боковым поверхностям зубьев колеса. По совмещенной диаграмме припуска (левого  $z_{\max}^L$  и правого  $z_{\max}^R$ ) определяют разность максимальных припусков по левой и правой боковым поверхностям зубьев колеса, т.е. находят величину  $|z_{\max}^L - z_{\max}^R|$ .

Планшайбу с заготовкой ЗК поворачивают относительно делительного диска в направлении боковой поверхности с наибольшим припуском. Т.е. наибольшим из рассмотренных выше  $z_{\max}^L$  и  $z_{\max}^R$ . Величина дополнительного поворота пропорциональна полуразности максимальных припусков. Поворот (или доворот) планшайбы производят при помощи блока для поворота, фиксации и отсчета величины поворота планшайбы (входит в состав КП). Фиксируют окончание поворота планшайбы с ЗК по индикатору поворота и после поворота планшайбу с ЗК снова закрепляют.

Затем повторяют цикл измерения при новом угловом положении зубчатого колеса относительно делительного диска. В результате новых замеров повторно вычерчивают совмещенную диаграмму распределения припуска по обеим боковым поверхностям зубьев ЗК. По этой (второй) диаграмме определяют боковые поверхности зубьев наладочных впадин, в которых припуски одинаковы. После определения наладочных впадин находят разность  $S$  между максимальным припуском и припуском наладочной впадины. После ориентации зубчатого колеса на станке относительно шлифовального круга по боковым поверхностям зубьев наладочных впадин круг отводят на расстояние, равное или пропорциональное  $S$ . Этим обеспечивают положение касания во впадинах с максимальными припусками  $z_{\max}^L$  и  $z_{\max}^R$ , причем  $z_{\max}^L = z_{\max}^R$ . Таким образом, фактическое касание во впадинах с максимальными припусками не проверяют. Фактическое касание делают во впадине с одинаковыми припусками, предварительно определяя положение этой впадины (наладочная впадина). С наладочной впадины начинают зубошлифование. Недостатки способа следующие. Во-первых, двукратное измерение избыточно, только ради определения положения наладочной впадины, можно было вычислить это положение по первой совмещенной диаграмме. Во-вторых, целью было уменьшить общий припуск, но не выдержано условие равенства минимальных припусков слева и справа, т.к. выравнивали максимальные припуски.

Известен способ контроля ЗК перед зубошлифованием [4], в соответствии с которым выравнивают минимальные значения припусков по левой и правой стороне впадин ЗК. Контролируемую заготовку ЗК устанавливают с зазором на посадочную поверхность планшайбы КП, содержащего делительный механизм, механизм разворота планшайбы с зубчатым колесом (относительно делительного диска) и измерительную каретку с двумя измерительными блоками, состоящими из измерительного наконечника, счетного устройства и датчика линей-

ных перемещений. Одну из впадин ЗК, причем случайную (далее исходную) располагают в зоне измерения и ЗК предварительно закрепляют на планшайбе. Затем ЗК выверяют, т.е., с регламентируемой точностью производят идентификацию величины радиального биения по базовой поверхности ЗК при незафиксированном делительном диске. После этого фиксируют делительный диск, вводят измерительные наконечники во впадину в зоне измерения и путем разворота планшайбы относительно делительного диска с помощью механизма разворота планшайбы выравнивают припуск по обеим сторонам этой исходной впадины ЗК, пользуясь отсчетным устройством. Настройка отсчетного устройства измерительных блоков (и пера регистрирующего прибора) на нулевое положение производится по эталонному изделию, прошлифованному на нижний предельный размер толщины зуба. После измерения всех впадин на ленте регистрирующего прибора будет вычерчена совмещенная диаграмма распределения припуска по левой и правой стороне впадины контролируемого ЗК (рис.2,а). Кривые распределения припуска по левой и правой сторонам зубьев на рис. 2 обозначены как Left и Right, соответственно.

Из этой диаграммы (рис. 2, а) видно, что величина наименьшего припуска на шлифование является отрицательной величиной  $z_{\min}^L < 0$  (сектор впадины  $E$ ). Это означает, что при данном угловом положении ЗК на станке в секторе впадины  $E$  на левых сторонах впадин останутся «черновины», т.е. после окончания обработки ШК не коснется этих сторон впадин.

По диаграмме припуска (рис. 2, а) определяют разность  $N = z_{\min}^L - z_{\min}^R$  минимальных припусков по левой  $z_{\min}^L$  и правой  $z_{\min}^R$  стороне впадин (левая сторона на зуба – это правая сторона впадины и наоборот) и разворачивают планшайбу с контролируемым колесом относительно делительного диска в направлении стороны с наибольшим из минимальных припусков. В рассматриваемом случае  $N = 0,09$  мм. Величина разворота (коррекции) равна полуразности минимальных припусков, т.е.  $N / 2 = 0,045$  мм. Величину разворота 0,045 мм фиксируют визуально по отсчетному устройству измерительного блока или автоматически с помощью цифрового инкодера (датчика угла). После корректировки углового положения контролируемого ЗК повторно измеряют и регистрируют припуск по обеим сторонам его зубьев и строят новую совмещенную диаграмму распределения припуска (рис.2, б). На этой диаграмме минимальные припуски будут выравнены и равны наименьшему припуску, т.е.  $z_{\min}^R = z_{\min}^L$  (впадины  $B$  и  $E$  на рис.2).

По новой диаграмме припуска определяют наладочные впадины, имеющие одновременно шлифуемые разноименные стороны зубьев с одинаковым припуском. Здесь необходимо учитывать схему фасонного зубошлифования по методу копирования: шлифование двумя фасонными кругами или шлифование одним фасонным кругом [1]. При зубошлифовании двумя разными фасонными кругами угловое расстояние  $W$  известно. Зная это расстояние, находим наладочные впадины  $C$  и  $D$  (рис.2, б), которые расположены на угловом расстоянии  $W$ . Одновременно обрабатываемые стороны (с одинаковым припуском по каждой стороне) разных наладочных впадин отмечают на ЗК, т.е. производят разметку.

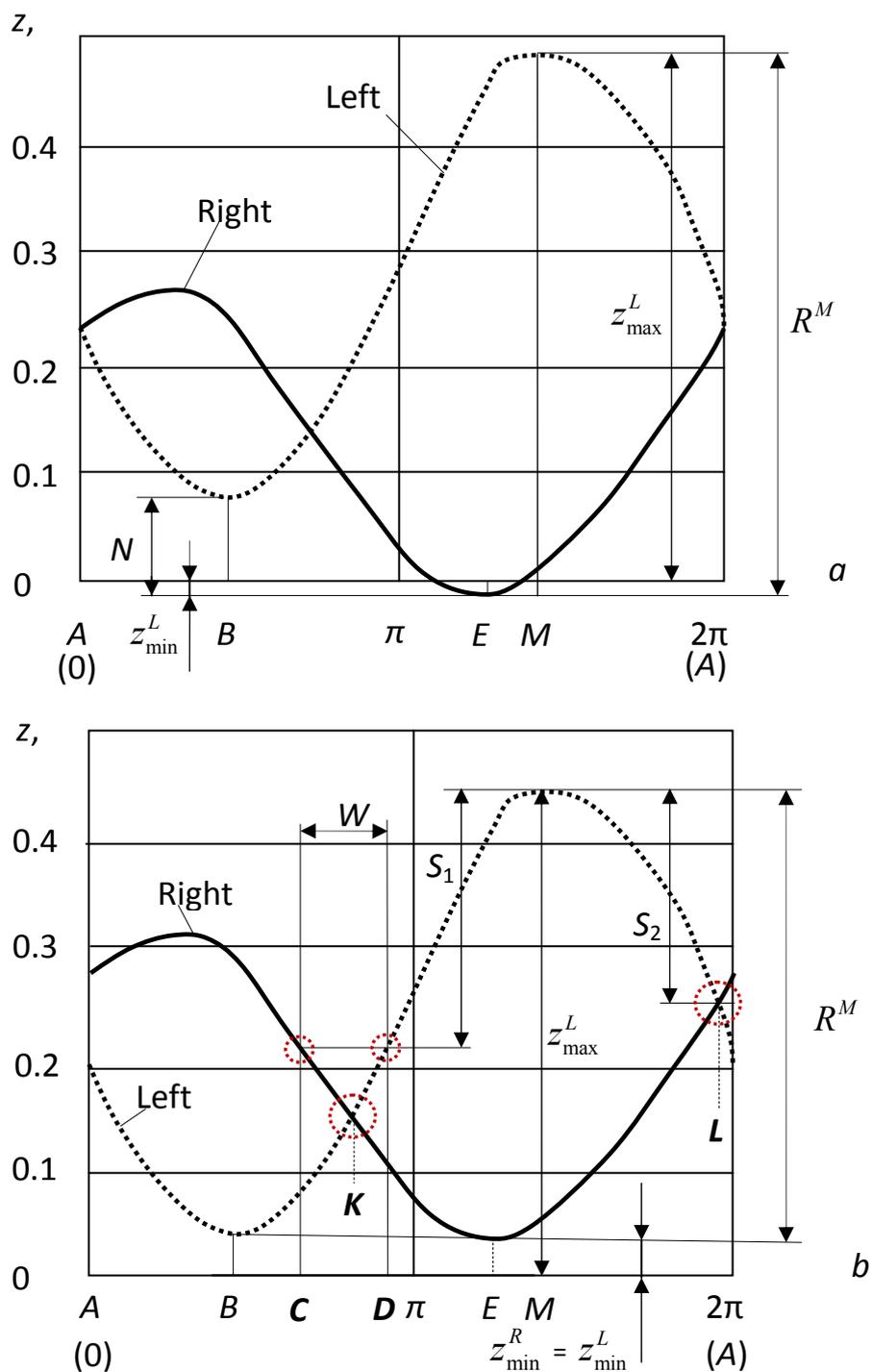


Рис. 2. Распределение припуска по левой (Left) и правой (Right) сторонам зубьев до (а) и после (б) внесения коррекции в угловое положение ЗК

При шлифовании одним фасонным кругом, левый и правый профили которого находятся в одной впадине ЗК ( $W = 0$ ), наладочные впадины находятся в секторах  $K$  и  $L$  (рис.2, б). Из этих двух секторов выбирают тот, в котором наладочная впадина расположена ближе к точке пересечения непрерывных кривых Left и Right, например, из двух секторов  $K$  и  $L$  выбирают сектор  $L$ .

Если на диаграмме припуска нет одновременно шлифуемых впадин с одинаковым припуском (вызвано дискретным расположением впадин в отличие

от непрерывного тренда распределения припуска), то в качестве наладочных выбирают впадины, имеющие одновременно шлифуемые разноименные стороны зубьев с наименьшим различием в припуске.

После выбора наладочных впадин определяют разность  $S$  между наибольшим припуском по всему ЗК во впадине и припуском разноименных сторон зубьев с равным припуском наладочных впадин. Величина  $S$  равна или пропорциональна величине отвода режущего инструмента после ориентации по нему на станке разноименных сторон зубьев с одинаковым припуском наладочных впадин. Отвод инструмента на величину  $S$  от сторон зубьев наладочных впадин предотвращает увеличение глубины резания на первом проходе в секторах зубчатого венца с наибольшим припуском. Для рассмотренных двух случаев выбора наладочных впадин (шлифование двумя фасонными кругами или одним фасонным кругом) соответствующие величины указанного параметра  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 2, б).

Измеренную (аттестованную) заготовку ЗК устанавливают на зубошлифовальном станке, выверяют по базовой поверхности, закрепляют и ориентируют по сторонам зубьев наладочных впадин относительно ШК. Операция ориентирования заключается в центрировании профиля ШК относительно наладочной впадины. Эту наладочную операцию рабочий выполняет вручную или она выполняется с помощью соответствующей компьютерной системы автоматической настройки положения профиля ШК относительно профиля наладочной впадины. Затем отводят инструмент от сторон зубьев на величину  $R$ , которую вычисляют по формуле  $R = K \cdot S$ , где  $K$  – коэффициент, учитывающий направление подачи инструмента на врезание. Причем  $K = 1$ , если подача производится в тангенциальном направлении и  $K = 1/\sin \alpha$ , если подача в радиальном направлении к оси колеса. Здесь  $\alpha$  – угол профиля зуба по окружности измерения, град.

Недостатком этого способа является вторичное измерение, которое является излишним и приводит к увеличению времени контроля. Следовательно, выравнивание при наладке максимальных значений припуска выгодно с точки зрения уменьшения общего припуска на зубошлифование, но при этом не будет выдержано равенство минимальных значений припуска. Задача выравнивания максимальных значений припуска актуальна при недостаточной толщине закаленного слоя, которую получают, например, контурной закалкой ТВЧ (энергосберегающая технология). Однако при этом при этом возможно, что минимальный припуск на одной из сторон впадины будет меньше суммы известных четырех составляющих припуска по В.М. Ковану, что для ответственных изделий (например, авиационных ЗК) недопустимо. Выравнивание минимальных значений припуска по левой и правой сторонам впадин на уровне, достаточном для минимального припуска по В.М. Ковану, более предпочтительно, однако приведет к завышению общего припуска по сравнению с предыдущим случаем.

В этой связи, возможно, перераспределить припуски по сторонам впадин ЗК не только исходя из двух описанных выше случаев (равенство максимальных или минимальных припусков по противоположным сторонам впадин), но

также исходя из компромиссного варианта – выравнивания припусков с учетом наименьшего расхождения минимальных и максимальных значений припусков [5]. Дальнейший компромисс возможен, при выравнивании по среднему (расчетному) значению припусков [2]. Общий случай выравнивания припусков при расширенной области применения способа сформулирован таким образом, что можно выбирать способ выравнивания в зависимости от требований к изделиям и особенностям производства [6].

**Список литературы:** 1. Мильштейн М.З. Чистовая обработка зубчатых колес / М.З. Мильштейн. – К.: Техніка, 1971. – 168 с. 2. Макаров В.М. Обеспечение точности профильного шлифования винтовых зубьев крупномодульных цилиндрических колес на основе имитационного моделирования: автореф. дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.07 "Технология и оборуд. механич. и физ. - техн. обработки"; 05.02.08 "Технология машиностроения" / В.М. Макаров. – М., 2010. – 36 с. 3. А.с. 1070424 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес на зубошлифовальных станках / Э.Н. Перов, В.Г. Субботин, В.Ф. Суслов (СССР). – № 3481940 / 25-28; заявл. 06.08.82; опубл. 30.01.84, Бюл. № 4. 4. А.с. 1147919 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, Е.М. Рябов (СССР). – № 3648014 / 25-28; заявл. 05.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12. 5. А.с. 1147921 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, В.Г. Пыхтеев (СССР). – № 3657432 / 25-28; заявл. 24.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12. 6. А.с. 1293464 А1 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес на зубошлифовальных станках / Э.Н. Перов, Д.Э. Перов (СССР). – № 3883777 / 25-28; заявл. 16.04.85; опубл. 28.02.87, Бюл. № 8.

УДК 531.717.8

## **АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКА ПО ПРОФИЛЮ ВПАДИНЫ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ**

**Лищенко Н. В.**, канд. техн. наук

(Одесская национальная академия пищевых технологий)

**Нежебовский В.В.**, канд. техн. наук

(ПАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера")

**Ларшин В.П.**, докт. техн. наук

(Одесский национальный политехнический университет)

*The analysis of the known methods of adjusting gear grinding machines, working on a method of copying is given*

Для проверки эффективности различных способов наладки технологической системы на зубошлифование по методу копирования одним фасонным кругом выполнено их сравнение на основе проведенных экспериментальных исследований на современном зубошлифовальном станке с ЧПУ модели HÖFLER RAPID 1250 при измерении и обработке крупномодульных зубчатых колес шахтных редукторов.

Заготовку зубчатого колеса (ЗК) устанавливают на вращающуюся от электропривода оправку. В соответствии с управляющей программой ЧПУ измери-

ительный щуп заходит в первую случайно расположенную впадину на позицию измерительной окружности (рисунок).

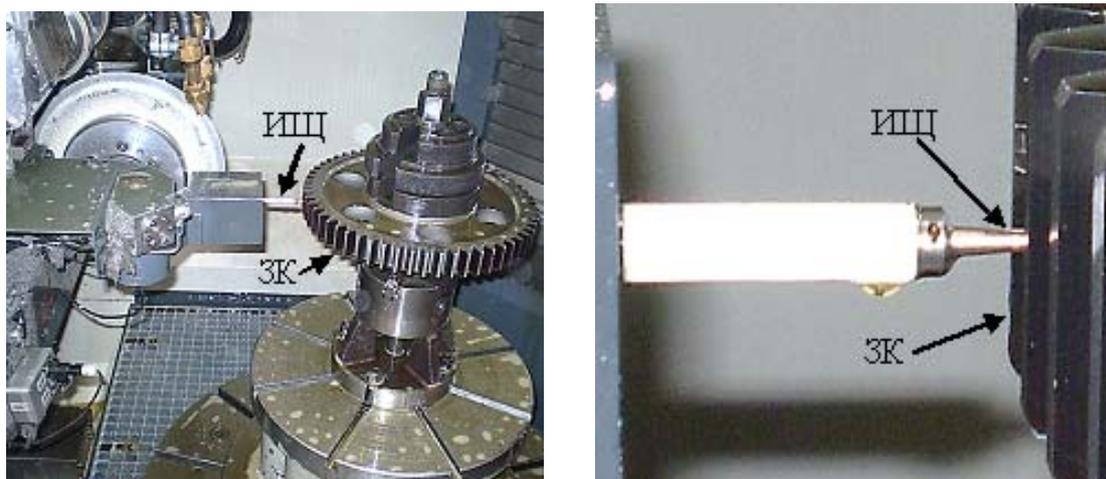


Рисунок. Предварительное измерение припуска тактильным датчиком ReniShaw на общем виде (слева) и в зоне измерительного щупа (справа): ИЩ – измерительный щуп; ЗК – зубчатое колесо с числом зубьев  $z = 58$

Программное обеспечение станка HÖFLER RAPID 1250 включает следующие элементы. Общий режим: «Данные заказа». В режиме «Заготовка» задают параметры зубчатого колеса: число зубьев  $z$ , модуль  $m$ , угол зацепления  $\alpha_n$ , угол наклона  $\beta$ , ширину зуба  $b$ , диаметр окружности выступов  $d_a$ , начальный диаметр эвольвенты  $d_{fs}$ , диаметр окружности впадин  $d_{fe}$ , смещение профиля  $x_m$ . Также указывают заданную длину общей нормали зубьев  $W_k$ , фактическую длину общей нормали зубьев; высоту зажима. Припуск на каждой боковой стороне зуба рассчитывают исходя из указанной выше заданной длины общей нормали и ее фактической величины.

В режиме «Процессы → Предварительная настройка → Поиск центра» задают способ поиска впадины (шлифовальным кругом или специальным измерительным щупом), а также способ центрирования впадины, например, измерительным щупом (рисунок). При этом указывают количество уровней (до трех) по высоте зуба, по которым осуществляют поиск впадины. Поиск центра состоит из двух этапов: поиск впадины, т.е. грубое определение ее положения, и центрирование впадины, т.е. точное определение середины впадины. Поиск впадины может выполняться вручную с помощью шлифовального круга или измерительного щупа. При этом круг заводят во впадину, ориентируют относительно нее и за счет этого определяется фактическая позиция впадины относительно шлифовального круга или измерительного щупа.

Поиск впадины может выполняться измерительным щупом, который погружают во впадину, и за счет этого определяется его позиция. Центрирование впадины может выполняться вручную, автоматически или измерительным щупом. При центрировании впадины вручную поиск середины впадины определяют в результате ориентации профиля шлифовального круга симметрично по

отношению к профилю впадины ЗК колеса, например, при одновременном касании кругом левой и правой стороны профиля впадины.

После введения в окно задания количества впадин для центрирования определяются номера впадин на окружности. Они распределяются равномерно. Ручное центрирование осуществляется на одном уровне: в середине венца. С помощью опции «Смещение уровня из центра» можно переместить этот уровень вверх или вниз.

При наладке на зубошлифование измеряли заготовки ЗК разных типоразмеров. В качестве примера для проверки эффективности разных способов выравнивания припуска с точки зрения их влияния на параметры припуска выбраны три заготовки ЗК с числом зубьев  $z = 16$ . Эти заготовки изготовлены из стали 20Х2Н4А, прошли цементацию (глубина цементации  $h = 0,9 \dots 1,3$  мм) и закалку HRC 58...62. Основные размеры цилиндрического ЗК с прямыми зубьями: наружный диаметр 299,644 мм; делительный диаметр – 256 мм; количество зубьев 16; модуль  $m = 16$ ; коэффициент смещения исходного контура 0,6 мм; нормальный угол зацепления  $\alpha = 20^\circ$ ; угол наклона  $\beta = 0$ . Степень точности зубчатого колеса 8-B по ГОСТ 1643-81. Шероховатость зубчатой поверхности Ra 2,5 мкм. Исследованы разные методы выравнивания: минимальных припусков [1], разности максимальных и разности минимальных припусков [2], интервал между выравниванием минимальных и максимальных припусков [3], по среднему припуску [4]. Данные по методам выравнивания сведены в таблицу.

Таблица

Сравнение различных способов наладки на зубошлифование

Параметры	Номер колеса	По работе [1]	По работе [2]	По работе [3]		По работе [4]
				5	6	
1	2	3	4	5	6	7
$z_{\max}^L$	1	0,3875	0,3825	0,3875	0,3775	0,381981
	2	0,4205	0,422225	0,4205	0,4205	0,411675
	3	0,3871	0,37985	0,3871	0,3734	0,391588
$z_{\max}^R$	1	0,3675	0,3725	0,3675	0,3775	0,373019
	2	0,4274	0,425675	0,42395	0,4274	0,436225
	3	0,3597	0,36655	0,3597	0,3734	0,355213
$z_{\min}^L$	1	0,2188	0,2138	0,2188	0,2088	0,213281
	2	0,2523	0,254025	0,25575	0,2523	0,243475
	3	0,2494	0,24255	0,2494	0,2357	0,253888
$z_{\min}^R$	1	0,2188	0,2238	0,2188	0,2288	0,224319
	2	0,2523	0,250575	0,24885	0,2523	0,261125
	3	0,2494	0,25625	0,2494	0,2631	0,244913
$R^L$	1	0,1687	0,1687	0,1687		0,1687
	2	0,1682	0,1682	0,1682		0,1682
	3	0,1377	0,1377	0,1377		0,1377
$R^R$	1	0,1487	0,1487	0,1487		0,1487
	2	0,1751	0,1751	0,1751		0,1751
	3	0,1103	0,1103	0,1103		0,1103

Окончание табл.

$R^M$	1	0,1687	0,1687	0,1687		0,1687
	2	0,1751	0,1751	0,1751		0,19275
	3	0,1377	0,1377	0,1377		0,146675
Величина коррекции	1	0,0438	$X > 0$ 0,0488	0,0438...0,0538		0,049319
	2	0,01645	$X < 0$ -0,014725	0,013...0,01645		0,025275
	3	0,0489	$X > 0$ 0,05575	0,0489...0,0626		0,0444125
$z_{\max}^L - z_{\max}^R$	1	0,02	0,01	0,02	0	0,008962
	2	0,0069	-0,00345	0	0,0069	-0,02455
	3	0,0274	0,0137	0,0274	0	0,036375
$z_{\min}^L - z_{\min}^R$	1	0	-0,01	0	0,02	-0,011038
	2	0	0,00345	0,0069	0	-0,01765
	3	0	-0,0137	0	0,0274	0,008975
Примечание: колонки 5 и 6 для параметров $R^L$ , $R^R$ и $R^M$ объединены в одну, т.к. их численные значения одинаковы.						

**Выводы:** 1. В зависимости от метода наладки на зубошлифование изменяются значения максимальных ( $z_{\max}^L$  и  $z_{\max}^R$ ), минимальных ( $z_{\min}^L$  и  $z_{\min}^R$ ) припусков, а также взаимный размах  $R^M$ . Также изменяются разности между максимальными припусками ( $z_{\max}^L - z_{\max}^R$ ) и минимальными припусками ( $z_{\min}^L - z_{\min}^R$ ) разноименных сторон.

2. Взаимный размах  $R^M$  является информативным технологическим параметром. Он равен наибольшему значению из двух односторонних размахов и зависит от выбранного способа наладки. Преимущество имеет способ, который обеспечивает наименьший взаимный размах.

3. Близкие односторонние размахи ( $R^L$  и  $R^R$ ) приводят к одинаковым результатам наладки с использованием разных методов наладки. И, наоборот, при большом различии значений односторонних размахов разные способы наладки обеспечивают разную их эффективность при оптимизации процесса зубошлифования.

**Список литературы:** 1. А.с. 1147919 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, Е.М. Рябов (СССР). – № 3648014 / 25-28; заявл. 05.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12. 2. А.с. 1147921 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, В.Г. Пыхтеев (СССР). – № 3657432 / 25-28; заявл. 24.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12. 3. А.с. 1293464 А1 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес на зубошлифовальных станках / Э.Н. Перов, Д.Э. Перов (СССР). – № 3883777 / 25-28; заявл. 16.04.85; опубл. 28.02.87, Бюл. № 8. 4. Макаров В.М. Обеспечение точности профильного шлифования винтовых зубьев крупномодульных цилиндрических колес на основе имитационного моделирования: автореф. дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.07 "Технология и оборуд. механич. и физ. - техн. обработки"; 05.02.08 "Технология машиностроения" / В.М. Макаров. – М., 2010. – 36 с.

## **РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Лавріненко В.І.**, докт. техн. наук, **Скрябін В.О.**,  
**Скрябін В.В.**, канд. техн. наук, **Лещук І.В.**, канд. техн. наук,  
**Девицький О.А.**, канд. техн. наук  
(Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ)

*The construction of special grinding wheels intended for flat grinding and cutting removable plates conditions. The use of the grinding tool will provide high-performance processing and achieve significant savings*

В наш час на машинобудівних та приладобудівних підприємствах України для виконання механічного оброблення широко впроваджується імпортне високоточне обладнання. При цьому постає проблема забезпечення виробництва високоякісним вітчизняним інструментом, що дозволило би позбутись необхідності закупівлі дороговартісного іноземного. В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України виконується розробка та виробництво спеціального абразивного інструменту з надтвердих матеріалів (НТМ), що призначений для шліфування важкооброблюваних матеріалів на сучасних верстаках та оброблювальних центрах.

При виробництві збірних великогабаритних шліфувальних кругів діаметром 750–900 мм основними проблемами є трудомісткість виконання кріплення абразивовмісних брусків на корпусі круга, а також необхідність додаткового балансування круга. При удосконаленні конструкції таких кругів нами досягнуто спрощення конструкції фіксації окремих елементів з НТМ, що підвищує надійність зборки інструмента. На рис. 1 представлено загальний вид збірного абразивного круга, що складається з корпусу та встановлених в ньому абразивовмісних секторів.

Розроблена конструкція збірного абразивного круга з НТМ відрізняється технологічністю виготовлення, а саме зменшує до мінімуму механічне оброблення вже спресованих абразивовмісних брусків. А можливість візуального контролю кріплення брусків стяжними кільцями дозволяє підвищити безпеку експлуатації інструмента.

Подібна конструкція може знайти своє використання й для алмазних планшайб, які застосовуються для високопродуктивного та якісного оброблення опорних поверхонь різальних змінних багатогранних пластин (РЗБП) з твердих сплавів (в тому числі безвольфрамових) та різальної металокераміки. Алмазні планшайби (круги форми 6A2) застосовуються при пружному плоскому шліфуванні. Різальна поверхня планшайб складається з 6-ти алмазних секторів, зовнішній діаметр яких складає 400 мм, ширина робочої поверхні – 100 мм, товщина алмазного шару – 3 мм [1]. Застосування даних алмазних планшайб

дозволяє досягти продуктивності шліфування до  $2600 \text{ мм}^3/\text{хв}$  (залежно від зернистості алмазів та режимів оброблення).

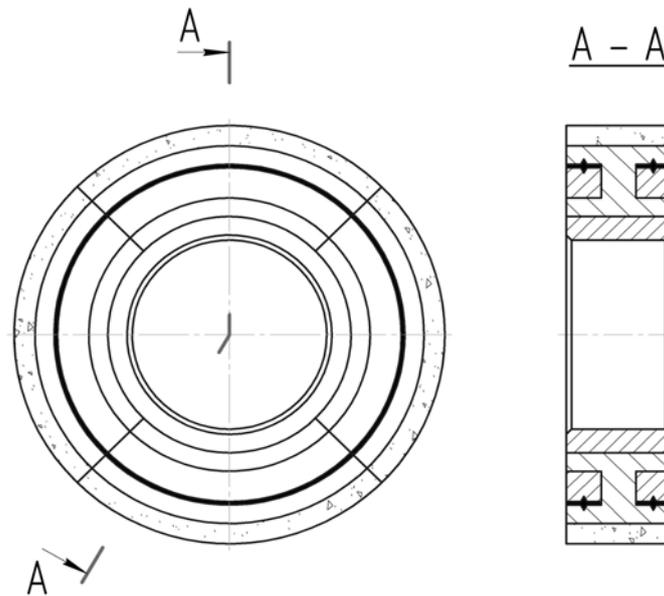


Рис. 1. Збірний абразивний круг із секторами з НТМ

Іншим варіантом виконання кругів форми 6А2 є конструкція, що складається з корпусу та змінного кільця з напресованим алмазним шаром (рис. 2). Найменші відносні витрати алмазів та найбільш низькі значення шорсткості оброблених поверхонь при шліфуванні даними кругами досягаються при використанні алмазів марки АС6, зернистістю 80/63 (допускається 63/50) та концентрацією 100% (допускається 75%) на полімерних (В1-11П) та металополімерних (В1-13) зв'язуючих. При обробленні рекомендовано наступні режими алмазного шліфування: швидкість обертання круга – 20–25 м/с; тиск – 2,5–3,5 МПа; частота осциляції пластини – 60–80 подв.хід/хв. [2]. Круги обох виконань можна застосовувати на верстатах мод. МШ289, WAM200, WAM300/12, WAM300/15, WAM336.



Рис. 2. Змінні кільця для кругів форми 6А2 з напресованим алмазним шаром

Виробництво різальних змінних багатогранних пластин з твердого сплаву вимагає більш високої продуктивності процесу шліфування при дотриманні необхідної якості оброблених поверхонь. Це досягається одночасним шліфуванням передньої та опорної поверхонь РЗБП інструментом з НТМ. Пластини твердого сплаву при цьому закріплюються в сателітах, які виконують обертовий рух. Для цього розроблено спеціальний алмазно-абразивний інструмент для верстату моделі Peter Wolters AC 530-F та верстатів аналогічних йому. Для досягнення необхідної якості пластин та забезпечення оптимальної продуктивності їх оброблення, а також для реалізації потенціальних технологічних можли-

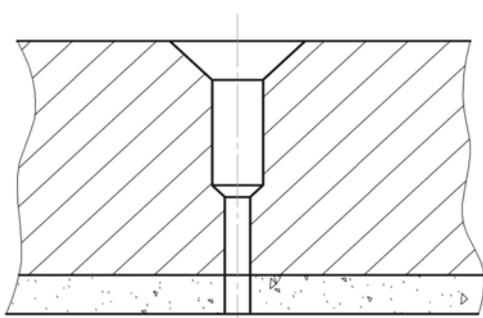


Рис. 3. Отвір для подачі МОТС

востей даних верстатів визначено оптимальні характеристики алмазно-абразивного інструменту та розроблено рекомендації для його ефективного застосування.

Спеціальний алмазно-абразивний інструмент представляє собою верхній та нижній шліфувальні круги. Верхній шліфувальний круг містить наскрізні отвори для подачі мастильно-охолоджуючого технологічного середовища (МОТС) (рис. 3).

В робочому шарі кругів застосовано зерна АС6, АС15 зернистістю від 80/63 до 125/100. В якості зв'язуючого застосовуються металополімерні зв'язки, що дозволяє зменшити інтенсивність засалювання кругів та знизити частоту їх правки. Ці характеристики робочого шару дають змогу забезпечити швидкість обертання верхнього та нижнього шліфувальних кругів в межах 100–120 об/хв. і, відповідно, швидкість обертання сателітів зі змінними різальними пластинами – 45–50 об/хв, швидкість знімання оброблюваного матеріалу при цьому становитиме 60 мкм/хв.

В процесі шліфування кругами, представленими в даній статті, рекомендується застосовувати МОТС, у склад якої входять наступні компоненти: натрій фосфорнокислий двозаміщений – 2,0 мас. %; натрій азотистокислий – 0,2 мас. %; амоній сірчатоокислий – 0,1 мас. %; вода – 97,7 мас. %.

Перевагами застосування в процесах шліфування алмазних кругів на полімерних та металополімерних зв'язках є зменшення частоти правки кругів до 1,25–1,67 разів та забезпечення величини шорсткості обробленої поверхні периферії пластин по параметру  $Ra$  до 0,12–0,22 мкм. Заміна дороговартісного інструменту іноземного виробництва вищенаведеними розробками дозволить досягти значної економії, що важливо в сучасних реаліях промисловості України.

*Круги можна замовити в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ), відділ №3, тел. +380 (44) 432-95-15.*

**Список літератури:** 1. Бондарев Е.К. Алмазные секторные планшайбы для плоского шлифования / Е.К. Бондарев, Ф.Г. Рубан, В.И. Лавриненко и др. // Информационный листок о научно-техническом достижении №85-037. – Киев: УКРНИИНТИ, 1985. 2. Лавриненко В.И. Процессы шлифования многогранных пластин специальными алмазными кругами / В.И. Лавриненко, И.В. Лещук, В.А. Скрыбин // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы междунар. пром. конф. (п. Славское, Карпаты, 21–25 февраля 2005 г.). – Киев: УИЦ «НТТ», 2005. – С. 247–249.

## РОЗРОБКА ПІДХОДУ ДО КОНТРОЛЮ ЗОВНІШНІХ ДЕФЕКТІВ ЗВАРНИХ ШВІВ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ЇХ КЛАСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СТЗ

Дерев'янченко О.Г., докт. техн. наук, Волков С.К., інженер,  
Татаренко П., магістр, Усик А., магістр  
(Одеський національний політехнічний університет)

*Some results of system developing for surfaces defects of welded seam control on the special stand equipment by the system of technical sight are considered*

Контроль якості зварних швів (ЗШ) є одним з важливих завдань сучасного машинобудування. Основні розробки у цій сфері присвячені створенню систем контролю та діагностування внутрішніх дефектів швів. Однак у процесі зварювання виникає множина зовнішніх дефектів, перелік яких наведений в [1].

Метою статті є викладення деяких результатів розробки системи контролю зовнішніх дефектів ЗШ на спеціальному лабораторному стенді з системою технічного зору (СТЗ) та підходу до автоматизованого розпізнавання їх класів.

З метою моделювання системи контролю зовнішніх дефектів зварних швів на кафедрі ТКММ ОНПУ розроблений та виготовлений лабораторний стенд, оснащений СТЗ. Загальний вид цього стенда, що забезпечує контроль комплексу параметрів цих дефектів, показано на рис. 1,а – 1,в.

На стійці 2, встановленої в основі 1, кріпиться монтажна траверса 3 системи освітлення зони шва 9. На траверсі 4 зібрано пристрій лінійних переміщень цифрової камери 7 відносно зони шва, що оснащений мікроприводами. Зона шва 6, з'єднуючого пластини 5, освітлюється системою 9, і відображений світловий потік попадає в об'єктив цифрової камери (7), оснащеної матрицею ПЗЗ. Після предобробки на екрані ПЕОМ (10) формується цифрове зображення дільниці шва 8.

Дистанційне керування стендом відбувається з використанням зовнішніх кнопок керування електроприводами з пульта 11.

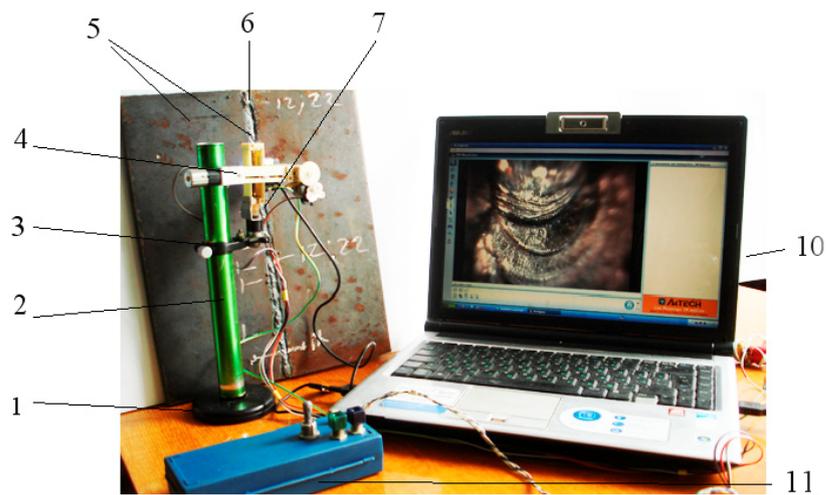
Стенд забезпечує можливість реєстрації наборів цифрових зображень дільниць зварного шва і послідовного їх введення в ПЕОМ.

Початкове цифрове зображення з використанням спеціального програмного комплексу перетворюється в напівтонове, далі – в бінарне.

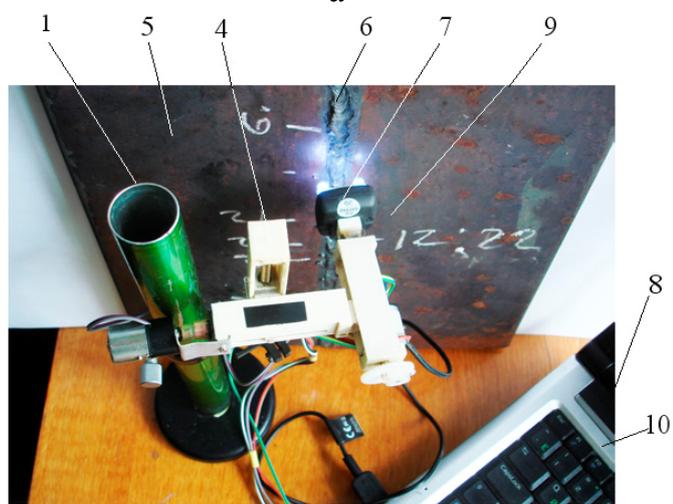
На рис. 2 наведені параметри цифрових зображень дефектних дільниць зварного шва. Вони мають такі дефекти, як зони значних коливань ширини шва (1,3), наявність бризгів (2), лускатість (4) та інші [1].

Розглянемо елементи математичного забезпечення для реалізації процесу розпізнавання класів дефектів зварного шва.

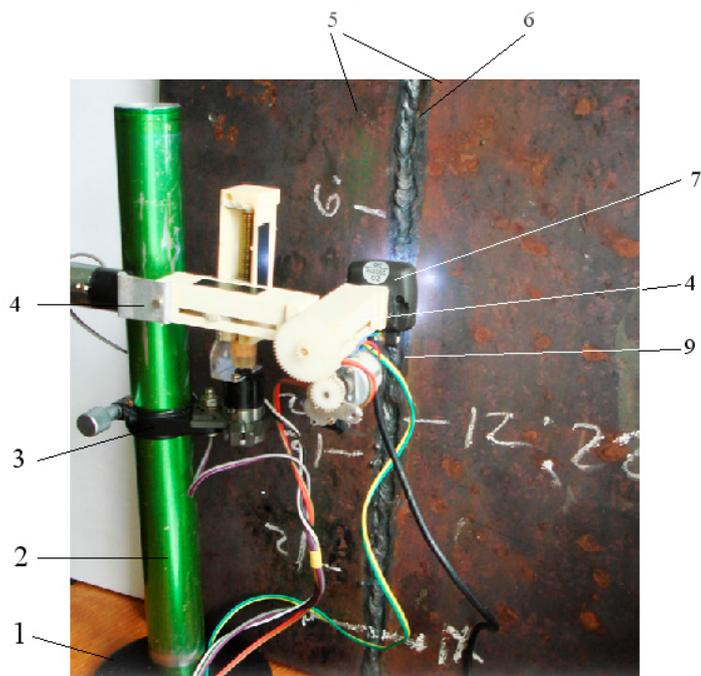
Ділянка ( $A_2^T$ ) зони ЗШ ( $A_1^T$ ) у момент контролю  $T$  після обробки бінарного зображення відображується у вигляді наборів контурів.



а

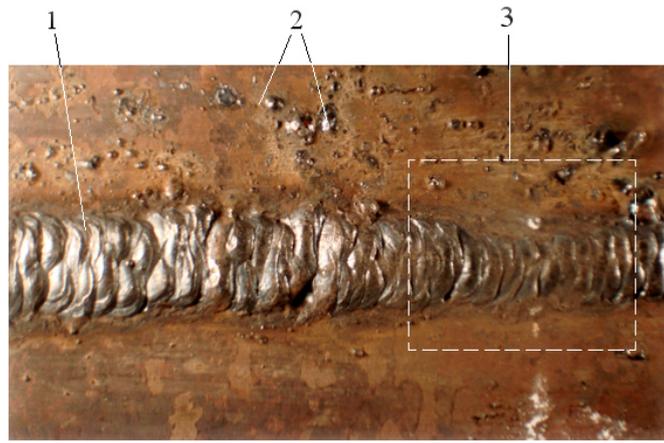


б

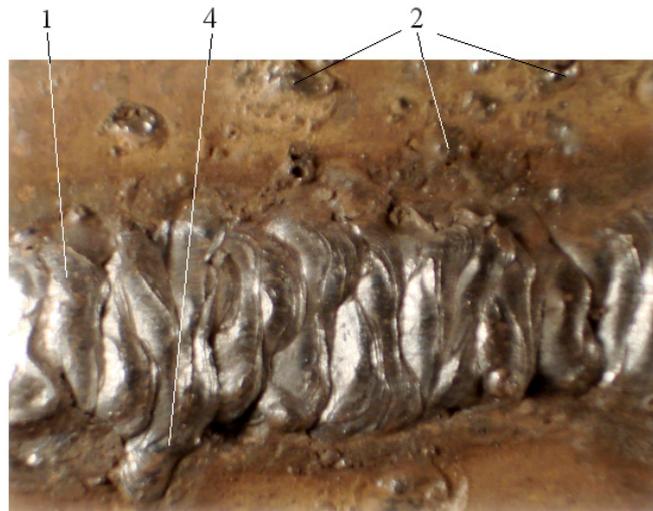


в

Рис. 1. Загальні види станда для контролю і розпізнавання класів зовнішніх дефектів зварних швів



а



б

Рис. 2. Параметри цифрових зображень дефектних ділянок зварного шва

Для визначення форми та орієнтації таких контурів, подальшого розпізнавання класів дефектів ЗШ, можуть бути використані різноманітні ознаки, відомі в теорії розпізнавання зображень [2]. Залежності для визначення основних з них приведені нижче [2].

Площа ділянки зварного шву:

$$F^{A_2^T} = A^{A_2^T} \Delta x \Delta y; \quad A^{A_2^T} = \sum_{x_L}^{x_E} \sum_{y_L}^{y_E} B_{A_2^T}^*(x, y),$$

де  $A^{A_2^T}$  – загальне число елементів (пікселів) контуру ділянки ЗШ;  $\Delta x, \Delta y$  – розміри пікселу;  $B_{A_2^T}^*(x, y)$  – бінарна матриця зображення ЗШ;  $B_{A_2^T}(x, y)$  – вихідна матриця зображення.

Габаритні ознаки контуру ділянки ЗШ:

$$L_Y^{A_2^T} = \max \left\{ \sum_{y_L}^{y_E} B_{A_2^T}^*(x, y) \Delta y \right\}; \quad L_X^{A_2^T} = \max \left\{ \sum_{x_L}^{x_E} B_{A_2^T}^*(x, y) \Delta x \right\};$$

$$S_x^{A_2^T} = \max[\Delta x], y = const; \quad S_y^{A_2^T} = \max[\Delta y], x = const.$$

Координати центру ваги контуру зони ЗШ:

$$x_F^{A_2^T} = \frac{1}{F^{A_2^T}} \sum_{y_L}^{y_E} \sum_{x_L}^{x_E} x B_{A_2^T}^*(x, y); \quad y_F^{A_2^T} = \frac{1}{F^{A_2^T}} \sum_{y_L}^{y_E} \sum_{x_L}^{x_E} y B_{A_2^T}^*(x, y).$$

Моменти інерції контуру ділянки ЗШ:

$$I_x^{A_2^T} = \frac{1}{F^{A_2^T}} \sum_{y_L}^{y_E} \sum_{x_L}^{x_E} (x - x_F)^2 B_{A_2^T}^*(x, y); \quad I_y^{A_2^T} = \frac{1}{F^{A_2^T}} \sum_{y_L}^{y_E} \sum_{x_L}^{x_E} (y - y_F)^2 B_{A_2^T}^*(x, y).$$

Головний момент інерції контуру зони ЗШ:

$$I_{1/2}^{A_2^T} = 1/2(I_x^{A_2^T} + I_y^{A_2^T}) \pm \sqrt{1/4(I_x^{A_2^T} - I_y^{A_2^T})^2 + (I_x^{A_2^T})^2}.$$

Центробіжний момент інерції контуру зони ЗШ:

$$I_{x,y}^{A_2^T} = \frac{1}{F^{A_2^T}} \sum_{y_L}^{y_E} \sum_{x_L}^{x_E} (x - x_F)(y - y_F) B_{A_2^T}^*(x, y).$$

Угол нахилу контуру зони ЗШ

$$\mu = \frac{1}{2} \arctg \frac{2I_{xy}^{A_2^T}}{I_y^{A_2^T} - I_x^{A_2^T}}.$$

Периметр контуру зони ЗШ у площині зображення:

$$Pr^{A_2^T} = \sum \sqrt{(x_{L+1} - x_L)^2 + (y_{L+1} - y_L)^2}.$$

Кривизна контуру зони ЗШ:

$$R_k^{A_2^T} = \frac{1}{(F^{A_2^T})^2} (I_x^{A_2^T} + I_y^{A_2^T}).$$

Компактність контуру зони ЗШ ( $\ell_x, \ell_g$  – розміри сторін прямокутника, що описаний навкруги контуру):

$$K^{A_2^T} = \frac{F^{A_2^T}}{\ell_x \ell_g}.$$

Форм – фактор контуру зони ЗШ:  $K^{A_2^T}' = \frac{1}{K^{A_2^T}}$

Зображення деяких з робочих панелей програмного комплексу для формування приведених діагностичних ознак контурів зварного шву (що використовуються для розпізнавання класів дефектів ділянок ЗШ) приведені на рис. 3, рис. 4.

**Висновки.** 1. Викладено деякі результати розробки системи контролю зовнішніх дефектів ЗШ на спеціальному лабораторному стенді з системою технічного зору (СТЗ).

2. Розроблено підхід до автоматизованого розпізнавання основних класів цих дефектів.

3. Проведені дослідження показали добру якість контролю та розпізнавання класів зовнішніх дефектів ЗШ, що є основою для виконання подальших розробок.

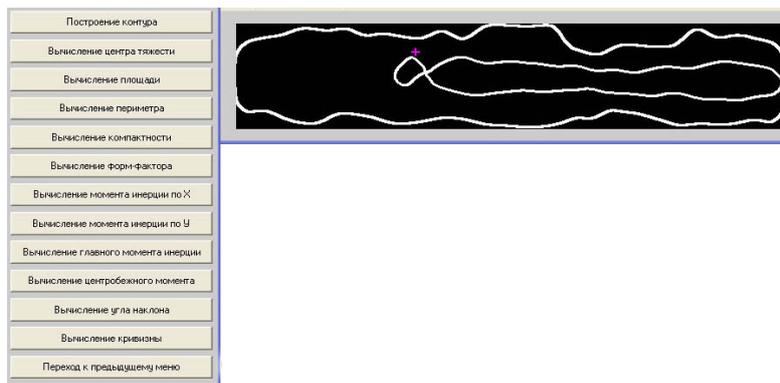


Рис. 3. Зображення робочої панелі програмного комплексу для формування діагностичних ознак контурів зварного шву

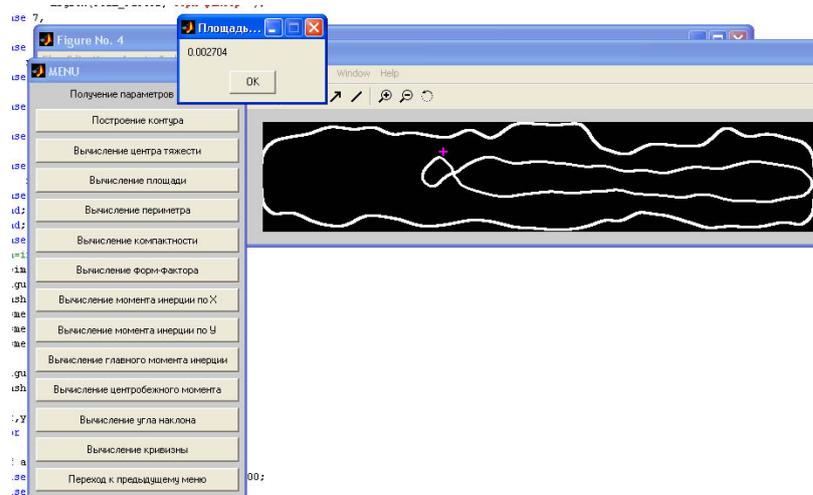


Рис. 4. Зображення робочої панелі програмного комплексу для формування діагностичних ознак контуру зварного шву – з індикацією параметру – площини контуру.

**Список літератури:** 1. Настанова з візуального і вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавов металевих конструкцій. – ДСТУ-Н Б А.3.1–11:2008. – 63 с. 2. Шмидт Д. Опто-электронные сенсорные системы / Д. Шмидт, В. Шварц; Пер. с нем. – М.: Мир, 1991.

УДК 621.922.024.536.5

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ЛЕНТОЧНОМ ШЛИФОВАНИИ

**Якимова О.А., Якимов П.А, Кузьминова В.И., Иванищева И.Н.**  
(Одесский национальный политехнический университет)

*The article presents the advantages of intermittent belt grinding against the conventional method of sanding belt. The mathematical calculation scheme of temperatures in intermittent belt grinding from which analytical dependence for determining the temperature of grinding*

Эффективность и целесообразность применения прерывистых абразивных лент при шлифовании различных материалов с точки зрения их режущей

способности, стойкости и силовых затрат известна из ранее проведенных работ и подтверждается положительными итогами их производственных испытаний на моторостроительных заводах Перми, Казани, а также ряда металлургических и деревообрабатывающих предприятий Украины [1,2].

Данный метод шлифования относится к числу новых и чрезвычайно перспективных [3,4]. Но наличие широкого ассортимента материалов, абразивных лент, типов станков и оборудования не позволяет чисто эмпирическим методом охватить все случаи и дать рациональные рекомендации по использованию нового процесса шлифования лентами с прерывистой (рельефной) рабочей поверхностью без изучения происходящих при этом тепловых процессов.

Кроме того, помимо всех факторов, проявляющихся при обычном ленточном шлифовании, новый процесс будет определяться целой совокупностью новых факторов. К ним, в первую очередь, следует отнести продолжительность контакта режущего участка ленты с деталью и последующей паузы. При этом важно как их абсолютное значение, так и соотношение между временем паузы и длительностью контакта, что необходимо для создания научно-обоснованной методики расчета геометрических параметров прерывистых лент.

Математическая постановка тепловой задачи формулировалась по известным схемам Н.Н. Рыкалина и В.А. Сипайлова.

Начальная температура принимается равной нулю. Теплообмен с окружающей средой отсутствует. С учетом характера кинематики взаимодействия прерывистой ленты с деталью, а также особенностью резания единичного выступа, плотность теплового потока при прерывистом ленточном шлифовании будет непостоянной и в данном исследовании принята, в отличие от известных решений, изменяющейся, с течением времени по некоторому закону

Задача сводится к решению уравнения теплопроводности

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dx^2} + \frac{dT}{dz^2} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} T|_{t=0} &= 0 \\ -\frac{dT}{dx}\Big|_{x=0} &= -\frac{1}{\lambda} \cdot g(t')\delta(z') \\ \frac{dT}{dx}\Big|_{x=\infty} &= \frac{dT}{dy}\Big|_{y=\pm\infty} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Если в начальный момент времени середина источника совпадает с началом системы отсчета, то функция  $\delta(z')$  определит координаты точек области действия теплового источника с учетом его движения:

$$\delta(z') = \begin{cases} 1, & Vt - h \leq z' \leq Vt + h \\ 0, & z' < Vt - h, z' > Vt + h \end{cases} \quad (3)$$

где  $g(t)$  – плотность теплового источника.

Температуры, развиваемые при шлифовании прерывистыми лентами, ниже критических точек, т.е., резких изменений теплофизических характеристик

быть не должно, и потому принятое в постановке задачи постоянство теплофизических характеристик оправдано.

Решение уравнения (1) при краевых условиях (2) в безразмерных величинах имеет вид:

$$T^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{F_0} \exp\left[-\frac{x^2}{4\tau}\right] \Phi(\xi \cdot \tau) \cdot D(F_0 - \tau) \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (4)$$

где 
$$T^* = \frac{\lambda}{g_0 \cdot h} \cdot T; \quad (5)$$

$$\Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{1 + \xi + u\tau}{2\sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-1 + \xi + u\tau}{2\sqrt{\tau}}\right); \quad (6)$$

$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z \exp[-x^2] dx$  – функция ошибок Гаусса;  $T$  – температура;  $h$  – полуширина источника;  $\xi = z/h$  – безразмерный параметр координаты в направлении движения зоны контакта;  $x = x/h$  – безразмерный параметр координаты по направлению внутрь детали;  $F_0 = at/h^2$  – безразмерный параметр комплекса времени (число Фурье);  $u = Vh/a$  – безразмерный параметр комплекса скорости (число Пекле);  $t$  – время;  $V$  – скорость перемещения источника (детали);  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $g_0$  – амплитуда импульса теплового потока;  $T^*$  – безразмерный параметр температуры (относительная температура).

Функция  $D(F_0 - \tau)$  задает закон изменения плотности теплового потока во времени в зоне контакта. По площади контакта плотность теплового потока считается постоянной. Безразмерный параметр времени резания одним выступом прерывистой ленты определяется выражением:

$$F_0 = \frac{a}{h^2} \cdot t_1. \quad (7)$$

где  $t_1 = \frac{l_1}{V_l}$ ;  $l_1$  – длина режущего участка (выступа) ленты;  $V_l$  – скорость движения ленты.

При ленточном шлифовании скорости резания могут быть выше, а протяженности режущих участков прерывистой ленты или выступов прерывистых роликов напротив, меньше, чем у кругов. Так, для прерывистых кругов минимальная длина режущего выступа ( $l_1$ ) составляет порядка 20 мм, а для лент длина  $l_1 = 20$  мм – ближе к верхнему пределу, что приводит к малым значениям комплекса  $F_{0l}$ . Поэтому с целью упрощения и повышения точности расчетов при малых  $F_{0l}$  решение (4) преобразуем так, чтобы расчет температур проводить по каждому импульсу вплоть до установившегося режима. Это можно сделать, если функцию  $D(F_0 - \tau)$  записать как функцию безразмерного параметра времени  $\tau$ . Такой переход можно сделать, используя свойство, свертки. Тогда уравнение (4) запишется в виде:

$$T^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{F_0} D(\tau) \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}}, \quad (8)$$

где  $\Phi(\xi, F_0 - \tau) = \operatorname{erf} \left[ \frac{\xi + 1 + u(F_0 - \tau)}{2\sqrt{F_0 - \tau}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{\xi - 1 + u(F_0 - \tau)}{2\sqrt{F_0 - \tau}} \right];$  (9)

$$F(x, F_0 - \tau) = \exp \left[ -\frac{x^2}{4(F_0 - \tau)} \right]. \quad (10)$$

Разобьем интеграл в уравнении (8) на сумму интегралов по каждому импульсу и паузе, а функцию  $D(\tau)$  представим отдельно для моментов резания (момент прохождения режущего выступа  $l_1$ ) и пауз (момент прохождения впадины  $l_2$ ):

(1-й выступ)

$$T^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \left[ \int_0^{F_{01}} g \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} + \right.$$

(1-й паз)

$$+ \int_{F_{01}}^{F_{01} \cdot (1+\gamma)} P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} +$$

(2-й выступ)

$$+ \int_{F_{01}(1+\gamma)}^{F_{01} \cdot 2(1+\gamma)} g \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} +$$

(2-й паз)

$$+ \int_{F_{01} \cdot 2(1+\gamma)}^{2F_{01}(1+\gamma)} P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} + \dots +$$

$$+ \left. \int_{F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]}^{F_{01} \cdot N(1+\gamma)} P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} \right] +$$

$$+ \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \int_{F_{Q,01}(1+\gamma)}^{F_{01}} g \cdot P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}}. \quad (11)$$

Все нечетные интегралы соответствуют моментам контакта ленты с деталью. Функция  $g$  при этом определяет закон изменения плотности теплового потока в течение контакта. Четные интегралы соответствуют паузам и, следовательно, равны нулю, так как функция, описывающая плотность теплового потока, равна нулю, т.е.  $P = 0$ . Последний интеграл в уравнении (11) попадает либо на импульс (момент прохождения режущего участка ленты), либо на паузу (момент прохождения впадины ленты). В соответствии с этим берется функция

$g$  или  $P$ . Число  $Q$  определяется как целая часть отношения  $\left[ \frac{F_0}{F_{01(1+\gamma)}} \right]$ , т.е. это целое число циклов (импульс + пауза), действующих в течение времени, равного заданному  $F_0$ . Величина  $\gamma = l_2 / l_1$  равна отношению длины нережущего участка к режущему.

Следует заметить, что в случае шлифования обычными (сплошными) лентами, но с прерывистым контактным роликом пауз не будет и  $P \neq 0$ , хотя очевидно, что  $|P \max| < |g \max|$ . В дальнейшем для большего обобщения, в случаях отсутствия дополнительных условий, полагаем, что  $P \neq 0$ . Тогда, объединив сумму интегралов, в уравнения (11) получим:

$$T^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{N=1}^Q \left[ \int_{(N-1)F_{01(1+\gamma)}}^{F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]} g \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} + \int_{F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]}^{F_{01} \cdot N(1+\gamma)} P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}} \right] + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \int_{Q \cdot F_{01(1+\gamma)}}^{F_{01}} g \cdot P \cdot \Phi(\xi, F_0 - \tau) \cdot F(x, F_0 - \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{F_0 - \tau}}. \quad (12)$$

Для удобства программирования, а именно исключения деления на ноль, произведем замену выражения

$$\sqrt{F_0 - \tau} = t, \text{ откуда } F_0 - \tau = t^2 \\ \tau = F_0 - t^2 \text{ и } d\tau = -2tdt \quad (13)$$

и пределы соответственно изменятся:

$$\text{при } \tau = (N-1)F_{01}(1+\gamma) \text{ имеем } t = \sqrt{F_0 - (N-1)(1+\gamma)F_{01}}; \\ \text{при } \tau = F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1] \text{ имеем } t = \sqrt{F_0 - F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]}. \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) выражение (12) запишется:

$$T^* = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left\{ \sum_{N=1}^Q \left[ \int_{\sqrt{F_0 - F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]}}^{\sqrt{F_0 - (N-1)(1+\gamma)F_{01}}} t^2 \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt + \int_{\sqrt{F_0 - N(1+\gamma)F_{01}}}^{\sqrt{F_0 - F_{01}[(N-1)(1+\gamma)+1]}} P \cdot \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt \right] + \int_A^B g \cdot \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt \right\} \quad (15)$$

$$\text{где } \Phi(\xi, t^2) = \operatorname{erf} \left[ \frac{\xi + ut^2 + 1}{2t} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{\xi + ut^2 - 1}{2t} \right]; \quad F(x, t^2) = \operatorname{erf} \left[ -\frac{x^2}{4t^2} \right].$$

Значения пределов  $A$  и  $B$  зависят от выбранного момента. Для двух основных случаев имеем: к концу действия паузы  $A=B=0$ , и температура определяется двумя интегралами. К концу действия импульса  $A=0$ ,  $B = \sqrt{F_0 - Q(1+\gamma)F_{01}}$ .

При шлифовании прерывистой лентой со сплошным контактним роликком в период прохождения промежутков без абразивного слоя (пазов  $l_2$ ) сила резания равна нулю, т.е.  $P=0$  и решение (15) при введенных обозначениях (пределы интегралов:  $a, b, c$ ) упрощается:

$$T^* = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \sum_{N=1}^Q \left[ \int_a^b g \cdot \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt + \int_0^a P \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt \right] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_A^B g \cdot \Phi(\xi, t^2) F(x, t^2) dt \right\}. \quad (16)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения температуры шлифования прерывистой лентой.

**Список литературы:** 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. “Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.8. “Оптимизация технологических процессов в машиностроении” – Одесса: ОНПУ, 2004. – 508 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.6. “Качество обработки деталей машин” – Одесса: ОНПУ, 2003. – 716 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.2. “Теплофизика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.

УДК 621.923

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ШЛІФУВАЛЬНОЇ БАБКИ ВЕРСТАТА МОДЕЛІ 3М151

Сизий Ю.А., докт. техн. наук,  
Ушаков О.М., канд. техн. наук, Новіков Д.Ф.  
(Національний технічний університет “ХПІ”, м. Харків)

*Calculations of moment of inertia wheelhead machine model 3M151 manual and automated methods. Found efficiency of the automated method based on modern software for designing parts*

При проектуванні металорізального верстата необхідно виконати математичні розрахунки роботи його окремих елементів. Для верстата моделі 3М151 найбільш важливим є правильний розрахунок шліфувальної бабки для того щоб точно знати максимально можливе навантаження на привод. Основою цих розрахунків є момент інерції вузлів шліфувальної бабки. У цей час існують наступні методи розрахунку моменту інерції: ручний і автоматизований. Тому цілком роботи є аналіз ефективності методів розрахунку моменту інерції шліфувальної бабки верстата моделі 3М151. Для визначення найбільш ефективного методу розрахунку моменту інерції необхідно виконати розрахунок на прикладі одного зі шківів приводу двома методами та порівняти отримані результати.

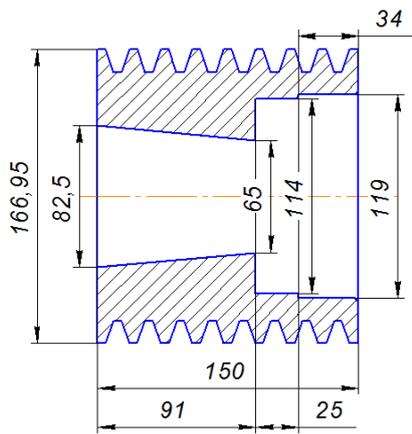


Рис. 1. Схема конструкції шківів шпинделя пасової передачі

Конструкція шківів передачі наведена на рис. 1. Для спрощення розрахунку слід замінити дійсну конструкцію шківів наближеною, що складається з якихось  $i$ -тіл простої форми, для яких можна просто розрахувати момент інерції:

$$I_i = r_i^2 \cdot m_i, \quad (1)$$

де  $r_i$  - відстань центра ваги  $i$ -го тіла до осі  $X$ , момент інерції навколо якої обчислюється.

Загальний момент інерції всього тіла:

$$I_x = \int r_i^2 \cdot m_i. \quad (2)$$

Шківів пасової передачі – тіла обертання, для яких розрахунок моменту інерції спрощується. Так, для суцільного циліндричного тіла:

$$I_x = \frac{h \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^4}{2} = \frac{m \cdot R^2}{2} \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2), \quad (3)$$

де  $h$  – розмір циліндра уздовж осі, м;  $R$  – радіус навантаженої поверхні, м;  $\rho$  – щільність матеріалу циліндра,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m$  – маса циліндра, кг.

Для циліндричного тіла з отвором:

$$I_{x_0} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot R^4 \cdot \left(1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^4\right) = m \cdot \frac{R^2}{2} \left[1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^4\right], \quad (4)$$

де  $R_1$  – радіус отвору, м.

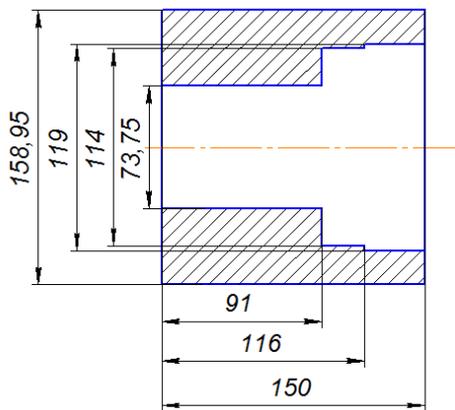


Рис. 2. Схема шківів для розрахунку моменту інерції ручним методом

Для розрахунку моменту інерції використовуємо два методи: ручний і автоматизований. При визначенні моменту інерції ручним методом слід використати формулу (4). На рис. 2 представлено схему, за якою виконується розрахунок моменту інерції для шківів.

Центральний отвір конусного виду був представлений як циліндричний отвір з усередненим діаметром. Пази для пасової передачі були представлені як циліндрична поверхня з усередненим діаметром. Після проведення перетворень шківів, усе тіло можна розділити на три окремих циліндри з отворами. Дане перетворення в значній мірі спрощує процес розрахунку моменту інерції тіла.

Розрахунок першого циліндричного тіла:

$$m_1 = \pi \cdot h \cdot \rho \cdot R^2 = 23,2 \text{ кг}; \quad I_{x_0 1} = 0,0498 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розрахунок другого циліндричного тіла:

$$m_2 = \pi \cdot h \cdot \rho \cdot R^2 = 10 \text{ кг}; \quad I_{x_0 2} = 0,0056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розрахунок третього циліндричного тіла:

$$m_3 = \pi \cdot h \cdot \rho \cdot R^2 = 7,26 \text{ кг}; \quad I_{x03} = 0,0195 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розрахунок сумарного моменту інерції шківів згідно рис. 2:

$$I_{x0} = \sum I_{x0i} = 0,0498 + 0,0056 + 0,0195 = 0,0749 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розрахунок автоматизованим методом здійснюється за допомогою двох програмних продуктів: SolidWorks та Компас 3D.

За допомогою програмного продукту SolidWorks розроблено 3D модель шківів та розраховано його момент інерції:  $m = 14,91 \text{ кг}; I_x = 0,0607651 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

За допомогою програмного продукту Компас 3D виконано креслення шківів та знайдено його момент інерції.

Найбільш точним є автоматизований метод розрахунку за допомогою програмного продукту SolidWorks, тому що він враховує всі конструкційні елементи шківів. Цій спосіб слід прийняти як номінальний.

Погрішність при розрахунку показників ручними способами:

$$\Delta I_x = \left(1 - \frac{I_x \text{ ручн.спосіб}}{I_x \text{ номінал}}\right) \times 100 = 23\%.$$

Погрішність при розрахунку показників за допомогою програмного продукту Компас 3D:

$$\Delta I_x = \left(1 - \frac{I_x \text{ компас}}{I_x \text{ номінал}}\right) \times 100 = 3,1\%.$$

Виконавши розрахунки моменту інерції двома способами за допомогою програмних продуктів, отримано практично однакові результати, що підтверджує їхню достовірність. Розбіжності в розрахунках відрізняються через те, що при розрахунках за допомогою програмного продукту Компас 3D неможливо врахувати вплив сегментної шпонки.

При розрахунках ручним способом схему деталі необхідно перетворювати в циліндричні тіла для зручності обчислення. Виходячи зі значної погрішності в 23 %, такий спосіб розрахунку моменту інерції є неефективним, і подальше його застосування є недоцільним.

Після вибору найбільш ефективного методу розрахунків (на підставі 3D моделі, розробленої в програмному продукті SolidWorks), виконується розрахунок моменту інерції для шківів електродвигуна, шпинделя й шліфувального круга із фланцем. Розрахунок моменту інерції шліфувального круга виконується у зборі з двома фланцями

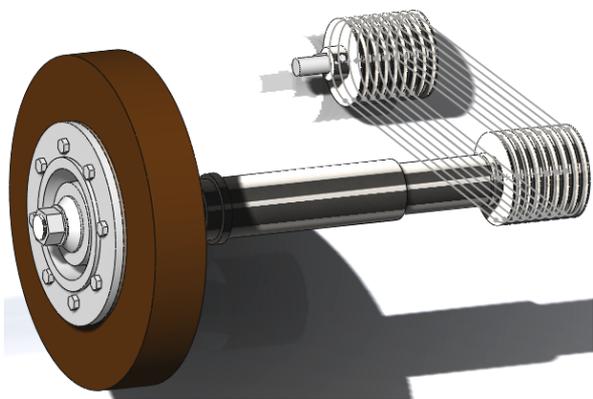


Рис. 3. 3D модель приводу шліфувальної бабки верстата моделі 3M151

та прокладками, а також окремо: шліфувальний круг, фланець лівий та фланець правий (рис. 3, табл. 1).

Таблиця 1

Значення моменту інерції для вузлів приводу

Найменування вузла	Маса, кг	Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>
Шків приводу	14,91	$I_x = 0,0607651$
Шків електродвигуна	19,63	$I_x = 0,0558830$
Шпиндель	53,27	$I_x = 0,0659514$
Шліфувальний круг у зборі	108,87	$I_x = 2,3951757$
Шліфувальний круг	56,75	$I_x = 1,6541126$
Фланець правий	43,66	$I_x = 0,5446500$
Фланець лівий	8,46	$I_x = 0,1964131$
Ротор електродвигуна	1,91	$I_x = 0,0400000$
Привод у зборі	196,68	$I_x = 2,6177752$

Таким чином встановлено, що розвиток інформаційних технологій дозволяє значно зменшити час на проектування нових високоточних виробів. На основі розробленої 3D моделі виробу можна легко й швидко виконати математичні розрахунки роботи вузлів виробу. Точність таких розрахунків значна, тому що зменшується вплив людського чинника на процеси розрахунку й перетворень схеми деталі.

**Список літератури:** 1. Сизый Ю.А. Анализ предельных технологических возможностей круглошлифовального станка 3М151 при врезном шлифовании / Ю.А. Сизый, А.Н. Ушаков, Д.Ф. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 68-75. 2. Киркач Н.Ф. расчет и проектирование деталей машин: учеб. пособие для техн. вузов; 3 изд., перераб. и доп. / Н.Ф. Киркач, Р.А. Баласанян. – Х.: Основа, 1991. – 276 с.

УДК 621.923

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ НЕОДНОРОДНЫХ НАПЛАВЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗЦАМИ ИЗ ПСТМ**

**Тищенко Л.Н.**, докт. техн. наук, **Коломиец В.В.**, докт. техн. наук,  
**Любичева К.М.** (Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства имени Петра Василенко)  
**Vijay Kumar**, prof. (Dr) (г. Дели, Индия)

*The coefficients of friction of surfaced materials such as steel and super hard castiron with hard alloy and are determined*

**Введение.** Процесс резания материалов сопровождается деформацией и разрушением срезаемого слоя обрабатываемой заготовки, интенсивным трени-

ем между деталью, инструментом и стружкой, износом инструмента и изменением его геометрических параметров. Величина характеристик трения зависит от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, состояния контактных поверхностей и режимов процесса обработки [1]. Физические характеристики взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов зависят от внешнего и внутреннего трения, которые сопровождаются явлениями адгезии и диффузии и приводят к возникновению нормальных и касательных напряжений на передней и задних поверхностях инструмента, упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала [2, 3].

Обработка наплавленных материалов, характеризующихся наличием большого количества различных дефектов и неоднородностей в наплавленном материале и зоне сплавления, особенно при наплавке порошковыми наплавочными проволоками и проволоками дающими материал типа высокопрочный чугун, также сопровождается интенсивным трением, имеющим свои специфические особенности и отличия от трения при резании сплошных однородных материалов [4].

**Основная часть.** Так как при обработке наплавленных материалов почти всегда передний угол резца принимается отрицательным, то угол трения  $\eta$  всегда будет меньше угла направления равнодействующей сил на передней поверхности резца  $\omega$  на величину переднего угла  $\gamma$ :

$$\eta = \omega + \gamma = \omega + (-\gamma).$$

При свободном резании наплавленных материалов (рис. 1) средний коэффициент трения выражается геометрической зависимостью:

$$\mu = F/N = \operatorname{tg}\eta = \operatorname{tg}(\omega + \gamma),$$

где  $\operatorname{tg}\eta = P_2/P_1$ .

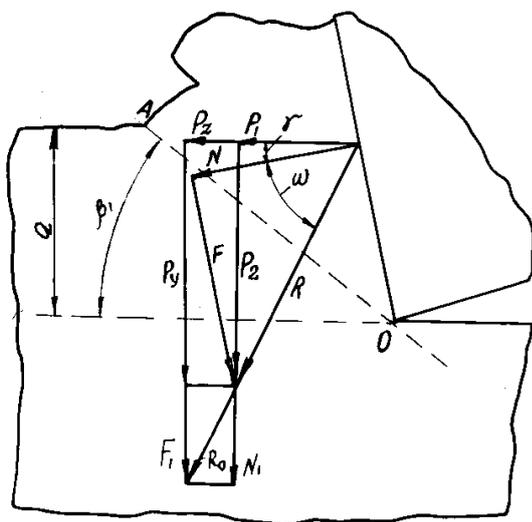


Рис. 1. Схема действия сил при свободном резании наплавленных материалов

Сила трения будет равна:

$$F = P_1 \cdot \sin\eta / \cos(\eta - \gamma);$$

нормальная сила равна:

$$N = P_1 \cdot \cos\eta / \cos(\eta - \gamma).$$

При несвободном резании равнодействующая всех сил на резце направлена в плоскости, расположенной к главной режущей кромке под углом  $\psi - (90^\circ - \varphi)$ . Тогда коэффициент трения определится из формулы:

$$\mu = \operatorname{tg}\eta = \operatorname{tg}(\omega - \gamma'),$$

где  $\gamma'$  – передний угол резца, измеренный в плоскости действия равнодействующей всех сил на резце, который определяется из зависимости:

$$\operatorname{tg}\gamma' = \operatorname{tg}\gamma \cdot \cos[\psi - (90^\circ - \varphi)].$$

Угол трения будет равен:  $\eta = \omega + \gamma'$ .

Силы трения на задних поверхностях резца при резании наплавленных материалов с толстыми срезами относительно велики, поэтому их необходимо также учитывать при определении коэффициентов трения.

Проведенными опытами установлены отличительные особенности влияния неоднородностей наплавленных материалов на величину коэффициентов трения при моделировании для материалов типа нержавеющей сталей и высокопрочных чугунов. Так при трении инденторов из твердого сплава Т15К6 и из ПСТМ типа гексанит – Р по поверхности, наплавленной нержавеющей проволокой Нп-12Х18Н9Т (рис. 2) наблюдается различный характер изменения коэффициентов трения в зависимости от изменения скорости скольжения и удельного давления.

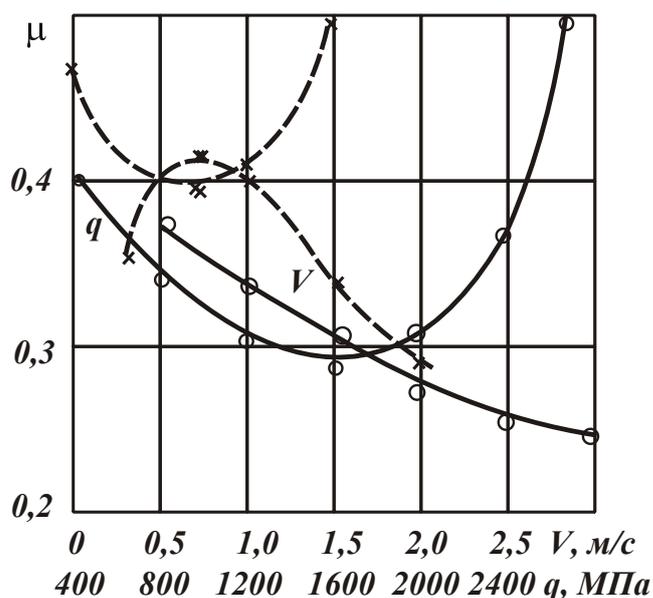


Рис. 2. Влияние скорости трения  $V$  и удельного давления  $q$  на коэффициент трения  $\mu$  твердого сплава Т15К6 /x-----x/ и гексанита-Р /o-----o/ на наплавленном материале Нп-12Х18Н9Т (HRC 38) при  $\mu = f(V)$  для Т15К6 –  $q = 800$  МПа; для гексанита-Р –  $q = 1800$  МПа; при  $\mu = f(q)$  для Т15К6 –  $V = 1,0$  м/с; для гексанита-Р –  $V = 2,0$  м/с.

Из приведенных графиков видно: для твердого сплава Т15К6 наблюдается ярко выраженный максимум в зависимости  $\mu = f(V)$  с большими значениями коэффициентов трения – в 1,5 – 2 раза большими чем для гексанита-Р, величина которых в свою очередь выше, чем при трении по наплавленным легированным материалам примерно такой же твердости. Это можно объяснить большей пластичностью материала, наплавленного проволокой типа нержавеющей стали, а также лучшим заполнением микропор, трещин и неровностей в поликристалле из гексанита-Р разогретым никелем, что приводит к повышению коэффициента трения [5, 6]

Характер изменения зависимостей  $\mu = f(q)$  у инденторов из Т15К6 и из гексанита-Р одинаков, но минимум наблюдается при разных скоростях скольжения и величины коэффициентов трения резко отличаются. Это и приводит к быстрому износу резцов из твердого сплава.

При трении инденторов из твердого сплава Т15К6 и из гексанита–Р по наплавленному материалу типа высокопрочный чугун Нп–250Х10Б8С2Т (HRC 58) при моделировании наблюдаются большие коэффициенты трения (рис. 3), что можно объяснить наличием только упругих контактов в зоне трения с большими дефектами в наплавке. Величины коэффициентов трения инденторов по этим наплавкам почти в 2 раза больше, чем по наплавленным материалам типа легированные стали.

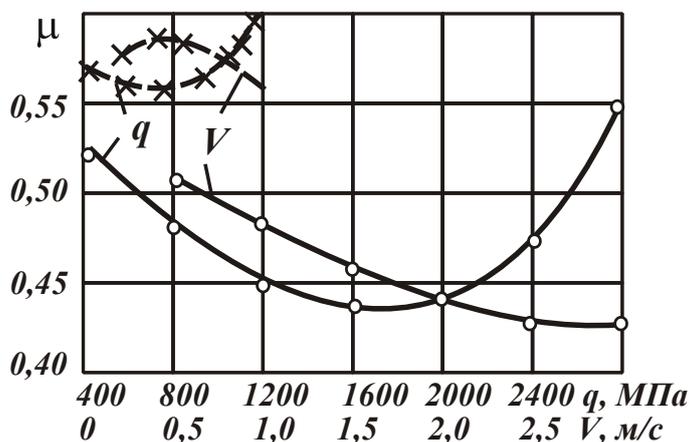


Рис. 3. Влияние скорости трения  $V$  и удельного давления  $q$  на коэффициент трения  $\mu$  твердого сплава Т15К6 /х-----х/ и гексанита–Р /о-----о/ с материалом наплавленным проволокой ПП – Нп-250Х10Б8С2Т. При  $\mu = f(V)$  для Т15К6  $q = 800$  МПа; для гексанита–Р:  $q = 1800$  МПа; при  $\mu = f(q)$  для Т15К6  $V = 0,5$  м/с; для гексанита–Р  $V = 1,3$  м/с.

Для сравнения величин коэффициентов трения, полученных при моделировании трения инденторов из твердого сплава Т15К6 и из ПСТМ типа гексанита–Р по материалам наплавленным проволоками Нп-12Х18Н9Т и ПП-Нп-250Х10Б8С2Т их значения при оптимальных скоростях скольжения и удельных давлениях приведены в таблице.

Таблица

Опытные величины коэффициентов трения при моделировании

Марка наплавки	Твердость HRC	Скорость трения, м/с	Удельное давление, МПа	Коэффициент трения	
				Т15К6	гексанит-Р
Нп-12Х18Н9Т	38	1,0; 2,0	800; 1800	0,42	0,27
ПП-Нп 250Х10Б8С2Т	58	0,5; 1,3	800; 1800	0,57	0,43

**Выводы.** Проведенными опытами определения коэффициентов трения при резании наплавленных материалов разной твердости и неоднородного строения типа Нп-12Х18Н9Т и ПП-Нп-250Х10Б8С2Т резами из твердого сплава Т15К6 и из сверхтвердого поликристаллического материала на основе нитрида бора типа гексанита–Р установлены различные характеры изменения величин трения при моделировании в зависимости от изменения скорости скольжения. При изменении удельного давления характер изменения коэффициентов трения для этих материалов одинаков, но их величины отличаются по-

чти в 1,5 раза. Это приводит к значительно большей работоспособности резцов из ПСТМ на основе нитрида бора. При обработке наплавленных материалов оптимальные режимы резания необходимо устанавливать с учетом не только физических характеристик процесса резания, но и устанавливать значение характеристик неоднородности каждого наплавленного слоя по глубине наплавки.

**Список литературы:** 1. Кравченко Б.А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1962. – 179 с. 2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 396 с. 3. Костецкий Б.И. Механические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бердашский. – М.: Наука, 1972. – 170 с. 4. Обработка резанием деталей с покрытиями / С.А. Клименко, В.В. Коломиец, М.Л. Хейфец, А.М. Пилипенко, Ю.А. Мельничук, В.В. Бурыкин. Под общ. ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с. 5. Резников Н.И. Физические особенности процесса резания и обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, А.С. Черемисин. – Куйбышев, 1973. – Вып. 1. – С. 5–17. 6. Рациональные режимы резания наплавленных поверхностей резцами из гексанида-Р / В.В. Коломиец, В.И. Сорбат, В.В. Голик и др. // Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов. – Х., 1981. – С. 130–131.

УДК 621.793

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

**Степанов М.С.**, докт. техн. наук, **Клочко А.А.**, докт. техн. наук  
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)  
**Кравцов А.Н.** (Уральский федеральный университет им. первого  
Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия)

*The decision of task of providing of operating properties of surfaces of details is considered from the help of functional-cost analysis during multicriterion regulation of parameters of their superficial layer*

**Введение.** Необходимость получения свойств, предъявленных к поверхностям деталей, выдвигает задачу обеспечения комплексных параметров состояния поверхностного слоя, как функций эксплуатации, каждая из них представляет собой совокупность отдельных параметров шероховатости, волнистости, макроотклонений и физико-механических свойств [1, 2]. В теории технологического обеспечения эксплуатационных свойств (ЭС) имеется достаточно исследований по каждому отдельному параметру состояния поверхностного слоя [3]. Но, вопрос совместного их получения рассмотрен недостаточно, что требует решения с помощью функционально-стоимостной оценки назначаемого технологического обеспечения.

**Основная часть.** Воспользуемся графической интерпретацией метода на базе двух критериального случая. Для этого в заданном пространстве выберем некоторую область Р (рис. 1) и (рис. 2). Определим, что эта область является областью регламентированных значений эксплуатационных свойств (ОРЭС). Она имеет ограничения:

$$X_i = X_{iPij \max}; X_i = X_{iPij \min}; Y_j = Y_{jPij \max}; Y_j = Y_{jPij \min};$$

$$Z_k = Z_{kPkj \max}; Z_k = Z_{kPkj \min}.$$

Далее ограничим область достижимых значений при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) (рис. 1, б) и (рис. 2, а). Для учета разброса не регламентируемых параметров состояния поверхностного слоя, как, например  $Wa = Wa_{\min} \dots Wa_{\max}$ , функция  $J = f(Ra)$ , где  $Ra$  – регламентируемый параметр состояния поверхности, функция эксплуатации изменит свое положение от  $J_{\min} = f_2(Ra)$  до  $J_{\max} = f_1(Ra)$  (рис. 1,а) и (рис. 1,б).

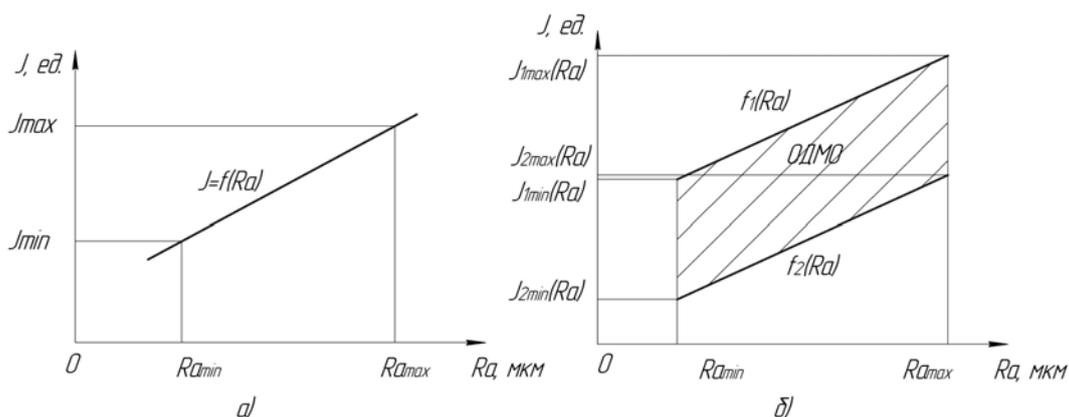


Рис. 1. Схема построения области ОДМО при регламентации одного параметра состояния поверхностного слоя для одной функции эксплуатации

С этой целью представим зависимости, отражающие технологическое значение комплексных параметров в виде:

$$Y_j = K_{ijk} \cdot f(X_i; Z_k),$$

$X_i$  - значения  $i$ -го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси абсцисс;  $Z_k$  - значения  $k$ -го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси ординат;  $K_{ijk}$  - коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых  $j$  комплексных параметров при  $i$  и  $k$  регламентируемом параметре состояния поверхностного слоя.

Тогда область ОДМО ограничится функциями:

$$X_i = X_{iDij \max}; X_i = X_{iDij \min}; \quad (1)$$

$$Y_j = K_{ijk \max} \cdot f(X_i; Z_k); Y_j = K_{ijk \min} \cdot f(X_i; Z_k) \quad (2)$$

$$Z_k = Z_{kDkj \max}; Z_k = Z_{kDkj \min}. \quad (3)$$

Объемы ОДМО и ОРЭС определяются из выражений:

$$V_{Dijk} = (K_{ijk \max} - K_{ijk \min}) \cdot \int_{X_{iDij \min}}^{X_{iDij \max}} \left[ \int_{Z_{kDkj \min}}^{Z_{kDkj \max}} f(X_i; Z_k) dZ_k \right] dX_i \quad (4)$$

$$V_{Pijk} = (X_{iPij \max} - X_{iPij \min}) \cdot (Y_{jPij \max} - Y_{jPij \min}) \cdot (Z_{kPkj \max} - Z_{kPkj \min}). \quad (5)$$

Пересечение областей ОДМО и ОРЭС ограничит область эффективных значений ОЭМО, в которой при применении рассматриваемого метода обра-

ботки будут иметь место значения эксплуатационных свойств и параметров, определяемых регламентацией.

Назначение допусков на величины областей ОДМО, ОРЭС, ОЭМО и т.п. не имеет смысла, т.к. значения диапазонов функции эксплуатации, ограниченных этими областями, значительно (на порядок) больше, чем предполагаемые значения допускаемых величин.

Объем области ЦОРЭС можно определить при помощи смешанного произведения векторов. Для этого рассмотрим области ОРЭС<sub>1</sub>, ОРЭС<sub>2</sub>, ..., ОРЭС<sub>i</sub>, которые образованы множествами векторов  $O_1\{a_1; b_1; c_1\}$ ,  $O_2\{a_2; b_2; c_2\}$ , ...,  $O_i\{a_i; b_i; c_i\}$  соответственно. Таким образом, объем областей ОРЭС<sub>i</sub> определяется смешанным произведением векторов, которые лежат на гранях соответствующих областей ОРЭС:  $V_1 = [a_1 b_1]c_1 = (Se_1)c_1$ ;  $V_2 = [a_2 b_2]c_2 = (Se_2)c_2$ ; ... ;  $V_i = [a_i b_i]c_i = (Se_i)c_i$ . В этих выражениях  $Se_i$  – площадь параллелограмма, построенного на векторах  $a_i$  и  $b_i$  соответственно, приведенных в одну точку.

Для примера, приведенного на рис. 2, б, координаты векторов определяются так:  $a_1 = \{Wa_1; 0; 0\}$ ;  $a_2 = \{Wa_2; 0; 0\}$ ; ... ;  $a_i = \{Wa_i; 0; 0\}$ ;  $b_1 = \{0; Ra_1; 0\}$ ;  $b_2 = \{0; Ra_2; 0\}$ ; ... ;  $b_i = \{0; Ra_i; 0\}$ ;  $c_1 = \{0; 0; J_1\}$ ;  $c_2 = \{0; 0; J_2\}$ ; ... ;  $c_i = \{0; 0; J_i\}$ . Здесь,  $J_1, \dots, J_i$  – регламентируемые значения функции эксплуатации, т.е. функции комплексного параметра, для рассматриваемых параметров состояния поверхностного слоя.

Объем областей ОРЭС<sub>i</sub>:

$$V^{ОРЭС}_1 = \begin{vmatrix} Wa_1 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1 \begin{vmatrix} Ra_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1(Ra_1 - J_1); \quad (6)$$

$$V^{ОРЭС}_2 = \begin{vmatrix} Wa_2 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2 \begin{vmatrix} Ra_2 & 0 \\ 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2(Ra_2 - J_2); \quad (7)$$

$$\dots$$

$$V^{ОРЭС}_i = \begin{vmatrix} Wa_i & 0 & 0 \\ 0 & Ra_i & 0 \\ 0 & 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i \begin{vmatrix} Ra_i & 0 \\ 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i(Ra_i - J_i), \quad (8)$$

где  $J_i = J_i(Ra_i; Wa_i)^{\max} - J_i(Ra_i; Wa_i)^{\min}$ ,  $Ra_i$  и  $Wa_i$  – среднее арифметическое отклонение профиля продольного сечения и среднеарифметическое отклонение профиля волнистости соответственно.

Объем области ЦОРЭС определится вычитанием из самой большой по значению объема области ОРЭС<sub>i</sub> ( $V^{ОРЭС}_i$ ) областей  $V^{ОРЭС}_1, V^{ОРЭС}_2, \dots, V^{ОРЭС}_{i-1}$ , т.е.:  $V_{ЦОРЭС} = V^{ОРЭС}_i - (V^{ОРЭС}_1 + V^{ОРЭС}_2 + \dots + V^{ОРЭС}_{i-1})$ .

Объемы областей ОДМО<sub>i</sub> и СОДМО находятся при помощи двойных интегралов, взятых в соответствующих пределах:

$$V_1^{\max} = \int_{Ra_{\min}^1}^{Ra_{\max}^1} \left( \int_{Wa_{\min}^1}^{Wa_{\max}^1} [C_m^{\max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa; \quad (9)$$

$$V_1^{\min} = \int_{Ra_{\min}^1}^{Ra_{\max}^1} \left( \int_{Wa_{\min}^1}^{Wa_{\max}^1} [C_m^{\min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa, \quad (10)$$

где,  $C_m^{\max}_i$  и  $C_m^{\min}_i$ , для задачи, приведенной на рис. 2, б:

$$C_m^{\max}_1 = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_1 \quad (11)$$

$$C_m^{\min}_1 = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_2 \quad (12)$$

$$\dots$$

$$C_m^{\max}_i = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_j \quad (13)$$

$$C_m^{\min}_i = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_k \quad (14)$$

Аналогично находятся объемы областей ОДМО<sub>i</sub>:

$$V_i^{\max} = \int_{Ra_{\min}^i}^{Ra_{\max}^i} \left( \int_{Wa_{\min}^i}^{Wa_{\max}^i} [C_m^{\max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (15)$$

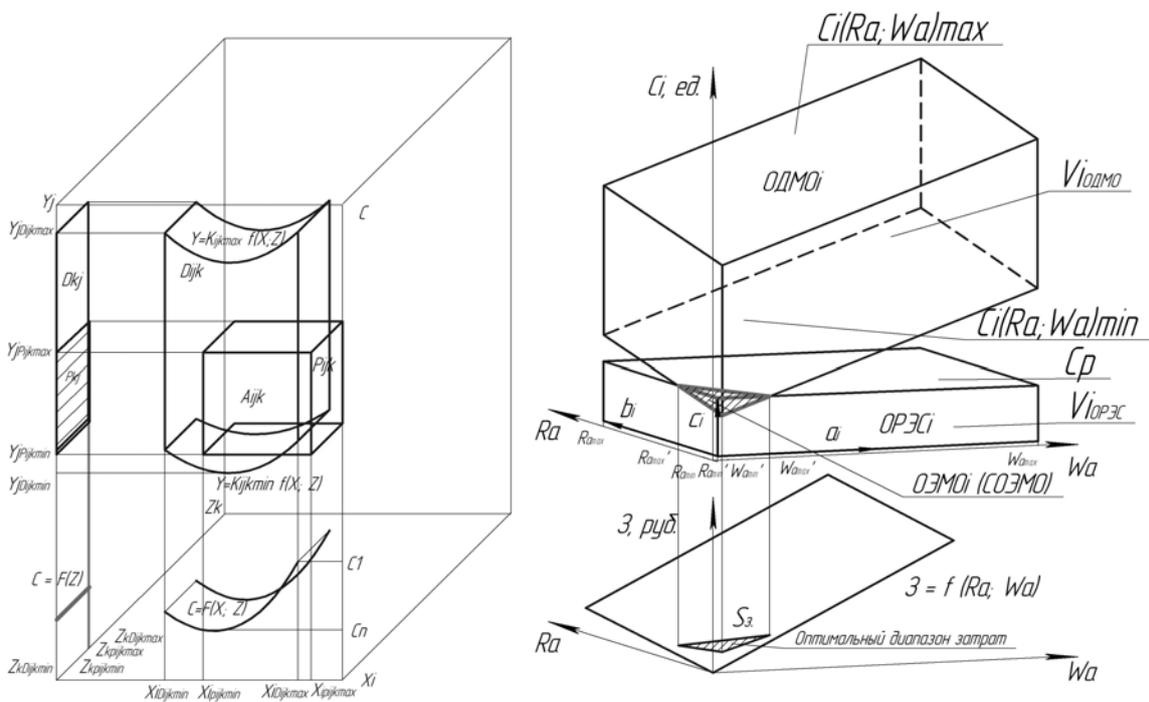
$$V_i^{\min} = \int_{Ra_{\min}^i}^{Ra_{\max}^i} \left( \int_{Wa_{\min}^i}^{Wa_{\max}^i} [C_m^{\min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (16)$$

$$V^{\text{ОДМО}}_1 = V_1^{\max} - V_1^{\min} \quad (17)$$

$$\dots$$

$$V^{\text{ОДМО}}_i = V_i^{\max} - V_i^{\min} \quad (18)$$

Объем области СОДМО определяется аналогично нахождению объема области ЦОРЭС в предыдущих рассуждениях:  $V^{\text{СОДМО}} = V^{\text{ОДМО}}_i - (V^{\text{ОДМО}}_1 + V^{\text{ОДМО}}_2 + \dots + V^{\text{ОДМО}}_{i-1})$ .



б

Рис. 2. Решение задачи выбора оптимальной площади затрат  $S_3$  для обеспечения заданного эксплуатационного свойства при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя

Рассмотрим пример построения областей ОДМО для функции комплексного параметра прочности посадок с натягом  $C_m$ , в качестве регламентируемых параметров поверхностного слоя выбраны параметры  $R_a$  и  $W_a$  (рис. 3). Параметры состояния поверхностного слоя, входящие в формулу комплексного параметра  $C_M = R_p + W_p + H_p = 2.6 \cdot R_a + W_p + 0.5H_{\max}$ , находятся в диапазонах (метод обработки - тонкое точение):  $H_{\max} = (6 \dots 40)$  мкм,  $W_p = (0,20 \dots 1,00)$  мкм,  $R_p = (0,25 \dots 2,5)$  мкм [3]. Функции комплексного параметра определяются из выражений:  $C_M^{\max} = 2.6 \cdot R_a + W_p + 0.5H_{\max}^{\max} = 2.6 \cdot R_a + W_p + 0.5 \cdot 40 = 2.6 \cdot R_a + W_p + 20$ ;  $C_M^{\min} = 2.6 \cdot R_a + W_p + 0.5H_{\max}^{\min} = 2.6 \cdot R_a + W_p + 0.5 \cdot 6 = 2.6 \cdot R_a + W_p + 3$ .

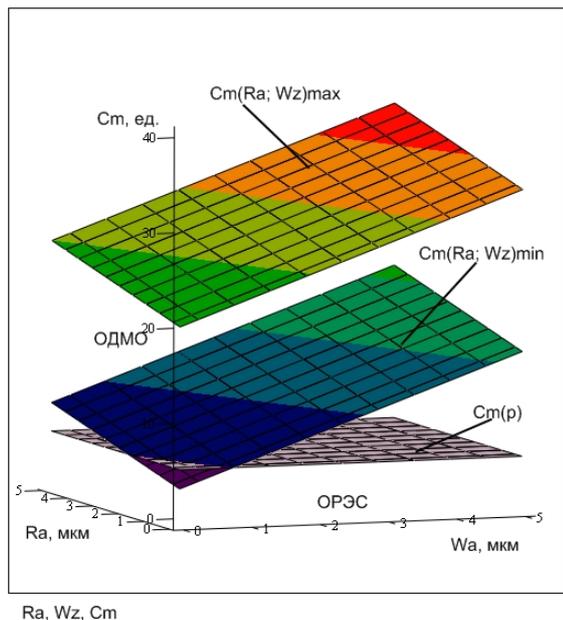


Рис. 3. Области ОДМО и ОРЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя ( $R_a$ ;  $W_a$ ) для обеспечения свойства прочности посадок с натягом

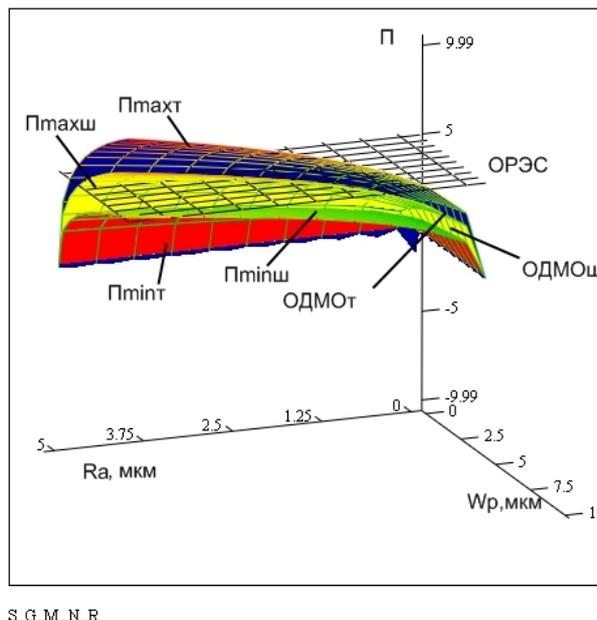


Рис. 4. Области ОДМО и ОРЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя ( $R_a$ ;  $W_p$ ) для обеспечения свойства несущей способности

Рассмотрим пример построения области ОДМО для функции комплексного параметра несущей способности поверхности  $\Pi$ . В качестве регламентируемых параметров состояния поверхностного слоя выберем  $R_a$  и  $W_p$  (рис. 4). Ряд методов на финишном этапе обработки поверхностей, принятых для обеспечения ее несущей способности и параметры поверхностного слоя следующие: тонкое точение:  $H_{\max} = (6 \dots 40)$  мкм,  $W_p = (0,20 \dots 1,00)$  мкм,  $R_p = (0,25 \dots 2,5)$  мкм,  $K^1 = (1,3 \dots 1,7)$ ; тонкое шлифование:  $H_{\max} = (6 \dots 20)$  мкм,  $W_p = (0,08 \dots 0,50)$  мкм,  $R_p = (0,125 \dots 0,800)$  мкм,  $K^1 = (1,2 \dots 1,5)$  [3]. Уравнения поверхностей, образующих область ОДМО:

Метод обработки – тонкое точение:

$$\Pi_{\max} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot H_{\max}^{\max}}{(K_{\max}^1)^{0,5}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot 40}{(1.7)^{0,5}} \right]^{\frac{1}{3}} = 3.417 \cdot \sqrt[3]{R_a \cdot W_p}; \quad (19)$$

$$\Pi_{\min} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot H_{\max}^{\min}}{(K^{\min})^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot 6}{(1.3)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = 1.898 \cdot \sqrt[3]{R_a \cdot W_p} . \quad (20)$$

Метод обработки – тонкое шлифование:

$$\Pi_{\max} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot H_{\max}^{\max}}{(K^{\max})^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot 20}{(1.5)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = 2.769 \cdot \sqrt[3]{R_a \cdot W_p} ; \quad (21)$$

$$\Pi_{\min} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot H_{\max}^{\min}}{(K^{\min})^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{2.6 \cdot R_a \cdot W_p \cdot 0.5 \cdot 6}{(1.2)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} = 1.924 \cdot \sqrt[3]{R_a \cdot W_p} . \quad (22)$$

Схема технологического обеспечения эксплуатационного свойства (несущей способности) поверхности при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя приведена на рис. 4. Построение произведено при помощи математического пакета MathCad. Объем областей ОДМО:

$$\begin{aligned} V_{\text{ОДМО}_T} &= (3.417 - 1.898) \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left( \int_{W_p^{\min}}^{W_p^{\max}} \sqrt[3]{R_a \cdot W_p} dW_p \right) dR_a = \\ &= 1.519 \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot W_p^{\frac{3}{4}} \right)_{0.2}^{1.0} dR_a = 1.14 \cdot \left( 1 - 0.2^{\frac{3}{4}} \right) \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} dR_a = \\ &= 0.799 \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} dR_a = 0.799 \cdot \frac{3}{4} \cdot \left( (R_a^{\max})^{\frac{3}{4}} - (R_a^{\min})^{\frac{3}{4}} \right) = 0.599 \cdot \left( 0.8^{\frac{3}{4}} - 0.1^{\frac{3}{4}} \right) = \\ &= 0.40(\text{ед.}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{ОДМО}_III} &= (2.769 - 1.924) \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left( \int_{W_p^{\min}}^{W_p^{\max}} \sqrt[3]{R_a \cdot W_p} dW_p \right) dR_a = \\ &= 0.845 \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot W_p^{\frac{3}{4}} \right)_{0.08}^{0.50} dR_a = 0.634 \cdot \left( 0.50^{\frac{3}{4}} - 0.08^{\frac{3}{4}} \right) \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} dR_a = \\ &= 0.281 \cdot \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \sqrt[3]{R_a} dR_a = 0.281 \cdot \frac{3}{4} \cdot \left( (R_a^{\max})^{\frac{3}{4}} - (R_a^{\min})^{\frac{3}{4}} \right) = 0.211 \cdot \left( 0.25^{\frac{3}{4}} - 0.05^{\frac{3}{4}} \right) = \\ &= 0.052(\text{ед.}) \end{aligned} \quad (24)$$

Объем области ОРЭС:  $V_{\text{ОРЭС}} = (R_a^{\max} - R_a^{\min}) \cdot (W_p^{\max} - W_p^{\min}) \cdot \Pi = (0.8 - 0.05) \cdot (1.00 - 0.08) \cdot 5.23 = 0.75 \cdot 0.92 \cdot 5.23 = 3.61$  (ед.). Объем областей ОЭМО:

$$V_{\text{ОЭМОт}} = V_{\text{ОРЭС}} - V_{\text{ОДМОт}} = 3.61 - 0.40 = 3.21 \text{ (ед.)}; V_{\text{ОЭМОш}} = V_{\text{ОРЭС}} - V_{\text{ОДМОш}} = 3.610 - 0.052 = 3.558 \text{ (ед.)}.$$

При решении задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхности и выше проведенных расчетов объемов областей ОЭМО, можно утверждать что, приоритетным методом, обеспечивающим заданные эксплуатационные свойства на финишном этапе обработки является тонкое шлифование.

Нахождение наиболее оптимального варианта на стадии подготовки производства является задачей, которая эффективно решается с применением принципов функционально-стоимостного анализа (ФСА). Под ФСА понимают метод системного исследования функций объекта, направленный на минимизацию затрат в сферах проектирования, производства и эксплуатации. Рассмотрим вопрос с позиций технологического обеспечения качества обработки контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных инструментов. При такой постановке задачи конструкторско-расчетные значения комплексных параметров состояния выступают в качестве функции эксплуатации [1].

Степень производственных затрат, в значительной мере, определится выбранным методом обработки, трудоемкостью и оснащением, используемом при его применении. Уровень регламентации параметров качества поверхности, назначаемых в процессе проектирования деталей, предназначен обеспечить эксплуатационные свойства поверхностей и как следствие изделия в целом.

Используя системный подход, введем в систему  $X_i Y_i Z_k$  ось затрат  $C$ . Построим зависимости затрат от параметров состояния поверхностного слоя  $X_i, Z_k$  (рис. 2, а):

$$C = F_j(X_i; Z_k). \quad (25)$$

Проецирование экстремумов  $X_i, Z_k$  из области ОЭМО на ось затрат (рис. 2, а) ограничит максимум и минимум издержек при рассматриваемом методе обработки. В предыдущем изложении рассматривался случай выбора метода обработки с позиций обеспечения одного  $j$ -го комплексного параметра, при заданном уровне  $i$ -го и  $k$ -го параметра состояния поверхностного слоя. Однако, часто необходимо обеспечить несколько эксплуатационных свойств с регламентацией двух и более параметров.

Для решения задачи построим совмещенную систему координат  $X_1, Y_1, Z_1 \dots X_n, Y_n, Z_n$  с коррелированными по масштабу координатным осям. Введем единую ось затрат  $C$  (рис. 2,а). Масштабный фактор по осям  $Y_j$  выберем исходя из совместного решения уравнений, отражающих конструкторско-расчетное значение комплексного параметра состояния поверхности, отражающего ее эксплуатационные свойства [1].

Соотношения масштаба по осям  $X_i$  и  $Z_k$  определяются на основании зависимостей между параметрами состояния поверхностного слоя, известными из теории технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей [3]. Параметры не коррелированных значений будем учитывать в структуре коэффициента  $K$ , поэтапно производя решения по всем регламентируемым параметрам. Очевидно, что проводимый при регламентировании нескольких коррели-

рованных параметров и обеспечении двух и более эксплуатационных свойств, анализ является общим. На основании ограничений (1.1 – 1.2), (2), (3.1 – 3.3) построим области ОДМО и ОРЭС, а также функции затрат для всех  $j$  эксплуатационных свойств, по  $i$  и  $k$  регламентируемым параметрам.

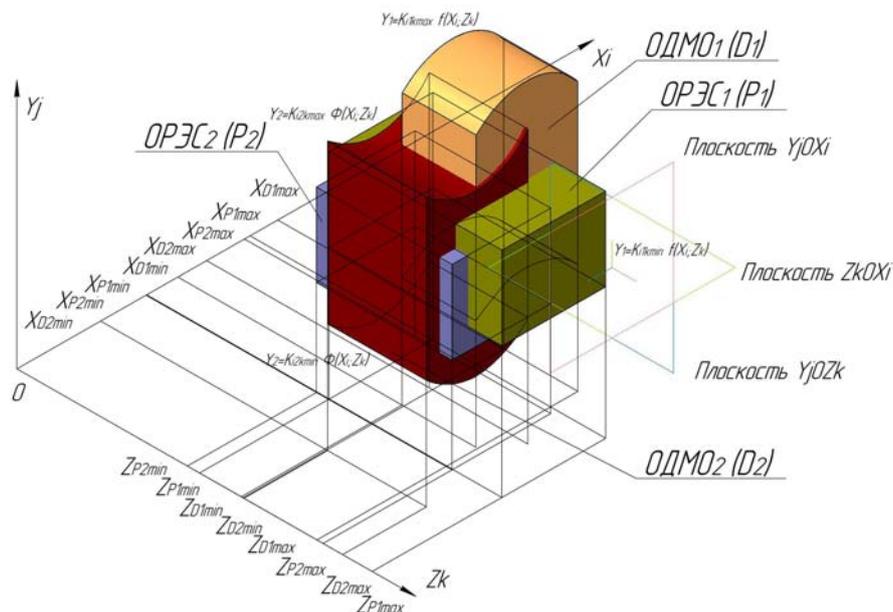


Рис. 5. Схема построения областей ОДМО и ОРЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя для двух функций эксплуатации

Пересечение областей ОДМО образует  $D_\Sigma$  – совместную область достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (СОДМО). Пересечение областей ОРЭС образует  $P_\Sigma$  – целеобразную область регламентируемых значений эксплуатационных свойств (ЦОРЭС). Пересечение областей СОДМО и ЦОРЭС образует  $A_\Sigma$  – совместную область эффективных значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (СОЭМО).

На рис. 5 области  $D_i$  и  $D_1$  – области достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) образуют совместную область СОДМО – область В. Области регламентируемых значений эксплуатационных свойств (ОРЭС)  $P_i$  и  $P_1$  образуют совместную область ЦОРЭС – область Р. Пересечение областей эффективных значений эксплуатационных свойств В (СОДМО) и Р (ЦОРЭС) образуют совместную область СОЭМО – область А. Объемы ЦОРЭС, СОДМО, СОЭМО определяются так:

$$V_{D\Sigma ij k} = \sum_{\psi=1}^e \left[ K_{BD\Sigma ij k} \cdot \iint_{D_i} f_{BD\Sigma ij k}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HD\Sigma ij k} \cdot \iint_{D_1} f_{HD\Sigma ij k}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k \right]_e \quad (26)$$

$$V_{A\Sigma ij k} = \sum_{\psi=1}^t \left[ K_{BA\Sigma ij k} \cdot \iint_{P_i} f_{BA\Sigma ij k}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HA\Sigma ij k} \cdot \iint_{P_1} f_{HA\Sigma ij k}(X_i) dX_i dZ_k \right]_t \quad (27)$$

$$V_{P\Sigma ij k} = (X_{iP\Sigma ij k \max} - X_{iP\Sigma ij k \min}) \cdot (Y_{jP\Sigma ij k \max} - Y_{jP\Sigma ij k \min}) \cdot (Z_{kP\Sigma ij k \max} - Z_{kP\Sigma ij k \min}) \quad (28)$$

где  $\psi$  - количество пересеченных множеств;  $f_{HD\Sigma_{ijk}}(X_i; Z_k)$ ,  $f_{BD\Sigma_{ijk}}(X_i; Z_k)$  - приведенная к  $j$  показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область  $D_{\Sigma_{ijk}}$ ;  $X_{iP\Sigma_{ijk} \max}$ ,  $X_{iP\Sigma_{ijk} \min}$  - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области  $P_{\Sigma_{ijk}}$  (по первому регламентируемому параметру);  $Z_{kP\Sigma_{ijk} \max}$ ,  $Z_{kP\Sigma_{ijk} \min}$  - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области  $P_{\Sigma_{ijk}}$  (по второму регламентируемому параметру);  $Y_{jP\Sigma_{ijk} \max}$ ,  $Y_{jP\Sigma_{ijk} \min}$  - минимальные и максимальные значения комплексных параметров состояния поверхности, отражающих ее эксплуатационные свойства;  $f_{HA\Sigma_{ijk}}(X_i; Z_k)$ ,  $f_{BA\Sigma_{ijk}}(X_i; Z_k)$  - приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область  $A_{\Sigma_{ijk}}$  по регламентируемым параметрам;  $K_{BD\Sigma_{ijk}}$ ,  $K_{HD\Sigma_{ijk}}$  - приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область  $D_{\Sigma_{ijk}}$ ;  $K_{BA\Sigma_{ijk}}$ ,  $K_{HA\Sigma_{ijk}}$  - приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область  $A_{\Sigma_{ijk}}$ ;  $e$  - количество множеств СОДМО;  $t$  - количество множеств СОЭМО. Проецирование экстремальных значений  $X_{iD\Sigma}$ ,  $X_{iA\Sigma}$  областей СОДМО и СОЭМО на функции затрат образуют области затрат, которые показывают в каких пределах колеблется стоимость обработки деталей при обеспечении эксплуатационных свойств данным методом обработки.

В случае не пересечения области ОЭМО (СОЭМО) с областью ОРЭС (ЦОРЭС) возможны следующие пути решения задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств: а) Смена метода обработки поверхности на финишном этапе технологического процесса; б) Смена регламентируемого(-ых) параметра(ов) состояния поверхностного слоя; в) Увеличение числа этапов обработки поверхностей в технологическом процессе.

**Выводы.** Предложенная система оценок позволяет установить схемы проведения ФСА в зависимости от требований, предъявляемых к поверхностям контактного взаимодействия в процессе эксплуатации, которые регламентируются в соответствии с ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 24642-81. При этом регламентация лишь частично определяет эксплуатационные свойства поверхности. Наиболее жесткая регламентация на стадии конструкторской разработки изделия не эффективна, так как ведет к увеличению затрат на производство, а иногда приводит к невозможности совместного получения регламентируемых параметров и требуемых эксплуатационных свойств в процессе изготовления.

**Список литературы:** 1. Инструментальные средства менеджмента [Текст] / В.Н. Тисенко и др.; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС". – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012. – С. 153–187. 2. Кравцов Н.В. Комплексные параметры состояния поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов [Текст] / Н.В. Кравцов, А.Н. Кравцов // Журнал «Омский научный вестник». Серия: Приборы, машины и технологии. – № 3 (113). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. –С. 162–166. 3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей [Текст] / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ

Андилахай А.А., докт. техн. наук

(ГБУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь)

*On the basis of the developed method of determination of residual stresses in the surface layer of the workpiece it found that in the process of abrasion flooded jets arise compressive stresses (hardening occurs). The magnitude of the stress-Uwe creases for 20 - 25 minutes of treatment, then stabilize. According to the same law of change microhardness of the workpiece. It was established experimentally that the most-Shaya material removal rate when abraded submerged jet-reaching at the end face is machined small parts. It is shown that this method of processing, in contrast to known methods abrasive blasting, by eliminating wear of nozzles to stabilize over time the basic processing parameters: roughness and accuracy of the machined surface residual compressive stress and microhardness workpiece*

Развитие производственных мощностей, связанных с точной механикой, электроникой, прецизионным оборудованием и нанотехнологиями, требует новых подходов к выполнению трудоемких ручных операций отделочной обработки мелких точных деталей малой жесткости и сложной конфигурации. Одним из наиболее перспективных направлений в решении данной проблемы является механизация операций отделочной обработки деталей свободным зернистым абразивным материалом на основе применения прогрессивного метода абразивной обработки затопленными струями. Данный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами струйно-абразивной обработки и позволяет повысить эффективность обработки, однако недостаточно изучен. В особой мере это относится к качеству обработки: остаточным напряжениям в поверхностном слое обрабатываемой детали, микротвердости детали, качеству обработки кромок детали и стабильности во времени параметров процесса. Поэтому исследование закономерностей абразивной обработки деталей затопленными струями имеет большое научное и практическое значение, открывает новые технологические возможности повышения качества, производительности и стабильности обработки мелких точных деталей (массой до 3 г) малой жесткости и сложной конфигурации.

В работах [1-5] приведены результаты экспериментальных исследований основных технологических параметров струйно-абразивной обработки. Значительное внимание в них уделено исследованию закономерностей съема металла и формообразования поверхностей деталей. Показано влияние различных технологических факторов на параметры шероховатости поверхности и на этой основе обоснованы оптимальные условия обработки. Однако эти результаты получены применительно к обработке достаточно габаритных деталей, поскольку, как известно, при обработке мелких деталей применение методов струйно-абразивной обработки малоэффективно. В связи с этим, важно оценить параметры качества обрабатываемых поверхностей мелких деталей при использовании перспективного метода абразивной обработки затопленными струями,

т.е. установление, насколько эффективно применение данного метода для обработки мелких деталей с точки зрения обеспечения параметров качества поверхностного слоя детали. Цель работы – обоснование условий повышения качества поверхностного слоя детали при абразивной обработке затопленными струями на основе экспериментальных исследований закономерностей съема металла и формообразования поверхностей деталей.

Напряженное состояние поверхностного слоя детали при абразивной обработке затопленными струями зависит, прежде всего, от ее габаритных размеров, массы и скорости абразивных зерен (которая определяется давлением сжатого воздуха на входе в сопловое устройство, расположенное на дне рабочей камеры). В работе [6] установлено, что при относительно малых размерах абразивных зерен их способность производить микрорезание и пластическое деформирование снижается. В поверхностных слоях детали возникают незначительные деформации, в результате чего не обеспечивается требуемое их упрочнение. С увеличением размера абразивных зерен увеличиваются напряжения, возникающие в зоне контакта зерен и поверхности металла, и съем металла происходит в основном за счет микрорезания и пластического отеснения металла.

Для выяснения степени влияния каждого из этих параметров на остаточные напряжения и наклеп были проведены эксперименты на образцах из титанового сплава ВТ1 и стали 65Г, обладающих упругими свойствами, при следующих технологических параметрах абразивной обработки затопленными струями: абразивный материал – карбид кремния зеленый 63С зернистостью 63П, объемом 0,18 л; расход сжатого воздуха 1 м<sup>3</sup>/мин при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа, время обработки 30 мин. Исследования остаточных напряжений проводились на образцах с размерами 60×20×0,18 мм (рис. 1).

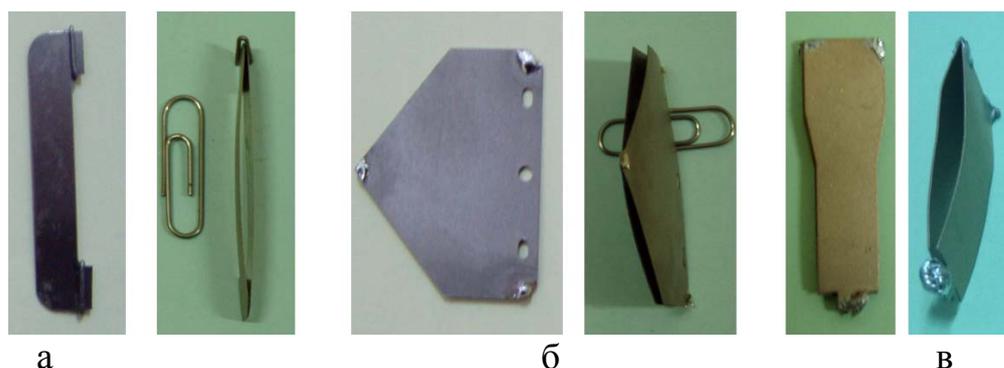


Рис. 1. Внешний вид спаренных деталей до и после абразивной обработки затопленными струями: а – титановый сплав ВТ-1; б – сталь 65Г; в – бериллиевая бронза БрБ2

Образцы в состоянии поставки полосы не имели заметных отклонений от правильной геометрической формы, что не исключало напряженного состояния металла. Для снятия возможных поверхностных напряжений все образцы подвергались ускоренному (вибрационному) старению на вибрационном стенде с частотой колебаний 23,3 Гц в течение 60 мин. После операции

старения наличие внутренних напряжений проверяли стравливанием металла с одной стороны контрольного образца-свидетеля. В результате стравливания слоя металла образец не изменил первоначальной формы, что свидетельствовало об отсутствии напряжений поверхностного слоя. Перед началом обработки образцы попарно спаивали припоем по углам точечной пайкой так, чтобы одна плоская сторона образца была изолирована от струйно-абразивного воздействия (рис. 1).

После обработки в течение 30 мин попарно соединенные образцы становились двояковыпуклыми, т.е. образовывали два шаровых сегмента с прямоугольным периметром, после распайки стрелка хорды увеличивалась еще на некоторую величину, что свидетельствовало о достижении равновесия в напряжениях с двух противоположных сторон образцов – обработанной и необработанной. Глубина напряженного слоя определялась путем измерения деформации образца (рис. 2) при непрерывном стравливании металла с обра-

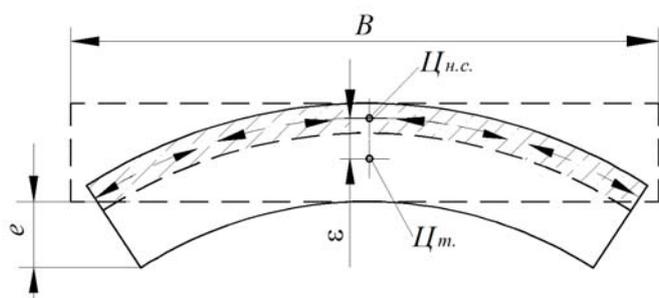


Рис. 2. Расчетная схема к определению среднего значения напряжения в наклепанном слое (заштрихованный участок):  $\text{Ц}_m$  – центр тяжести пластины;  $\text{Ц}_{н.с.}$  – центр тяжести наклепанного слоя

ботанной струйно-абразивным методом стороны образца до тех пор, пока образец не выровнялся и становился плоским. В результате стравливания металла толщина заготовки уменьшилась на разных образцах от 5 до 6 мкм (замеры толщины контрольных образцов выполняли на горизонтальном оптиметре) с последующим расчетом по формуле Саверина М.М. [7]:

$$\sigma_{cp} = \frac{8E I e}{B^2 \varepsilon \Delta F}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{cp}$  – среднее значение напряжения в наклепанном слое, Н/мм<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости материала, Н/мм<sup>2</sup>;  $I$  – момент инерции пластины, мм<sup>4</sup>;  $\varepsilon$  – расстояние между центром наклепанного слоя и центром тяжести всего сечения пластины, мм;  $B$  – длина пластины, мм;  $e$  – изгиб пластины (стрелка хорды), мм;  $\Delta F$  – площадь поперечного сечения наклепанного слоя, мм<sup>2</sup>.

На рис. 2 представлена расчетная схема к формуле (1). На схеме изображен образец с наклепанным слоем, характеризующимся сжимающими напряжениями. Формальным признаком наличия сжимающих напряжений в наклепанном слое является его выпуклость. Величина прогиба (стрелка хорды) определяется замером образца, размещенного на плоской поверхности с помощью рейсмаса за вычетом толщины образца (рис. 2). На рис. 3 приведена зависимость прогиба пластины (с наибольшим габаритным размером, равным 60 мм) в результате образования поверхностных напряжений от времени обработки. Получены следующие результаты замеров прогиба, отнесенного к 60 мм длины пластины: деталь из титанового сплава ВТ-1 –  $e = 3,75$  мм; из стали 65Г –  $e = 3,5$  мм; из бериллиевой бронзы –  $e = 3,25$  мм.

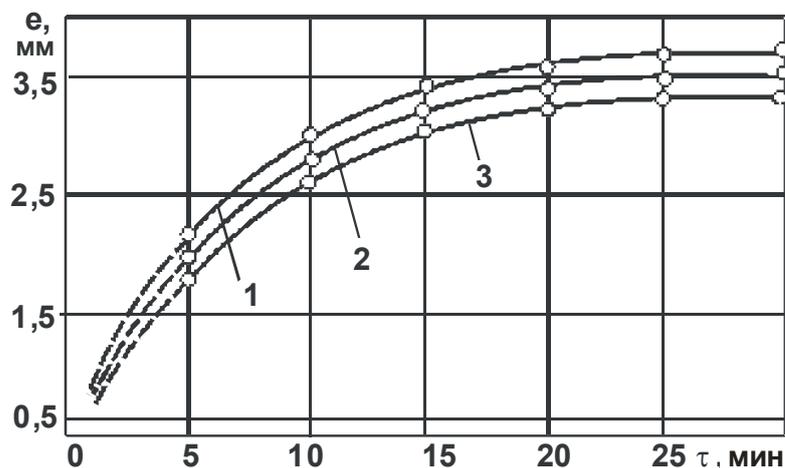


Рис. 3. Зависимость прогиба пластины в результате образования поверхностных напряжений от времени обработки: 1 – титановый сплав ВТ-1 толщиной 0,18 мм; 2 – сталь 65Г толщиной 0,2 мм; 3 – бериллиевая бронза БрБ2 толщиной 0,25 мм

Глубину напряженного (наклепанного) слоя определяли путем его стравливания (признаком удаления наклепанного слоя, а, следовательно, и ликвидации напряжений, является восстановление плоскостности образца по мере стравливания слоя металла). В результате замеров установлено, что толщина слоя на образцах из титанового сплава ВТ-1 и стали 65Г равна 5 мкм, а на образце из бериллиевой бронзы БрБ2 равна 6 мкм. Таким образом, можно считать, что глубина наклепанного слоя для различных материалов приблизительно одинакова. Используя полученные данные, по зависимости (1) определено среднее значение напряжения в наклепанном слое для образца из стали 65Г, которое равно  $\sigma_{cp} = 35,29 \text{ Н/мм}^2$ . Аналогично определены средние значения напряжения в наклепанном слое для образцов из титанового сплава ВТ-1 и из бериллиевой бронзы БрБ2, которые соответственно равны:  $\sigma_{cp} = 37,81 \text{ Н/мм}^2$  и  $\sigma_{cp} = 32,77 \text{ Н/мм}^2$ .

Как видно, наиболее предрасположены к образованию напряжений титановый сплав ВТ-1 и сталь 65Г. Вместе с тем, из рис. 3 вытекает одинаковая интенсивность приобретения наклепа тремя исследуемыми материалами. Следовательно, в условиях абразивной обработки затопленными струями наблюдается устойчивая тенденция к образованию сжимающих напряжений, повышающих твердость, прочность на изгиб и продольную устойчивость деталей. При этом по мере увеличения продолжительности обработки не возникает перенаклеп и не снижается металлосоём, что можно объяснить стабильностью ударов абразивных зерен об обрабатываемую поверхность под острым углом.

Из рис. 3 следует, что с увеличением времени обработки до 20–25 минут прогиб пластинки непрерывно увеличивается, а затем фактически остается неизменным. Это свидетельствует о стабилизации параметров процесса через 20 – 25 минут обработки. Таким образом, экспериментально установлено, что при абразивной обработке затопленными струями в поверхностном слое обрабатываемой детали возникают благоприятные сжимающие напряжения. Это

указывает на преобладание силового фактора над тепловым фактором в процессе обработки и свидетельствует о высоком качестве обрабатываемых поверхностей.

Дополнительным подтверждением времени формирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей являются результаты измерений микротвердости (по Виккерсу) поверхностей деталей из различных материалов до и после обработки на микротвердомере ПМТ-3. Замеры микротвердости выполняли с помощью алмазной пирамиды с выдержкой нагрузки 1,5 Н в течение 15 с. На каждом образце производили по 10 измерений. Поэтапное изменение микротвердости деталей из алюминия АД, латуни ЛС59.1, латуни Л63, стали Ст3, стали 65Г (рис. 4) завершается через 20–25 мин, и далее стабилизируется на разных уровнях в зависимости от предрасположенности материалов к наклепу. Из графиков, приведенных на рис. 4, видно, что наиболее восприимчивыми к наклепу в процессе абразивной обработки затопленными струями из рассмотренных материалов являются алюминий АД и сталь 65Г.

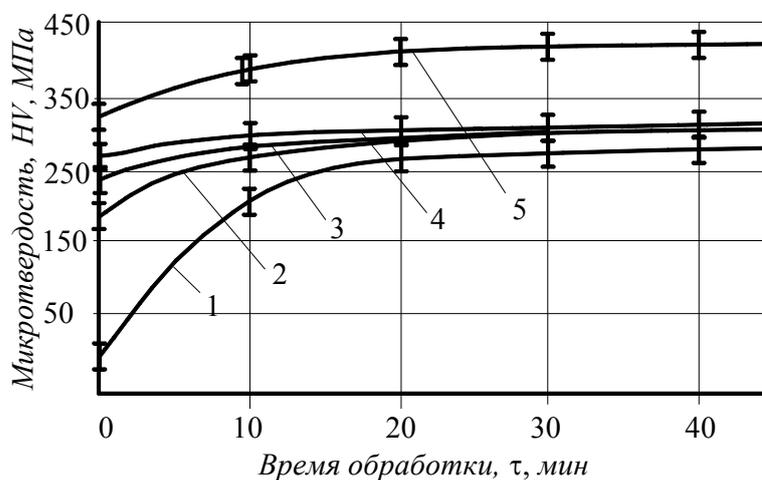


Рис. 4. Зависимость микротвердости (по Виккерсу) деталей от времени их обработки: 1 – алюминий АД; 2 – латунь ЛС59.1; 3 – латунь Л63; 4 – сталь Ст3; 5 – сталь 65Г

При изучении формообразования поверхности в процессе абразивной обработки затопленными струями особого внимания требует изучение механизма скругления острых кромок и удаления заусенцев.

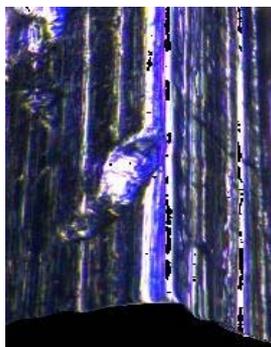


Рис. 5. Фотография кромки одного из торцов листовой детали.  $\times 850$

На рис. 5 представлена фотография кромки одного из торцов листовой детали, обработанной абразивным методом затопленными струями: на кромке (ребре) след абразивного зерна. Кромка является результирующей 20 снимков со смещением резкости от вершины кромки по 1–2 мкм в глубину изображения. Кромка (ребро) детали, находившейся в рабочей камере в течение 5–7 секунд, была расположена на столе микроскопа так, что обе грани, приле-

гающие к ребру, составляли по  $45^\circ$  к плоскости стола микроскопа. Эта деталь не имеет заусенцев, однако нуждается в скруглении острых кромок. На рис. 5 видно, что одно абразивное зерно оставило свой след на кромке, с чего и начался процесс ее скругления.

Необходимо отметить, что в отличие от следов абразивных зерен, которые образуются при обработке плоской поверхности, при обработке кромки детали след абразивного зерна имеет четко выраженную форму, фактически отсутствуют навалы деформированного металла по обе стороны и впереди следа. Иными словами, кинетической энергии движущегося абразивного зерна достаточно для образования полного микросреза, тогда как при обработке плоской поверхности детали образуются, как правило, неполные срезы, а движущиеся абразивные зерна фактически теряют свою кинетическую энергию и останавливаются в обрабатываемом металле. Из этого можно сделать вывод о том, что при обработке кромки детали энергоемкость процесса меньше, чем при обработке плоской поверхности, и поэтому интенсивность съема металла в этом случае больше. Подтверждением тому является приведенные на рис. 6 фотографии кромок деталей со следами абразивных зерен на кромках, на которых видны четкие полные микросрезы, что свидетельствует о высоком качестве обработки кромок детали. Глубина резкости в данном случае получена в результате программной обработки 20 фотоснимков.

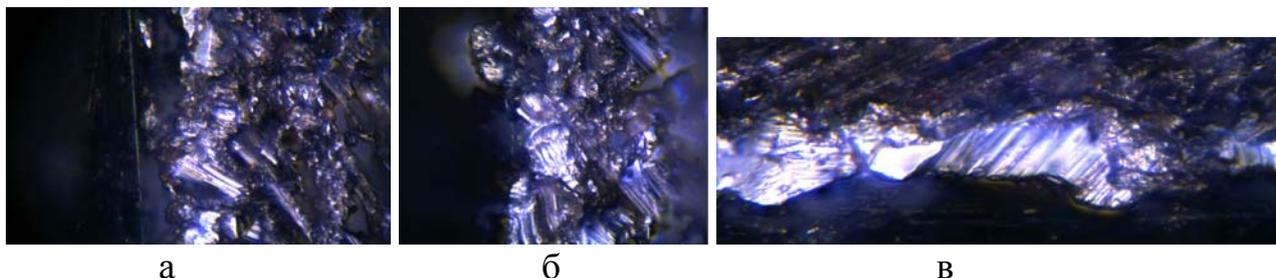


Рис. 6. Фотографии фрагментов кромки листовой латунной детали со следами абразивных зерен: а)  $\times 500$ ; б)  $\times 650$ ; в)  $\times 850$

При обработке деталей в свободном (незакрепленном) состоянии наиболее уязвимыми для разрушения оказываются заусенцы, так как они не защищены полупространством с двух противоположных сторон, а в перпендикулярном направлении имеют, в качестве защиты, такие же легкоразрушаемые заусенцы. Общеизвестно, что заусенцы на мелких листовых штампованных деталях образуются из-за зазоров между пуансоном и матрицей штампа. Причем, чем больше толщина и зазор, тем толще и выше заусенец. При зазоре, равном толщине штампуемого металла, осуществляется загиб металла. Поскольку данный метод обработки не обладает бесконечными возможностями съема металла, необходимо ограничить величину допустимых заусенцев при абразивной обработке затопленными струями. Ограничение устанавливали, руководствуясь средней длиной следа абразивного зерна на обрабатываемой поверхности, полученной на основании аналитических выводов, и путем замера следов, полученных съемкой под микроскопом. Она составляет  $0,03 - 0,04$  мм. Указанный диапазон

значений является наиболее предпочтительным для обработки деталей с шириной в основании заусенца, не превышающей 0,04 мм. Высота заусенца – это величина, зависящая от его ширины, материала штампуемой заготовки, а также от остроты пуансона и матрицы штампа. Как правило, высота заусенца не превышает три его толщины. Обработка деталей с заусенцами, ширина которых больше указанной выше величины, потребует более 30 мин машинного времени.

Особенностью абразивной обработки затопленными струями деталей из листовой штамповки является то, что в отличие от всех известных методов обработки высокие заусенцы сначала загибаются на плоскости, а затем срезаются у основания, т.е. реализуется случай, когда создаются благоприятные по энергоемкости условия обработки с уменьшающейся глубиной микрорезания. Для других методов обработки характерно загибание заусенцев в отверстия, пазы и на торцы из-за «пакетирования» плоских деталей. Эта особенность метода абразивной обработки затопленными струями позволяет решать проблемы зачистки от заусенцев узких пазов, в которых должны перемещаться без зазоров и заеданий стержни или втулки.

Стабильность хода процесса абразивной обработки затопленными струями в значительной мере зависит от постоянства количества и качества всех технологических и конструктивных параметров. Иными словами, необходимо сохранить: диаметр сопел, давление сжатого воздуха, а, следовательно, расход сжатого воздуха, размер зерен, количество абразивного материала и количество жидкой составляющей абразивной суспензии. На рис. 7 показан характер изменения основных параметров обработки за время работы установки (2,5 часа), что в 5 раз превышает время осуществления одной технологической операции.

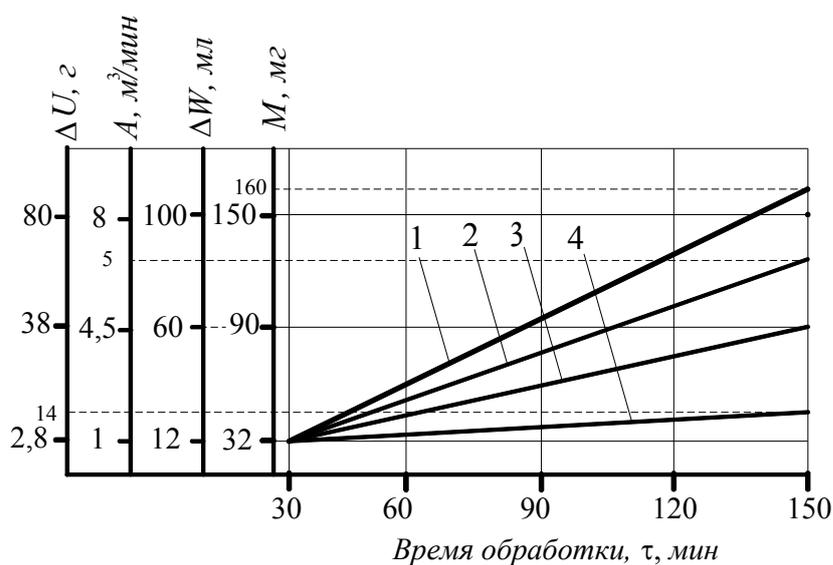


Рис. 7. Зависимости съема металла  $M$  (1), износа абразива  $\Delta U$  (2), расхода сжатого воздуха  $A$  (3) и уноса жидкости  $\Delta W$  (4) от времени абразивной обработки затопленными струями

Производилась обработка деталей из латуни ЛС59.1 при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа. Приведенные на рис. 7 графики указывают на высокую

стабильность основных параметров процесса обработки, поскольку отклонения, выражающиеся в снижении съема металла и увеличении расхода сжатого воздуха, отсутствуют. Отклонения, связанные с износом абразива за время операции (30 мин), составляют 0,5– 0,7 %, а с уносом жидкости – 2 %. Этим показано, что данный метод обработки, в отличие от известных методов струйно-абразивной обработки, за счет исключения износа сопел позволяет стабилизировать во времени основные параметры обработки.

**Список литературы:** 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 177 с. 2. Шманев В. А. Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1995. – 143 с. 3. Исупов М. Г. Разработка, исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 Технология машиностроения / Исупов Максим Георгиевич. – М.: РГБ, 2007. – 432 с. 4. Зверев Е. А. Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление покрытий / Е. А. Зверев // Материаловедение: сб. науч. тр. – Новосибирск: Новосибир. гос. техн. ун-т, 2008. – № 2 (52). – С. 109–114. 5. Цыгановский А. Б. Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вибрации в технике и технологиях. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – № 2(58). – С. 205–215. 6. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 7. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.

УДК 621.923

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУЖКИ ПРИ ПЛОСКОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Стрельчук Р.М., канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The article presents the research of parameters of chips for flat diamond grinding. The research results can be used grinding in a mathematical model for calculating the cutting forces, the machined surface roughness*

Сведения о размерах единичных срезов, образующихся при шлифовании, необходимы для расчетов нагрузки на единичном зерне, параметров шероховатости обработанной поверхности, температур в зоне обработки, в связи с чем исследуемый вопрос является весьма актуальным для теории шлифования. В силу особенностей рабочей поверхности круга (РПК), заключающихся в отличии геометрических параметров отдельных зерен, их размеров и ориентации, с обрабатываемой поверхности удаляются срезы самых различных конфигураций и размеров. Соответственно при шлифовании образуются и различные виды стружек. В основе их классификации используется форма стружек (ленточная, запятообразная, сегментообразная, промежуточная [1]; волнистая и сферическая [2]), а также особенность их образования (сливная, скалывания, с оплавом, оплавленная, со спеком и спекшаяся [3]). Вместе с тем данные о сопоставлении параметров срезов и стружек в литературе отсутствуют.

Целью работы является оценка сопоставимости параметров среза и пара-

метров стружки, образующейся при алмазном шлифовании.

Поскольку размеры стружек в результате пластических деформаций, происходящих в процессе резания, отличаются от размеров срезов на коэффициент продольной усадки стружки, при сопоставлении статистических характеристик размеров срезов и стружек будем учитывать значение коэффициента усадки.

Исследованию подвергали стружки, полученные при плоском шлифовании образца из стали Р6М5Ф3 периферией круга 1А1 250×16×75×5 АС6 160/125-4-М2-01 на модернизированном станке модели ЗД642Е. Перед экспериментом шлифовальный круг подвергали электроэрозионной правке, а затем прирабатывали в течение 30 минут. Правящий электрод представлял собой брусок из меди М1, обеспечивающий длину контакта с РПК 30 мм. Режимы правки: скорость круга 30 м/с, вертикальная подача (0,005...0,007) мм/ход, что обеспечивало силу тока (7...8) А, поперечная подача - ручная. Режимы шлифования: скорость круга 30 м/с, скорость детали 6 м/мин, поперечная подача 2,5 мм/ход, глубина шлифования 0,015 мм. Охлаждающей жидкостью являлся 0,3 %-ный водный раствор кальцинированной соды. Обрабатываемый образец размерами 60×40 мм был установлен на магнитной плите стола.

Динамика процесса шлифования характеризовалась частотой радиальных колебаний 37 Гц с амплитудой 0,9 мкм. Колебания с более высокой частотой в силу низкой амплитуды (менее 0,5 мкм), значительно меньшей параметров шероховатости обработанной поверхности, не учитывали. Сбор стружки осуществляли в специально изготовленную емкость, которую устанавливали на магнитную плиту вплотную к шлифуемому образцу. Собранную стружку извлекали из емкости, просушивали, размагничивали и укладывали на поверхность подложки. Подложку с исследуемыми стружками устанавливали на предметном столике 1 микротвердомера ПМТ-3 (рис. 1, а, б).

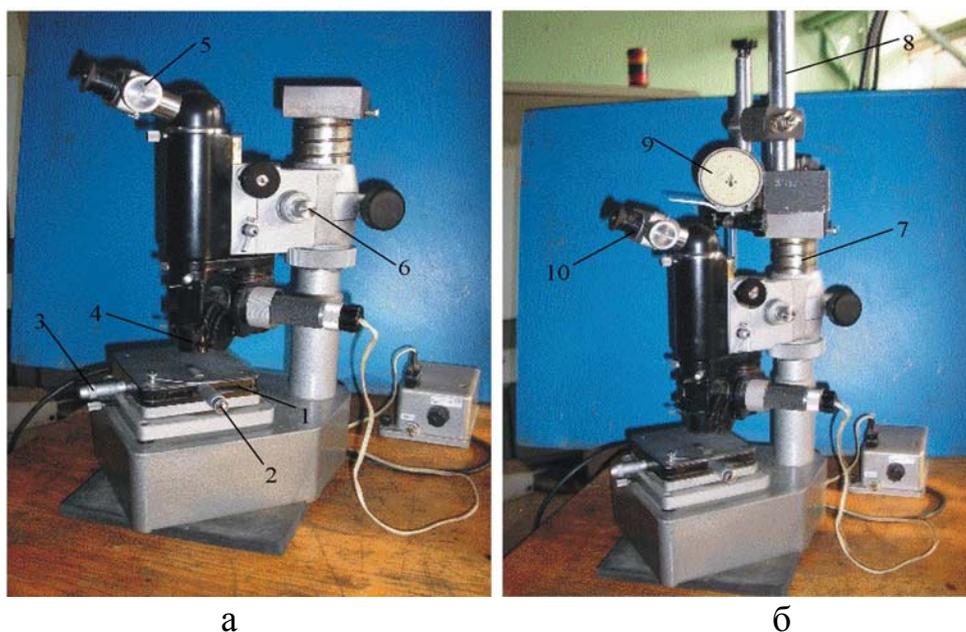


Рис. 1. Измерение ширины стружки с помощью микрометрического винта тубуса микротвердомера ПМТ-3 (а) и с помощью отдельного микрометра (б)

Цена деления лимбов на винтах продольного 2 и поперечного 3 перемещений предметного столика составляла 0,01 мм. Информация о координатах расположения подложки со стружками на предметном столике позволяла, при необходимости, повторно найти стружки для исследования и фотографирования. Измерение толщины, ширины и длины стружек проводили с помощью оптического устройства микротвердомера ПМТ-3 при увеличении 520 раз, которое обеспечивается объективом 4 ( $F = 6,2$ ;  $A = 0,65$ ). Измерение толщины стружек производили с помощью лимба окулярного микрометра 5, цена деления которого –  $0,3 \cdot 10^{-3}$  мм. Ширину стружек измеряли с помощью микрометрического винта перемещения тубуса 6 с ценой деления 0,002 мм (рис. 1,а). Для повышения точности измерений на стойке 7 микротвердомера ПМТ-3 закрепляли площадку, на которую устанавливали магнитную стойку 8 с микрометром 9 с ценой деления 0,001 мм (рис. 1,б).

Для измерения длины прямолинейных коротких стружек использовали лимбы микрометрических винтов координатного перемещения предметного столика с ценой деления 0,01 мм. Для измерения длины криволинейных стружек в окуляр микроскопа 10 устанавливали сетку (размер клетки  $0,5 \times 0,5$  мм), закрывающую 50 % поля окуляра (рис. 2). При аттестации прибора с увеличением в 520 раз параметры ячейки составили  $0,015 \times 0,015$  мм. Измерение параметров стружек осуществляли следующим образом.

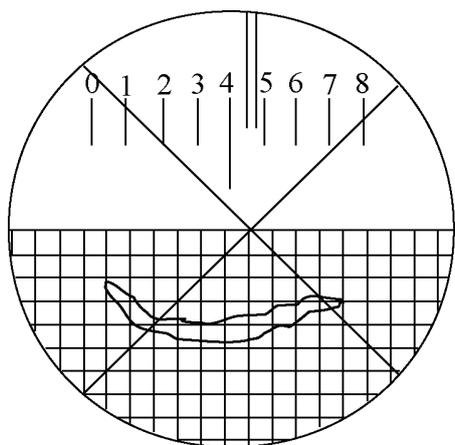


Рис. 2. Вид поля окуляра при измерении длины криволинейной стружки с помощью сетки

При измерении толщины стружки находили контуры стружки справа и слева в том же сечении, в котором измеряли и ширину, и по разности показаний лимба окулярного микрометра определяли толщину стружки.

При измерении ширины стружки фокусировку оптической системы производили вначале на подложку, а затем на наивысшую точку стружки в данном сечении. Разность двух отсчетов, снятых с лимба винта микрометрического движения тубуса при фокусировке на подложку и наивысшую точку сечения стружки, принимали за ширину стружки. Длину криволинейных стружек измеряли путем перемещения их в поле окуляра с сеткой и по количеству ячеек, занимаемых изображением стружки, определяли ее

длину. Погрешность измерения длины стружки не превышала половины цены деления сетки, что составляло 5–10 % от длины стружек.

Исследовали выборку из 300 стружек, которую впоследствии подвергали статистическому анализу с целью определения законов распределения исследуемых параметров. Как показали исследования, по форме образовавшиеся стружки можно отнести к ленточным, запятообразным, сегментобразным и дробленным (рис. 3). Запятообразные стружки имеют вид запятой с утолщением на одном конце. Они образуются запятообразными срезами, а также промежу-

точными. Сегментообразные стружки имеют утолщение посередине и образуются сегментообразными срезами. Ленточные стружки также образуются сегментообразными срезами. Дробленые по длине стружки имеют приблизительно одинаковую ширину по всей длине. Они могут быть образованы запытообразными, сегментообразными и промежуточными срезами.

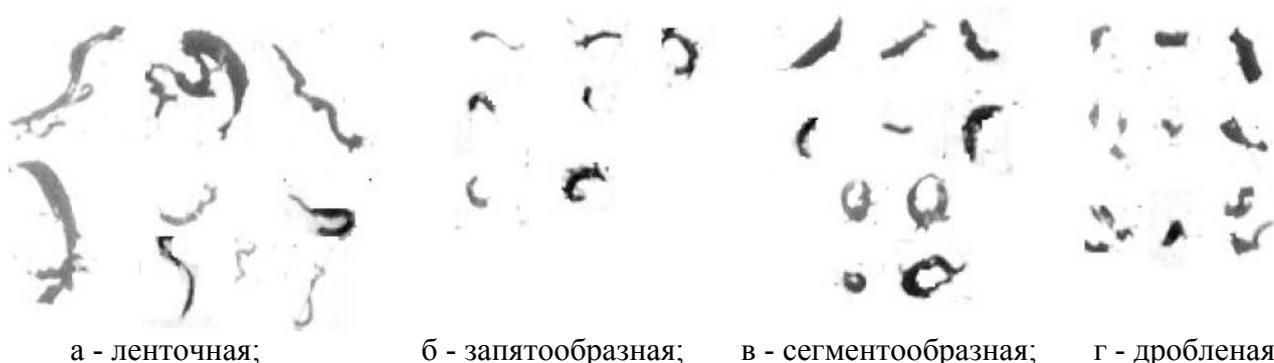


Рис. 3. Виды стружек, образующихся при плоском алмазном шлифовании

Результаты, полученные при измерении стружки, обработаны методами математической статистики. Построены гистограммы распределений толщины и длины стружки (рис. 4). Анализ гистограмм распределений геометрических параметров стружки показывает, что имеет место относительно большой диапазон изменения исследуемых параметров, преобладание мелких стружек.

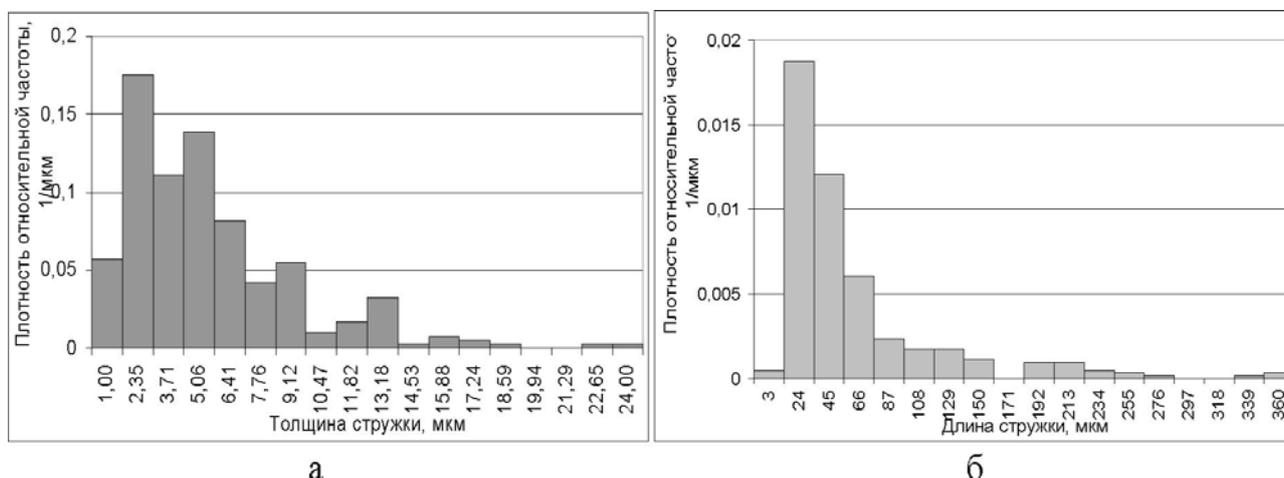


Рис. 4. Гистограммы распределений толщины (а) и длины (б) стружек, образовавшихся при плоском врезном шлифовании стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×16×75×5 АС6 160/125-4-М2-01

Средние значения исследуемых параметров стружки, определенные экспериментально, составили: длина  $52,59 \pm 3,42$  мкм, ширина  $11,89 \pm 0,49$  мкм, толщина  $4,93 \pm 0,21$  мкм. Геометрические параметры срезов, рассчитанные на базе математической модели шлифования [4], следующие: длина  $972,37 \pm 125,09$  мкм, толщина  $3,25 \pm 1,90$  мкм. Для сопоставления параметров стружек по параметрам срезов, определенным на базе математической модели, и параметров

стружек, полученных экспериментально, воспользуемся коэффициентом усадки, равным 1,5 [5]. Тогда расчетные параметры стружек, составят: длина  $648,24 \pm 83,39$  мкм, толщина  $4,88 \pm 2,85$  мкм. Приведенные данные показывают значительное расхождение сопоставляемых рассчитанных по срезам и экспериментально полученных длин стружек (практически в 12 раз), что объясняется, по моему мнению, дроблением стружек по длине.

В расчетах выходных показателей процесса шлифования основное влияние оказывает толщина среза, которая, как показывает сравнение, попадает в 95 %-ный доверительный интервал, что говорит об отсутствии влияния сравниваемых способов определения параметров стружки на их величину.

Таким образом, параметры единичного среза, определенные с помощью математической модели шлифования, можно использовать для расчета сил резания, параметров шероховатости обработанной поверхности.

**Выводы.** 1. Средняя толщина стружек, определенная экспериментально, составляет  $4,93 \pm 0,21$  мкм, что сопоставимо со средней толщиной стружек, равной  $4,88 \pm 2,85$  мкм, которая рассчитана по толщине среза на базе математической модели шлифования.

2. Параметры срезов, определенные с помощью математической модели, можно использовать для расчетов параметров шероховатости обработанной поверхности, сил резания и т.п.

**Список литературы:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 316 с. 2. Huges F.H. Talking diamond grinding. Pat 5. Tooling, 1978, Feb. 3-21. 3. Лурье Г.Б. Устройство шлифовальных станков / Г.Б. Лурье, В.Н. Комиссаржевская. – М.: Высшая школа, 1983. – 215 с. 4. Азарова Н.В. Математическая модель плоского врезного шлифования с вибрациями / Н.В. Азарова // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – № 1. – С. 119–123. 5. Байкалов А.К. Геометрические параметры стружки при шлифовании и притирке ЭВМ / А.К. Байкалов, Т.М. Волкова, Е.И. Вал // Синтетические алмазы, 1972. – № 4. – С. 17–19.

УДК 621.923

## **РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗЕРЕН МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

**Стрельчук Р.М.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця)

*The results of studies and modeling of the size of wheel wear in grinding carbide grains of nanoscale tungsten monocarbide. Designed to wear diamond circles for different combinations of characteristics of circles, cutting and state relief*

В обычных процессах шлифования износ кругов регламентируется периодом стойкости, т. е. временем его работы до засаливания или потери режущей способности. Наступает так называемое «отказное состояние» абразивного ин-

струмента и это обычно связывается с его рабочим циклом [1]. В этих условиях абразивный инструмент с позиции надежности становится наиболее слабым звеном технологической системы обработки.

При алмазно-искровом шлифовании достигается активное самозатачивание рельефа кругов и, как было показано, съём материала во времени практически остается неизменным [2]. Устойчивое состояние рабочей поверхности алмазных кругов в течение длительного периода времени позволяет сделать вывод об их равномерном износе, т.е. понятие стойкости, как показателя надежности при алмазно-искровом шлифовании теряет смысл, и надежность уже не следует, как обычно, рассматривать как временную характеристику качества. Таким образом, из наиболее слабого звена в технологическом процессе шлифования алмазный круг при АИШ превращается в достаточно надежное звено. На основании изложенного появляется возможность при допущении сохранения оптимального устойчивого состояния режущего рельефа круга определить скорость его износа в установившемся режиме шлифования [3].

Экспериментальные исследования проводились на базе универсально-заточного станка модели 3Д642Е, а дополнительная энергия в зону резания вводилась от генератора импульсов НО 6506, преобразующего переменный ток напряжением 380В в униполярный импульсный с регулируемой частотой и величиной тока. В процессе проведения опытов среднее значение тока составляло 4-6 А, напряжение 35-45 В, частота импульсов 22 кГц, скважность 2, при этом алмазный круг служил анодом, а обрабатываемый материал – катодом (обратная полярность). Охлаждающей жидкостью служил 3%-й водный раствор соды. Скорость резания на станке составляла  $V=20$  м/с. Нормальное давление изменялось приспособлением для упругого шлифования в диапазоне от 1,2 до 2,0 МПа с интервалом 0,4 МПа.

Применялась торцовая схема шлифования, которая осуществлялась чашечными кругами конической формы 12А2-45° 150x10x3x32 (ГОСТ 16172-80) производства Полтавского завода искусственных алмазов на связке М1-01 с алмазными зернами АС6, диапазоном зернистости 50/40...160/125 и концентрации – 4. При определении работоспособности алмазные круги предварительно правились и прирабатывались в течении 5–10 минут. В качестве обрабатываемого материала использовались наноструктурные твердосплавные пластины «ВолКар», представляющие собой геометрическую фигуру типа диска диаметром 20 мм и толщиной 5 мм. Для проведения экспериментальных исследований пластинам придавалась форма квадрата с размером 14x14 мм. Размерный износ круга измерялся с помощью специального приспособления (рис. 1) непосредственно на рабочем месте.

Приспособление представляет собой текстолитовый диск, на одном торце которого по окружности с помощью эпоксидного клея прикреплены твердосплавные пластинки, которые после их крепления были доведены на плоскошлифовальном станке. В осевом отверстии приспособления с помощью винта устанавливается индикатор часового типа с ценой деления 0,001мм. Износ круга измерялся от постоянной базы, что достигалось установкой круга по риске

до и после опыта, ножка индикатора при этом упирается в головку крепежного болта, поверхность которого и служит базой при измерении. Износ высчитывался как среднее 3-х измерений до и после проведения эксперимента. Температура корпуса алмазного круга до и после опыта обязательно соответствовала температуре окружающей среды.

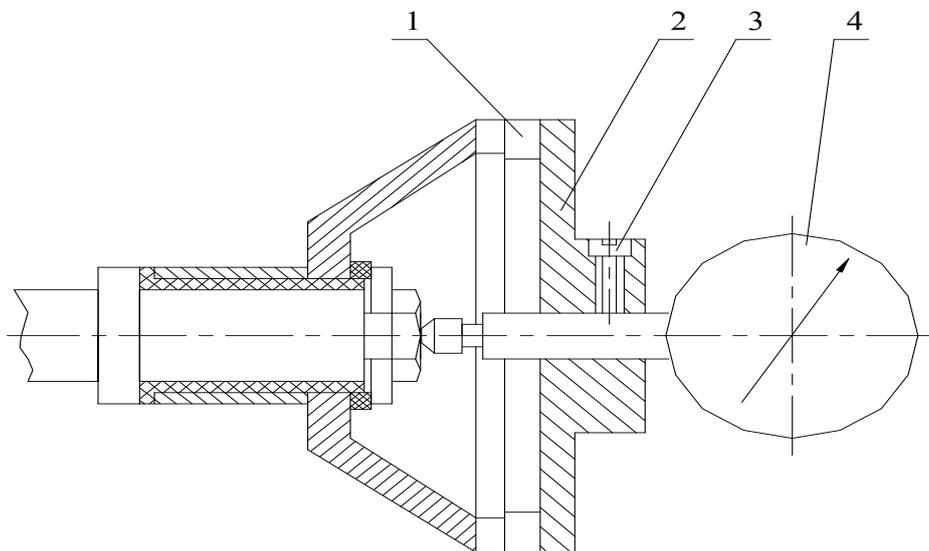


Рис. 1. Приспособление для измерения износа круга: 1 – пластинки из твердого сплава; 2 – корпус; 3 – винт; 4 – индикатор часового типа

При помощи математической программы «Maple» были рассчитаны значения объема износа алмазных зерен на  $1 \text{ мм}^2$  рабочей поверхности в расчете на 1 оборот круга  $V_u$ ,  $\text{мкм}^3$ , суммарная площадь условных поверхностей износа зерен  $F_u$ ,  $\text{мкм}^2$ , и значения размерного износа кругов за 10 минутный промежуток времени его работы  $\mu^{10}$ ,  $\text{мкм}$ , при шлифовании наноструктурного твердого сплава «ВолКар».

Произведены расчеты значений объема износа алмазных зерен на  $1 \text{ мм}^2$  режущей поверхности круга за 1 оборот круга  $V_u$ ,  $\text{мкм}^3$ , суммарной площади поверхностей износа этих зерен  $F_u$ ,  $\text{мкм}^2$ , и размерного износа круга за 10 минутный промежуток времени его работы  $\mu^{10}$ ,  $\text{мкм}$ . Установлено, что с увеличением нормального давления размерный износ кругов возрастает. Это в большей степени связано с ростом объема износа  $V_u$  особенно для мелкозернистых кругов. Например, для кругов зернистостью 50/40 при увеличении нормального давления с 1,2 МПа до 2,4 МПа  $V_u$  возрастает в 2,2 раза, а суммарная площадь износа  $F_u$  в 1,2 раза. Для кругов зернистостью 160/125 при том же интервале значений нормального давления  $V_u$  увеличивается в 1,2 раза, а  $F_u$  изменяется незначительно с возрастанием всего в 1,09 раза.

При анализе полученных результатов четко прослеживается тот факт, что для любой из рассмотренных зернистостей алмазного круга с ростом нормаль-

ного давления суммарная площадь износа  $F_u$  изменятся весьма незначительно. Это свидетельствует с одной стороны об активной возобновляемости режущей поверхности, с другой стороны – об устойчивости рельефа при шлифовании. В связи с полученными результатами расчета износа алмазных кругов для различных условий шлифования, представляет интерес сравнение их с экспериментальными данными, которые рассматриваются в работе [4].

Для сравнительной оценки рассмотрим три конкретных примера. При шлифовании твердого сплава «ВолКар» со скоростью резания  $V=25$  м/с и нормальном давлении  $P=1,6$  МПа алмазным кругом зернистостью 100/80, концентрацией 4 размерный износ за 10 минут работы составил  $\Delta S=54,5$  мкм; а значение расчетного износа для тех же условий обработки составляет  $\mu=44,5$  мкм. При шлифовании твердого сплава «ВолКар» со скоростью резания  $V=25$  м/с и нормальном давлении  $P=1,6$  МПа алмазным кругом зернистостью 100/80, концентрацией 4 размерный износ за 10 минут работы составил  $\Delta S=54,5$  мкм; а значение расчетного износа для тех же условий обработки составляет  $\mu=44,5$  мкм. Шлифование тем же алмазным кругом с нормальным давлением  $P=1,2$  МПа и скоростью резания  $V=15$  м/с по результатам экспериментов сопровождалось износом  $\Delta S=41,5$  мкм; при этом расчетные значения износа было получено  $\mu=35,6$  мкм.

Шлифование мелкозернистым алмазным кругом 50/40 и сравнение с расчетными данными также показало незначительное расхождение результатов. При проведении экспериментов со скоростью резания  $V=25$  м/с и нормальном давлении  $P=1,2$  МПа износ составил  $\Delta S=39,3$  мкм; а в результате выполненных расчетов получено  $\mu=45,5$  мкм.

Таким образом, результаты расчета показывают вполне приемлемую сопоставимость с экспериментальными данными. Процент расхождения в приведенных выше примерах по размерному износу составил от 16–22 %, что, по моему мнению, можно считать достаточно удовлетворительным результатом. Возможности реализации расчета износа алмазных кругов позволяют оценивать его результаты для различных сочетаний характеристик кругов, режимов резания и состояния рельефа. Учитывая, что проведение стойкостных экспериментов по износу алмазных кругов связано со значительными издержками – длительными и дорогостоящими опытами, расходом значительных объемов твердого сплава, в частности «ВолКар», возможности расчетного износа приобретают важное значение.

**Список литературы:** 1. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М.Д. Узунян // Резание и инструмент. – Харьков, 1981. – Вып. 26. – С. 42–48. 2. Узунян М.Д. Работоспособность кругов при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов / М.Д. Узунян, Ю.С. Краснощек // Резание и инструмент. – Харьков, 1980. – Вып. 23. – С. 3–10. 3. Малкин С. Износ алмазных кругов / С. Малкин, Н. Кук // Конструирование и технология машиностроения. Тр. америк. общ-ва инженеров-механиков. Пер. – М.: Мир, 1971. – № 4. – С. 237–252. 4. Стрельчук Р.М. Исследование и анализ производительности обработки при шлифовании наноструктурных твердых сплавов / Р.М. Стрельчук, Ш.К. Джха // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 1(22). – С. 275–280.

## ЧИСЛЕННЫЙ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кленов О.С., канд. техн. наук  
(Фирма “ДиМерус Инженеринг” ООО, г. Харьков)

*Numerical and analytical calculations of thermal process parameters for machining of machine parts. It was shown that due to lower cutting temperatures attained during turning, is less likelihood of occurrence of thermal defects on the treated surface than when grinding is confirmed by practical data*

Температурный фактор при механической обработке деталей машин является определяющим в формировании качества поверхностного слоя обрабатываемой детали, стойкости режущего инструмента и производительности обработки. Поэтому изыскание эффективных путей уменьшения температуры резания и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, а соответственно уменьшения толщины дефектного слоя и исключения образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях, является актуальной задачей технологии машиностроения. Решению данной задачи посвящены многочисленные работы [1-3]. Однако для выработки более действенных технологических решений необходимо установить новые закономерности формирования параметров теплового процесса при механической обработке, включая процессы лезвийной и абразивной обработки.

В работе профессора Якимова А.В. [3] предложен упрощенный, но весьма удобный для анализа теоретический подход к определению температуры резания, состоящий в том, что снимаемый припуск при шлифовании представлен в виде пакета бесконечно тонких адиабатических стержней, расположенных перпендикулярно направлению движения шлифовального круга, которые в процессе обработки перерезаются кругом. Данный подход можно распространить и для анализа теплового процесса, возникающего при лезвийной обработке (точении, фрезеровании и т.д.), что позволит с единых позиций сравнивать различные процессы лезвийной и абразивной обработки.

Необходимо отметить, что первоначально в расчетах не учитывалось перерезание адиабатических стержней шлифовальным кругом. Дальнейшие исследования показали, что это вносит существенные упрощения в закономерности формирования температуры резания. Поэтому в работах [4, 5] предложены новые теоретические решения, связанные с учетом перерезания адиабатических стержней шлифовальным кругом в процессе шлифования. Настоящая работа является дальнейшим развитием этих работ, для чего рассмотрена аналитическая зависимость для определения глубины проникновения тепла в адиабатический стержень предложено использовать зависимость [5]:

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau$ , где

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала обрабатываемой детали, Вт/м·К;  $c$  – удельная теплоемкость материала обрабатываемой детали, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала обрабатываемой детали, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время контакта движущегося шлифовального круга с торцевой поверхностью адиабатического стержня, с.

С учетом того, что в процессе шлифования происходит перерезание шлифовальным кругом адиабатических стержней, то время нагрева адиабатического стержня  $\tau_n$  будет меньше времени его контакта с шлифовальным кругом  $\tau$ , поскольку часть образующегося тепла будет уходить в стружки, а не в адиабатический стержень. В связи с этим время нагрева адиабатического стержня может быть определено из условия:  $l_{2n} = l_{2(n-1)} + V_{рез} \cdot d\tau$ , где  $l_{2n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}$ ;

$l_{2(n-1)} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_{n-1})}$  – глубина проникновения тепла в адиабатический стержень после условного  $(n-1)$ -го бесконечно малого  $d\tau$  его контакта с кругом, м;  $\tau_n, \tau_{n-1}$  – время нагрева адиабатического стержня после  $n$ -го и  $(n-1)$ -го бесконечно малых  $d\tau$  его контактов с кругом, с. Тогда:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left( \sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right)^2, \quad (1)$$

где  $\alpha = \frac{V_{рез} \cdot d\tau}{l_{2_0}} < 1$ ;

$$l_{2_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau}; \quad V_{рез} \text{ – скорость}$$

перерезания кругом адиабатического стержня, м/с.

Принимая исходные данные для закаленной стали ШХ15: коэффициент температуропроводности  $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{градус})$ ;  $V_{рез} = 3,33 \text{ мм}/\text{с}$ , на рис. 1 приведены расчетные значения  $\tau_n / d\tau$  в зависимости от  $n$  бесконечно малых контактов круга с адиабатическим стержнем для условий  $\alpha = 0,1$  и  $\alpha = 0,2$ . Как видно, с увеличением числа шагов  $n$  расчетные значения

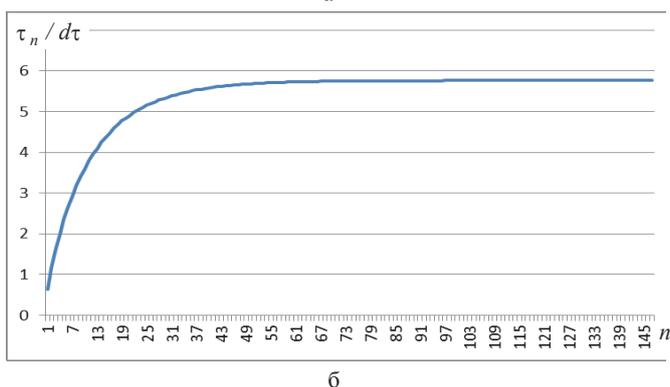
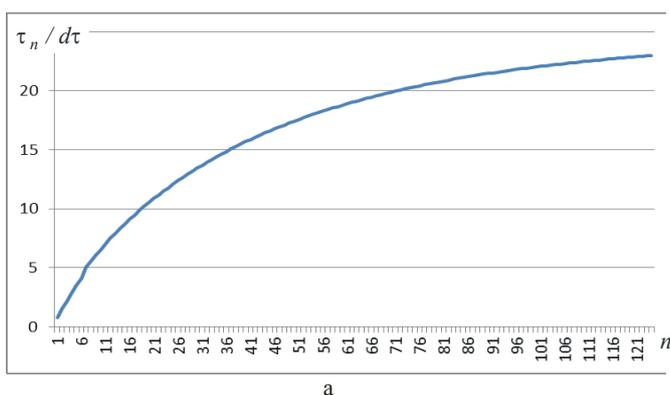


Рис. 1. Расчетные значения  $\tau_n / d\tau$  в зависимости от числа шагов  $n$  для  $\alpha = 0,1$  (а) и  $\alpha = 0,2$  (б)

$\tau_n / d\tau$  непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к определенным установившимся (максимальным) значениям. Расчетами установлено, что  $d\tau = 0,0151 \text{ с}$  для  $\alpha = 0,1$  и  $d\tau = 0,0605 \text{ с}$  для  $\alpha = 0,2$ . Исходя из этого, на рис. 2 при-

ведены расчетные значения  $\tau_n$  для случаев  $\alpha=0,1$  и  $\alpha=0,2$ , полученные путем умножения значений  $\tau_n/d\tau$  (приведенных на рис. 1) на значения соответственно  $d\tau=0,0151$  с и  $d\tau=0,0605$  с. Как видно, расчетные значения  $\tau_n$  аналогично значениям  $\tau_n/d\tau$  с увеличением числа шагов  $n$  непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к установившимся (максимальным) значениям.

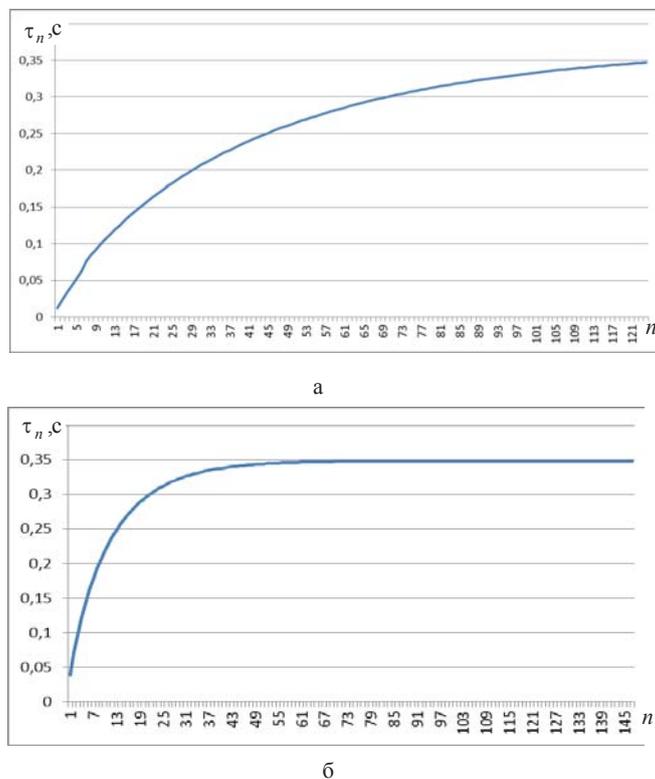


Рис. 2. Расчетные значения  $\tau_n$  в зависимости от  $n$  для  $\alpha=0,1$  (а) и  $\alpha=0,2$  (б)

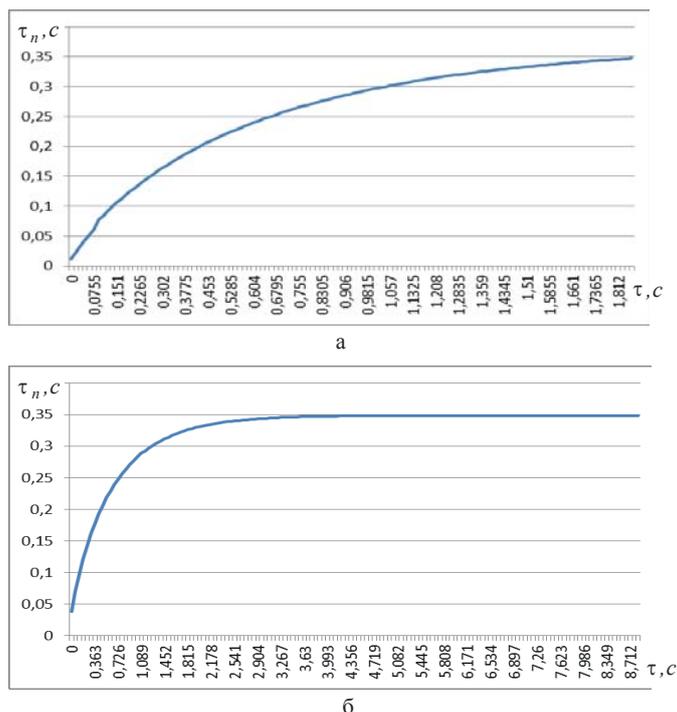


Рис. 3. Расчетные значения  $\tau_n$  в зависимости от  $\tau$  для  $\alpha=0,1$  (а) и  $\alpha=0,2$  (б)

На рис. 3 показан характер изменения времени нагрева адиабатического стержня  $\tau_n$  от времени контакта круга с адиабатическим стержнем  $\tau = n \cdot d\tau$ . Как видно, с увеличением времени  $\tau$  время  $\tau_n$  изменяется аналогично зависимости  $\tau_n$  от  $n$  (рис. 2).

На рис. 4 приведены расчетные значения отношения  $\tau_n / \tau$  в зависимости от времени  $\tau$ : чем больше  $\tau$ , тем меньше отношения  $\tau_n / \tau$ . Причем, для случая  $\alpha=0,2$  отношение  $\tau_n / \tau$  принимает меньшие значения, чем для случая  $\alpha=0,1$ . Поскольку уменьшение величины  $d\tau$  позволяет получить более точные значения  $\tau_n$  и  $\tau_n / \tau$ , то очевидно, случай  $\alpha=0,1$  более точно отражает закономерности изменения этих величин. Поэтому отношение  $\tau_n / \tau$  должно уменьшаться до значения 0,2 (рис. 4,а), а не до значения 0,02, как это следует из рис. 4,б.

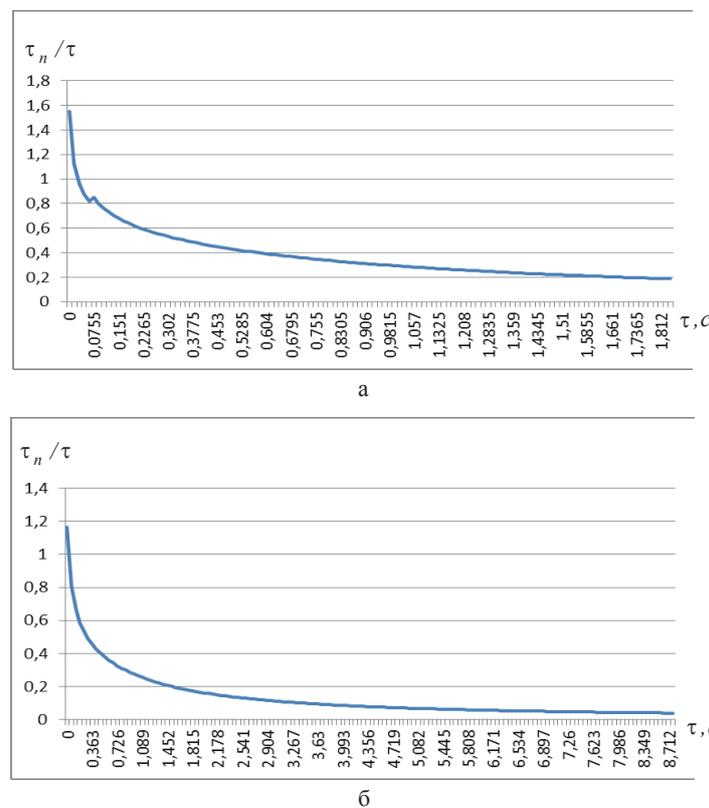
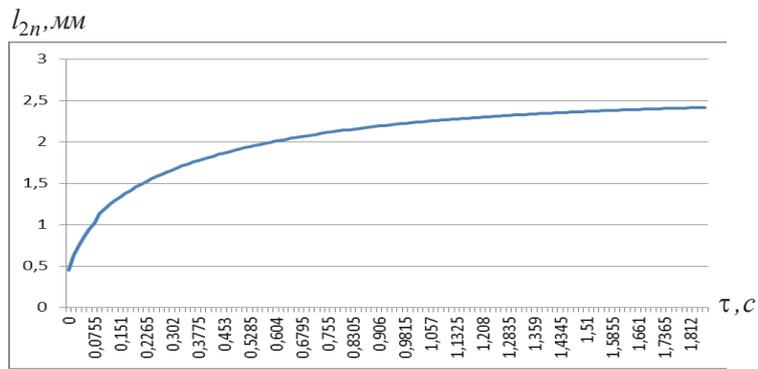
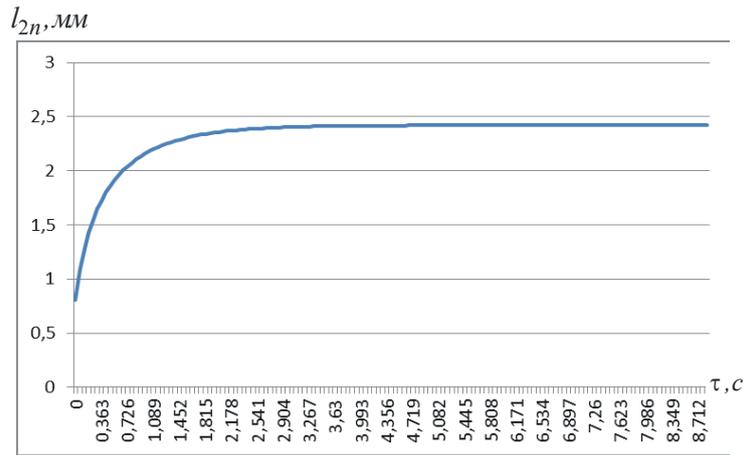


Рис. 4. Расчетные значения  $\tau_n / \tau$  в зависимости от  $\tau$  для  $\alpha=0,1$  (а) и  $\alpha=0,2$  (б)

На рис. 5 приведены расчетные значения глубины проникновения тепла в адиабатический стержень  $l_{2n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_n$ , а на рис. 6 – температуры резания при шлифовании  $\theta = \frac{q \cdot l_{2n}}{\lambda}$ , где  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>. Условное напряжение резания определяется зависимостью [4]:  $\sigma = 2\sigma_{сж} / K_{рез}$ , где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала (для стали ШХ15:  $\sigma_{сж} = 2000$  Н/мм<sup>2</sup>);  $K_{рез} = 0,4$  – коэффициент резания при шлифовании. Тогда  $\sigma = 10000$  Н/мм<sup>2</sup> =  $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

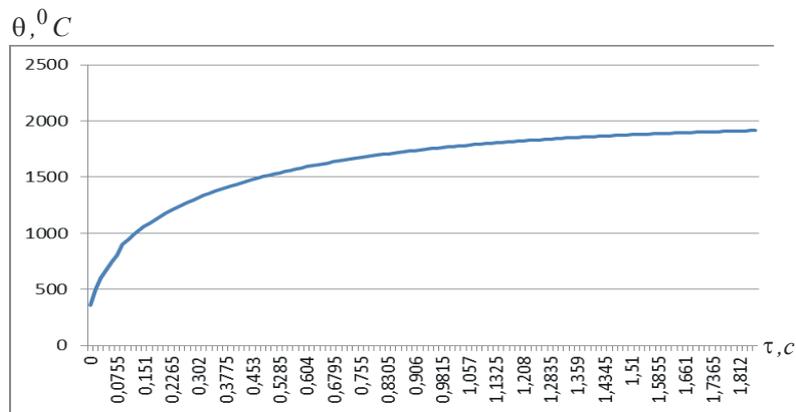


а

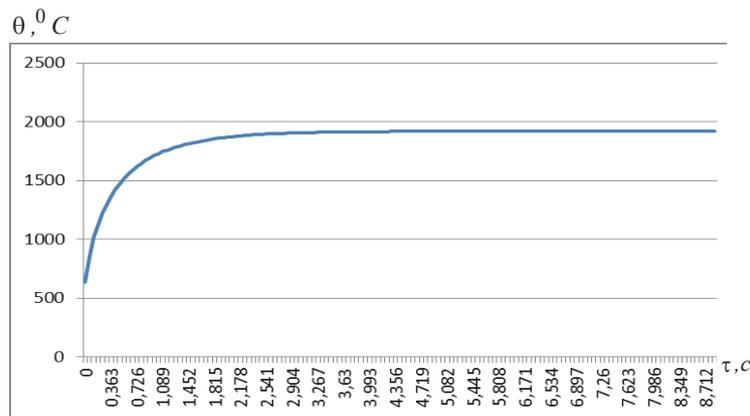


б

Рис. 5. Расчетные значения  $l_{2n}$  в зависимости от  $\tau$  для  $\alpha=0,1$  (а) и  $\alpha=0,2$  (б)



а



б

Рис. 6. Расчетные значения  $\theta$  в зависимости от  $\tau$  для  $\alpha=0,1$  (а) и  $\alpha=0,2$  (б)

Уравнение (1) можно представить в виде интегрального уравнения:

$$d\tau = \frac{d\tau_n}{\left(1 - 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \tau_n\right)}. \quad (2)$$

С учетом нулевого начального условия получено решение интегрального уравнения (2):

$$\tau = -\frac{2}{m} \cdot \sqrt{\tau_n} - \frac{2}{m^2} \cdot \ln(1 - m \cdot \sqrt{\tau_n}), \quad (3)$$

где  $m = 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}}$ .

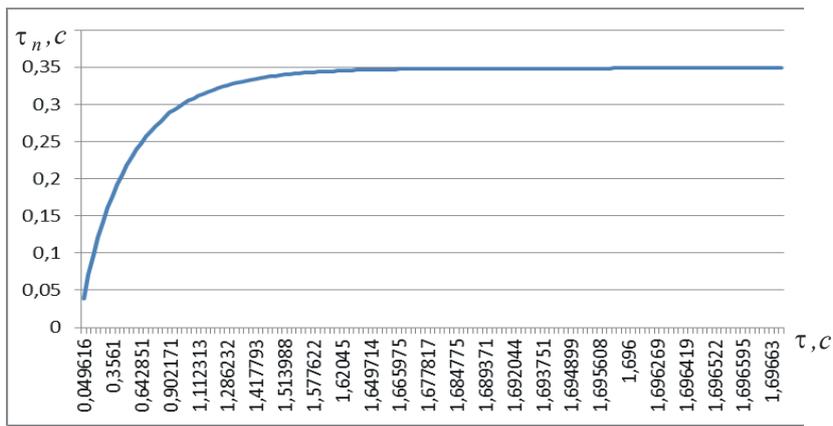
Аналитическое решение (3) увязывает время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем  $\tau$  с временем нагрева адиабатического стержня  $\tau_n$ .

На рис. 7 приведены значения  $\tau_n$ ,  $\tau_n/\tau$ ,  $l_{2n}$  и  $\theta$ , рассчитанные на основе зависимости (3), для различных значений  $\tau$ . Полученные расчетные значения  $\tau_n$  и  $\tau_n/\tau$  незначительно отличаются от аналогичных значений, полученных в результате численного расчета для случая  $\alpha=0,1$  (рис. 3,а и рис. 4,а). В случае  $\alpha=0,2$  наблюдается большее расхождение значений  $\tau_n$  и  $\tau_n/\tau$  (рис. 3,б и рис. 4,б). Следовательно, чем меньше безразмерная величина  $\alpha$  и соответственно величина  $d\tau$ , тем выше точность расчетов величин  $\tau_n$  и  $\tau_n/\tau$ . Этим показано, что значения  $\tau_n$  и  $\tau_n/\tau$ , установленные численным (для случая  $\alpha=0,1$ ) и аналитическим методами расчета, отличаются незначительно (менее, чем на 10 %). Это свидетельствует о достоверности разработанной математической модели и возможности применения этих двух методов для расчета величин  $\tau_n$  и  $\tau_n/\tau$ .

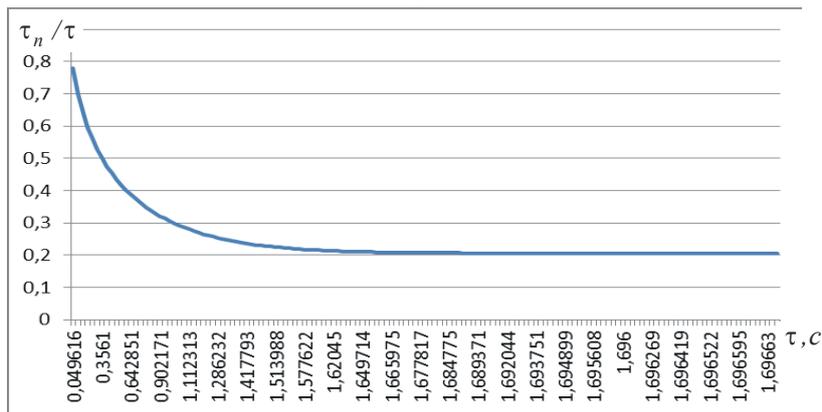
Если принять, что отношение  $\tau_n/\tau=0,2$  (или  $\tau/\tau_n=5$ ), то, согласно зависимости  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau$ , в которой вместо времени  $\tau$  необходимо рассматривать время  $\tau_n$ , величина  $l_2$  уменьшится в  $\sqrt{5}=2,24$  раза по сравнению с исходным значением. Этим показано, что величина  $l_2$  в связи с учетом перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня в среднем уменьшается до 2-х раз. Зная величину  $l_2$ , можно прогнозировать возможную толщину дефектного слоя в обрабатываемом материале при шлифовании.

Приведенные в работе аналитические зависимости для определения параметров теплового процесса при шлифовании были использованы для анализа процесса точения.

Скорость перерезания адиабатического стержня при точении определяется:  $V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta$  [5], где  $V$  – скорость резания, м/с;  $\beta$  – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

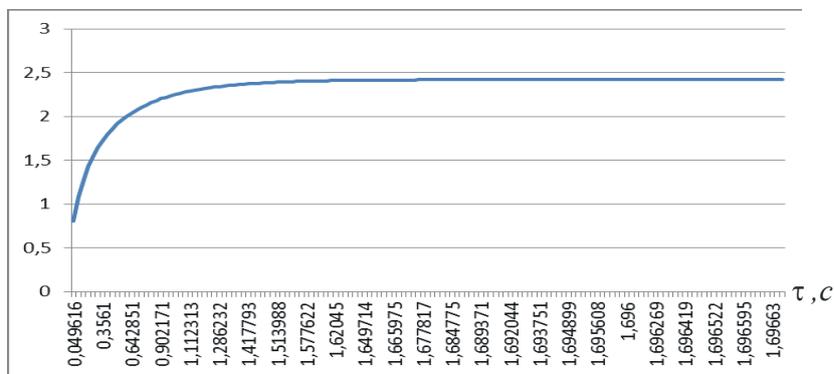


а



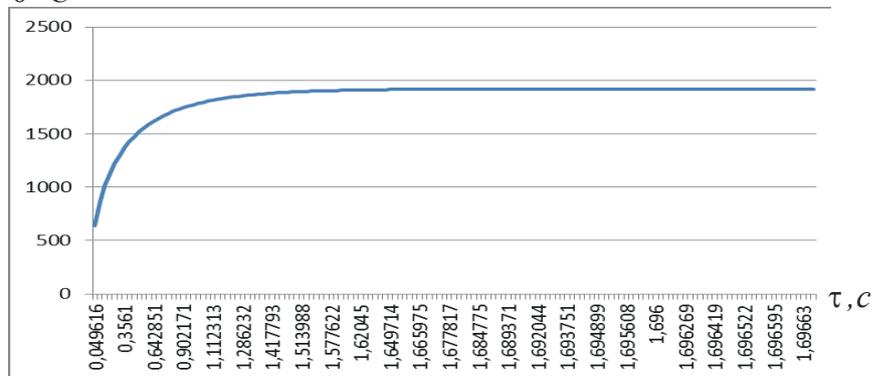
б

$l_{2n}, MM$



в

$\theta^0 C$



г

Рис. 7. Расчетные значения  $\tau_n$  (а),  $\tau_n / \tau$  (б),  $l_{2n}$  (в) и  $\theta$  (г) в зависимости от времени  $\tau$ , полученные из уравнения (3)

Условное напряжение резания определяется зависимостью [4]:  $\sigma = \sigma_{сж} \cdot ctg\beta$ . Тогда с учетом приведенной выше зависимости  $\sigma = 2\sigma_{сж} / K_{рез}$ , имеем:  $K_{рез} = 2 \cdot tg\beta$ . В табл. 1 приведены расчетные значения величин  $\sigma / \sigma_{сж} = ctg\beta$ ;  $\sigma$ ;  $K_{рез} = 2 \cdot tg\beta$ ;  $V_{рез} = V \cdot tg\beta$  в зависимости от условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  для  $\sigma_{сж} = 2000$  Н/мм<sup>2</sup>;  $V = 5$  м/с.

Таблица 1

Расчетные значения  $\sigma / \sigma_{сж}$ ,  $\sigma$ ,  $K_{рез}$  и  $V_{рез}$

$\beta$ , град.	0	10	20	30	40	45
$\sigma / \sigma_{сж}$	$\infty$	5,68	2,75	1,73	1,19	1
$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\infty$	11360	5500	3460	2380	2000
$K_{рез}$	0	0,352	0,728	1,154	1,678	2
$V_{рез}$ , м/с	0	0,85	1,82	2,92	4,2	5

Из табл. 1 следует, что с увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  условное напряжение резания  $\sigma$  уменьшается, а коэффициент резания  $K_{рез}$  при точении, наоборот, увеличивается, принимая при  $\beta \geq 30^\circ$  значения, больше единицы, что соответствует условиям лезвийной обработки (точению). Скорость  $V_{рез}$  с увеличением угла  $\beta$  также увеличивается, принимая при  $\beta = 45^\circ$  наибольшее значение, равное скорости резания  $V$ . С учетом данных, приведенных в табл. 1 для  $\beta = 30^\circ$ , и аналитических зависимостей произведен расчет параметров  $\tau_n$ ,  $l_{2n}$ ,  $\theta$  и отношения  $\tau_n / \tau$  от времени перерезания резцом адиабатического стержня  $\tau$  (табл. 2). Максимальные значения параметров  $\tau_n$ ,  $l_{2n}$  и  $\theta$  для принятых исходных данных равны:  $\tau_n = 0,8 \cdot 10^{-6}$  с;  $l_{2n} = 3,668 \cdot 10^{-3}$  мм;  $\theta = 692^\circ$ .

Таблица 2

Расчетные значения  $\tau_n$ ,  $l_{2n}$ ,  $\theta$  и  $\tau_n / \tau$  в зависимости от времени  $\tau$  при точении

$\tau$ , с	$\tau_n$ , с	$l_{2n}$ , мм	$\theta$ , град	$\tau_n / \tau$
0,00000006	0,00000005	0,000917	172,9947	0,829406
0,00000013	0,0000001	0,001297	244,6515	0,755785
0,00000021	0,00000015	0,001588	299,6357	0,697697
0,00000031	0,0000002	0,001834	345,9895	0,647391
0,00000042	0,00000025	0,00205	386,828	0,60183
0,00000054	0,0000003	0,002246	423,7488	0,559418
0,00000067	0,00000035	0,002426	457,7011	0,519158
0,00000083	0,0000004	0,002593	489,303	0,480341
0,00000102	0,00000045	0,00275	518,9842	0,442397
0,00000124	0,0000005	0,002899	547,0574	0,404804
0,00000150	0,00000055	0,003041	573,7586	0,367006
0,00000183	0,0000006	0,003176	599,2714	0,328312
0,00000226	0,00000065	0,003306	623,7414	0,287689
0,00000288	0,0000007	0,00343	647,287	0,243226
0,00000395	0,00000075	0,003551	670,0057	0,189955

Как следует из табл. 2, параметры  $\tau_n$ ,  $l_{2n}$ ,  $\theta$  принимают значительно меньшие значения, чем при шлифовании, что связано с уменьшением условного напряжения резания  $\sigma$  и времени контакта реза с адиабатическим стержнем  $\tau$  за счет увеличения скорости резания  $V$ . Отношение  $\tau_n / \tau$  остается приблизительно таким же, как и при шлифовании. Следовательно, при точении меньше вероятность возникновения температурных дефектов на обрабатываемой поверхности, чем при шлифовании, что подтверждается практическими данными.

Таким образом, используя полученные аналитические зависимости для определения параметров теплового процесса при шлифовании и точении (которые могут быть применены для различных методов механической обработки), появляется возможность прогнозировать условия обеспечения высококачественной и высокопроизводительной финишной обработки деталей машин.

**Список литературы:** 1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 2. Ящерицын П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 464 с. 3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 5. Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / С.М. Яценко. – Одесса, 2006. – 21 с.

УДК 621.923

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

**Рябенков И.А.**, канд. техн. наук (ГП ХМЗ "ФЭД", г. Харьков)

*The theoretical analysis of the minimum temperature in intermittent cutting grinding, determined from the condition that the working protrusions and recesses discontinuous circle. It is shown that in the course of processing time minimum temperature in intermittent cutting grinding remains unchanged, and in the normal grinding - increases. Therefore, the more interrupts contact with the material being processed range occurs during the passage of a fixed point on the workpiece surface, the greater the effect of the discontinuous grinding as compared with the conventional grinding. It concluded that the efficacy of intermittent creep feed grinding wheels (cutting materials, cutting through the deep grooves, profile grinding, etc.). With the reduction of the contact time of the working range of the projection material decreases the penetration depth of heat into the surface layer of the workpiece and improves the quality of processing*

В 1960-е годы профессор Якимов А.В. предложил новый эффективный способ снижения температуры резания при шлифовании и повышения качества обработки на основе применения шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Благодаря периодичности контакта круга с обрабатываемым металлом происходит охлаждение металла, и температура резания фактически стабилизируется во времени на низком уровне, не достигающим критической

температуры. В результате в поверхностных слоях обрабатываемой детали отсутствуют структурно-фазовые изменения, исключаются прижоги и другие температурные дефекты. Этот метод получил широкое практическое использование при шлифовании труднообрабатываемых материалов. С целью расширения его технологических возможностей в настоящее время в промышленности изготавливаются различные конструкции прерывистых кругов, в том числе и алмазные круги. Вместе с тем, как показывает практика, технологические возможности этих кругов используются не в полной мере, что требует проведения дальнейших исследований.

Прерывистому шлифованию в научно-технической литературе уделено большое внимание. В работах [1,2] приведены теоретические основы прерывистого шлифования, позволяющие аналитически определить оптимальные условия обработки, включая режимы шлифования и конструктивные параметры круга. При этом доказана высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных. В работе [3] приведены результаты исследования температуры резания при шлифовании алмазными прерывистыми кругами материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Работа [4] посвящена оптимизации параметров прерывистого шлифования по критерию наибольшей производительности обработки с учетом ограничений по износу круга и температуре резания. Это позволило рассчитать длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга. Однако при этом не показан характер изменения температуры резания и не определены условия ее уменьшения, что является актуальной задачей при разработке эффективных процессов прерывистого шлифования.

В работе [5] предложен новый подход к определению температуры резания при прерывистом шлифовании. Установлено, что существует экстремум (минимум) температуры резания, при котором длины рабочего выступа и впадины круга равны. Используя это условие, можно обоснованно подойти к определению оптимальных параметров обработки, что является важным решением для технологии машиностроения.

Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при прерывистом шлифовании прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V_{дет0}$  [5]:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дет0} \cdot \left( \sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $l_{01}$ ,  $l_{02}$  – длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $c_m$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Расчетами установлено, что при условии  $l_{01} = l_{02}$  температура резания  $\theta$  принимает минимальное значение:

$$\theta_{min} = \sigma \cdot V_{dem0} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot l_{01}}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \quad (2)$$

С точки зрения уменьшения  $\theta_{min}$  длину рабочего выступа прерывистого круга необходимо уменьшать  $l_{01} \rightarrow 0$ . Однако это приводит к уменьшению количества зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, и повышению износа круга. Поэтому  $l_{01}$  следует уменьшать до определенного значения, определяемого из условия обеспечения допустимого износа круга.

Представляет интерес сравнение температуры резания  $\theta$ , определяемой зависимостью (1), при прерывистом шлифовании и при обычном шлифовании сплошным кругом.

При прерывистом шлифовании в точке экстремума (минимума) температура резания  $\theta_{min}$  множитель  $I = \left( \sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) = 2 \cdot \sqrt{l_{01}}$ . Это означает, что при первом контакте выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом  $l_{01}$  множитель  $I = \sqrt{l_{01}}$ , поскольку впадина круга не участвует в процессе обработки ( $l_{02}=0$ ).

Если к началу второго контакта выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом произойдет его полное остывание, то при втором контакте множитель  $I = 2 \cdot \sqrt{l_{01}}$ . При условии полного остывания обрабатываемого материала после второго контакта, при третьем контакте множитель  $I = 2 \cdot \sqrt{l_{01}}$ , т.е. будет оставаться таким же, как и при втором контакте. При последующих контактах он также не будет изменяться (рис. 1).

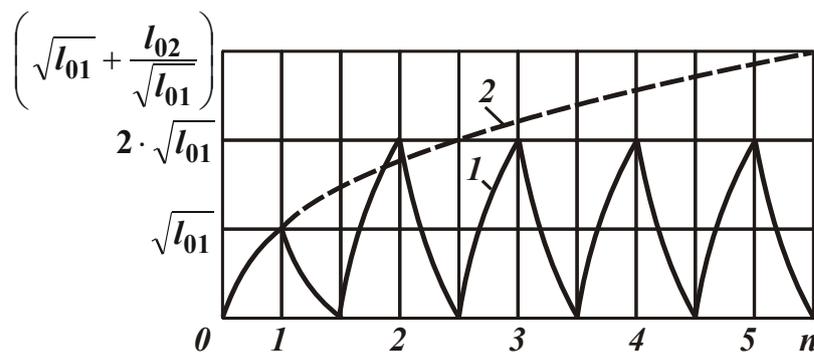


Рис. 1. Характер изменения множителя  $\left( \sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right)$  при прерывистом (1) и обычном шлифовании (2)

При обычном шлифовании сплошным кругом, т.е. при  $l_{02}=0$ , множитель  $I = \sqrt{l_{01}}$ . В данном случае параметр  $l_{01}$  определяет длину контакта круга с обрабатываемым материалом. Следовательно, с увеличением  $l_{01}$  множитель  $I$  будет непрерывно увеличиваться (рис. 1).

Сравнивая графики, приведенные на рис. 1, видно, что при первом контакте выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом  $l_{01}$  множитель  $I$  принимает такие же значения, как и при обычном шлифовании.

При втором контакте множитель  $I$  принимает значение  $I = 2 \cdot \sqrt{l_{01}}$ , а при обычном шлифовании сплошным кругом за это же время –  $I = \sqrt{3 \cdot l_{01}} = 1,73 \cdot \sqrt{l_{01}}$ . Как видно, в данном случае при обычном шлифовании сплошным кругом множитель  $I$  принимает меньшее значение, чем при прерывистом шлифовании. При третьем контакте множитель  $I = 2 \cdot \sqrt{l_{01}}$ , а при обычном шлифовании сплошным кругом за это же время –  $I = \sqrt{5 \cdot l_{01}} = 2,236 \cdot \sqrt{l_{01}}$ . Следовательно, начиная с третьего контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом  $l_{01}$  множитель  $I$  становится меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом.

Для более полного представления характера изменения минимальной температуры резания  $\theta_{min}$  при прерывистом шлифовании необходимо зависимость (1) представить в виде, справедливом для условия  $n \geq 2$ :

$$\theta_{min} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(2 \cdot n - 1) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество рабочих выступов прерывистого круга при условии  $l_{01} = l_{02}$ .

Входящий в знаменатель подкоренного выражения зависимости (3) множитель  $2 \cdot n - 1$  определяет, во сколько раз уменьшается время контакта круга с материалом в связи с прохождением впадины прерывистого круга длиной  $l_{02}$ . После преобразований зависимости (3) при условии  $l_{01} = l_{02}$  получено:

$$\theta_{min} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{[0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)] \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)}}, \quad (4)$$

где  $\theta_0 = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}$  – температура резания при обычном шлифовании.

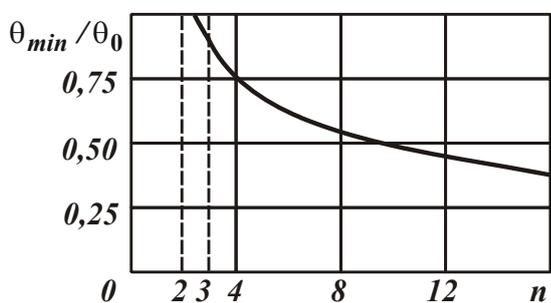


Рис. 2. Зависимость  $\theta_{min} / \theta_0$  от  $n$

С увеличением множителя  $0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)$  (за счет увеличения  $n > 2$ ) температура резания при прерывистом шлифовании  $\theta_{min}$  уменьшается, что указывает на целесообразность использования прерывистых кругов. На рис. 2 и в табл. 1 показан характер изменения отношения  $\theta_{min} / \theta_0$  от  $n$ , установленного на основе зависимости (4).

Таблица 1

Расчетные значения отношения  $\theta_{min} / \theta_0$

$n$	2	3	4	8	12	16	32
$\theta_{min} / \theta_0$	1,155	0,894	0,756	0,516	0,417	0,359	0,252

С увеличением количества рабочих выступов прерывистого круга  $n$  от 3 до 32 отношение  $\theta_{min} / \theta_0$  уменьшается в 3,55 раза по сравнению с обычным шлифованием сплошным кругом. Полученные расчетные данные согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [1].

Используя полученное теоретическое решение, можно определить условия обработки, при которых в максимальной степени реализуются преимущества прерывистого шлифования. Из рис. 1 следует, что чем больше по времени прерывистый круг контактирует с фиксированной точкой на обработанной поверхности, тем выше эффективность прерывистого шлифования по сравнению с обычным шлифованием. Так, при шлифовании по схеме, показанной на рис. 3,а, время нагрева обрабатываемого материала в фиксированной точке  $A$  определяется снимаемым припуском  $\Pi$  и может быть достаточно большим ( $n \gg 3$ ). Следовательно, в этом случае могут быть максимально реализованы потенциальные возможности прерывистого шлифования с точки зрения обеспечения заданной температуры резания.

При плоском шлифовании (рис. 3,б) время контакта круга с фиксированной точкой  $A$  на обрабатываемой поверхности определяется [6]:

$$\tau = \frac{l}{V_{дем}}, \quad (5)$$

где  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R}$  – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом, м;  $t$  – глубина шлифования, м;  $R$  – радиус круга, м.

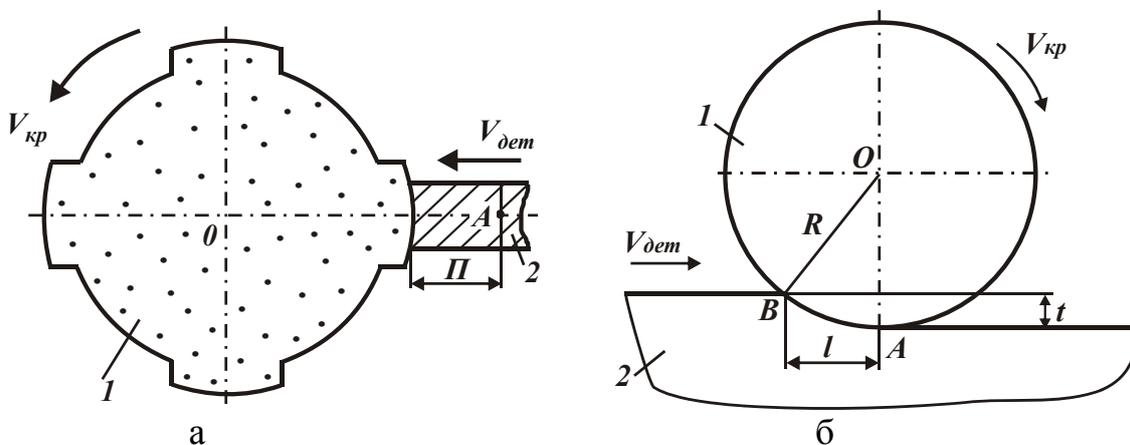


Рис. 3. Расчетные схемы прерывистого (а) и обычного плоского (б) шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

Длина пути контакта рабочей поверхности круга с фиксированной точкой  $A$  с учетом зависимости (5) определится:

$$L = \tau \cdot V_{кр} = \sqrt{2 \cdot t \cdot R} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}}. \quad (6)$$

При плоском многопроходном шлифовании:  $t=0,01$  мм;  $R=200$  мм;  $V_{кр}=30$  м/с;  $V_{дем}=30$  м/мин, имеем  $L=120$  мм. Как установлено выше, минимум температуры резания при прерывистом шлифовании обеспечивается при усло-

вии  $l_{01} = l_{02}$ , откуда  $n \cdot l_{01} = 60$  мм. Принимая  $l_{01} = 20$  мм, получено:  $n = 3$ . Следовательно, в этом случае реализуется минимальное значение температуры резания при прерывистом шлифовании  $\theta_{min}$ . Однако, эффект от применения прерывистого шлифования по отношению к обычному шлифованию (табл. 1) не большой, т.к.  $\theta_{min} / \theta_0 = 0,894$ , т.е. минимальная температура при прерывистом шлифовании незначительно отличается от температуры при обычном шлифовании.

Чтобы увеличить длину  $L$  и соответственно количество рабочих выступов круга  $n$ , контактирующих с фиксированной точкой  $A$  на обрабатываемой поверхности, необходимо увеличить параметр  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R}$  и отношение  $V_{кр} / V_{дем}$ . Это достигается за счет увеличения глубины шлифования  $t$  и уменьшения скорости детали  $V_{дем}$ , т.е. применения глубинного шлифования. В этом случае глубина шлифования  $t$  может принимать значения больше 1 мм, а  $V_{дем}$  – меньше 0,5 м/мин. Например, при  $t = 1$  мм и  $V_{дем} = 0,6$  м/мин получено:  $L = 60$  м. Очевидно, для этих условий шлифования  $n \gg 3$ , а отношение  $\theta_{min} / \theta_0 \rightarrow 0$ , т.е. минимальная температура резания при прерывистом шлифовании  $\theta_{min}$  будет во много раз меньше температуры при обычном шлифовании сплошным кругом. Собственно этим можно объяснить тот факт, что круги с прерывистой рабочей поверхностью широко используются на практике при шлифовании с большими глубинами резания, например, при разрезке материалов на части, прорезке глубоких пазов и канавок, профильном шлифовании и т.д. При этом полностью исключается образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов даже при обработке без применения охлаждающей жидкости.

Полученное теоретическое решение позволяет сделать еще один важный вывод, связанный с тем, что при прерывистом шлифовании с уменьшением времени контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом  $\tau$  уменьшается глубина проникновения образуемого при шлифовании тепла в по-

верхностный слой обрабатываемой детали  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$  [6]. Так, при уменьше-

нии времени  $\tau$  в 2 раза, при выполнении условия  $l_{01} = l_{02}$  параметр  $l_2$  уменьшится в 1,42 раза. Это способствует снижению вероятности появления дефектного слоя обрабатываемого материала и повышению качества обработки. Таким образом, эффект прерывистого шлифования состоит не только в уменьшении температуры резания  $\theta$ , но также и в уменьшении глубины проникновения образуемого при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали  $l_2$ . Наряду с этим, как отмечалось выше, прерывистое шлифование способствует уменьшению условного напряжения резания  $\sigma$  (энергоемкости обработки) за счет ударного характера взаимодействия зерен круга с обрабатываемым материалом, что также способствует уменьшению температуры резания  $\theta$  и повышению производительности обработки.

Необходимо отметить, что в этом случае фактическая скорость съема обрабатываемого материала  $V_{dem01}$  превышает номинальную скорость съема обрабатываемого материала  $V_{dem0}$ . С одной стороны, это ведет к уменьшению  $\sigma$  за счет более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал, а с другой стороны – к их повышенному износу, что согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [1].

Таким образом, благодаря полученному решению удалось выявить новые технологические возможности прерывистого шлифования, связанные с уменьшением как температуры резания  $\theta$ , так и параметра  $l_2$ , определяющего условия возникновения дефектного слоя обрабатываемого материала, а также уменьшением энергоемкости обработки  $\sigma$ . Этим показано, что прерывистое шлифование обладает целым рядом достоинств, выгодно отличающих его от обычного шлифования сплошным кругом. При этом доказано, что существует экстремум (минимум) температуры резания  $\theta$  при прерывистом шлифовании, обусловленный равенством длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга ( $l_{01} = l_{02}$ ).

Автор считает перспективными направления исследования, связанные с разработкой на основе полученных теоретических решений эффективных технологий прерывистого шлифования высокоточных деталей гидро- и топливо-регулирующей аппаратуры, полностью исключая образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов и обеспечивающих повышение качества и производительности обработки за счет научно обоснованного выбора оптимальных условий шлифования.

**Выводы.** Проведен теоретический анализ минимальной температуры резания при прерывистом шлифовании, определяемой из условия равенства рабочего выступа и впадины прерывистого круга. Показано, что с течением времени обработки минимальная температура резания при прерывистом шлифовании остается неизменной, тогда как при обычном шлифовании сплошным кругом – непрерывно увеличивается. Из этого сделан вывод об эффективности применения прерывистых кругов при глубинном шлифовании (при разрезке материалов на части, прорезке глубоких пазов и канавок, профильном шлифовании и т.д.).

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 3. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 4. Якимов А.В. Физическая сущность и технологические возможности прерывистого шлифования / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Зб. наук. праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 38-43. 5. Рябенков И.А. Эффективность применения прерывистого шлифования / И.А. Рябенков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Зб. наук. праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 226-231. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

**Шелковой А.Н.**, докт. техн. наук, **Клочко А.А.**, докт. техн. наук,  
**Анциферова О.А.** (Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)  
**Палашек С.Ю.** (ДГМА, г. Краматорск)

*The analysis of parameters of the state of superficial layer is considered with the purpose of providing of operating properties hard-tempered large module of gear-wheels with the terms of their treatment. For the estimation of roughness of surfaces of gear-wheels it is necessary to have the system of parameters, which all other parameters, in-use in the calculations of contact co-operation and tireless durability of gear-wheels, are determined through. Waviness, as well as roughness, depending on methods and external environments have a different form and different distributing of ledges on a height, that allows depending on terms treatments taking into account operating properties to set intercommunication of parameters of the state of superficial layer hard-tempered large module of gear-wheels, determining their operating properties*

**Введение.** Эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес и их передач неразрывно связано с обеспечением параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес. С целью обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес с условиями их обработки необходимо проанализировать комплексную систему параметров состояния поверхностного слоя и их влияние на эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Основная часть. На базе принятой системы параметров А.Г. Сулова предложены комплексные параметры, характеризующие несущую способность и равновесное состояние поверхностей при трении и износе для непосредственного обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес (табл. 1).

Таблица 1

Комплексные параметры, рекомендуемые к использованию при назначении технологического обеспечения крупномодульных зубчатых колес

Наименование поверхности	Комплексный параметр	Зубчатые колеса
Работающие в условиях трения и износа	СХ	Поломка зубьев, износ
Работающие в тяжелонагруженных условиях реверсивного исполнения	П	Выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев
Поверхности зубчатых колес, работающие в условиях циклического нагружения	Д	Пластические деформации зубьев и заедание
С повышенной шероховатостью рабочих поверхностей зубьев	Н	Абразивный износ зубьев

Теоретический анализ несущей способности поверхностного слоя зубчатых колес позволяет установить необходимую систему параметров его состояния, включающую в себя макроотклонения ( $H_{\max}$  – максимальная высота макроотклонения,  $R_r$  – высота сглаживания макроотклонения, характеризующая металлоемкость поверхности), волнистость ( $W_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля волнистости,  $W_p$  – высота сглаживания профиля волнистости;  $W_z$  – высота волнистости по десяти точкам;  $S_{mw}$  – средний шаг волнистости,  $t_{mw}$  – относительная опорная площадь волнистости на уровне средней линии), шероховатость ГОСТ 2789-73 [1, 2, 4] (рис. 1):  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля,  $R_p$  – расстояние от линии выступов до средней линии,  $R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей профиля,  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам,  $t_m$  – относительная опорная площадь неровностей на уровне средней линии,  $S_m$  – средний шаг неровностей,  $S$  – средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов,  $t_p$  – относительная опорная длина профиля на уровне  $p$  и физико-механические свойства ( $H_{\mu 0}$  – поверхностная микротвердость,  $\sigma_0$  – величина остаточных напряжений на поверхности,  $h_{H\mu}$  – глубина залегания упрочненного слоя,  $h_{\sigma_0}$  – глубина залегания остаточных напряжений поверхности).

Анализ работ по проблеме технологического обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес показывает, что научно-обоснованный выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес является сложной и многовариантной задачей. Учитывая это обстоятельство для решения подобных задач необходимо использование специально математического аппарата с применением методов многокритериальной оптимизации и средств ПК.

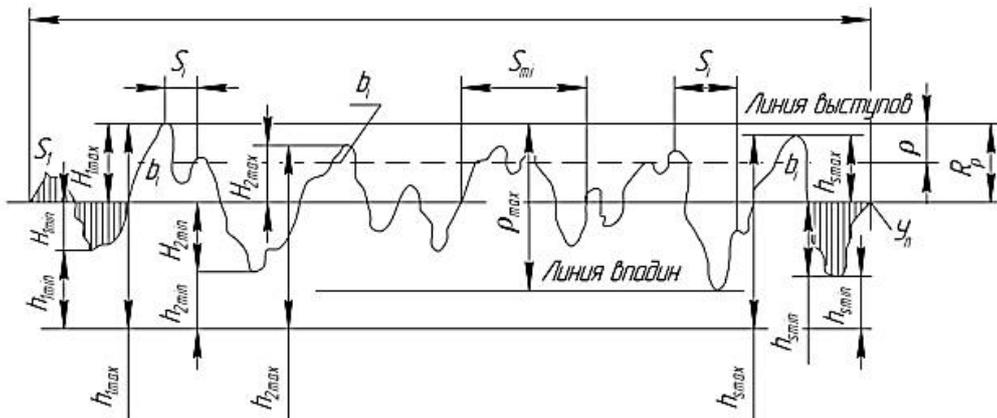


Рис. 1. Профиль шероховатости поверхности

Один из путей решения таких задач является разделение их на две части: конструкторскую и технологическую, с выделением технологических параметров в виде комплексного показателя эксплуатационных свойств. Количество таких показателей и их структура определяется из конкретных требований к изучаемому объекту. Многообразие механических методов обработки [1–5], зубообрабатывающих станков, фрез и материалов для обработки зубчатых колес предоставляет широкие технологические возможности в обеспечении требуемых

мых параметров поверхностного слоя зубчатых колес, определяющих эксплуатационные свойства.

Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств зубчатых колес неразрывно связано с обеспечением параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства. Для успешного решения этой задачи необходимо рассмотреть теоретические аспекты взаимосвязи параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес с технологическими условиями их обработки. Целесообразно рассматривать не общие аспекты связи отдельных параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес с условиями их обработки, а непосредственную взаимосвязь системы параметров состояния поверхностного слоя, определяющих эксплуатационные свойства зубчатых колес с условиями их обработки (рис. 2). Эту взаимосвязь выражается в математических уравнениях, которые являются основой при разработке алгоритмов и программы для ПК. В результате автоматизируется решение одной из основных задач расчета оптимальных технологических условий обработки с учетом обеспечения требуемых параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес, исходя из их эксплуатационных свойств.

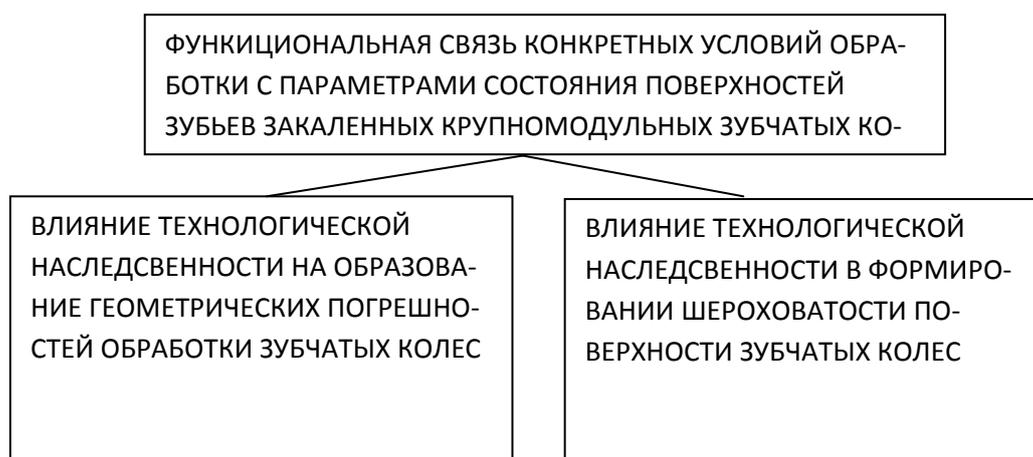


Рис. 2. Функциональная взаимосвязь условий обработки с параметрами поверхностного слоя зубчатых колес

Анализ результатов исследований по формированию высоты профиля шероховатости при различных методах обработки зубчатых колес [1, 4, 5] позволяет сделать вывод, что на образование шероховатости при всех методах механической обработки оказывают влияние следующие факторы: геометрия рабочей части зубообрабатывающего инструмента (радиуса округления режущей кромки инструмента, направления неровностей при заточке инструмента, состояния поверхности инструмента, степени упрочнения рабочей части инструмента, кинематика рабочего движения инструмента [2, 4, 5]; упругие и пластические деформации обрабатываемого материала в зоне контакта с рабочим инструментом, вырывы частиц обрабатываемого материала зубчатых колес.

Степень влияния каждого из этих факторов на образование шероховатости поверхности и обеспечении эксплуатационных свойств зубчатых колес будет различной в зависимости от выбранных технологических параметров обра-

ботки. Такие факторы как геометрия рабочей части зубообрабатывающего инструмента, кинематика рабочего движения инструмента, упругие и пластические деформации обрабатываемого материала в зоне контакта с рабочим инструментом вызывают образование систематических составляющих профиля шероховатости, которая может быть описана математически. Фактор вырыва частиц обрабатываемого материала зубчатых колес вызывает образование случайной составляющей профиля и определяет дисперсию параметров шероховатости [1, 2, 4].

При механической обработке зубчатых колес в зависимости от условий обработки могут происходить различные явления, оказывающие влияние на формирование поверхностного слоя. Согласно теории контактного взаимодействия деталей при формообразовании поверхностей механическим способом в зоне контакта инструмента с заготовкой в общем случае имеют место упругие, упруго-пластические, и пластические деформации слоев металла и относительный сдвиг пластически деформируемого поверхностного слоя относительно обрабатываемой поверхности заготовки [1, 4]. Пластическое оттеснение при механической обработке определяется по формулам [2, 4], регламентируется радиусом округления режущей кромки инструмента, который изменяется в процессе формообразования рабочих поверхностей зубчатых колес и зависит от обрабатываемого материала и режущего лезвия инструмента и рассматривается с учетом кинематики движения инструмента и условий формирования поверхностного слоя исходя из технологических параметров обработки и стабилизации процесса обработки цилиндрических зубчатых колес.

Современная, научно-обоснованная организация работ поиска новых решений и технологии изготовления зубчатых колес, базируется на тесной взаимосвязи проблем обеспечения функциональных и экономических показателей зубчатых передач [3, 5].

Эксплуатационные характеристики, в значительной степени, определяются условиями взаимодействия контактирующих поверхностей, свойства которых обеспечиваются механическими методами обработки и на основании теории технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес с учетом функционально-стоимостного анализа [1–4]. На основании анализа современного состояния вопроса можно сформулировать выводы.

Выбор научно-обоснованного метода обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес, рационально учитывающего эксплуатационные и стоимостные показатели, в значительной степени определяет технологические возможности обеспечения качества зубчатых передач.

Теоретическое и экспериментальное обоснование влияния комплексных параметров состояния поверхности на эксплуатационные свойства контактирующих поверхностей зубчатых колес, методология выбора методов обработки в обеспечении системы параметров поверхностного слоя применительно к материалам и форме обрабатываемых поверхностей является основной задачей научно-обоснованного технологического обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Эксплуатационные свойства зубчатых колес в значительной мере зависят от состояния их поверхностных слоев. В настоящее время проводится много исследований по отысканию оптимальной системы параметров качества поверхности зубчатых колес, которая наиболее широко и просто отражала бы их эксплуатационные свойства [1–5]. В этих исследованиях характеристики поверхностного слоя зубчатых колес подразделяются на: геометрические и физико-механические.

Под геометрическими параметрами поверхности зубчатых колес понимают параметры шероховатости, волнистости и макроотклонения. Шероховатость, волнистость и макроотклонения на контактирующих поверхностях зубчатых колес приводят к дискретности их контакта и дифференциации площадей контакта на фактическую  $A_f$ , контурную  $A_c$  и номинальную  $A_a$  (рис. 3). Причем максимально возможную площадь контакта идеальных поверхностей зубчатых колес без шероховатости, волнистости и макроотклонения будем называть геометрической площадью контакта  $A$ . Как видно из рис. 1, геометрическая площадь контакта определяется наименьшими размерами поверхностей  $A = L_{\text{ноп}} \text{ мм}$ .

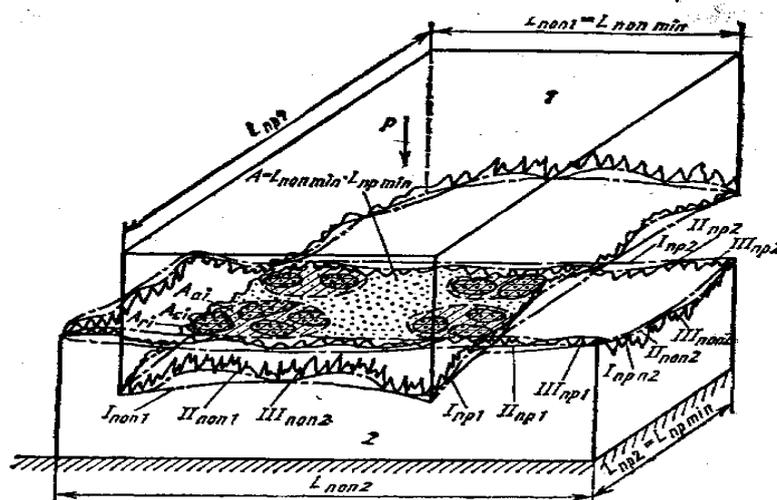


Рис. 3. Схема контакта реальных поверхностей сопрягаемых зубчатых колес:  $I_{\text{ноп1}}, II_{\text{ноп1}}, III_{\text{ноп1}}$ ;  $I_{\text{ноп2}}, II_{\text{ноп2}}, III_{\text{ноп2}}$  – поперечный профиль макроотклонения, волнистости и шероховатости контактирующих поверхностей соответственно шестерни и колеса;  $I_{\text{пр1}}, II_{\text{пр1}}, III_{\text{пр1}}$ ;  $I_{\text{пр2}}, II_{\text{пр2}}, III_{\text{пр2}}$  – продольный профиль макроотклонения, волнистости и шероховатости контактирующих поверхностей соответственно шестерни и колеса

Номинальная площадь контакта, обусловленная наличием макроотклонения на поверхностях деталей, будет равна сумме отдельных номинальных площадок  $A_a = \sum_{i=1}^{N^e} A_{ai}$ . На номинальных площадках контакта расположены отдельные контурные площади контакта, обусловленные волнистостью поверхностей. Сумма отдельных контурных площадок приводит в целом к образованию кон-

турной площади контакта  $A_c = \sum_{i=1}^{N^{e'}} A_{ci}$ . Контакт зубчатых колес происходит по

фактическим площадкам контакта эвольвентной поверхности сопрягаемых зубчатых колес  $A_r$ , обусловленным наличием на поверхностях зубчатых колес шероховатости, которые в сумме составляют фактическую площадь контакта

$$A_r = \sum_{i=1}^{N^{e'}} A_{ri} \text{ в зависимости от } m - \text{модуля зацепления (рис. 4).}$$

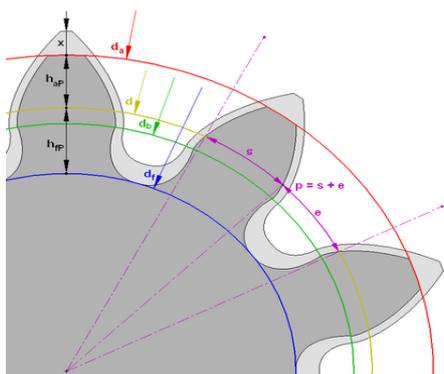


Рис. 4. Параметры зубчатого колеса

Модуль зацепления является главным параметром. Чем больше нагружена передача, тем выше значение модуля. Через модуль выражаются все остальные параметры.

Модуль измеряется в миллиметрах,  $z$  – число зубьев колеса;  $t$  – шаг зубьев;  $d$  – диаметр делительной окружности;  $d_a$  – диаметр окружности вершин колеса;  $d_b$  – диаметр основной окружности–эвольвенты;  $d_f$  – диаметр окружности впадин колеса.

Требования к шероховатости поверхности устанавливают указанием числовых значений параметров. В дополнении к количественным параметрам для более полной характеристики шероховатости указывают направление неровностей, вид обработки поверхности или последовательность видов обработки

Значения параметра  $R_a$  ГОСТ2789-73 установлено 14 классов шероховатости поверхности, причем классы 1–5, 13 и 14 определены через параметр  $R_z$ , а классы 6–12 через параметр  $R_a$  (табл. 2). При конструировании величину шероховатости выбирают в зависимости от функционального назначения поверхности. В общем случае, чем выше требования по точности, тем выше требования и по шероховатости поверхности.

При установлении требований к шероховатости поверхности целесообразно пользоваться предпочтительными значениями параметра  $R_a$  (в таблице указаны в отдельном столбце курсивом увеличенным размером шрифта). При выборе класса шероховатости должны быть учтены свойства материала и твердость поверхности детали. Высокие показатели для сталей можно получить при твердости не ниже HRC 30-35. Стальные изделия, подлежащие чистой обработке, должны быть, по меньшей мере, подвергнуты улучшению или нормализации. Термически необработанные низкоуглеродистые стали плохо поддаются тонкой обработке.

Нормирование шероховатости поверхности: применяется три основных способа регламентации конструктором качества поверхности, в том числе шероховатости:

- 1) по прототипу (метод прецедентов);
- 2) расчетный;
- 3) экспериментальный.

Выбор параметров и их значений для нормирования шероховатости должен производиться с учетом назначения поверхности и установления их связи с эксплуатационными свойствами поверхности.

В табл. 3 приведены некоторые важнейшие эксплуатационные свойства поверхности, зависящие от ее шероховатости, и номенклатура параметров, при помощи которых обеспечиваются показатели этих свойств. Основным во всех случаях является нормирование высотных параметров.

Таблица 2

Классы шероховатости поверхностей, соответствующие различным видам обработки по ГОСТ 2789–73

Вид обработки	Параметр шероховатости	Вид обработки	Параметр шероховатости
Литье	Rz 320 – Rz 20	Ковка	Rz 320 – Rz 400
Прокат холодный	2,5–0,63	Протягивание	2,5 – 0,63
Штамповка горячая	Rz 160 – Rz 20	Слесарная опилка	Rz 80 – Rz 20
Штамповка холодная	Rz 20, 2,5 – 0,63	Сверление	Rz 80 – Rz 20
Строгание	Rz 80 – Rz 20, 2,5	Развертывание	Rz 40–Rz 20, 2,5–0,32
Точение обдирочное	Rz 320 – Rz 40	Подрезка торца черновая	Rz 80 – Rz 40
Точение чистовое	Rz 20, 2,5 – 0,63	Подрезка торца чистовая	Rz 20
Растачивание обдирочное	Rz 160 – Rz 40	Фрезерование, зубофрезерование черновое	Rz 40
Растачивание чистовое	Rz 20, 2,5; 1,25	Фрезерование, зубофрезерование чистовое	Rz 20, 2,5; 1,25
Шлифование, зубошлифование чистовое	2,5; 1,25 – 0,63	Скоростное зубофрезерование чистовое	2,5; 1,25; 1,00
Шлифование тонкое	0,63 – 0,16	Хонингование	0,32 – 0,04

Предпочтительно, в том числе и для самых грубых поверхностей, нормировать параметр Ra, который более информативно, чем Ra и Rmax характеризует неровности профиля, поскольку определяется по всем точкам (или достаточно большому числу точек) профиля.

Таблица 3

Эксплуатационные свойства поверхности, зависящие от ее шероховатости по ГОСТ2789–73

Эксплуатационное свойство поверхности	Параметры шероховатости поверхности и характеристики, определяющие эксплуатационное свойство
Износоустойчивость при всех видах трения	Ra (Rz), tp направление неровностей
Виброустойчивость	Ra (Rz), Sm, S, направление неровностей
Контактная жесткость	Ra (Rz), tp
Прочность соединения	Ra (Rz), Rmax, Sm, S, направление неровностей
Прочность поверхности при циклических нагрузках	Ra (Rz), Smax, S, tp

Параметры  $R_z$  и  $R_{max}$  нормируют в тех случаях, когда по функциональным требованиям необходимо ограничить полную высоту неровностей профиля, а также когда прямой контроль параметра  $R_a$  с помощью профилометров или образцов сравнить невозможно, например, для поверхностей, имеющих малые размеры или сложную конфигурацию (режущие кромки инструментов, детали часовых механизмов и пр.).

Для ответственных поверхностей производится нормирование не только высотных параметров, но и шаговых и параметра  $t_p$ , так как они обеспечивают некоторые их функциональные свойства.

Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться путем указания: 1) параметра шероховатости (одного или нескольких); 2) числовых значений выбранных параметров; 3) базовых длин, на которых происходит определение указанных параметров.

На практике применяются три варианта указания числовых значений параметра (параметров) шероховатости: 1) наибольшим значением; 2) диапазоном значений; 3) номинальным значением.

Наиболее распространенным применительно к зубчатым цилиндрическим колесам является вариант, когда указано числовое значение параметра, соответствующее допускаемой шероховатости, т. е. наибольшему предельному значению для параметров  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $S$  и наименьшему предельному значению параметра  $t_p$  и направление неровностей поверхности по ГОСТ 2789–73.

В отдельных случаях, когда для правильного функционирования недопустима и слишком гладкая поверхность, применяется второй вариант, при котором указан диапазон значений параметра; наибольший и наименьший предельные значения.

Третий вариант применяется реже, в основном для образцов сравнения шероховатости поверхности или для образцовых деталей, служащих для этих же целей. При этом варианте указывается номинальное значение параметра с допустимыми предельными отклонениями от него (%). Установление требований к шероховатости поверхности указанием номинальных значений параметра обеспечивает наиболее строгий метрологический контроль.

При установлении требований шероховатости поверхности рекомендуется применять параметры  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $t_p$ . Среднее арифметическое значение отклонения профиля  $R_a$  – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ .

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  – сумма средних арифметических абсолютных значений отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины  $l$ .

Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$  – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины  $l$ . Относительная опорная длина профиля  $t_p$  (где  $p$  – числовое значение уровня сечения профиля) – отношение опорной длины профиля к базовой длине.

В научных исследованиях для оценки несущей способности шероховатости зубчатых колес исследуют: кривую опорной поверхности, построенную в

относительных координатах  $tr = b\epsilon v$ , параметры ее начального участка  $v$  и  $b$ , средние радиусы локальных выступов  $\rho$  и выступов  $r_t$ , радиус впадин  $r'_t$ , безразмерный комплекс  $\Delta$  [1, 4]. По расположению опорных кривых и по значению их параметров проводят сравнение несущей способности шероховатости поверхностей, обработанных различными методами и с разной величиной  $R_a$ . Однако экспериментальные исследования [4] часто опровергают такие необоснованные выводы. Это объясняется тем, что одинаковые относительные расстояния  $\epsilon$  ( $\rho$ ) при различной  $H_i$ . высоте шероховатости  $R_{max}$  характеризуют разные уровни по своим абсолютным значениям  $y$ , поэтому при построении опорных кривых в относительных координатах одни из них как бы искусственно сжимаются, а другие растягиваются. Так, на рис. 5 построены кривые для разных  $R_{max}$  в относительных и абсолютных значениях по высоте ординат профиля. Как видно из рис. 5,а, опорная кривая для  $R_{max} = 3$  мкм хуже, чем для  $R_{max} = 8$  мкм. При построении этих кривых по высоте ординат профиля в абсолютных значениях картина изменяется (рис. 5,б).

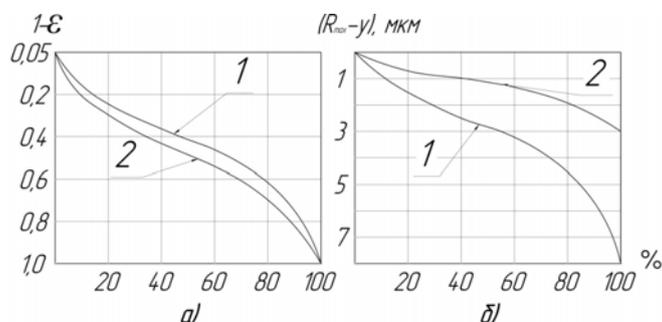


Рис. 5. Распределение опорных линий микронеровностей по уровням при относительном (а) и абсолютном (б) значениях их расстояний от линий выступов: 1 – чистовое зубофрезерование специальными червячными фрезами по линии зацепления; 2 – ППД обработка накатными роликами

Проведенные исследования также показывают, что с изменением шероховатости не всегда существует закономерность в изменении параметров  $\epsilon$  и  $v$ . Все это говорит о том, что по взаимному расположению опорных кривых, построенных в относительных координатах, и по значению их параметров  $\epsilon$  и  $v$  затруднительно проводить сравнение несущей способности шероховатости поверхностей, обработанных различными технологическими методами и с разной величиной  $R_{max}$  [4, 5]. Поэтому для сравнительной оценки несущей способности шероховатости поверхностей опорные кривые целесообразно строить в абсолютном значении по оси ординат профиля  $y$  (рис. 5,б).

Установлена связь относительной опорной длины профиля шероховатости с параметрами, для определения которых не требуется больших затрат времени.

Анализ различных профилей (рис. 6) доказывает, что несущая способность шероховатости при неизменной их высоте  $R_{max}$  ( $R_z$ ) и величине  $R_a$  тем больше, чем меньше высота сглаживания  $R_p$  (расстояние от линии выступов до средней линии).

При одинаковых  $R_p$  и  $R_{max}$  ( $R_z$ ) несущая способность шероховатости выше, чем больше ( $R_a$ ). На кривой профиля  $\zeta$ , с уменьшением высоты шероховатости  $R_{max}$  параметры  $R_a$  и  $R_p$  уменьшаются, а ее несущая способность увеличивается. Таким образом, из анализа различных профилей установлено, что несущая способность шероховатости зависит от ее высоты  $R_{max}$  ( $R_z$ ), высоты сглаживания  $R_p$  и от среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$ .

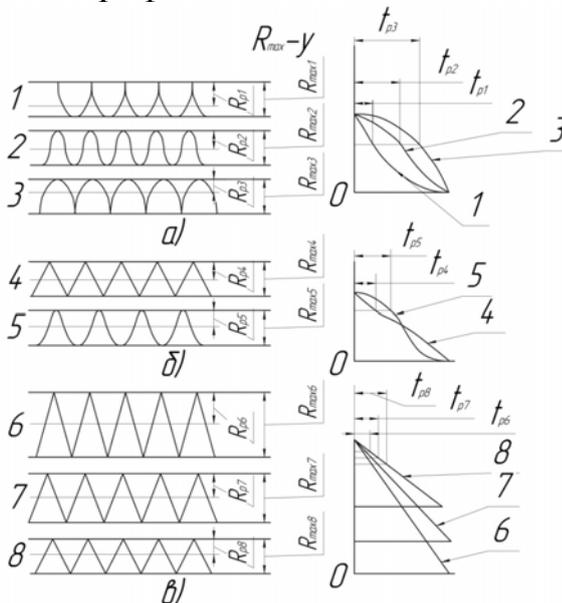


Рис. 6. Анализ различных профилей шероховатости по ее параметрам (номера профилей соответствуют графикам распределения опорных линий по высоте)

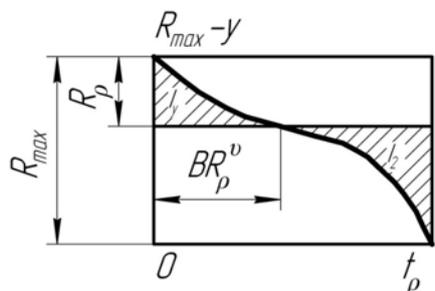


Рис. 7. Общий вид опорной кривой профиля зубчатого колеса

Естественно, что этот вывод требует математического подтверждения. Экспериментальные исследования показали [4, 5], что уравнением  $i_p = 100b (y/100)^v$  опорная кривая (рис. 7) удовлетворительно описывается до уровня средней линии.

Проинтегрировав это уравнение по  $y$  от 0 до  $R_p$ , получим зависимости для определения параметров опорной кривой

$$v = \frac{\tau_m R_p}{30 R_a} - 1; \quad (1)$$

$$b = \frac{\tau_m}{100} \left( \frac{R_{max}}{R_p} \right)^v, \quad (2)$$

где  $\tau_m$  – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, %.

Уравнение для определения относительных опорных длин профиля шероховатости до средней линии будет иметь следующий вид:

$$\tau_p = \tau_m \left( \frac{y}{R_p} \right)^{\left( \frac{\tau_m R_p}{30 R_a} - 1 \right)} = \tau_m \left( \frac{\mu R_{max}}{30 R_a} \right)^{\left( \frac{\tau_m R_p}{30 R_a} - 1 \right)}. \quad (3)$$

При больших удельных нагрузках на стык возникает необходимость расчета относительных опорных длин профиля ниже средней линии, для их определения получено следующее уравнение:

$$t_p = 100 - t_m \left( \frac{R_{max} - y}{R_{max} - R_p} \right)^{\frac{50R_z - t_m R_p}{50R_a}} = 100 - t_m \left( \frac{R_{max}(100 - p)}{100(R_{max} - R_p)} \right)^{\frac{50R_z - t_m R_p}{50R_a}}. \quad (4)$$

Полученные уравнения (1) – (4) имеют общий вид и могут быть использованы для определения относительных опорных длин профиля на любом уровне  $y$  ( $p$ ) и параметров опорной кривой  $v$  и  $b$  после различных методов обработки.

Существующие в настоящее время теоретические зависимости для расчета контактного взаимодействия зубчатых колес основаны на принципе моделирования выступов шероховатости. [1, 2, 4]. Так, в теории трения одной из важнейших характеристик является радиус скругления локальных выступов [1, 2, 4], а при расчете контактной жесткости – радиусы скругления выступов [1, 4, 5]. Моделируя локальные выступы и выступы шероховатости телами двойкой кривизны так, чтобы их площади в поперечном и продольном сечениях были соответственно равны площадям этих выступов, можно определить их поперечные и продольные радиусы (рис. 8):

$$\rho_{cp} = \frac{b_{cp}^3}{12S_{cp}}, \quad (5)$$

где  $b_{cp}$  – средняя длина основания моделирующего сегмента на заданном уровне  $p$  и базовой длине профиля  $l$ :

$$b_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} = \frac{t_p}{100n}, \quad (6)$$

$\eta$  – число локальных выступов или выступов выше уровня  $p$  на базовой длине;  $S_{cp}$  – средняя площадь моделирующего сегмента, определяемая из уравнения:

$$S_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} = \frac{\int_0^p t_m \left( \frac{p - R_{max}}{100R_p} \right)^V \frac{R_{max}^2}{100n} dp}{100}. \quad (7)$$

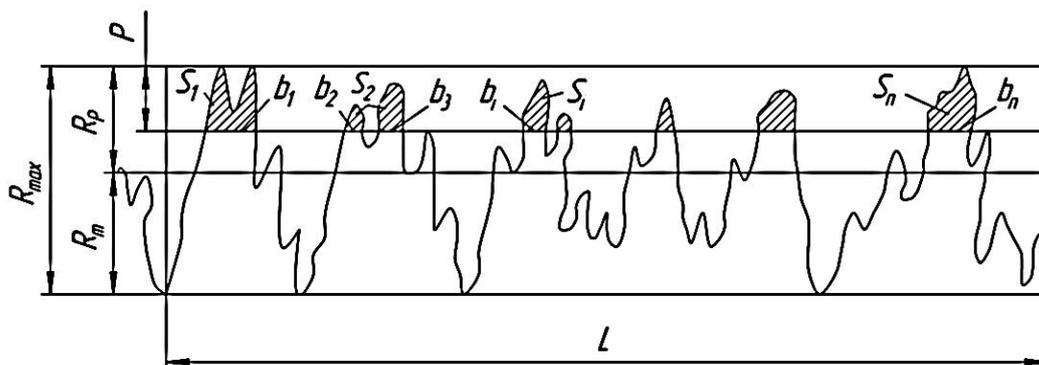


Рис. 8. Исходная схема для расчета средних радиусов локальных выступов  $\rho$  и выступов  $\rho_m$

Произведя частичное интегрирование уравнения (7) и ряд математических преобразований, получим:

$$S_{\text{ср}} = \frac{t_p p R_{\text{max}} l R_a}{2 \cdot 10^2 t_m R p^2} \quad (8)$$

Подставляя выражения (6) и (8) в формулу (5), получим общее уравнение для определения средних радиусов локальных выступов и выступов шероховатости для любого уровня  $p$ :

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{t^2 t_p^2 t_m R_a}{60 n^2 R_{\text{max}} R_a} \quad (9)$$

Из этого уравнения легко получить зависимость для определения среднего радиуса выступов  $\left(p = \frac{R_p}{R_{\text{max}}} 100, t_p = t_m\right) s$

$$\rho_m = \frac{S_m^2 t_m^2}{6 \cdot 10^2 R_a} \quad (10)$$

или локальных выступов

$$\rho = \frac{S^2 t t_m R_a}{60 p R_{\text{max}} R_a} \quad (11)$$

Уравнение (10) может быть использовано и для расчета среднего радиуса впадин профиля шероховатости. Радиус наибольшей впадины шероховатости, определяющий предел выносливости рассчитывается по уравнению:

$$\rho_{\text{min}} = \frac{t_m^2 S_m^2}{9 \cdot 10^4 R_m} \quad (12)$$

где  $R_m$  – глубина сглаживания (расстояние от средней линии до линии впадины).

Полученные уравнения позволяют записать зависимость для определения безразмерного комплекса  $\Delta$  [1, 2, 4, 5] в следующем виде:

$$\Delta = \left(\frac{100}{t_m}\right)^{1/2} \frac{R_p}{\rho} \quad (13)$$

Таким образом, результаты теоретических исследований показывают, что для оценки шероховатости поверхностей зубчатых колес достаточно иметь следующую систему параметров:  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_{\text{max}}$ ,  $t_m$ ,  $S_m$  и  $S$ , через которые могут быть определены все остальные параметры:  $v$ ,  $b$ ,  $t_p$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho$ ,  $\rho'_m$ ,  $\Delta$ , используемые в расчетах контактного взаимодействия и усталостной прочности зубчатых колес. Что касается волнистости, под которой следует понимать неровности поверхности с шагом, большим базовой длины, используемой для измерения шероховатости, то до настоящего времени она не регламентирована ГОСТ 2789-73. Учет волнистости приводит к значительному изменению относительной опорной кривой поверхности, которую можно построить, рассматривая шероховатость и волнистость как независимые составляющие или рассматривая их совместно [1, 2, 4, 5]. Учитывая, что волнистость, как и шероховатость, в зависимости от методов и условий эксплуатации имеют разную форму и различное распределение выступов по высоте, для оценки их несущей способности можно строить опорные кривые волнистости, начальный участок которых с достаточной точностью описывается уравнением:

$$t_{pW} = b_W \left( \frac{y}{W_{\max}} \right)^{v_W}, \quad (14)$$

где  $b_W$  и  $v_W$  – параметры начального участка опорной кривой волнистости;  $W_{\max}$  – максимальная высота волнистости.

Проведя рассуждения и математические выкладки, аналогичные приведенным выше для шероховатости, получим следующие уравнения для определения относительной опорной длины профиля волнистости и параметров ее начального участка:

$$t_{pW} = t_{mW} \left( \frac{y}{W_p} \right)^{v_W} = t_{mW} \left( \frac{pW_{\max}}{100 W_p} \right)^{v_W}; \quad (15)$$

$$v_W = \frac{t_{mW} W_p}{50 W_a} - 1; \quad (16)$$

$$b_W = \frac{t_{mW}}{100} \left( \frac{W_{\max}}{W_p} \right)^{v_W}, \quad (17)$$

где  $W_a$  и  $W_p$  – среднее арифметическое отклонение и высота; сглаживания профиля волнистости;  $t_{mW}$  – относительная длина опорной линии профиля волнистости на уровне средней линии.

Используя математический аппарат свертки, примененный для построения относительных опорных кривых в работе [4], можно определить относительные опорные площади шероховатости с учетом волнистости.

Другой метод основан на снятии профилограмм большой реализации ( $L \geq 5SmW$ , где  $SmW$  – шаг волны) и соответствующей их обработке. Этот метод можно применять для поверхностей с небольшим шагом волн [4]. Однако, учитывая, что шероховатость и волнистость – независимые составляющие геометрии поверхности и что для обеспечения износостойкости и контактной жесткости необходимо стремиться к управлению как шероховатостью, так и волнистостью, предпочтение следует отдавать первому методу. Радиусы волн могут быть определены так же, как для шероховатости, а именно (при  $t_{mW} = 50\%$ ):

$$R_{mW} = \frac{125 S_{mW}^2}{6 W_a}. \quad (18)$$

Несущая способность поверхности, с точки зрения усталостной прочности детали, от волнистости практически не зависит.

Таким образом, для оценки несущей способности волнистости необходимы следующие параметры:  $W_a$ ,  $W_p$ ,  $W_z$  и  $S_nW$ . Как ранее было отмечено, значительное влияние на контактное взаимодействие зубчатых колес оказывает макроотклонение их поверхностей. Так, в работах [1, 2, 4, 5] показано, что наряду с величиной макроотклонения значительное влияние, в частности на контактную жесткость, оказывает и их форма. Учитывая, что макроотклонения могут иметь различные величину и форму, для оценки их несущей способности могут быть использованы два параметра:  $H_{\max}$  – максимальная высота макроотклонения, и  $R_p$  – высота сглаживания макроотклонения, характеризующая металлоемкость поверхности.

**Выводы.** Для оценки шероховатости поверхностей зубчатых колес достаточно иметь следующую систему параметров:  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_{max}$ ,  $t_m$ ,  $S_m$  и  $S$ , через которые могут быть определены все остальные параметры:  $v$ ,  $b$ ,  $tr$ ,  $pm$ ,  $\rho$ ,  $\rho'm$ ,  $\Delta$ , используемые в расчетах контактного взаимодействия и усталостной прочности зубчатых колес. Учет волнистости приводит к значительному изменению относительной опорной кривой поверхности, которую можно построить, рассматривая шероховатость и волнистость как независимые составляющие или рассматривая их совместно. Волнистость, как и шероховатость, в зависимости от методов и условий эксплуатации имеют разную форму и различное распределение выступов по высоте, что позволяет в зависимости от условий обработки с учетом эксплуатационных свойств установить взаимосвязь параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства.

**Список литературы:** 1. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М., 1970. – 227 с. 2. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с. 3. Соколовский А. П. Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – М.–Л.: Машгиз, 1955. – 515 с. 4. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с. 5. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А. Ключко и др.; Науч. ред. А.А. Пермяков. – ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с. - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.

УДК 621.923

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ НА ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

**Шкурूपий В. Г.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The mechanism of formation of the surface layer in the finish machining operations. The relationship of surface roughness and its optical characteristics. Practical recommendations for the provision of technological parameters of quality of treatment*

Известно, что на финишных операциях формируется то состояние поверхностного слоя, которое будет определять эксплуатационные характеристики поверхностей изделия. При изготовлении изделий, работающих в условиях воздействия солнечной радиации, используются различные методы обработки, однако еще недостаточно изучено влияние методов обработки на геометрию и физико-химическое состояние обрабатываемых поверхностей. Известно, что шероховатость поверхности ответственных деталей оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства готовых изделий. Требуемые значения параметров шероховатости поверхности обеспечиваются на операциях окончательной обработки.

Критерий шероховатости поверхности  $F$  характеризует отношение площади гладкой замыкающей части впадин к площади шероховатой части впадин. Применительно к профилю шероховатости поверхности критерий  $F$  учитывает не только высоту шероховатости, субмикрощероховатости, но и полноту впадин (выступов) профиля шероховатости. На практике этот критерий определяется из профилограмм и электронных снимков. Связь критерия шероховатости поверхности  $F$  с оптическими характеристиками (коэффициентами поглощения  $A_2$  и излучения  $\varepsilon_{ш}$ ) можно описать, используя известную формулу [1]:

$$\varepsilon_{ш} = \frac{\varepsilon_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)},$$

где  $\varepsilon_{ш}$  – коэффициент излучения шероховатой поверхности;  $\varepsilon_2$  – коэффициент излучения гладкой поверхности;  $A_2$  – коэффициент поглощения гладкой поверхности.

Результаты эксперимента приведены на рис. 1. Анализ значений критерия шероховатости на поверхностях деталей после различной обработки показал, что при высоте шероховатости  $R_a < 100$  нм его величина практически равна 1. Поэтому его можно использовать как интегральный параметр при получении высоты шероховатости не менее 100 нм. При уменьшении высоты шероховатости менее 100 нм интегральным параметром рассогласования принята величина РВЭ, которая на практике измеряется через величину контактной разности потенциалов (КРП).



Рис. 1. Зависимость критерия шероховатости поверхности и КРП от методов обработки деталей из сплава АМгб: 1 – прокат; 2 – обработка металлической дробью; 3 – гидроабразивная обработка; 4 – фрезерование твердосплавной фрезой; 5 – фрезерование фрезой из эльбора; 6 – точение твердосплавным резцом; 7 – полирование алмазное; 8 – выглаживание; 9 – микроточение алмазным резцом

Если рассматривать изменения критерия шероховатости поверхности и контактной разности потенциалов с учетом оптических свойств поверхностей, то для методов обработки, обеспечивающих критерий шероховатости поверх-

ности меньше единицы, можно говорить о влиянии образующихся микронеровностей, в частности, на светоотражательную способность. Для финишных методов обработки, обеспечивающих значения критерия шероховатости поверхности равные единице, и учитывая, что размеры микронеровностей меньше длин волн падающего излучения, их изменение не должно влиять на светоотражательную способность поверхности. Из приведенных на рис. 1 графиков видно, что изменения в поверхностном слое можно контролировать значениями контактной разности потенциалов.

Исследованиями механизма формирования поверхностного слоя с заданными оптическими свойствами после различных методов обработки установлено [1], что на предварительных стадиях обработки с применением гидроабразивной обработки, обработки металлической дробью, фрезерования, точения резцами, изготовленными из традиционных инструментальных материалов, и шлифования изменения оптических характеристик связаны, в первую очередь, с изменением критерия шероховатости поверхности, величина которого изменяется от 0,3 до единицы. Уменьшение критерия шероховатости поверхности при абразивной обработке связано с образованием на профиле шероховатости субмикронеровностей, которые сравнимы по величине с длинами волн падающего излучения. Применение финишных методов обработки (абразивное полирование, точение резцами из сверхтвердых материалов, поверхностное пластическое деформирование) приводит к образованию поверхностей, критерий шероховатости которых практически равен единице. При этом установлено, что изменение оптических характеристик коррелирует с изменением физико-химического состояния поверхностного слоя. Поэтому управление светоотражательной способностью поверхностей следует осуществлять через работу выхода электронов, которая оценивается величиной контактной разности потенциалов (КРП).

Установлено, что при предварительной обработке поверхностей деталей машин с целью достижения минимальных значений высотных параметров шероховатости поверхности контроль обработанной поверхности необходимо осуществлять путем оценки критерия шероховатости поверхности  $F$ . После финишных методов обработки контроль обработанной поверхности необходимо осуществлять путем оценки работы выхода электронов (значений контактной разности потенциалов - КРП).

Таким образом, в работе обоснован механизм формирования поверхностного слоя при обработке резанием и приведены результаты исследований влияния технологических факторов на эффективность создания светоотражательных поверхностей деталей.

**Список литературы:** 1. Агабабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства твердого тела со случайной шероховатостью / С.Г. Агабабов // Теплофизика высоких температур, 1976. – Т. 13, №2. – С. 314–318. 2. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / В.Г. Шкурупій . – Одеса, 2006. – 21 с.

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ НИТРИДБОРНЫХ СВЕРХТВЕРДЫХ КОМПОЗИТОВ ПО СТАНДАРТНОМУ РЕГЛАМЕНТУ СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Гуцаленко Ю.Г., старш. научн. сотрудник  
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

*The problem of comparing the operational capabilities of the tool materials in the conditions of use of each of them in their recommended area and its system of standard cutting conditions and regulatory stability is considered. The calculation is made for the rating of the standard group of superhard composites based on cubic boron nitride*

**Введение и постановка задачи.** Синтетические сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора, открытого в 1957 году Робертом Венторфом для американской многоотраслевой корпорации *Дженерал Электрик*, и в нынешнем веке продолжают оставаться топ-уровневым товаром инструментального назначения на мировом рынке техники и технологий механической обработки. Необходимость рейтинговой оценки эксплуатационных возможностей инструментальных материалов возникает в задачах предпочтения, в частности, при выборе объектов обработки для формирования баз данных экспертных систем поддержки внедрения в промышленность новых и перспективных технологий механической обработки. В выполняемой разработке априорно постулируется приоритетность стандартной базы исходных данных и нормативов стойкостных испытаний.

**Стандартные основы и концепция модели.** Межгосударственный стандарт [1] рассматривает применение семи основных нитридборных сверхтвердых композитов (табл. 1). Для каждой из этих инструментальных альтернатив стандартом оговорена рекомендуемая область применения. О сравнительной работоспособности композитов судят уже по стандартному нормативу стойкости для каждого из них. Критерием работоспособности рассматривается и производительность. Граничные значения заданных режимами резания производительностей обработки в проведении стойкостных испытаний композитов в рассматриваемой группировке, даже при исключении из сравнительного рассмотрения режимных условий осуществления процесса резания с ударом (в испытании композита 10Д), для безударных рабочих процессов отличаются почти в 6 раз (в сопоставлении для композитов 05 и 06 (табл. 1).

Несмотря на то, что объекты обработки композитов 05 (наиболее производительного) и 06 (наименее производительного из рекомендуемых к работе без удара) отличаются соответственно наиболее низкая и наиболее высокая твердость, логику «чем ниже твердость обрабатываемой стали, тем выше производительность ее обработки нитридборным композитом» в нашем рассмотрении разрушает испытательская практика композитов 01 и 02 в обработке сталей столь же высокого диапазона по твердости, что определен и наименее производительному из безударно работающих композиту 06.

Исходные данные и результаты рейтинговых расчетов

Условия испытаний и рассчитываемые показатели		Марка композита					
		01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10
Твердость стальной заготовки, HRC <sub>3</sub>	Нижняя граница	63	54	63	59	61	56
	Верхняя граница	61	52	61	57	56	50
Процесс резания	Характер	Без удара			С ударом	Без удара	
	Скорость ( $v$ ), м/мин	75			60	110	90
	Подача ( $S_o$ ), мм/об.	0,20	0,15	0,10	0,07	0,10	
	Глубина ( $t$ ), мм	0,8	2,0	0,5	0,4	0,5	1,0
Стойкость, мин	Средняя, $T_{cp}$	20	15	40	30	60	50
	95%-я, $T_{95\%}$	8	6	16	12	24	20
Расчетные относительные оценки	$k_T$	0,33	0,25	0,67	0,5	1	0,83
	$k_Q$	0,53	1	0,17	0,07	0,24	0,4
	$k_W$	0,53	0,75	0,33	0,11	0,73	1

Заданная производительность резания в стойкостных испытаниях композитов 01 и 02 (см. табл. 1) превосходит определенную композитам 11 и Томал-10 в обработке существенно менее твердых сталей соответственно более чем в 2 раза и на четверть, т.е. весьма значимо. Следовательно, стандартная практика стойкостных испытаний по [1] весьма затрудняет ясный учет твердости обрабатываемого материала (стали) в построении расчетной модели функционального рейтинга рассматриваемых нитридных композитов. Поэтому, исходя из проведенного предварительного анализа и из постановочно принятой приоритетности именно стандартных баз данных в определении взаимосвязей расчетной модели, учетом твердости обрабатываемого материала в ней пренебрегаем. Вместе с тем, поскольку установленный [1] регламент проведения испытаний на стойкость исходит из неравных нормативов стойкости для рассматриваемых нитридных композитов,

$$k_T = T_i / T_{\max}, \quad (1)$$

см. табл. 1, то приведенная там же (табл. 1) информация о результатах расчета относительной номинальной производительности,

$$k_Q = Q_i / Q_{\max}, \quad (2)$$

где  $Q = v S_o t$ , недостаточна для интегральной оценки сравнительной работоспособности рассматриваемых композитных пластин между сменами. В качестве такой оценки обратимся к относительному съему припуска  $k_W$ , произведенному за нормативный период стойкости  $T$  (мин), средний или на 95% гарантированный пластинам в партиях, чьи представители прошли испытания (табл. 1):

$$k_W = W_i / W_{\max}, \quad (3)$$

где  $W = Q \cdot T$ .

**Рейтинг.** В табл. 1 представлены результаты расчетов  $k_T$  (1),  $k_Q$  (2) и  $k_W$  (3). Полученные из расчетной модели (3) результаты после ранжирования отражают функциональный рейтинг рассматриваемых нитридных композитов

по критерию максимума ожидаемого съема рекомендуемой к обработке стали. Соответствующий рейтинговый ряд из 7 рассмотренных нитридных сверхтвердых композитов представляет следующую последовательность (в порядке убывания расчетных значений рейтинговой оценки; см. табл. 1): 1) композит Томал-10; 2) композит 05; 3) композит 11; 4-5) композиты 01 и 02; 6) композит 06; 7) композит 10Д.

**Выводы.** Предложена опирающаяся на стандартную методику стойкостных испытаний режущих пластин из сверхтвердых материалов аналитическая модель (3) рейтинговой оценки работоспособности лезвийных инструментов. Разработка реализована на примере группы композитов из нитридных сверхтвердых материалов (композиты 01, 02, 05, 06, 10Д, 11, Томал-10) с использованием баз данных режимов резания и нормативов их стойкостных испытаний по межгосударственному стандарту [1]. Из аналитической модели (3) рейтинговой оценки рассматриваемых по [1] нитридных сверхтвердых композитов и результатов расчетов по ней (табл. 1) предпочтение первого порядка в исследовательской и промышленной практике заслуживает композит Томал-10 (разработчик и производитель – Московское производственное объединение по выпуску алмазного инструмента, Томилино, Россия), а также композиты 05 (Завод “Композит”, Санкт-Петербург, Россия) и 11 (Институт сверхтвердых материалов, Киев, Украина).

**Список литературы:** 1. Пластины режущие сменные из сверхтвердых материалов. Технические условия: ГОСТ 28762-90 [Межгос. стандарт]. Введ. 1991-07-01. – Переизд. – М.: Стандартинформ, 2005. – 25 с.

УДК 515.2:518.62

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВЕРСТАТНОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗАГОТОВКИ ТА ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ФІНІШНОЇ ОБРОБЦІ МЕТОДАМИ ВІЛЬНОГО ОБКАТУ**

**Умінський С.М.,** канд. техн. наук  
(Одеський державний аграрний університет)

*Results of analytical and experimental researches of change of a corner of crossing of axes of the connected surfaces of preparation and the tool are given during processing cogwheels wheels by a tangential method sheving*

Подальше збільшення одиничних потужностей машин вимагає поліпшення всіх їх якісних показників, у тому числі міцності та точності. Технологічний процес виготовлення деталей з високою точністю та міцністю складається з ряду операцій. Досягти вказаних показників якості в такому складному процесі важко, оскільки при зміцненні (особливо термічному або хіміко-термічному) знижується точність, одержана на попередніх операціях, а при механічній обробці після зміцнення знімається найякісніший шар, виникають

несприятливі залишкові напруги, тобто знижуються міцність і твердість робочих поверхонь деталі. При цьому технологічний процес порушується, неефективно використовуються металоріжучі верстати і інструменти та ін. Підвищення ефективності таких технологічних процесів вимагає управління точністю виготовлення деталей на всіх виробничих стадіях. Цю задачу можна вирішити за допомогою оцінки можливих похибок розмірів і форми деталей щодо заданих допусків. Для цього необхідно провести аналіз і визначити відносний вплив конструкторсько-технологічних чинників на утворення геометричних похибок деталей. Впливаючи на чинники, що роблять істотний вплив на розсіяння погрешностей і величину їх середнього значення, можна визначити умови поставки початкового металу, вибрати елементи конструкції деталі, розробити технологію зміцнення і механічної обробки. Якість зубчатих коліс визначається їх міцністю і точністю. В більшості випадків міцність зубчатих коліс досягається шляхом термічного або хіміко-термічного зміцнення. Проте після таких операцій зміцнення значно зменшується другий показник якості – точність. При проектуванні конструкції і розробці технології виготовлення зубчатих коліс необхідно знати величину похибок, які можуть виникнути в процесі виготовлення цих деталей, тобто після механічної і термічної обробки [1].

Щонайвищу продуктивність обробки забезпечують способи шевінгування з подачею інструменту під кутом до осі заготовки [1]. В даний час в машинобудуванні набули поширення п'ять методів шевінгування зубчатих коліс – подовжнє, діагональне, тангенціальне, «короткого ходу» і врізне. Метод тангенціального шевінгування характеризується наявністю дотичної подачі, направленої перпендикулярно осі оброблюваного колеса. При такому методі обробки центр схрещування переміщується уздовж поверхні зуба шевера, в слідстві чого знос ріжучих кромки відбувається рівномірно, стійкість інструменту підвищується. Значні зусилля, що виникають при обробці викликають пружні деформації елементів технологічної системи, величина деформацій елементів технологічної системи зменшується із збільшенням числа проходів [2].

В період урізування шевера в оброблювану заготовку величина припуску, що видаляється, максимальна, що приводить до збільшення плями контакту в процесі обробки. Далі за рахунок збільшення плями контакту, зусилля різання досягають своїх максимальних значень, і подальшого упровадження ріжучих зубців шевера в оброблювану заготовку не відбувається. В цей період шевер своїм ділильним циліндром перекочується по ділильному циліндру оброблюваної заготовки. На початку робочого ходу кут схрещування осей шевера і заготовки  $\Sigma'$  не рівний розрахунковому куту схрещування  $\Sigma$  (має місце перекіс осей шевера і заготовки), а створююча ділильного циліндра шевера складає кут  $\Delta V$  (непаралельність осей), тобто має місце комбінований перекіс осей заготовки і інструменту [3]. Площини  $\Pi$  проведені через крапки контакту  $P_1$  і  $P_3$  ділильних циліндрів шевера і заготовлі на початку і кінці циклу обробки, і є дотичними до ділильного циліндра заготовки. Площини  $F$  проведені через осі шевера на початку і кінці обкату і через крапки  $P_1$  і  $P_3$ . Площини  $E_2$  проведені через вісь за-

готовки і крапки контакту  $P_1$  і  $P_3$ . Площина  $E_1$  проведена дотично до ділительних циліндрів шевера і заготовки при обробці в середнім положенні. Площина  $Q$  проведена через крапку контакту  $P_1$  і  $P_3$  паралельно площини  $E_1$ .  $O_1O_1$  – вісь заготовки;  $O_2O_2$  – вісь шевера на початку циклу обробки;  $O_3O_3$  – вісь шевера в середині циклу обробки;  $O_4O_4$  – вісь шевера наприкінці циклу обробки. З побудов, приведених на мал.1 випливає, що найбільше відхилення осі шевера від розрахункового значення досягається на початку і кінці циклу обробки ( $P_1$  і  $P_3$ ). У середині циклу обробки (т. $P_2$ ) вісь шевера  $O_3O_3$  практично не буде мати відхилень і залишається рівнобіжною площини  $\Pi$ . У цей період площини  $\Pi$  і  $E_1$  збігаються [4]. Для визначення максимального кута непаралельності осей шевера і заготівлі необхідно спроектувати осі заготівлі й інструмента в момент початку обкату на площину  $E_1$  ( $P_1K^1$  і  $P_1P_1^1$ ). Розрахункові залежності для визначення кута непаралельності осей, перекоосу осей шевера і заготовки мають вигляд:

$$\operatorname{tg} \Delta V = \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}; \quad (1)$$

$$\sin \Sigma' = \operatorname{tg} \Sigma \sqrt{\frac{(r_0 \cos^2 \Sigma + r) - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)}}, \quad (2)$$

де  $r_1$  - радіус ділительного кола заготовки, мм;  $r_0$  - радіус ділительного кола шевера, мм;  $\Delta \alpha$  - зміна положення центру схрещування осей заготовки, і інструмента, мм.

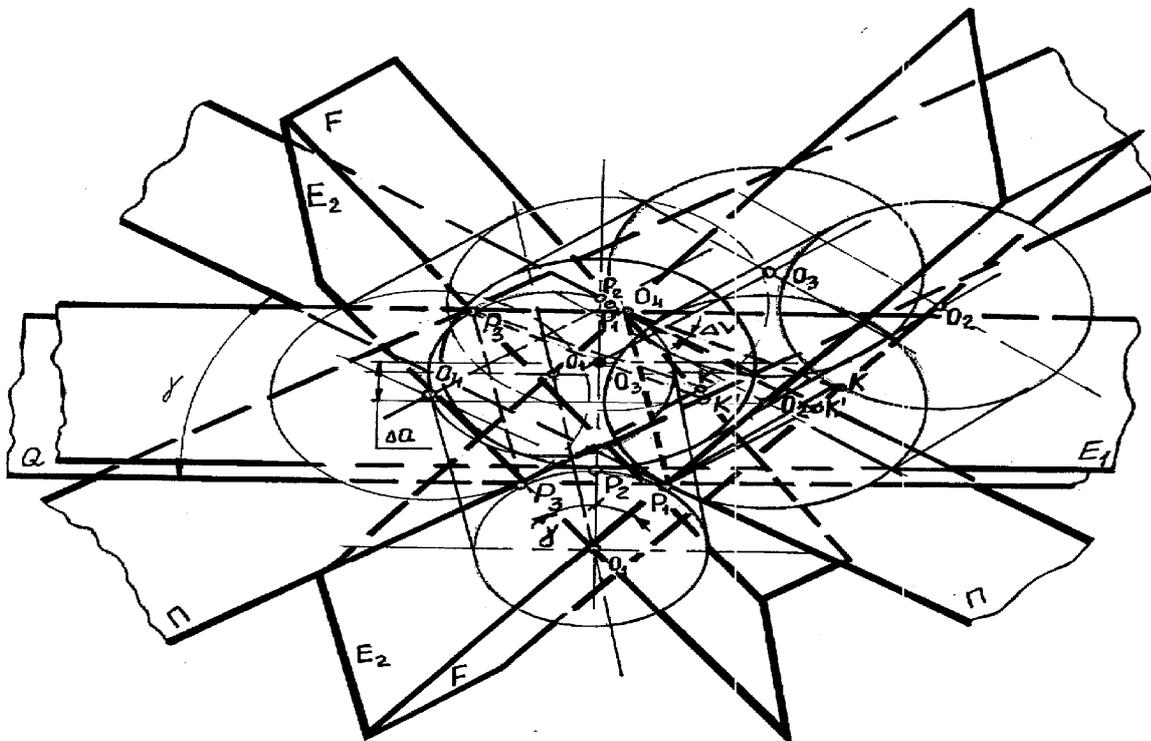


Рис.1.Зміна міжвісьової відстані при тангенціальному методі шевінгування

Так, дослідження похибок виготовлення цементованих зубчатих коліс, різьбових і шліцьових деталей, муфт і зірочок показало, що величина похибки їх розмірів і форми більш ніж в 40 % випадків залежить від технологічних чинників хіміко-термічної обробки, до 22 % – від елементів конструкції, до 24 % – від матеріалу і його полягання і близько 15 % – від чинників механічної обробки. Для виключення впливу розмірного чинника всі похибки нами віднесені до одиниці довжини, тобто розрахована відносна похибка [5].

Похибки еталонного зубчатого колеса є початком відліку і служать основою для визначення умовної вірогідності того, що одержані результати на досліджуваних деталях відносяться до відповідного класу. По теоремі Бейса умовна вірогідність

$$P_i = \frac{P_i f_i(x)}{P_1 f_1(x) + P_i f_i(x)}, \quad (3)$$

де  $P_1, P_i$  – вірогідність появи похибок в заданому інтервалі біля еталонної деталі і досліджуваної;  $f_1(x), f_i(x)$  – щільності вірогідності для еталонної і досліджуваної деталей.

Більшість похибок основних параметрів зубчатого колеса підкоряється нормальному закону розподілу. Тому вірогідність появи досліджуваної похибки відповідного параметра можна визначити по формулі Лапласа

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi n p q}} \exp \left[ -\frac{(k - np)^2}{2npq} \right] \quad (4)$$

або

$$P_i = P^k q^{n-k} \frac{n}{k(n-k)}, \quad (5)$$

де  $n$  – число контрольних перевірок;  $k$  – число раз появи належної похибки з відповідними межами, рівними  $q$ ;

$$q = 1 - P; \quad (6)$$

$P$  – вірогідність значень досліджуваної похибки в належному інтервалі

$$P = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2S^2}} dx, \quad (7)$$

або цей вираз можна записати за допомогою нормованої функції Лапласа, значення якої приводяться в літературі за математичною статистикою і довідниках [6, 7]:

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi(x_2 - \bar{X})/S - \Phi(x_1 - \bar{X})/S, \quad (8)$$

де  $x_1, x_2$  – граничні значення досліджуваної похибки;  $\bar{X}$  – середня арифметична величина похибки;  $S$  – середня квадратична величина похибки.

Узагальнені координати – величини, що описують поведінку системи; їх число рівне числу ступенів свободи системи. Для деталей і їх моделей узагальненими координатами є зміна розмірів, форми, відносного положення

їх поверхонь в процесі зміцнення. Це положення особливо важливо при моделюванні похибок деталей складних конструкцій з великим числом параметрів, що характеризують точність їх виготовлення. До таких деталей перш за все відносяться зубчаті колеса.

Найбільш чітко виявляються закономірності зміни розміру і форми зовнішньої поверхні зубчатого колеса, тобто діаметру вершин зубів  $da$ . Виявляється також функціональний зв'язок зміни діаметру вершин зубів і форми кола виступів з відношенням площ серцевини і зміцненого шару.

Результати аналітичних досліджень показують, що за критерій оцінки точності зубчатих коліс можна прийняти похибки розмірів і форми кола вершин зубів. Оскільки із зміною кола вершин зубів відбувається і зміна решти параметрів, то з'являється можливість одержати відповідні залежності і розрахункові формули [7].

Направлені зміни діаметру зубчатого вінця приводять до зміни кута нахилу зуба  $\beta$ , тобто до певної похибки напрямку зуба.  $F_{\beta}$  Величину похибки напрямку зуба можна визначити залежно від зміни розмірів зубчатого вінця:

$$F_{\beta_{r_1}} = \frac{\pi \Delta db}{\pi d \operatorname{ctg} \beta} = \frac{\Delta db}{d \operatorname{ctg} \beta} = \varepsilon_{pi} \frac{b}{\operatorname{ctg} \beta} = \varepsilon_{pi} b \operatorname{tg} \beta. \quad (9)$$

Проте по ГОСТ 1643–81 похибки напрямку зуба задаються залежно від ширини зубчатого вінця. Тому при одному модулі і ширині зубчатого вінця, але різних числах зубів зубчаті колеса після термічної обробки мають різні похибки напрямку зуба. Чим більше число зубів зубчатого колеса, тим більше похибка напрямку зуба, тим грубіше ступінь.

У процесі обробки тангенціальним шевінгуванням найбільшого значення кут  $\Delta V$  досягає при урізуванні і виході шевера і наближається до нульового значення при максимальних деформаціях технологічної системи. Довжина плями контакту в цьому випадку зменшується, що приводить до урізування ріжучих зубців шевера на велику глибину на початку і кінці циклу обробки. Довжина плями контакту є функцією параметрів верстатного зачеплення, а для випадку обробки тангенціальним методом шевінгування, довжина лінії контакту складатиме не менше половини ширини зуба заготовки [8]. Похибка напрямку зуба в цьому випадку визначається по залежності:

$$F_{\beta} = b_1 \operatorname{tg} \alpha_n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}, \quad (10)$$

де  $F_{\beta}$  – похибка напрямку зуба, мм;  $\alpha_n$  – нормальний кут зачеплення, град;  $b_1$  – ширина зубчатого вінця заготовки, мм;  $\Delta V$  – величина кута непаралельності осей, град.

Приведені на рис.2, рис. 3 графіки показують зміну розрахункового кута схрещування осей залежно від зміни положення центру схрещування осей заготовки і інструменту та кута схрещування осей.

На рис. 4, рис. 5 зображені графіки залежності зміни розрахункового кута схрещування осей залежно від зміни радіусу ділильного кола заготовки, та радіусу ділильного кола шевера.

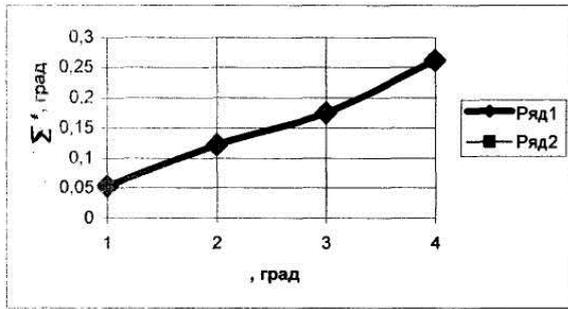


Рис. 2. Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від  $\Sigma$

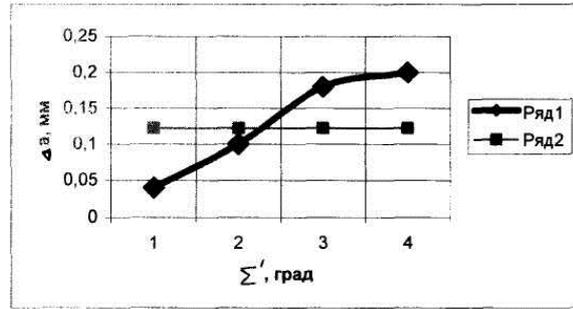


Рис. 3. Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від  $\Delta a$

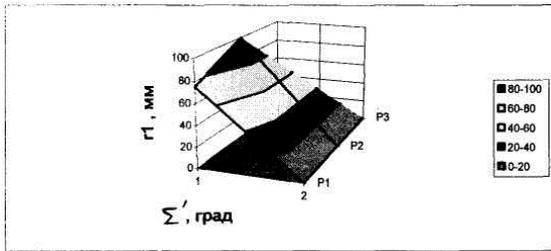


Рис. 4. Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від  $r_1$

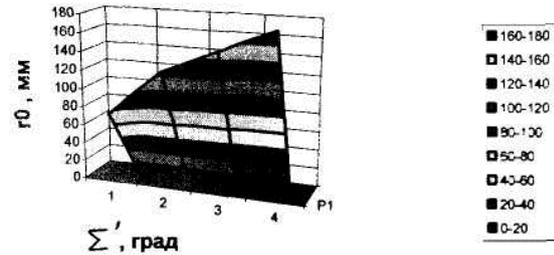


Рис. 5. Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від  $r_0$

Дослідженнями встановлено, що вплив величини модуля на похибку напрямку зуба, що виникає в процесі термічної обробки, незначний. В той же час величина кута нахилу зуба робить істотний вплив на похибку напрямку зуба в межах однієї ширини вінця. Похибки напрямку зуба залежать від радіальної похибки і похибки форми зубчатого вінця. Оскільки в ГОСТ 1643–81 немає залежності похибки напрямку зуба від радіальних розмірів зубчатого вінця, необхідно при нарізанні зубчатих коліс вводити технологічні допуски і відповідні поправки на зміну кута нахилу зуба в процесі термічного або хіміко-термічного зміцнення.

Проведені аналітичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що виникаючі на початку і кінці циклу обробки деформації технологічної системи приводить до зміни кута схрещування осей шевера і заготівки, і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба. Зміна величини припуску, що видаляється, в процесі обробки приводить до зсуву плями контакту уздовж зуба заготівки. Найбільша похибка напрямку зуба відповідає заготівкам, що мають найбільше радіальне биття. Зменшення похибки напрямку зуба досягається при збільшенні числа зубів інструменту.

**Список літератури:** 1. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин / В.П. Пономарев, А.С. Батов, А.В. Захаров. – М.: Машиностроение, 1984. 2. Калашников С.Н. Виготовлення зубчатих коліс / С.Н. Калашников, А.С. Калашников. – М.: Высшая школа, 1985. – 223 с. 3. Сухоруков Ю.Н. Вплив деформації систем на точність процесу шевінгування зубчастих коліс методом тангенціальної подачі / Ю.Н. Сухоруков // Передовий науково-технічний досвід. № 6-63-285/34. – М.; 1983. – С. 35–45. 4. Уминский С.М. Досліджен-

ня впливу параметрів верстатного зачеплення на точність обробки при шевінгуванні методом тангенціальної подачі / С.М. Уминский // Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві: Праці 8-й Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: ХНПК “ФЕД”, 2003. – С. 56–61. 5. Захаров А. В. Выбор рациональных способов базирования при окончательной обработке термически упрочняемых зубчатых колес / А.В. Захаров, В.П. Пономарев, П.А. Гудков // Автомобильная промышленность, 1979. – № 1. – С. 22–24. 6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 610 с. 7. Пономарев В.П. Прогнозирование точности изготовления зубчатых колес на основе конструкторско-технологической классификации / В.П. Пономарев // Вестник машиностроения, 1979. – № 3. – С. 28–31. 8. Сухоруков Ю.М. Инструменты для обробки зубчастих коліс методом вільного обкату / Ю.М. Сухоруков, Р.І. Евстигнеев. – К.: Техніка, 1983. – 120 с.

УДК 621.923

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

**Новиков Г.В.**, канд. техн. наук

(Научный Центр НТК “Эльбор”, г. Харьков)

*An assessment of the influence of parameters of the power tension cutting process on the accuracy and performance of the processing at the stage of nursing during grinding. The factors responsible for the formation of precision and productivity in the processing of nursing. Analytically described roughness treatment at nursing and established the conditions for its reduction, taking into account the simultaneous increase the accuracy of the treated surface*

При шлифовании важно обеспечить требуемые параметры точности и качества обработки. Для этого на заключительном этапе шлифования используется выхаживание, т.е. обработка ведется с отключенной радиальной подачей [1, 2]. Как установлено на практике, применение выхаживания является исключительно важным фактором повышения эффективности шлифования. Вместе с тем, с физической точки зрения процесс выхаживания изучен недостаточно полно. Отсутствуют теоретические решения о закономерностях изменения основных параметров обработки и путях интенсификации процесса. Известные (экспериментальные) результаты справедливы для вполне конкретных рассматриваемых условий обработки, что не позволяет провести с единых позиций анализ закономерностей съема припуска и на этой основе выбрать оптимальные параметры финишной обработки.

Целью работы является теоретический анализ путей повышения эффективности процесса выхаживания при шлифовании по критериям точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

В работах [3, 4] приведены аналитические зависимости для определения производительности обработки  $Q$  при выхаживании и отношения коэффициента резания  $K_{рез} = P_z / P_y$  к условному напряжению резания  $\sigma$ :

$$Q = \frac{\Pi}{\left( \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B} + \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \right)} ; \quad (1)$$

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left( \frac{a_z}{\rho} \right)^2} , \quad (2)$$

где  $P_z, P_y$  – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $\Pi$  – снимаемый припуск, м;  $\tau$  – время обработки, с;  $D_{дет}$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $B$  – ширина обработки, м;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $V_{рез}$  – скорость резания (скорость вращения абразивного инструмента), м/с;  $HV, \tau_{сдв}$  – соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  $a_z$  – толщина среза при абразивной обработке, м;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки инструмента, м.

Как следует из зависимости (1), производительность обработки  $Q$  является функцией отношения  $K_{рез} / \sigma$ , которая в свою очередь зависит от толщины среза  $a_z$  и соответственно производительности обработки  $Q$ . Для установления данной закономерности, т.е. однозначного представления производительности обработки, воспользуемся аналитической зависимостью для определения максимальной толщины среза  $a_z$  при шлифовании [4]:

$$a_z = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot \rho^2} , \quad (3)$$

где  $\bar{X}$  и  $m$  – зернистость и объемная концентрация зерен в алмазном круге;  $V_{кр}, V_{дет}$  – скорости круга и детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $R_{кр}, R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м;  $\rho$  – радиус округления вершины зерна, м.

Подставляя (3) в зависимость (2), имеем:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{\bar{X}^2}{3 \cdot \rho^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left[ \frac{315 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр}} \right]^2} . \quad (4)$$

Наибольшее влияние на отношение  $K_{рез} / \sigma$  (рассматривая при шлифовании отношение  $K_{ш} / \sigma$ , где  $K_{ш} = K_{рез}$  – коэффициент шлифования) оказывают параметры  $\rho$  и  $\bar{X}$ . По мере затупления зерен круга их радиусы  $\rho$  увеличиваются, что приводит к уменьшению отношения  $K_{ш} / \sigma$ . Следовательно, ос-

новным условием увеличения отношения  $K_{ш}/\sigma$  и повышения эффективности шлифования необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен круга. Исходя из зависимости (4), увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  также можно добиться существенного увеличения отношения  $K_{ш}/\sigma$ . Однако, как известно, с увеличением  $\bar{X}$  увеличивается радиус  $\rho$ , что препятствует росту отношения  $K_{ш}/\sigma$ .

В рассматриваемом процессе выхаживания при шлифовании поперечная подача равна нулю. Съем металла происходит за счет упругих перемещений в технологической системе. Очевидно, фактическая глубина шлифования  $t$  с течением времени будет уменьшаться (вплоть до нуля) и, исходя из зависимости (4), будет приводить к уменьшению отношения  $K_{рез}/\sigma$  по закону  $t^{1/3}$ . Как видим, интенсивность уменьшения  $K_{рез}/\sigma$  не столь существенна.

Произведем количественную оценку влияния изменения соотношения  $K_{рез}/\sigma$  на производительность обработки  $Q$ . Для этого в зависимости (4) произведение параметров режима шлифования  $V_{дет} \cdot t$  выразим через производительность обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ . Если подставить зависимость (4) в (1), то приходим к уравнению относительно неизвестной величины  $Q$ :

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{2/3} - \Pi = 0, \quad (5)$$

где  $M = \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B}$ ;

$$N = \frac{3 \cdot \rho^2}{c \cdot V_{кр} \cdot \bar{X}^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{HV^2 \cdot \tau_{сдв}}{2} \left[ \frac{m \cdot V_{кр}}{315 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{V_{дет}}{B} \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}} \right]^2}.$$

Данное уравнение может быть решено лишь численным методом. Для наглядности решения упростим уравнение (5), рассматривая его в виде квадратного уравнения и принимая  $x^2 = Q$ :

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{0,5} - \Pi = 0 \text{ или } x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0. \quad (6)$$

Решая квадратное уравнение, после несложных преобразований, имеем:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением величины снимаемого припуска  $\Pi$  и уменьшением параметров  $N$  и  $M$ . Уменьшение  $N$  предполагает уменьшение  $\rho$ ,  $B$ ,  $m$  и уве-

личение  $c$ ,  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$ ,  $\bar{X}$ . Уменьшение  $N$  предполагает уменьшение времени обработки  $\tau$ , т.е. с течением времени  $\tau$  производительность обработки  $Q$  будет уменьшаться. Это согласуется с начальной зависимостью (1), рассматривая в ней отношение  $K_{рез} / \sigma$  заданным. Однако, влияние времени обработки  $\tau$  на производительность обработки  $Q$  в зависимости (7) значительно ниже, чем в зависимости (1). Следовательно, увеличивается время устранения погрешности размера обрабатываемой детали. Чтобы усилить влияние времени обработки  $\tau$  на производительность  $Q$ , необходимо в зависимости (7) существенно уменьшить параметр  $N$ , а параметр  $M$ , наоборот, увеличить. Уменьшение параметра  $N$  связано в первую очередь с уменьшением радиуса округления вершины режущего зерна  $\rho$  и увеличением зернистости круга  $\bar{X}$ . Увеличить параметр  $M$  можно главным образом за счет уменьшения ширины шлифования  $B$ , так как диаметр детали  $D_{дет}$  – заданная величина.

Если в зависимости (7) слагаемое  $N^2 / 4\Pi^2$  будет больше  $M / \Pi$ , то влияние времени обработки  $\tau$  на производительность обработки будет несущественно и процесс исправления погрешности обработки «растянется» во времени. Это подтверждается практикой шлифования, в особенности при резании затупленным инструментом, когда в процессе длительного выхаживания не удается добиться заметного уменьшения величины упругого перемещения.

Данная закономерность имеет место и при шлифовании алмазным инструментом. В этом случае определяющим фактором является существенное увеличение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет увеличения трения связки круга (в особенности металлической связки) с обрабатываемым материалом. В результате знаменатель зависимости (1) резко увеличивается, соответственно производительность обработки  $Q$  неограниченно уменьшается, что не позволяет практически реализовать процесс выхаживания. Произведем расчет и анализ шероховатости поверхности на этапе выхаживания при шлифовании.

При шлифовании прямолинейного образца без поперечной подачи (т.е. при выхаживании) уравнение, описывающее баланс перемещений в технологической системе, имеет вид [3]:

$$y + V_{\phi} \cdot \tau = \Pi, \quad (8)$$

где  $y$  – упругое перемещение в технологической системе, м;  $V_{\phi}$  – линейная скорость съема металла, м/с;  $\Pi$  – снимаемый припуск при выхаживании, м.

Упругое перемещение  $y$  определяется радиальной составляющей силы резания  $P_y = c \cdot y$ . Предположим, что при абразивной обработке в контакте с обрабатываемым материалом находится  $n_0$  зерен. Если принять, что режущие зерна выступают над уровнем связки абразивного или алмазно-абразивного инструмента на одинаковую высоту и имеют конусообразную форму режущей части с углом при вершине  $2 \cdot \gamma$ , то для вдавливания режущих зерен в обрабатываемый металл необходимо приложить радиальную силу  $P_y$ , равную

$$P_y = \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot R_{max}^2 \cdot n_0 \cdot HV, \quad (9)$$

где  $R_{max}$  – глубина вдавливания режущего зерна в обрабатываемый металл (условно равна максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности – параметру шероховатости обработки  $R_{max}$ ), м;  $n_0 = S \cdot k$ ;  $S$  – площадь контакта инструмента с обрабатываемой деталью, м<sup>2</sup>;  $k$  – поверхностная концентрация зерен инструмента, шт./м<sup>2</sup>.

Параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  при шлифовании образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V'_{дет}$ , определяется зависимостью [5]:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V'_{дет}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (10)$$

Параметр  $V'_{дет}$  равен  $V_{ф}$ . Разрешим зависимость (10) относительно скорости  $V'_{дет} = V_{ф}$  и подставим полученную зависимость в уравнение (8). Подставив в уравнение (8) также зависимость (9), имеем

$$R_{max} = \sqrt{\frac{\Pi \cdot c}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot (\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot S \cdot HV + 2 \cdot V_{кр} \cdot c \cdot \tau)}}. \quad (11)$$

Как видно, с течением времени обработки  $\tau$  параметр шероховатости  $R_{max}$  уменьшается. Более существенное влияние на параметр  $R_{max}$  оказывают параметры  $\Pi, \gamma, k$ . Важнейшим условием уменьшения параметра  $R_{max}$  следует рассматривать увеличение поверхностной концентрации зерен  $k$ , т.к. увеличение угла  $\gamma$  ведет к уменьшению отношения  $a_z / \rho$ , увеличению силовой напряженности и ухудшению процесса резания. Для сравнения определим параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  при шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ , определяемым зависимостью (9)

$$R_{max} = \sqrt{\frac{c \cdot y}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot k \cdot S}}. \quad (12)$$

При условии  $\tau = 0$  зависимость (11) принимает вид зависимости (12), рассматривая при этом  $y = \Pi$ . Это означает, что обработка по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$  приводит к большим значениям параметра шероховатости обработки  $R_{max}$ , чем обработка по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе. Значения  $R_{max}$  равны для двух рассматриваемых схем лишь в начальный момент обработки (при условии  $\tau = 0$ ). Следовательно, с точки зрения уменьшения параметра шероховатости  $R_{max}$  эффективно обработку вести по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе, т.е. реализуя процесс выхаживания.

Таким образом, произведена оценка влияния параметров силовой напряженности процесса резания на точность и производительность обработки на этапе выхаживания при шлифовании. Определены факторы, ответственные за

формирование точности и производительности обработки при выхаживании. Аналитически описана шероховатость обработки при выхаживании и установлены условия ее уменьшения.

**Список литературы:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1995. – 36 с.

УДК 621.923-5

## ОБОБЩЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

Лебедев В.Г., докт. техн. наук, Клименко Н.Н., канд. техн. наук,  
Луговская Е.А., канд. техн. наук  
(Одесский национальный политехнический университет)

*The results of research capacity and temperature of the grain cutting unit, based on the controversial process rezaniya. Thus, a single grain cutting capacity is a function of at least 4 variables - deepening grain size in metal  $h_1$ , front angle  $\gamma$ , ed warp speed, cutting temperature  $\Theta$ . As the power source of heat in grinding grains formed by a group working in the contact circle of detail, knowledge of patterns changing power cutting and cutting single grain temperature makes it possible to calculate the total power cut and consequently contact temperature grinding. The article provides a summary of the power and temperature of cutting a single abrasive grain*

**Введение.** При движении абразивного зерна по трассе, начиная с момента врезания до момента выхода зерна из обрабатываемого металла, происходит непрерывное изменение величины углубления зерна в металл, связанное с тем, что трасса представляет собой удлиненную трохойду и непрерывное изменение переднего угла  $\gamma$ , что оказывает значительное влияние на процесс резания. Кроме того, при шлифовании имеет место высокоскоростная деформация, в результате чего предел прочности металла значительно увеличивается [1, 2]. С другой стороны, при движении абразивного зерна в металле происходит значительное тепловыделение, в результате чего наблюдается местное разупрочнение металла.

Таким образом, в зоне контакта зерна с металлом предел прочности металла является функцией двух переменных – скорости деформации и теплового потока или же температуры резания. Следовательно, мощность резания единичного зерна является функцией по крайней мере 4-х переменных: величины углубления зерна в металл  $h_1$ , переднего угла  $\gamma$ , скорости деформации  $\epsilon_d$ , температуры резания  $\Theta$ .

Целью настоящей работы является разработать научно обоснованные аналитические зависимости, дающие возможность определять как мощность, так и температуру резания единичным зерном.

**Основная часть.** При резании металлов единичным зерном, затрачивается определенная работа, что вызывает силовые и тепловые процессы при резании, которые при теоретическом анализе удобнее рассматривать параллельно, так как от сил резания можно перейти к мощности резания. Как показано, при движении зерна по его трассе с момента врезания до выхода из металла, происходит непрерывное изменение величины углубления зерна в металл. Это, в свою очередь, обеспечивает непрерывное изменение переднего угла  $\gamma$ . Оба эти фактора оказывают значительное влияние на тепловыделение. Кроме того, при шлифовании имеет место высокоскоростная деформация, которая приводит к значительному увеличению предела прочности металла. С другой стороны, при движении зерна в металле, под действием выделяющегося тепла предел прочности имеет тенденцию к снижению. Таким образом, предел прочности является функцией двух факторов: скорости деформации и температуры резания.

Следовательно, сила резания и тепловой поток от единичного зерна функционально зависят от изменения величины углубления  $h$ , переднего угла  $\gamma$  и температурно-скоростного фактора, влияющего на механические свойства шлифуемого металла [3].

Выражение для элементарной силы резания  $P_z$  определяется:

$$P_z = 0,6\sigma_\delta \cdot f \cdot A, \quad (1)$$

где  $\sigma_\delta$  – предел прочности с учетом температурно-силового фактора;  $f$  – площадь пятна контакта зерна с металлом;  $A$  – коэффициент, определяемый:

$$A = \frac{\cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma}{\sin \theta \cdot [(1 - \mu \cdot \mu') \cdot \cos(\gamma + \theta) - (\mu + \mu') \cdot \sin(\gamma + \theta)]}, \quad (2)$$

$\theta$  – угол скалывания;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\mu'$  – коэффициент внутреннего трения деформируемого металла в направлении плоскости скалывания.

Площадь контакта зерна с металлом представляется в виде:

$$f = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус закругления зерна;  $h$  – величина углубления зерна в металл по длине дуги контакта.

При определении силы резания  $P_z$  единичным зерном существенную роль играет передний угол  $\gamma$ . Передний угол является величиной переменной по длине дуги контакта и выражается следующей функциональной зависимостью:

$$\sin \gamma = \frac{r - h}{r}. \quad (4)$$

При шлифовании образование стружки сопровождается возникновением высоких температур, которые оказывают влияние на сопротивление металла пластическому деформированию. Прочность металла в этом случае изменяется по экспоненте [4, 5]:

$$\sigma_m = \sigma_{nl} \cdot e^{m(T_{nl} - T)}, \quad (5)$$

где  $T_{nl}$  – температура начала плавления металла по абсолютной шкале;  $m$  – коэффициент интенсивности падения  $\sigma_m$  при повышении температуры  $T$ ;  $\sigma_{nl}$  – прочность металла при температуре его плавления.

С другой стороны, с увеличением скорости шлифования повышается сопротивление металла деформации. В работах [4, 5] эти два процесса увязываются посредством температуры, модифицированной по скорости.

Таким образом, механические свойства шлифуемых материалов в локальной области являются функцией температурного и скоростного факторов. Объединяя действие этих факторов на предел прочности в один, имеющий размерность температуры, получим следующую зависимость для динамического предела прочности при высокоскоростной деформации:

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{nl} \cdot e^{m(T_{nl} - T_{mod})}, \quad (6)$$

где

$$T_{mod} = T \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_0} \right), \quad (7)$$

$T_{mod}$  – так называемая модифицированная температура;  $\beta$  – скорость деформации, при которой определяется температура;  $\beta_0$  – скорость деформации при стандартной методике испытаний;  $C$  – коэффициент, зависящий от шлифуемого материала.

Расписывая окончательно формулу для расчета динамического предела прочности, получим:

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{nl} \cdot e^{m \cdot T_{nl} - m \cdot T \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_0} \right)}. \quad (8)$$

По данным работ [6, 7], определяя скорость деформации как отношение скорости резания к толщине элемента снимаемой стружки, формулу (8) можно переписать в виде:

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{nl} \cdot \exp \left[ m \cdot T_{nl} - m \cdot T \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_0 \cdot \tau} \right) \right]. \quad (9)$$

Рассмотрим процесс теплообразования на поверхности шлифуемого металла, где температура описывается следующим уравнением:

$$T_n = \frac{Q \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \left( 1 - C^{-\frac{r \cdot h}{2 \alpha \cdot \tau}} \right), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – температуропроводность металла;  $\lambda$  – теплопроводность металла;  $\tau$  – время действия источника;  $Q$  – тепловой поток зерна.

Если в формуле для определения значения динамического предела прочности учесть полученную зависимость для величины углубления режущего зерна в металл, то выражение для мгновенного значения предела прочности на поверхности шлифуемого металла будет:

$$\sigma_{\delta} = \sigma_{nl} \cdot \exp \cdot \left[ m \cdot T_{nl} - \frac{m \cdot Q \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \tau}{2\alpha \cdot \tau} \cdot \left( 1 - e^{\frac{r \cdot v_{\delta} \cdot \tau \cdot \sin \frac{v_k \cdot \tau}{R}}{2\alpha \cdot \tau}} \right) \cdot \left( 1 - C \cdot \ln \frac{v_k}{\beta \cdot v_{\delta} \cdot \tau \cdot \sin \frac{v_k}{R}} \right) \right] \cdot \exp \left[ m \cdot T_{nl} - m \cdot T \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_0 \cdot \tau} \right) \right]. \quad (11)$$

Таким образом, с учетом полученных соотношений, выражение для элементарного теплового потока отдельного зерна примет вид:

$$dq = P_z \cdot v_k d\tau, \quad (12)$$

где  $P_z$  – элементарная сила резания, определяемая по формуле с учетом соотношений, приведенных выше.

Общая интенсивность теплового потока от единичного зерна в зависимости от времени, контакта зерна с металлом составит:

$$Q = \int_0^{\tau_0} v_k \cdot P_z d\tau = 1,2\pi \cdot r \cdot v_{\delta} \cdot \sigma_{nl} \cdot A \cdot v_k \cdot \int_0^{\tau_0} \tau \cdot \sin \frac{v_k}{R} \cdot \tau \cdot \exp \left[ m \cdot T_{nl} - m \cdot T \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_0 \cdot \tau} \right) \right] d\tau. \quad (13)$$

Интегрирование данного выражения в аналитическом виде не представляется возможным, поэтому воспользуемся аппроксимацией основных величин, входящих в формулу (13). Выражение для динамического предела прочности можно аппроксимировать с погрешностью 1,5...2,0 % степенной функцией в виде:

$$\sigma_{\delta} = K_{\delta} \cdot T^{-2,5} = K_{\delta} \left[ \frac{Q \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \tau}{2\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{r \cdot h}{2\alpha \cdot \tau}} \right) \right]^{-2,5}. \quad (14)$$

Учитывая, что выражение  $y = 1 - e^{-\frac{r \cdot h}{2\alpha \cdot \tau}}$  в диапазоне изменения  $0 \leq h \leq 6$  мкм, может быть аппроксимировано с погрешностью 2 % выражением  $y = \frac{r \cdot h}{q \cdot r \cdot h}$ , формула для  $\sigma_{\delta}$  примет вид:

$$\sigma_{\delta} = K_{\delta} \cdot \left[ \frac{4\lambda \cdot \sqrt{\pi} \cdot a \cdot \tau}{q \cdot r \cdot h} \right]^{2,5} = K_{\delta} \cdot \left[ \frac{4\lambda \cdot \sqrt{\pi} \cdot a \cdot \tau \cdot R_k}{q \cdot r \cdot v_{\delta} \cdot v_k \cdot \tau^2} \right]^{2,5}, \quad (15)$$

где  $\ln K_{\delta} = 20,441$ .

Величина углубления зерна в металл  $h$ , ввиду малости угла контакта зерна с металлом, принята равной  $h = \frac{v_{\delta} \cdot v_k \cdot \tau^2}{R_k}$ .

В силу принятой аппроксимации выражение для элементарного теплового потока от отдельного зерна (12) можно переписать в виде:

$$dq = P_z \cdot v_k \cdot d\tau = B \cdot \tau^{-0,5} d\tau, \quad (16)$$

где коэффициент  $B$  определится следующим образом:

$$B = \left[ \frac{2,4a \cdot A \cdot K_{\delta} \cdot (4\pi \cdot \lambda \cdot R)}{r \cdot v_{\delta}} \sqrt{\frac{\lambda \cdot R_k \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{r \cdot v_{\delta} \cdot v_k}} \right]^{\frac{2}{7}}. \quad (17)$$

Общая интенсивность теплового потока от единичного зерна в этом случае будет:

$$\int_0^Q dq = \int_0^{\tau} B \cdot \tau^{-0,5} d\tau, \quad (18)$$

где  $\tau$  – текущая координата времени.

После интегрирования получим:

$$Q = 2B \cdot \sqrt{\tau}. \quad (19)$$

Таким образом, интенсивность теплового потока зерна является величиной переменной и зависит от времени движения зерна по дуге контакта его с металлом.

Подставив выражения (15), (2), (3), (4) в (1), получим зависимости для сил  $P_z$  и  $P_y$ :

$$P_z = \frac{2B}{v_k} \cdot \sqrt{\tau}; \quad (20)$$

$$P_y = \frac{2B \cdot (\sin \gamma + \mu \cdot \cos \gamma)}{v_k \cdot (\cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma)}. \quad (21)$$

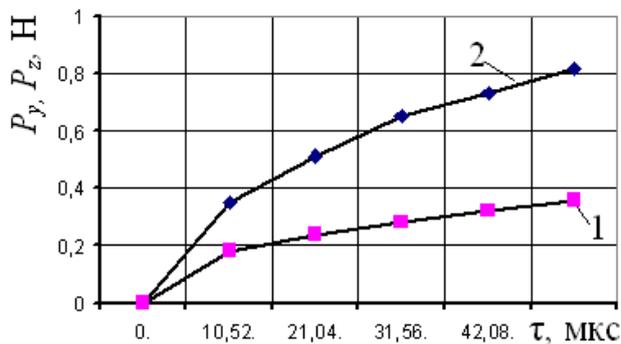


Рис. 1. Расчетные зависимости значения сил резания единичным зерном: 1 –  $P_y$ ; 2 –  $P_z$

По выражениям (20) и (21) построены зависимости изменения сил резания  $P_y$  и  $P_z$  на протяжении времени контакта зерна с металлом (рис. 1). Как видно из рис. 1, при сравнительно напряженных режимах резания  $v_k = 35$  м/с;  $v_{\delta} = 0,1$  м/с;  $t = 0,01$  мм, радиусе закругления зерна  $r = 14$  мкм, значение сил  $P_y$  и  $P_z$  колеблется соответственно в пределах 0,35... 0,85 Н.

Согласно настоящим представлениям о механизмах пластической деформации (4,5), она осуществляется в результате срабатывания граничных дислокационных источников, приводящих к образованию и развитию полос скольжения. При этом скорость пластической деформации определяется выражением:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = 2 \cdot n' \cdot \gamma'_{\delta} \cdot \omega, \quad (22)$$

где  $n'$  – удельная площадь полос скольжения;  $\gamma'_{\delta}$  – локальная деформация;  $\omega$  – скорость расширения полос скольжения.

Из условия взаимного связывания дислокационных петель в полосе скольжения получается оценка для

$$\gamma'_\partial = 4 \cdot \bar{b} \cdot \bar{l}_k \cdot \bar{l}_b \cdot \rho_s = \frac{20\pi \sqrt{(1-\nu)(\tau' - \tau'_{\partial 0})(\tau' - \tau'_{k0})}}{\sqrt{6} \cdot G}, \quad (23)$$

где  $b$  – вектор Бюргерса;  $\rho_s$  – плотность дислокаций;  $\bar{l}_b$ ,  $\bar{l}_k$  – средняя длина пробега краевой и винтовой компонентой;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига;  $\tau_{\partial 0}$  – напряжения трения для винтовой компоненты;  $\tau_{k0}$  – напряжение трения для краевой компоненты.

При этом заполнение полосы скольжения дислокационными петлями происходит до тех пор, пока выполняется условие  $S \cdot \delta \geq 1$ , где  $S$  – площадь петли;  $\delta$  – коэффициент размножения дислокаций. Размножение дислокаций и расширение полос скольжения происходят в результате термоактивируемых процессов, так что результирующая скорость пластической деформации, учитывающая локальное упрочнение, равна

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = 2n^* \cdot \gamma \cdot \bar{h} \cdot \nu \cdot \exp\left[-\frac{u(\tau')}{k \cdot \theta'}\right] + \frac{d\gamma}{d\tau'} \cdot \frac{d\tau'}{d\tau} \cdot \xi, \quad (24)$$

где  $\bar{h}$  – среднее расстояние выброса при поперечном скольжении;  $u(\tau')$  – энергия активации;  $\theta'$  – абсолютная температура;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\xi$  – относительный объем полосы скольжения;  $\tau'$  – сопротивление деформирования с учетом скорости деформации.

При этом сопротивление деформированию определится из выражения:

$$\tau' = \tau'_0 + C \cdot \ln \left( \frac{\frac{d\varepsilon}{d\tau}}{\frac{d\varepsilon_0}{d\tau}} \right), \quad (25)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности.

При высоких напряжениях и скоростях деформации осуществляется переход к безактивационным механизмам пластической деформации, при этом лимитирующей является скорость вязкого торможения дислокаций. При этом происходит линейное нарастание сопротивления.

Результирующая скорость деформации при этом лимитируется общей пластичностью активных расширяющихся дислокационных петель и оценивается как на основе развития полос скольжения, так и согласно модели цепных дислокационных реакций. При высокоскоростном движении дислокаций действуют различные механизмы диссипации энергии, в частности одним из основных является фононный ветер, то есть рассеяние дислокаций тепловых фононов, а также другие виды рассеяния и генерации различного рода квазичастиц и дефектов. Кроме известных механизмов рассеяния возможно также взаимодействие дислокаций с нетепловыми нулевыми фононами в силу наличия эффекта Мессбауэра, что может оказаться существенным при температурах ниже дебаевской. В данных условиях размножение дислокаций также осуществляется безактивационно по столкновительному механизму.

Скорость пластической деформации определится из выражения:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{V_{кр}}{h}. \quad (26)$$

Согласно формуле термоактивируемой деформации без учета сопротивления деформированию с изменением скорости деформации и температуры:

$$\left( \frac{\frac{d\varepsilon}{d\tau}}{\frac{d\varepsilon_0}{d\tau}} \right) = \exp \left[ -\frac{u(\tau')}{k \cdot \theta'} + \frac{u(\tau'_0)}{k \cdot \theta'_0} \right]. \quad (27)$$

Здесь

$$u(\tau') = u_0 - b \cdot l \cdot \Delta R \cdot \tau' \approx V_1^* (\tau_n - \tau'), \quad (28)$$

где  $V_1^* = b \cdot l \cdot \Delta R$  – активационный объем;  $\Delta R$  – активационный путь;  $\tau'_n$  – напряжение Пайерса.

Таким образом,

$$\frac{u(\tau_0)}{k \cdot \theta'_0} - \frac{u(\tau)}{k \cdot \theta'} = \frac{V_1^* \cdot \tau'_n}{k} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{V^*}{k} \left( \frac{\tau'}{\theta'} - \frac{\tau'_0}{\theta'_0} \right) = \ln \left( \frac{\frac{d\varepsilon}{d\tau}}{\frac{d\varepsilon_0}{d\tau}} \right). \quad (29)$$

Окончательно

$$\tau' = \tau_0 \frac{\theta'}{\theta'_0} - \tau'_n \left( \frac{\theta'}{\theta'_0} - 1 \right) + \frac{k \cdot \theta}{V_1^*} \cdot \ln \left( \frac{\frac{d\varepsilon}{d\tau}}{\frac{d\varepsilon_0}{d\tau}} \right). \quad (30)$$

Заменяя  $\tau'$  и  $\tau'_0$  на  $\sigma$  и  $\sigma_0$  в соответствии с третьей теорией прочности и решая совместно на компьютере уравнения (29) и (30), можно получить значения для  $Kv$ . Следует отметить, что решение может быть получено только в численном виде. Обработка результатов показывает, что выражение для  $Kv$  может быть аппроксимировано, для диапазона скоростей вращения круга 20 – 50 м/с, выражением

$$Kv = 5,58 \cdot 10^6 \cdot V_{кр}^{0,4}. \quad (31)$$

Значение мгновенной мощности определяется из выражения

$$q = 0,6948 \cdot V_{кр}^{0,56} \cdot x^{1,44}. \quad (32)$$

Проведя математические преобразования, изложенные в работе [3], можно получить выражение для мощности теплового источника, возникающего при резании металла зерном, переменной на протяжении всего времени контакта зерна с металлом

$$Q = 6\pi \cdot V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\frac{K_\partial \cdot \sigma_{ст} \cdot Ar \cdot V_\partial \cdot l_\phi}{R_{кр}}} \cdot \sqrt[5]{\left( \frac{\varepsilon_a}{V_{кр}} \right)^3} \cdot \sqrt{\tau} = B \cdot \sqrt{\tau}, \quad (33)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности шлифуемого металла;  $K_\partial$  – коэффициент, учитывающий изменение прочностных характеристик шлифуемого металла, в зависимости от условий резания;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности

сти шлифуемого металла;  $R_{кр}$  – радиус шлифовального круга;  $V_{\partial}$  – скорость перемещения детали относительно заторможенного шлифовального круга;  $V_{кр}$  – скорость вращения круга;  $r$  – радиус закругления режущего зерна.

Температура металла в точке, которую режет абразивное зерно, будет:

$$\theta = \frac{3R_{кр}V_{кр} \left[ \sqrt{\left( x_0 + \sqrt{\frac{2 \cdot r \cdot V_{\partial} \cdot l_{\phi} \cdot x_0}{V_{кр} \cdot R_{кр}}} \right)^3 - \sqrt{x_0^3}} \right]}{8 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot \gamma \cdot a \cdot r_1 \cdot r \cdot V_{\partial} \cdot l_{\phi} \cdot x_0} \cdot \left[ \Phi \frac{r_1}{2\sqrt{a(\tau' - \tau)}} - \Phi \frac{r_1}{2\sqrt{a \cdot \tau'}} \right]. \quad (34)$$

Моделируя данное выражение в среде MATCAD и анализируя его, можно сделать выводы, что в зависимости от того, на каком участке трассы зерна находится точка, в которой определяется температура, значения последней могут значительно отличаться.

Проведенные расчеты показывают, что значения мощности резания единичным зерном могут составлять величины 25–50 Вт.

Значения температуры резания единичным зерном, расчет которых произведен по выражению (34), показывают, что ожидаемые максимальные температуры могут достигать до 800–1200 °С.

**Выводы.** 1. В зоне контакта зерна с металлом предел прочности последнего является функцией двух переменных: скорости деформации и теплового потока или же температуры резания.

2. Мощность резания единичного зерна является функцией по крайней мере 4-х переменных – величины углубления зерна в металл  $h_1$ , переднего угла  $\gamma$ , скорости деформации  $\varepsilon_d$  и температуры резания  $\Theta$ .

3. Полученные в статье данные позволяют научно обоснованно увязать эти противоречивые факторы и получать достаточно точные величины как мощности резания, так и температуры.

4. Полученные данные могут быть использованы при математическом моделировании процесса резания при шлифовании в процессе разработки имитационных математических моделей.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Якимов А.В. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес / А.В. Якимов. – Х.: Институт системных исследований образования, 1997. – 212 с. 3. Аль Аджейлат С.А. Объем металла, удаляемый зерном КНБ, при шлифовании закаленной стали / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // Одесса: Проблемы техники. Научно-виробничий журнал, 2008. – № 3. – С. 128–136. 4. Зайков М.А. Влияние скорости деформации на прочность углеродистой стали при высоких температурах / М.А. Зайков // ЖТФ, 1949. – Т. XIX. – № 6. – С. 41–46. 5. Зайков М.А. Прочность углеродистых сталей при высоких температурах / М.А. Зайков // ЖТФ, 1946. – Т. XIX. – № 6. – С. 37–44. 6. Исаев А.И. Методика расчета температур при шлифовании / А.И. Исаев, С.С. Силян // Вестник машиностроения, 1972. – № 10. – С. 50–53. 7. Шлифование жаропрочных сплавов и чугунов кругами из синтетических алмазов на металлических связках / Исаев А.И. и др. // Вестник машиностроения, 1972. – № 10. – С. 50–53.

## ВЫРАВНИВАНИЕ ПРИПУСКА ПО ПРОФИЛЮ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

**Лищенко Н. В.**, канд. техн. наук

(Одесская национальная академия пищевых технологий)

**Ларшин В.П.**, докт. техн. наук

(Одесский национальный политехнический университет)

*An analysis of the influence of the number of gear wheel initial valley (in which centering is made) on the parameters of the stock to be removed distribution along the valley is given*

Зубошлифование является основным методом окончательной обработки закаленных зубчатых колес (ЗК), имеющих высокую твердость (HRC 56-65), высокую степень точности (4...7 по ГОСТ 1643-81) и высокий класс чистоты поверхности зубьев (7...8 по ГОСТ 2789-73). Зубошлифование осуществляют либо методами обкатки (огибания), либо методом копирования профиля шлифовального круга [1]. Зубошлифование по методу обкатки производят одним или двумя шлифовальными кругами, рабочие части которых воспроизводят профиль производящей рейки того же модуля и угла зацепления. Шлифование производят или с дискретным (периодическим) делением (на станках, работающих двумя тарельчатыми кругами, одним конусным кругом или одним плоским кругом) или с непрерывным делением (на станках, работающих червячным кругом – самым производительным методом).

Наиболее точным является зубошлифование по методу обкатки с помощью эвольвентного кулака плоским шлифовальным кругом большого диаметра (4...3 степени точности), а также методом обкатки двумя тарельчатыми кругами (5...4 степени точности). Однако производительность этих методов в 5...6 раз ниже производительности зубошлифования червячным кругом (5 степень точности). Поэтому первый из них (плоским шлифовальным кругом) применяют в инструментальном производстве, а второй (двумя тарельчатыми кругами) – для наиболее ответственных зубчатых колес, например, в авиастроении.

Для всех перечисленных методов зубошлифования актуальной является задача определения фактического припуска на обработку, расположенного по левой и правой стороне впадины обрабатываемого ЗК. Величина этого припуска должна превышать так называемую однопрофильную погрешность ЗК. Природа этой однопрофильной погрешности обусловлена тем, что любой технологический процесс формообразования ЗК является периодическим. В этом процессе имеется большое количество источников элементарных гармонических ошибок, которые суммируются на изделии (ЗК). Установлено, что обрабатываемое ЗК является носителем периодической ошибки, которая в свою очередь состоит из гармонического ряда колебаний, периоды которых кратны периоду основного синусоидального колебания, т.е. [2]

$$T_1 = 2T_2 = 3T_3 = 4T_4 = \dots = iT_i,$$

где  $T_i = 2\pi n$  – период основного колебания;  $n$  – количество оборотов ЗК (как правило,  $n = 1$ ).

Рассмотрение ошибок ЗК в виде периодической функции (с минимальным влиянием случайных ошибок) позволило Тайцу Б.А. по-новому подойти к решению ряда практических задач: находить ошибки ЗК по частным синусоидальным колебаниям, отыскивать правильные методы измерения общей периодической ошибки ЗК. Разложить общую периодическую ошибку ЗК при технологическом анализе на ряд отдельных гармонических составляющих для определения периода, амплитуды и начальной фазы гармоник с целью обнаружения первоисточников общей ошибки. Наконец, находить связи между периодической ошибкой ЗК и проявлением ее при работе данного ЗК в передаче в виде шума, вибраций и динамических нагрузок [2]. Из приведенных данных видно, что автор работы [2] очень близко подошел к частотным методам, однако не сформулировал и не применил частотный подход, в соответствии с которым применяют преобразования Фурье для перехода от временных зависимостей к частотным и обратно (период по времени может быть заменен периодом по расстоянию – шагом). Частным случаем этого подхода являются такие методы как интерполяция, сглаживание и применение цифровых фильтров для разделения сигналов [3]. Такой подход нашел успешное применение при обработке профилограммы при оценке параметров качества обработанной поверхности [4].

Термообработка зубчатого колеса перед зубошлифованием приводит к дополнительному искажению его окружного шага и смещению положения делительной окружности, сформированной на предыдущей операции зубофрезерования. В результате локальных усадок и растяжек зубчатого венца в направлении делительной окружности имеет место синусоидальный закон изменения погрешности окружного шага, причем, как правило, на интервале одного периода синусоиды  $2\pi$  (т.е.,  $n = 1$ ). Добавление к этой деформации геометрического и кинематического эксцентриситета, очевидно, изменяет общую периодическую ошибку колеса, но синусоидальный характер ее изменения сохраняется.

Для анализа влияния выбора номера исходной впадины на закономерности распределения припуска по профилю использовали экспериментальные данные автоматического измерения припуска по левой и правой стороне впадины ЗК на современном зубошлифовальном станке с ЧПУ модели HÖFLER RAPID 1250 при измерении и обработке крупномодульных зубчатых колес шахтных редукторов. При наладке на зубошлифование измеряли заготовки ЗК разных типоразмеров. В качестве примера для проверки эффективности разных способов выравнивания припуска выбраны заготовки ЗК с числом зубьев  $z = 16$ . Эти заготовки изготовлены из стали 20X2H4A, прошли цементацию (глубина цементации  $h = 0,9 \dots 1,3$  мм) и закалку HRC 58...62. Основные размеры цилиндрического ЗК с прямыми зубьями: наружный диаметр 299,644 мм; делительный диаметр – 256 мм; количество зубьев 16; модуль  $m = 16$ ; коэффициент смещения исходного контура 0,6 мм; нормальный угол зацепления  $\alpha = 20^\circ$ ; угол наклона  $\beta = 0$ . Степень точности зубчатого колеса 8-B по ГОСТ 1643-81. Шероховатость зубчатой поверхности Ra 2,5 мкм.

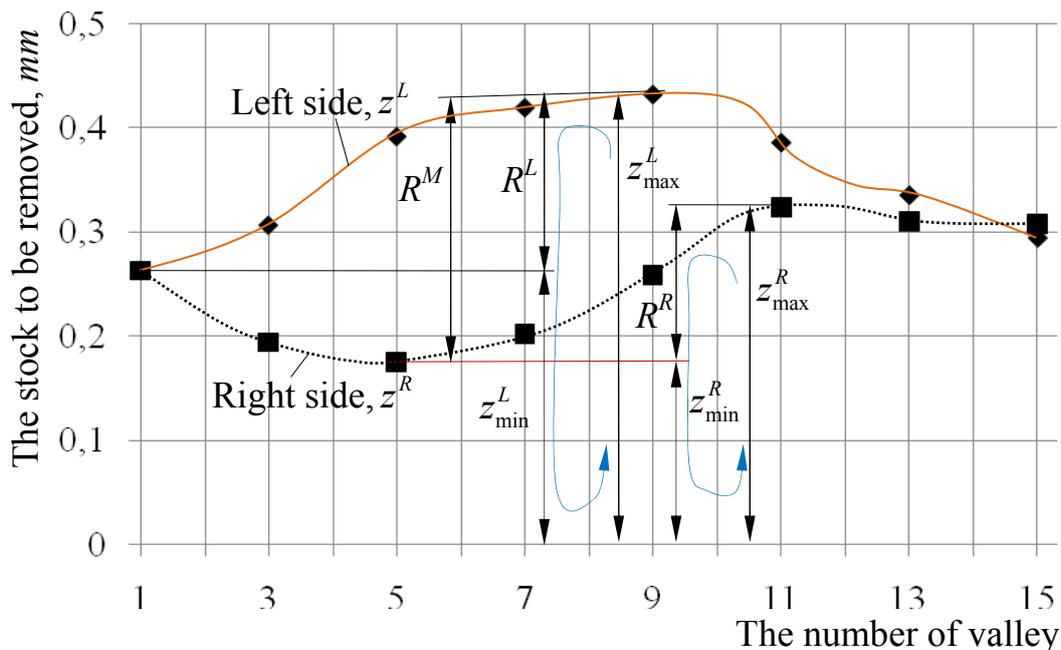


Рис. 1. Выравнивание в первой случайной впадине (начало для всех настроек)

Использованы следующие обозначения (рис.1):  $z_{\min}^L, z_{\min}^R$  – минимальные припуски по левой и правой стороне впадины, мм;  $z_{\max}^L, z_{\max}^R$  – максимальные припуски по левой ( $z^L$ ) и правой ( $z^R$ ) стороне впадины, мм;

$R^L, R^R$  – левый и правый односторонние размахи величины припуска по соответствующим сторонам впадины, мм;  $R^M$  – взаимный размах величины припуска (разность между максимальным и минимальным односторонними припусками), мм.

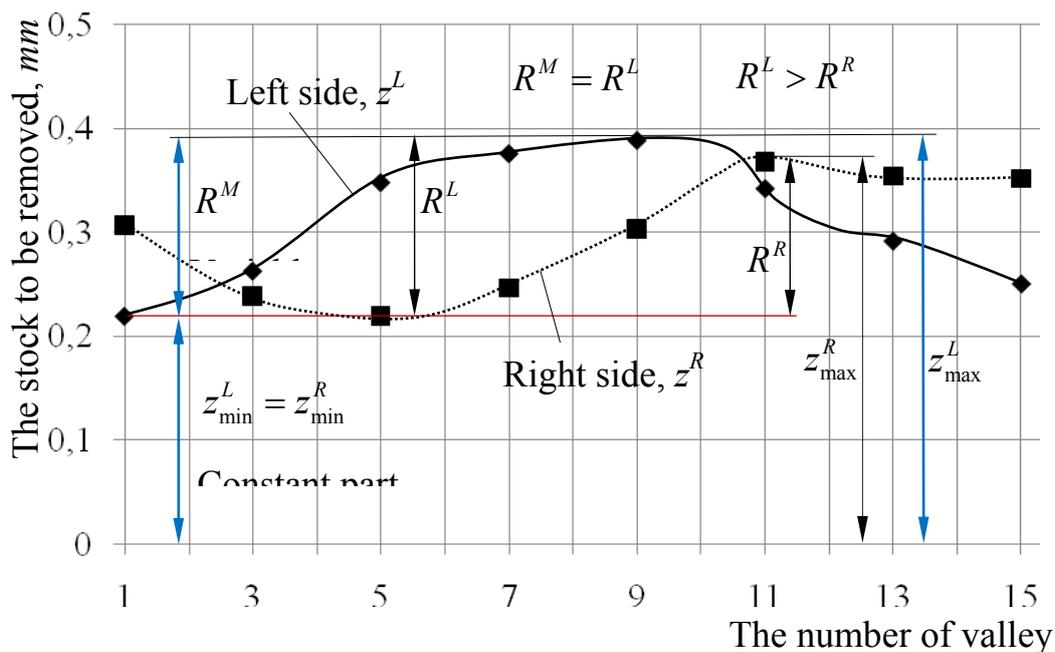


Рис. 2. Выравнивание минимальных значений припусков при исходной первой впадине

Выполняя выравнивание минимальных значений припуска при исходной первой впадине, например по способу [5] получаем новое распределение припусков (рис.2), из которого следует, что односторонние размахи  $R^L$  и  $R^R$  не изменились по величине, в то время как взаимный размах  $R^M$  существенно уменьшился. Видно, что максимальный припуск на зубошлифование равен сумме изменившегося взаимного размаха  $R^M$  и одного из минимальных припусков ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ), т.е  $z_{\max}^L = R^M + z_{\min}^L$  или  $z_{\max}^L = R^M + z_{\min}^R$ . Следовательно, от выбора исходной впадины зависит максимальный припуск на зубошлифование.

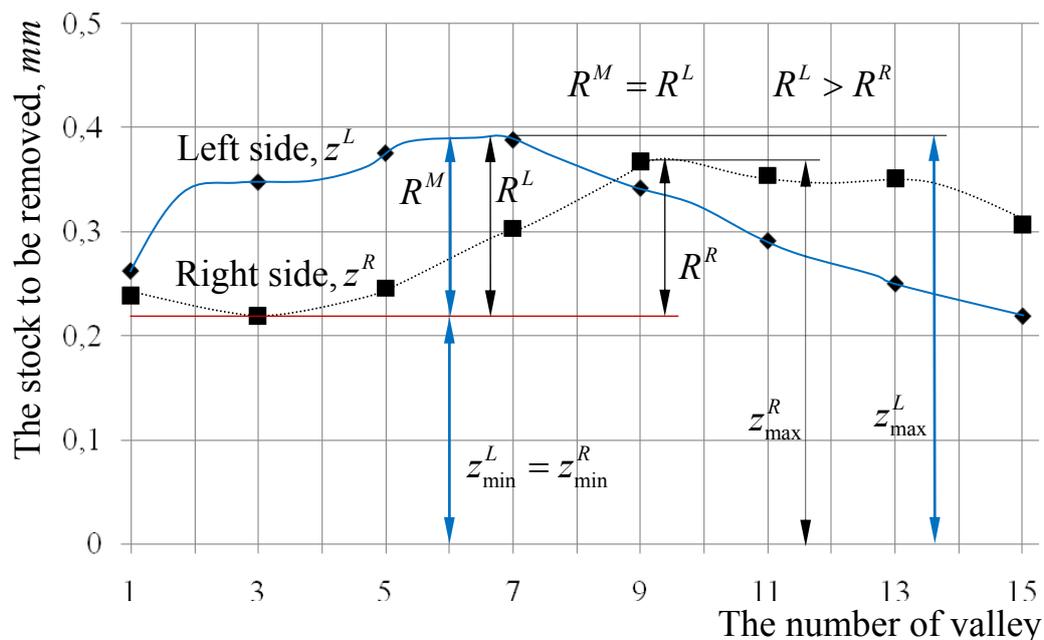


Рис. 3. Выравнивание минимальных значений припусков при исходной третьей впадине

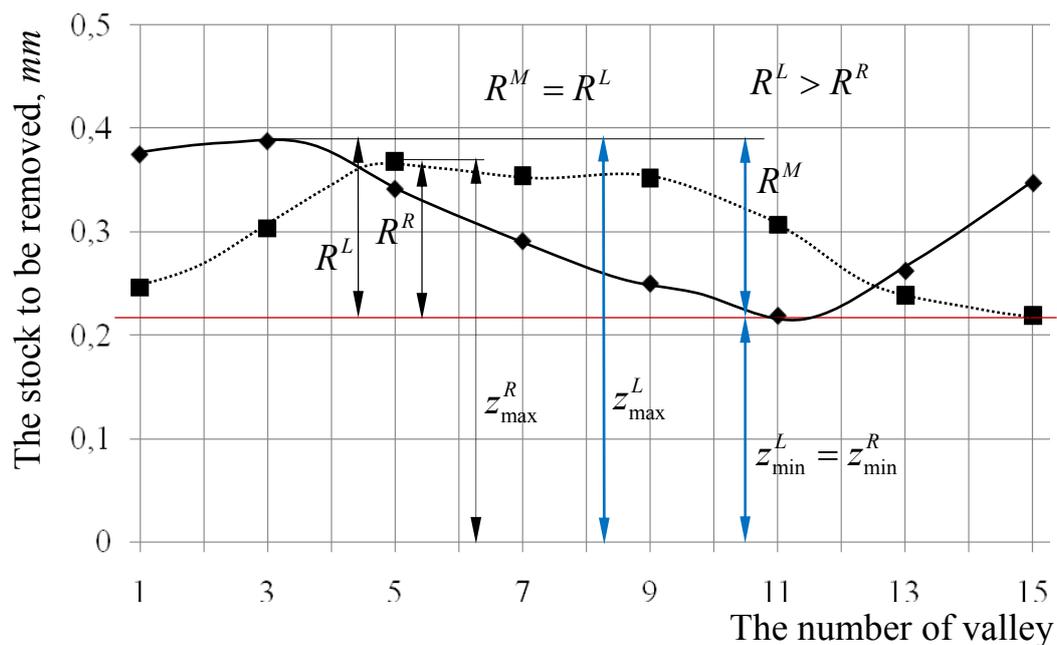


Рис. 4. Выравнивание минимальных значений припусков при исходной седьмой впадине

Далее выполнен анализ распределения припуска по левой и правой стороне впадин ЗК при изменении номера исходной впадины, но при реализации того же самого способа выравнивания припусков (рис. 3, рис. 4).

Для установления закономерностей изменения параметров припуска кривые распределения припуска по левой и правой сторонам впадин сведены вместе (рис.5).

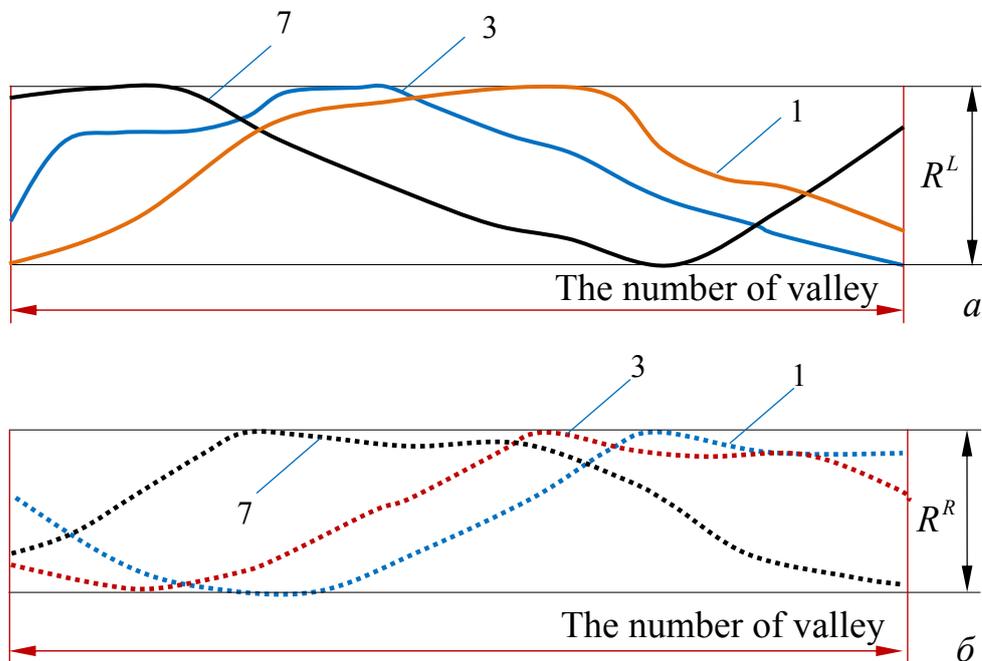


Рис. 5. Кривые распределения припуска при выравнивании минимальных его значений по левой ( $a$ ) и правой ( $b$ ) стороне впадины при различных номерах (1, 3 и 7) исходных впадин

Видно, что односторонние размахи ( $R^L$ ,  $R^R$ ) не зависят от выбора исходной впадины и от метода выравнивания припусков. После выравнивания минимальных значений припусков взаимный размах  $R^M$  уменьшается и становится равным максимальному одностороннему размаху ( $R^M = R^L$ ). Выравнивание минимальных припусков слева и справа приводит к формированию установившихся новых четырех значений общих припусков ( $z_{\max}^L$ ,  $z_{\min}^L$ ,  $z_{\max}^R$ ,  $z_{\min}^R$ ). До выравнивания это были четыре случайных числа, зависящие от случайного углового положения ЗК. Выбор первой впадины при последующем выравнивании минимальных общих припусков слева и справа ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ) не оказывает влияние на установившиеся после выравнивания общий минимальный и общий максимальный значения припусков по каждой (левой и правой) стороне впадины.

#### Выводы.

1. Односторонние размахи припуска ( $R^L$ ,  $R^R$ ) не зависят от номера исходной впадины (в которой произведено первоначальное центрирование). Они определяются фактическим расположением приращений тангенциального припуска в направлении измерительной окружности ЗК. Эти приращения относятся к индивидуальным особенностям заготовки ЗК.

2. Взаимный размах  $R^M$  зависит от номера исходной впадины и поэтому является одним из параметров оптимизации величины припуска. Взаимный размах определяет переменную часть максимального припуска, который равен сумме взаимного размаха и выравненного минимального припуска, т.е.  $z_{\max}^L = R^M + z_{\min}^L$  или  $z_{\max}^R = R^M + z_{\min}^R$ . Следовательно, от выбора исходной впадины зависит максимальный припуск на зубошлифование.

3. Выравнивание припуска по минимальным значениям предпочтительно по сравнению с другими способами выравнивания, т.к. выравненное значение минимального припуска можно отождествлять с минимальным значением припуска по В.М. Ковану (расчетно-аналитический метод определения припуска). Такой подход обеспечивает гарантированное удаление (по левой и правой стороне впадины) при зубошлифовании всех четырех составляющих минимального припуска по В.М. Ковану.

4. После выравнивания минимальных значений припуска получаем (независимо от места первой исходной впадины на ЗК) одни и те же экстремальные значения припуска ( $z_{\max}^L, z_{\min}^L, z_{\max}^R, z_{\min}^R$ ), которые зависят только от размахов припуска по каждой стороне впадины ( $R^L, R^R$ ) и величины вносимой коррекции (зависит от выбора первой исходной впадины). До выравнивания указанные экстремальные значения припуска были различными и зависели от номера исходной впадины.

5. При определении положения дискретно расположенных наладочных впадин выбирают те из них, которые ближе к расчетным точкам, расположенным на непрерывных кривых распределения припуска.

6. Введен новый технологический критерий эффективности наладки на зубошлифование – взаимный размах  $R^M$ , который равен разности между максимальным припуском на одной стороне впадины и минимальным припуском на другой стороне. Этот параметр характеризует переменную часть припуска на зубошлифование, зависящую от деформации при закалке ЗК, а также от погрешности установки ЗК при измерении припуска и при зубошлифовании.

7. Показано, что наладка на зубошлифование может производиться по двум технологическим схемам. По первой схеме – отдельно от зубошлифовального станка (на специальном контрольном приспособлении или КИМ) с последующей маркировкой наладочных впадин, с которых необходимо начинать зубошлифование. В этом случае выполняется принцип постоянства базы, используемой при измерении на КП (отдельно от станка) и при зубошлифовании. Однако при установке предварительно размеченного изделия на зубошлифовальном станке возникает погрешность установки. Преимущество первой схемы – отсутствие дорогостоящей встроенной в оборудование станка измерительной системы. По второй схеме наладку производят непосредственно на зубошлифовальном станке, оснащенном тактильной измерительной системой, например, типа ReniShaw. В этом случае выполняется принцип совмещения измерительной и технологической базы, так

как измерение припуска и его удаление при зубошлифовании выполняется с одной установки изделия. Недостаток – дорогостоящий зубошлифовальный станок с ЧПУ, оснащенный встроенной компьютерной измерительной системой.

**Список литературы:** 1. Мильштейн М.З. Чистовая обработка зубчатых колес / М.З. Мильштейн. – К.: Техніка, 1971. – 168 с. 2. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с. 3. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Р.В. Хемминг; под ред. Трахтмана А.М. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с. 4. Лищенко Н.В. Частотные характеристики профилограммы поверхности и вибраций при ее обработке / Н.В. Лищенко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПИ», 2015. – Вип. 1 (25). – С. 94-108. 5. А.с. 1147919 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, Е.М. Рябов (СССР). – № 3648014 / 25-28; заявл. 05.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12.

УДК 531.717.8

## ТЕОРИЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ПРИПУСКА ПО ПРОФИЛЮ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ПРОФИЛЬНЫМ КРУГОМ

Лищенко Н. В., канд. техн. наук

(Одесская национальная академия пищевых технологий)

*A theoretical analysis of the known methods for alignment of the stock to be removed along the profile of the gear valley grinded is given and the alignment theorem for this case is formulated and proved*

Необходимость выравнивания припуска по профилю шлифуемой впадины зубчатого колеса (ЗК) отмечается во многих работах по зубошлифованию методом копирования, например в работе [1]. В связи с установленными ранее закономерностями представляет интерес теоретический анализ способов наладки зубошлифовальных станков, описанных в работах [2] и [3] с учетом принятых в этих работах обозначений. В соответствии с работой [2] при соотношении  $M > R$  величину коррекции  $X$  находят из интервала

$$0,5[(S - R)] \leq X \leq 0,5[S], \quad (1)$$

где  $R = R_1 - R_2$  – разность размахов;  $R_1, R_2$  – наибольший и наименьший размахи.

В свою очередь  $M = M_1 - M_2$ , где  $M_1 = Z_{\max}$  на стороне с наибольшим размахом  $R_1$  и  $M_2 = Z_{\max}$  на стороне с наименьшим размахом  $R_2$ . Следовательно,  $S = |M| = M_1 - M_2$ . Тогда получаем

$$X = 0,5(S - R) = 0,5(|M| - R) = 0,5((M_1 - M_2) - (R_1 - R_2)). \quad (2)$$

Обозначим минимальный припуск на стороне с наибольшим размахом  $N_1$ , а на стороне с наименьшим размахом  $N_2$ . Запишем размахи  $R_1$  и  $R_2$  через минимальные и максимальные припуски следующим образом

$$R_1 = M_1 - N_1; \quad (3)$$

$$R_2 = M_2 - N_2. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в выражение (2), получаем

$$X = 0,5((M_1 - M_2) - (R_1 - R_2)) = 0,5(M_1 - M_2 - ((M_1 - N_1) - (M_2 - N_2))) =$$

$$= 0,5(M_1 - M_2 - M_1 + N_1 + M_2 - N_2) = 0,5(N_1 - N_2)$$

Следовательно, коррекция на величину  $X = 0,5(S - R)$  – это коррекция углового положения ЗК на величину, пропорциональную полуразности минимальных припусков. Величина  $X = 0,5S = 0,5(M_1 - M_2)$  – это коррекция положения зубчатого колеса на величину, пропорциональную полуразности максимальных припусков. При соотношении  $M < 0$  величину коррекции  $X$  вычисляют по выражению:

$$X = 0,5[(S + R)...S]. \quad (5)$$

Получаем

$$X = 0,5((-M_1 + M_2) + (R_1 - R_2)) = 0,5(-M_1 + M_2 + ((M_1 - N_1) - (M_2 - N_2))) =$$

$$= 0,5(-M_1 + M_2 + M_1 - N_1 - M_2 + N_2) = 0,5(N_2 - N_1).$$

Таким образом, коррекция на величину  $X = 0,5(S + R)$  – это коррекция положения зубчатого колеса на величину, пропорциональную полуразности минимальных припусков.

Аналогичный анализ можно выполнить для способа, предложенного в работе [3]. Действительно, предлагаемая в этой работе величина коррекции углового положения заготовки ЗК составляет  $X = 0,25(S_1 - S_2)$ . В свою очередь,  $S_1 = M_1 + N_1$  – это сумма максимального и минимального припусков на стороне с наибольшим размахом, а  $S_2 = M_2 + N_2$  – сумма максимального и минимального припусков на стороне с наименьшим размахом. Следовательно,

$$X = 0,25((M_1 + N_1) - (M_2 + N_2)) = 0,25((M_1 - M_2) + (N_1 - N_2)) =$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{(M_1 - M_2) + (N_1 - N_2)}{2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{(M_1 - M_2)}{2} + \frac{(N_1 - N_2)}{2} \right)$$

Таким образом, величина коррекции по способу, предложенному в работе [3], пропорциональна половине суммы полуразностей максимальных и минимальных припусков.

Проведенный теоретический анализ позволяет сформулировать следующую теорему выравнивания припуска: выравненное слева и справа экстремальное значение припуска (минимальное или максимальное) или значение припуска, полученное из этих экстремальных значений (например, среднее из экстремальных значений), не зависит от места расположения исходной впадины, от которой начинают измерение припуска по всем сторонам.

Для доказательства теоремы использованы следующие соотношения, справедливые для любых произвольно взятых впадин с номерами  $i$  и  $j$

$$\left| z_{\min}^{L(i)} - z_{\min}^{L(j)} \right| = \left| \frac{z_{\min}^{L(i)} - z_{\min}^{R(i)}}{2} - \frac{z_{\min}^{L(j)} - z_{\min}^{R(j)}}{2} \right|; \quad (6)$$

$$\left| z_{\min}^{R(i)} - z_{\min}^{R(j)} \right| = \left| \frac{z_{\min}^{L(i)} - z_{\min}^{R(i)}}{2} - \frac{z_{\min}^{L(j)} - z_{\min}^{R(j)}}{2} \right|, \quad (7)$$

где  $i = 1, 2, \dots, z$  ( $z$  – количество зубьев);  $j = i + n$ ;  $n = 1, 2, \dots, z - 1$ .

После преобразований получаем следующие соотношения

$$z_{\min}^{L(i)} = z_{\min}^{L(j)}; \quad z_{\min}^{R(i)} = z_{\min}^{R(j)}; \quad z_{\max}^{L(i)} = z_{\max}^{L(j)}; \quad z_{\max}^{R(i)} = z_{\max}^{R(j)}.$$

**Выводы.** 1. Выполнен теоретический анализ известных способов выравнивания припуска по левой и правой стороне впадин заготовки зубчатого колеса, показана преемственность известных способов, отражены их преимущества и недостатки.

2. Сформулирована теорема выравнивания припуска по указанным сторонам впадины, в соответствии с которой номер исходной впадины не оказывает влияние на экстремальные значения припуска, если выполнено выравнивание припуска по какому-либо способу из исследованных ранее.

**Список литературы:** 1. Качество изготовления зубчатых колес / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояршинов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. 2. А.с. 1293464 А1 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес на зубошлифовальных станках / Э.Н. Перов, Д.Э. Перов (СССР). – № 3883777 / 25-28; заявл. 16.04.85; опубл. 28.02.87, Бюл. № 8. 3. А.с. 1147921 А СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 5/20. Способ контроля зубчатых колес перед зубошлифованием / Э.Н. Перов, Ю.В. Лазарев, В.Г. Пыхтеев (СССР). – № 3657432 / 25-28; заявл. 24.10.83; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12.

УДК 621.923

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ КРУГЛОМ НАРУЖНОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ПО НИЗКОЧАСТОТНОМУ АКУСТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

**Онищенко А.В.**, студентка 2 года магистратуры

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця)

*The results of experimental studies of the relationship of parameters of low-frequency acoustic signal generated in the grinding process, with technology and output parameters of the process. A method for the control cycle round outdoor plunge grinding on the acoustic signals*

Для обеспечения надежности выполнения шлифовальных операций в автоматическом режиме необходимо проектировать рабочие циклы, учитывающие все многообразие изменений условий и факторов процесса шлифования, влияющих на режущую способность шлифовальных кругов. Многочисленные исследования износа и затупления шлифовальных кругов пока не привели к установлению единого критерия оценки их режущей способности. В связи с этим автором предпринято экспериментальное исследование с целью выявления зависимостей между режимами шлифования, величиной звукового давления и показателями процесса шлифования, необходимых для последующей

разработки критерия оценки работоспособности круга и методики управления циклом круглого наружного врезного шлифования с использованием информации по низкочастотному акустическому сигналу.

Эксперименты проводили на круглошлифовальном станке 3М152МВФ2 при предварительном шлифовании заготовок (образцов) из стали Р6М5 кругом 1–600×40×305–95А25ПСМ27К5 с окружной скоростью круга  $V_k = 50$  м/с. Частотой вращения заготовки  $n_u$  варьировали от 150 до 300 об/мин, а врезной подачей  $S_t$  – от 0,2 до 1 мм/мин. Величина припуска  $z$  изменялась в диапазоне (0,2–0,5) мм. В качестве основных характеристик акустического сигнала использовали частоту  $f$  акустических колебаний, звуковое давление  $P_z$  и амплитуду звукового давления  $A_z$ , определяемую амплитудным значением эффективного напряжения. Прием и обработку акустических сигналов осуществляли по методике, изложенной в работе [1].

В ходе экспериментальных исследований контролировали радиальную  $P_y$  и касательную  $P_z$  составляющие силы шлифования  $P$ , приведенную режущую способность шлифовального круга по звуковому давлению  $K_p$ , приведенную режущую способность шлифовального круга по объему снятого материала  $K_{Qp}$ , размерный износ круга  $\Delta R$ , среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  шлифованной поверхности, наличие прижогов и следов дробления. На первом этапе экспериментальных исследований был выявлен диапазон информативных частот (900 – 1000) Гц. Дальнейшие исследования на информативной частоте 950 Гц проводили однофакторным и многофакторным планами. Для реализации задачи управления процессом шлифования исследовали закономерности изменения величин  $P_z$ ,  $A_z$ ,  $P$ ,  $K_p$ ,  $\Delta R$  и  $Ra$  в зависимости от режимов шлифования. Установлено (рис. 1), что изменение технологических параметров процесса шлифования – врезной подачи  $S_t$ , снимаемого припуска  $z$  и частоты вращения заготовки  $n_u$  приводит к изменению амплитуды звукового давления и выходных показателей процесса шлифования.

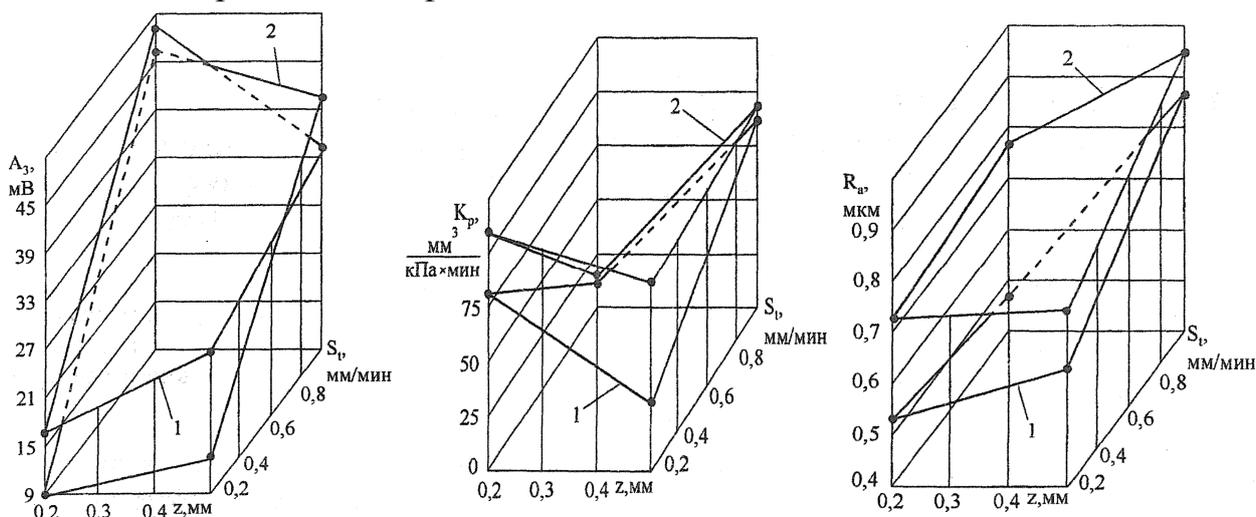


Рис. 1. Зависимость амплитуды звукового давления  $A_z$ , силы резания  $P$ , шероховатости шлифованной поверхности заготовки ( $Ra$ ) от скорости врезной подачи  $S_t$  и величины снимаемого припуска  $z$ :  
1, 2 – соответственно  $n_u = 300; 150$  об/мин

При увеличении припуска  $z$  от 0,2 до 0,5 мм (см. рис. 1) при шлифовании с поперечной подачей  $S_f=0,2$  мм/мин и частотой вращения заготовки  $n_u=300$  об/мин амплитуда  $A_3$  звукового давления увеличивается на 46 %, шероховатость  $Ra$  шлифованной поверхности заготовки на 4 %, а коэффициент  $K_p$  режущей способности круга уменьшается на 60 %. При частоте вращения заготовки  $n_u=150$  об/мин увеличение припуска  $z$  в тех же пределах влечет за собой повышение  $A_3$  на 9 %,  $Ra$  на 1 % и снижение  $K_p$  на 34 %. При работе с подачей  $S_f=1,0$  мм/мин увеличение припуска  $z$  от 0,2 до 0,5 мм вызывает снижение амплитуды  $A_3$  звукового давления на 30 и 17 % (для  $n_u=300$  об/мин и  $n_u=150$  об/мин соответственно) и увеличение шероховатости  $Ra$  шлифованной поверхности заготовки на 55 и 15 %, а приведенной режущей способности круга  $K_p$  на 85 % (в обоих случаях). Различный характер изменения данных параметров при увеличении снимаемого припуска объясняется тем, что круг при подаче  $S_f=0,2$  мм/мин работает в режиме затупления, а при  $S_f=1,0$  мм/мин – в режиме самозатачивания.

В ходе экспериментальных исследований была также выявлена связь амплитуды  $A_3$  звукового давления с шероховатостью шлифованной поверхности заготовки  $Ra$ , приведенной режущей способностью круга по объему снятого материала  $K_{Qp}$ , износом круга  $\Delta R$  и интенсивностью съема материала заготовки  $W$  (рис. 2). При увеличении шероховатости шлифованной поверхности заготовки  $Ra$  и режущей способности круга  $K_{Qp}$  амплитуда  $A_3$  изменяется по гиперболическому закону. Увеличение шероховатости  $Ra$  на 21 % вызывает снижение амплитуды  $A_3$  звукового давления в среднем на 26 %. Различие в величине шероховатости для различных частот вращения заготовки (рис. 2,а) объясняется значительным влиянием величины  $n_u$  на качество шлифованной поверхности заготовки. Однако, потеря режущей способности шлифовального круга в обоих случаях наступает при одинаковом уровне амплитуды звукового давления. При увеличении коэффициента режущей способности  $K_{Qp}$  на 57 % амплитуда уменьшается на 26 %. Увеличение износа круга  $\Delta R$  на 46% увеличивает величину  $A_3$  на 3–7 % (для  $n_u=300$  об/мин и  $n_u=150$  об/мин соответственно), а увеличение скорости съема припуска  $W$  на 33 % вызывает снижение амплитуды  $A_3$  в среднем на 25 %.

Таким образом, эксперименты показали, что амплитуда звукового давления  $A_3$  имеет корреляционную связь со скоростью съема припуска  $W$ , высотными параметрами шероховатости  $Ra$  шлифуемой поверхности заготовки, коэффициентом режущей способности  $K_{Qp}$  и износом  $\Delta R$  шлифовального круга, что позволяет использовать звуковое давление в качестве надежного информационного параметра, характеризующего протекание процесса шлифования.

Для реализации схемы управления процессом круглого наружного врезного шлифования на основе использования низкочастотного акустического сигнала удобнее использовать легко контролируемый в процессе шлифования критерий режущей способности круга  $K_p$ , связывающий производительность шлифования  $W$  со звуковым давлением  $P_3$ . Величина  $W$  контролируется прибором активного контроля (ПАК), а звуковое давление задается в виде «уставки»

на приборе контроля режущей способности круга по низкочастотному акустическому сигналу из условия обеспечения заданного качества шлифованной поверхности.

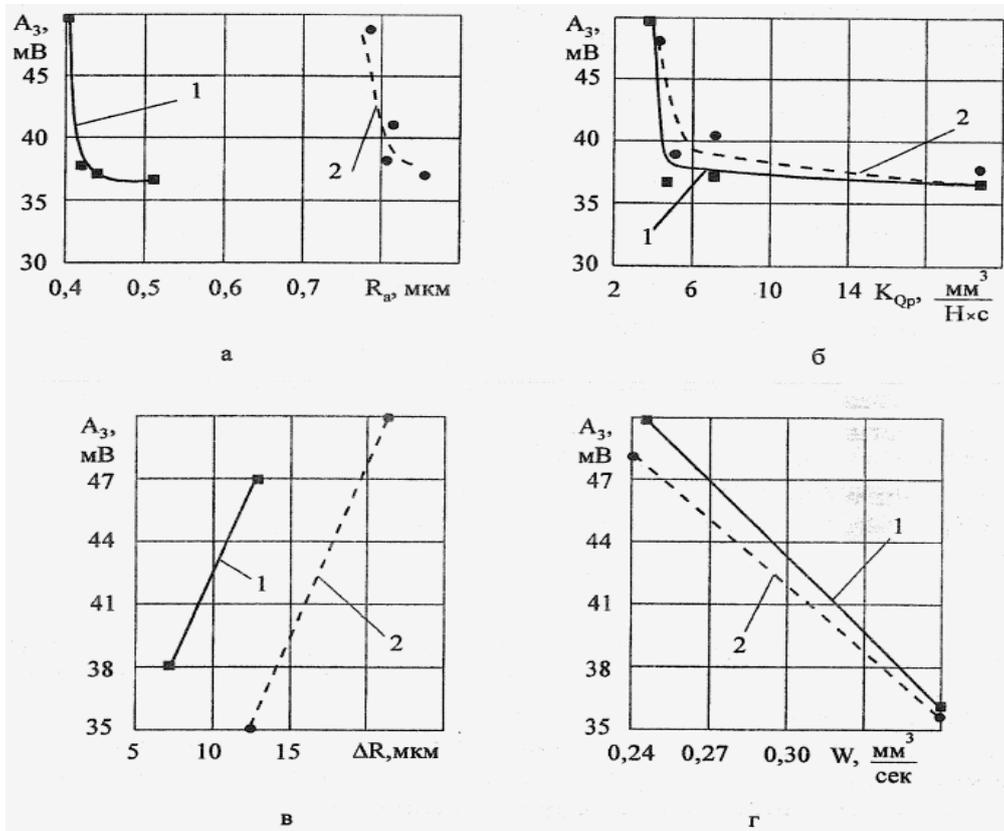


Рис. 2. Зависимость амплитуды  $A_3$  звукового давления от шероховатости шлифованной поверхности заготовки  $R_a$  (а), коэффициента режущей способности круга  $K_{QP}$  (б), износа круга  $\Delta R$  (в) и интенсивности съема материала заготовки  $W$  (г):  $S_f=1,0$  мм/мин;  $z=0,5$  мм; 1 –  $n_u=300$  об/мин; 2 –  $n_u=150$  об/мин

**Выводы.** Для реализации методики управления циклом круглого наружного врезного шлифования с использованием информации по низкочастотному акустическому сигналу необходимо:

определить число ступеней цикла и порядка их следования исходя из величины снимаемого припуска, погрешности формы и условной ширины заготовки;

распределить припуск по ступеням цикла и назначить режимы обработки на каждой ступени;

рассчитать радиальную  $P_y$  и касательную  $P_z$  составляющие силы шлифования для каждой ступени цикла по методике, приведенной в работе [2]; значение уставки  $[K_p]$  при окончательном шлифовании определяют исходя из обеспечения заданного качества шлифованной поверхности.

Лабораторная апробация предложенной методики подтвердила возможность использования акустического критерия (5) режущей способности шлифовального круга для управления циклом шлифования в автоматическом цикле.

*Научный руководитель канд. техн. наук Стрельчук Р.М.*

**Список литературы:** 1. Худобин Л.В. Использование низкочастотного акустического сигнала для текущего контроля процесса шлифования / Л.В. Худобин, В.Ф. Гурьянихин, В.С. Юганов // СТИИ, 2000. – №8. – С. 25-29. 2. Переверзев П.П. Теория и расчет оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1999. – 294 с.

УДК 621.923

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ ТОНКОМ ШЛИФОВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ТОРЦОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

**Сорокин А.В.**, студент 2 года магистратуры

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The algorithm and the program will calculate the deviation from the flatness of the processed surface with fine grinding parts in a "zigzag"*

Характерной особенностью процесса обработки поверхности крупногабаритных изделий шлифованием является значительное превышение габаритов обрабатываемой поверхности над размерами инструмента. В этом случае наиболее распространенной схемой перемещения шлифовального круга по поверхности заготовки является «зигзаг»

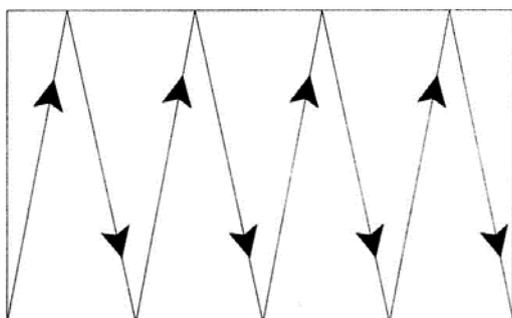


Рис. 1. Схема перемещения оси инструмента по поверхности заготовки

по поверхности заготовки является «зигзаг» (рис. 1). На этапах финишной обработки лимитирующим фактором является качество обработанной поверхности, в частности – величина отклонения от плоскостности. Эта величина является результатом неравномерности съема материала, определяемой геометрией торцевого инструмента [1, 2] и характером траекторий перемещения инструмента по поверхности заготовки. Для определения величины съема в каждой точке заготовки необходимо координаты точек

съема, получаемые при каждом проходе инструмента, привести к единой системе координат.

В общем случае преобразование аффинного, в частном случае евклидова пространства, может быть представлено в матричном виде [3]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \nu' \cos \nu'' \cos \nu''' \\ \cos \vartheta' \cos \vartheta'' \cos \vartheta''' \\ \cos \sigma' \cos \sigma'' \cos \sigma''' \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

При обработке плоских поверхностей торцевым инструментом матрицы преобразования существенно упрощаются. Например, для случая обработки заготовки по схеме «зигзаг» выражение (1) принимает вид:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{i\delta} \cdot t \\ S_{iii} \cdot t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  – угол поворота системы координат, град.

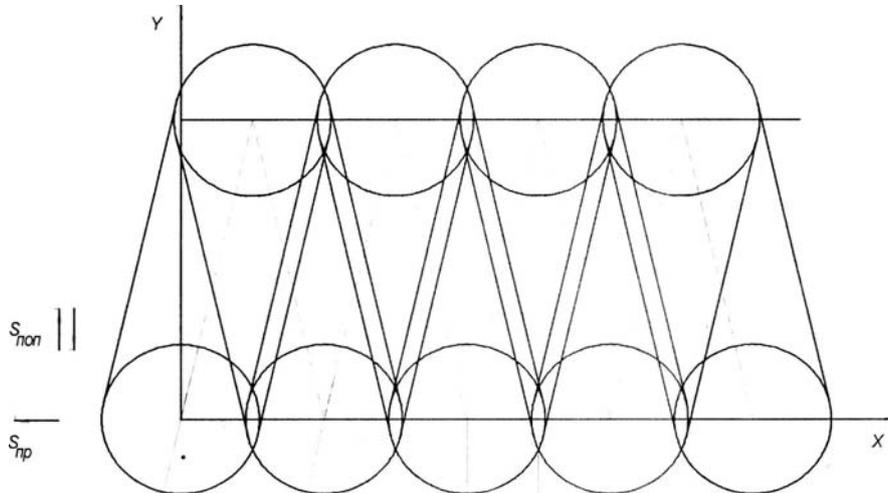


Рис. 2. Схема наложения полос обработки при движении инструмента по схеме «зигзаг»

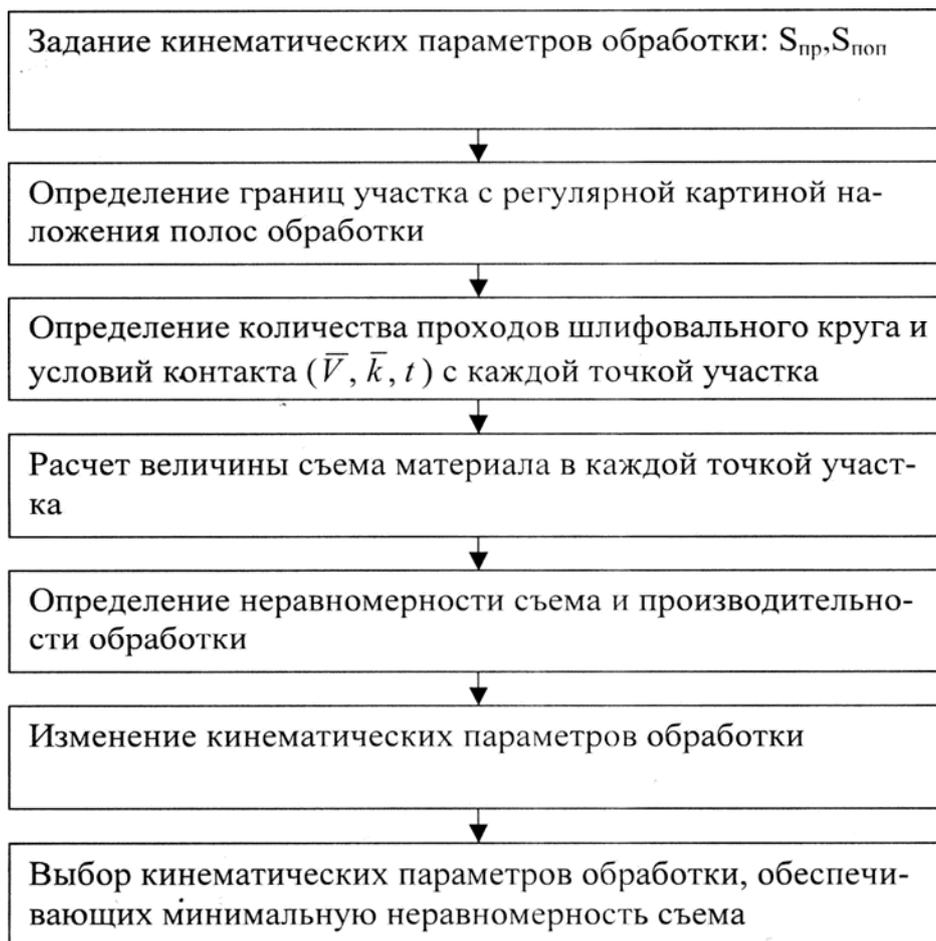


Рис. 3. Алгоритм расчета величины съема материала в каждой точке

Кинематические параметры, которые можно варьировать при схеме обработки «зигзаг» для уменьшения неравномерности величины съема материала по поверхности заготовки, это продольная и поперечная подачи. Соотношение между ними определяет угол излома траектории шлифовального круга и, соответственно, характер наложения полос обработки (рис. 2.).

Как видно из рис. 2 наложение полос обработки циклически повторяется с шагом  $A$ . Поэтому с целью оценки производительности обработки и величины неравномерности съема материала достаточно определить указанные показатели на площади заготовки размером  $A \times B$ .

Для этого разработан алгоритм и программа расчета величины съема материала в каждой точке указанной площадки при многократном прохождении через нее шлифовального круга и определение суммарного съема по всем точкам, а также величины максимального и минимального значений съема (рис. 3).

Проведенные расчеты показали, что, например, для шлифовального круга со сплошным алмазонасным слоем коэффициент неравномерности съема с увеличением величины перекрытия полос обработки от  $0,1D$  до  $0,4D$  (где  $D$  – диаметр шлифовального круга), неравномерность съема возрастает более чем в два раза. При дальнейшем увеличении величины перекрытия от  $0,4D$  до  $0,9D$  неравномерность съема снижается в шесть раз.

*Научный руководитель канд. техн. наук Стрельчук Р.М.*

**Список литературы:** 1. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей / Рогов В.В. – К.: Наук. Думка, 1985. – 264 с. 2. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л.С. Цеснек. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с. 3. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии / П.С. Александров. – М.: Наука, 1968. – 912 с.

## 2. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.981.002.237

### **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРИЦЕПОВ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ**

**Тришевский О.И.**, докт. техн. наук,

**Туев А.В.**, студент, **Петрук Р.Ю.**, студент

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко)

*In the examples of application rolled formed sections structures for trailers shown that one of the main ways to reduce metal consumption of manufactured agricultural machinery is to increase the strength properties of the structural elements of which it is made. The technology even improve the mechanical properties of the entire cross section formed sections forming due to their flat areas through small corrugations. The results of studies confirming the improvement of the mechanical properties of the finished profiles*

**Введение.** Среди основных технических и технологических требований, предъявляемых к сельскохозяйственной технике в настоящее время и на ближайшие десятилетия, были и остаются требования, связанные с ресурсосбережением при ее производстве и экономичностью в эксплуатации. В частности, конструкторам и производителям ставится задача по снижению металлоемкости выпускаемой продукции до 5 – 10%, что, в свою очередь, обеспечивает выполнение двух других важнейших эксплуатационных требований – это уменьшение давления техники на почву и снижение расхода топлива до 20%.

Выполнение этой важнейшей задачи неразрывно связано с широким внедрением в конструкциях сельскохозяйственных машин и механизмов прогрессивных и эффективных видов конструкционных материалов. Одним из наиболее эффективных видов таких материалов, широко применяющихся в различных видах сельскохозяйственной техники, являются гнутые профили проката, в том числе их специальные экономичные виды.

**Целью** данной работы является рассмотрение возможности снижения металлоемкости сельскохозяйственной техники за счет расширения сортамента и повышения прочностных свойств одного из основных видов конструкционных элементов, использующихся при ее изготовлении – гнутых профилей проката.

**Задачи работы.** Исследование на примере гнутых профилей, применяющихся в конструкциях сельскохозяйственных прицепов, реального локального повышения прочностных характеристик металла за счет наклепа в местах изгиба. Разработка технологии, обеспечивающей повышение этих же характеристик на плоских, не деформированных участках профилей, выравнивание за счет этого повышенных мехсвойств профилей по всему сечению и обеспечение возможности снижения металлоемкости сельскохозяйственных прицепов за счет применения нового сортамента эффективной металлопродукции.

**Результат исследования.** Сельскохозяйственное машиностроение Украины является наукоемкой отраслью с высокой добавленной стоимостью – в стране производятся современные зерно- и кормоуборочные комбайны, энергонасыщенные тракторы сельхозназначения, многофункциональные посевные комплексы и другая востребованная селом техника.

Развитое сельскохозяйственное машиностроение, выпускающее упомянутую технику, является индикатором развития АПК любой страны. В то же время, необеспеченность отрасли необходимым количеством сельскохозяйственной техники является серьезным барьером для развития сельского хозяйства.

В Украине доля сельскохозяйственных угодий в общей структуре земель составляет 70%, пахотных земель - свыше 55%, что является одним из самых высоких показателей в Европе и мире [1]. А потому, будущее сельского хозяйства Украины – в использовании высокопроизводительных и высокорентабельных технологий, осуществляемых с применением современной сельхозтехники, которые в свою очередь, являются основой для достижения конкурентоспособности украинского продовольствия.

Гнутые профили проката самого широкого сортамента от обычных сортовых, до листовых гофрированных и специальных успешно применяются практически во всех конструкциях сельскохозяйственных машин различного предназначения: комбайнах, жатках, косилках, колесных и гусеничных тракторах, культиваторах, сеялках, плугах, стогометателях, скирдооформителях, самоходных шасси, кормораздатчиках, зерноочистительных машинах, машинах для защиты растений от вредителей и болезней, силосорезках, автопоилках, свекло- и картофелеуборочных машинах, луцильниках, разбрасывателях удобрений, тележках, прицепах и многих других для изготовления рам, балок, поперечин, связей кронштейнов, опор, консолей, стоек, распорок, крыш, настилов, обшивок бортов, направляющих и т.д. В некоторых машинах их весовая доля может достигать до 60%. К одному из таких видов сельхозтехники относятся автотракторные прицепы различного предназначения (рис. 1).

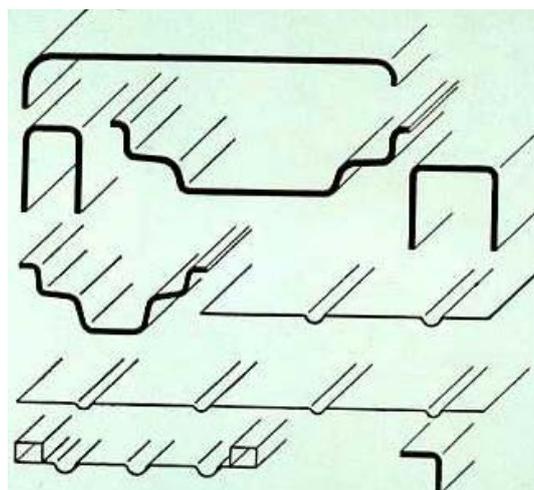


Рис. 1. Тракторный самосвальный прицеп ТСП-10 с трехсторонней разгрузкой к тракторам МТЗ-82, грузоподъемностью 8 т и некоторые виды гнутых профилей, применяющихся в его конструкции

Работа большого или малого сельского хозяйства связана с транспортировкой грузов малыми или большими партиями, что зависит от масштабов предприятия: тут и корма для скотины, солома под постилку, лекарственные препараты, которые требуются в немалых количествах, это и растения, саженцы и т.д.

Во многом различия конструкций сельскохозяйственных прицепов зависят от типа перевозимого груза. Наиболее широко сельскохозяйственные прицепы используются для перевозки сыпучих кормов, зерновых, комбикормов. Существуют специальные типы прицепов для перевозки корнеплодов, сельскохозяйственной химии, такой как удобрения или других сыпучих грузов. Применяются в хозяйствах прицепы для перевозки птиц и всевозможных животных; универсальные сельскохозяйственные прицепы.

Прицепы могут сильно различаться по типу исполнения, каждый из которых имеет узкое предназначение для перевозки определенного груза, по грузоподъемности – от малых прицепов для индивидуальных хозяйств до большегрузных для крупных агропромышленных комплексов. Прицепы могут быть с бортовой конструкцией, тентовым покрытием, шторные и со сдвижным тентом и крышей. Многие полуприцепы имеют самосвальный тип разгрузки, такой тип конструкции позволяет быстро разгружать сыпучие и навалынные грузы.

Следует отметить широкое представительство на украинском рынке сельхозприцепов как отечественных производителей, так и зарубежных (в основном, это Германия, Австрия, Польша).

Во всех типах прицепов различного предназначения и конструкции имеется три основных узла. Это рама с подвеской, каркас кузова и обшивки кузова прицепов. Во всех этих основных узлах прицепов самое широкое применение находят гнутые профили: сортовые и специального назначения в конструкциях рамы и каркаса кузова и листовые гофрированные - в конструкциях обшивки бортов. В качестве материала для изготовления гнутых профилей, в зависимости от предназначения и условий эксплуатации прицепов, используются углеродистые, конструкционные и низколегированные марки сталей.

В сортаменте сортовых гнутых профилей, используемых в конструкциях рам и каркасов прицепов, применяется металл толщиной от 3,0 до 6,0-8,0 мм. Обшивки бортов и настилы пола прицепов изготавливаются из листового металла толщиной от 1,0 мм до 4,0 мм.

Обращает внимание применение для обшивок бортов большегрузных прицепов для перевозки грузов строительного и сельскохозяйственного назначения фирмы Pronag профилей из износостойкой стали Хардокс (Hardox) и листовых профилей из конструкционной стали особой прочности Weldox, выпускаемой шведской компанией с 1974 года.

Используя профили из этой стали (Hardox) можно добиться снижения веса изделия, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках прицепа. Тонкий лист с сочетанием твердости, вязкости и конструкционной прочности дает возможность создать более крупные грузонесущие устройства, а тем самым увеличить грузоподъемность машины. Профили из стали Хардокс

(Hardox) выдерживают более тяжелые нагрузки и снижают затраты на одну тонну груза. Однако, стоимость прицепов, изготовленных из профилей из высокопрочной и износостойкой стали, существенно выше стоимости обычных прицепов.

Широкое применение гнутых профилей проката в конструкциях сельскохозяйственной техники, в т.ч. в рассматриваемых нами конструкциях прицепов объясняется высокой технико-экономической эффективностью их использования. Метод гибки в валках дает возможность получать фасонные профили с наиболее рациональным распределением металла по сечению и в связи с этим с максимальной жесткостью и прочностью их при минимальном расходе металла. Кроме того, процесс профилирования осуществляется в холодном состоянии, не требует специального оборудования для нагрева, и сопровождается повышением механических свойств металла в местах подгибки вследствие наклепа. Результаты исследования этого явления приведены в работе [1]. Величина упрочнения зависит от ряда факторов, основными из которых являются механические свойства профилируемого металла [2], углы изгиба и радиусы изгиба [3]. Для разработки новых более эффективных и менее металлоемких видов машин и механизмов, а также при разработке технологических процессов изготовления новых видов гнутых профилей нужно правильно учитывать указанные технологические и конструктивные особенности этого эффективного вида металлопродукции.

Исследования распределения упрочнения по поперечному сечению профилей [4] показало, что распространяется это явление лишь на участки подгибки и быстро уменьшается до значений мехсвойств исходной заготовки на плоских, прилегающих к месту изгиба участках. На плоских участках между радиусами изгиба, т.е. на недеформированных участках профиля упрочнение не наблюдается.

Характер изменения механических свойств одинаков для всех исследованных марок сталей. С увеличением суммарного угла изгиба предел прочности и предел текучести в местах изгиба возрастают, причем, последний более интенсивно, а относительное удлинение уменьшается. Однако, интенсивность изменения этих характеристик неодинакова и зависит от марки стали. Так, изменение предела прочности в местах изгиба профилей из стали 08кп, 25пс і Ст3сп по сравнению с заготовкой составляет 38–40%, из стали 20кп и 09Г2 – 31–34%, из стали 08Х13 и 10Г2Б - всего 15–23%. Изменение предела текучести составляет соответственно 72–84%, 57–67% и 28–38%, относительное удлинение уменьшается на 70–75% на профилях из углеродистой стали и на 40–60% у профилей из легированной.

Сопоставление интенсивности упрочнения стали в процессе профилирования с ее свойствами в исходном состоянии позволяет разделить все исследованные стали на три группы. К первой группе следует отнести пластичные стали с невысокими прочностными свойствами (предел текучести до 400МПа и относительное удлинение более 30%), которые в процессе профилирования упрочняются наиболее интенсивно. Ко второй группе относятся стали с преде-

лом прочности до 500 МПа и относительным удлинением 23–30%, к третьей – высокопрочные, малопластичные стали с пределом прочности более 500 МПа и относительным удлинением менее 20%, упрочнение которых является минимальным.

Однако, вследствие того, что повышение механических характеристик металла при профилировании происходит лишь на локальных участках - в местах изгиба профилей и не распространяется на их плоские участки, дополнительным резервом снижения металлоемкости сортамента производимых гнутых профилей является равномерное повышение их мехсвойств по всему сечению профилей. Такое равномерное повышение мехсвойств можно достичь тремя способами: легированием стали при выплавке, термической обработкой металлопродукции или ее равномерным деформационным упрочнением в холодном состоянии (наклепом).

Реализация первого способа ограничивается дефицитом дорогостоящих легирующих элементов, кроме того, он является весьма затратным. Второй способ требует громоздких нагревательных и душирующих устройств и также весьма затратен при реализации.

Третий способ – способ деформационного упрочнения не требует дополнительных капитальных вложений на изготовление и установку специального оборудования и может быть реализован в клетях обычных профилегибочных станов при нанесении продольных рифлений небольшой высоты на участки заготовки, которые при последующем формообразовании образуют стенки и полки гнутого профиля между участками подгибки [5]. Формообразование упрочняющих рифлений происходит в первой паре валков профилегибочного стана за счет местной вытяжки металла и не требует увеличения ширины исходной заготовки, что приводило бы к перерасходу металла. Калибровка валков для упрочнения по подобной технологии стенок гнутого швеллера 120x690x2,5 мм приведена на рис. 2.

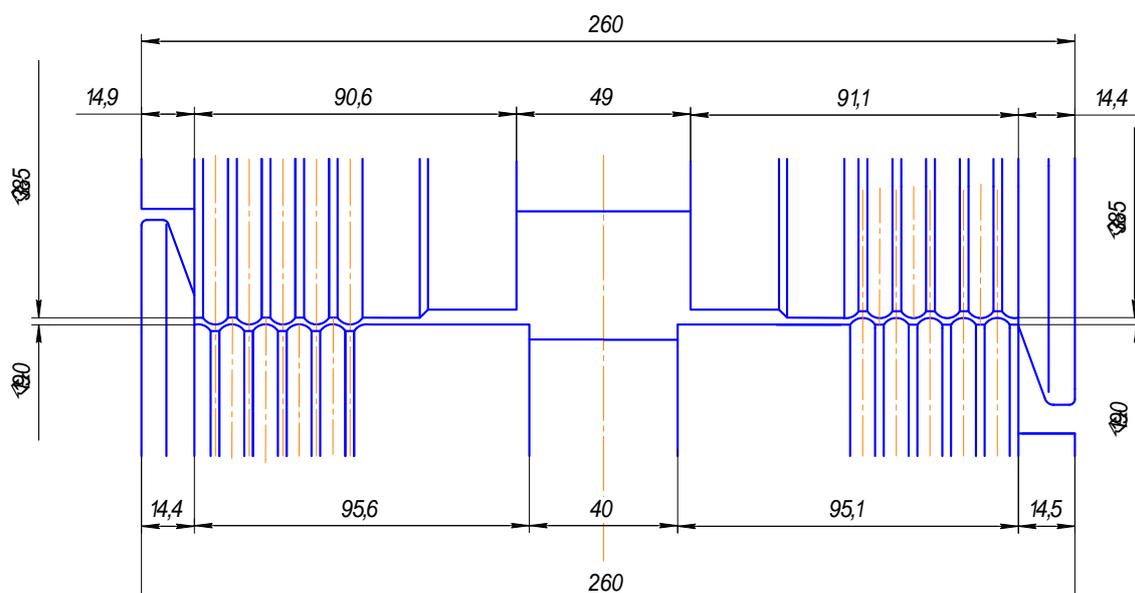


Рис. 2. Калибровка валков клетки для формовки рифлений на стенках швеллера 120x60x2,5 мм

Для отработки, исследования и освоения новой технологии, а также определения эксплуатационных характеристик профилей в металлоконструкциях приняты упрочненные швеллер 120x60x2,5 мм (рис. 3,а), z-образный профиль 120x60x2,5 мм, а также корытный профиль 80x60x32x2,5 мм из низколегированной стали 09Г2 (рис. 3,б). Последний профиль применяется в тракторных прицепах – в конструкции платформы прицепа взамен аналогичного профиля толщиной 3 мм. Отработку и исследование технологии формовки рифлений на заготовке, ее профилирование и изготовление партии профилей производили на профилегибочном агрегате 1-4x50-300.

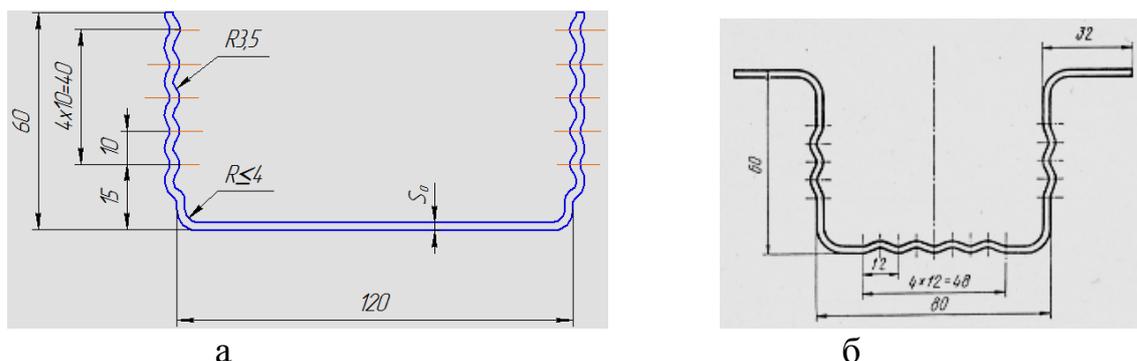


Рис. 3. Экспериментальные гнутые профили с плоскими участками, усиленными деформационным упрочнением:  
а – швеллер 120x60x2,5 мм; б – корытный профиль 80x60x32x2,5 мм.

Формообразование рифлений высотой 1,25 мм, радиусом 3,5 мм и шагом 10 мм было предусмотрено непосредственно перед началом профилирования в первой клетке стана на участках заготовки, соответствующих полкам профилей (рис. 2, 3). Профилирование (подгибку полок) в остальных клетях стана осуществляли по обычному режиму, принятому для аналогичных профилей, изготавливаемых из гладкой заготовки.

Для исследования характера изменения механических свойств по сечению неупрочненных и упрочненных (рифленых) профилей на универсальной испытательной машине ЦД-10 проводились испытания образцов, отобранных от характерных элементов сечения профилей.

Результаты испытаний (рис. 4) показали, что деформационное упрочнение стенок профиля кроме увеличения прочностных характеристик на участках формовки рифлений приводит к их выравниванию по сечению профиля, что благоприятно сказывается на несущей способности профиля в целом.

Учитывая условия работы исследуемого профиля в конструкции платформы тракторного прицепа, для оценки несущей способности металлоконструкций с использованием упрочненных профилей проводили испытание на чистый (четырёхточечный) изгиб образцов профилей совместно с приваренными к полкам листами из стали 09Г2 толщиной 2,5 мм. Изгибающая нагрузка прикладывалась со стороны приваренных листов, что моделировало условия эксплуатации профиля. Результаты испытаний свидетельствуют о большей сопротивляемости изгибающим нагрузкам профилей, упрочненных рифлениями, по

сравнению с неупрочненными. В области упругих деформаций вплоть до упруго-пластического перехода (прогиб до 3 мм) рифленый профиль более чем на 21 % прочнее, чем аналогичный неупрочненный.

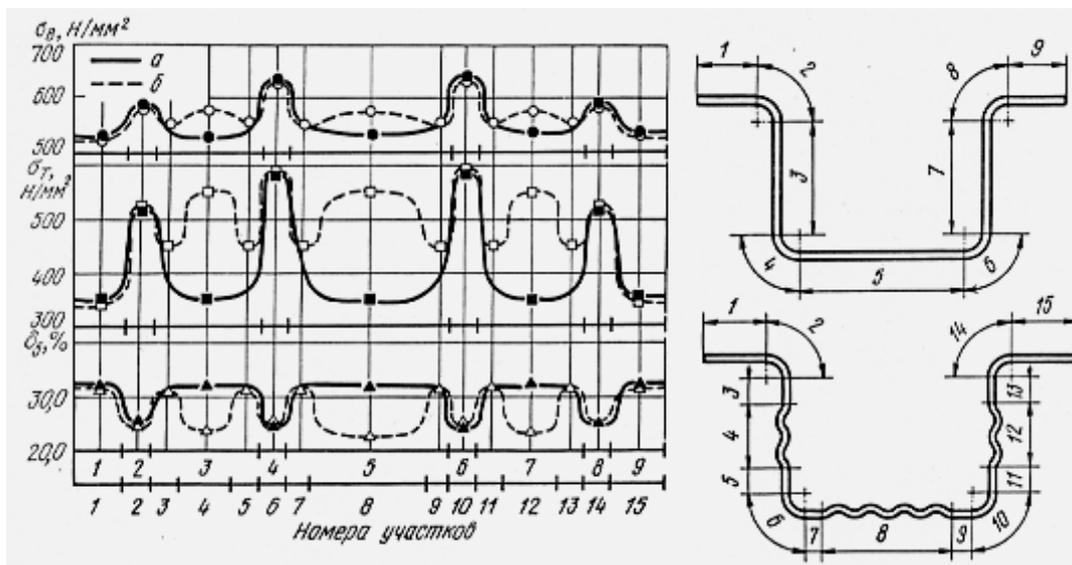


Рис. 4. Изменение механических свойств корытного профиля 80x60x32x2,5 мм при упрочнении

Проведенные исследования и расчеты показали, что усиленный нанесением упрочняющих рифлений корытный профиль 80x60x32x2,5мм и конструкция платформы прицепа, в которой он применяется, по прочности не уступают платформам, изготовленным с применением неупрочненного корытного профиля 80x60x32x3 мм.

Таким образом, предложенная технология изготовления профилей увеличивает прочностные свойства металла на плоских участках между участками изгиба, причем, предел текучести и временное сопротивление с повышением высоты рифлений монотонно возрастают и при высоте рифлений 1,4... 1,6 мм рост их прекращается. Максимальное повышение предела текучести для исследованных сталей и толщин полос колеблется в пределах 60...80 %, а временного сопротивления 20...40%. Это позволяет увеличить несущую способность гнутых профилей и получить экономию металла в результате уменьшения их толщины.

**Список литературы:** 1. Механические свойства холодногнутых периодических профилей / И.С. Тришевский, В.В. Клепанда и др. // Реф. сб. «Автомобилестроение». – М.: НИИНАВТОСЕЛЬХОЗМАШ, 1965. – Вып. 7. – 34 с. 2. Тришевский И.С. Зависимость механических свойств холодногнутых профилей от механических свойств исходных заготовок / И.С. Тришевский, В.А. Гамерштейн, Э.П. Акимов // Сб. «Высокоэкономичные гнутые профили проката». – М.: Металлургия, 1965. – С. 202–214. 3. Тришевский И.С. Исследование влияния параметров процесса профилирования на механические свойства холодногнутых профилей / И.С. Тришевский, В.А. Гамерштейн, Э.П. Акимов // Сб. «Высокоэкономичные гнутые профили проката». – М.: Металлургия, 1965. – С. 214–223. 4. Тришевський О.І. Дослідження зміни механічних властивостей гнутих профілів при формовці / О.І. Тришевський // Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2012. – С. 87–91. 5. Тришевский О.И. Нанесение упрочняющих рифлений на плоские элементы гнутых профилей как фактор снижения металлоемкости продукции / О.И. Тришевский, Е.А. Гончаренко, С.Н. Бондаренко // Вісник ХНТУСГ: Серія «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у с/г виробництві», 2011.– Вип. 115. – С. 31–35.

## МАТЕРИАЛЫ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ, СМАЗЫВАЕМЫХ ВОДОЙ

**Свиргун О.А.**, канд. техн. наук, **Коломиец В.В.**, докт. техн. наук  
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко),

**Свиргун В.П.**, канд. техн. наук|  
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

*The article analyzes materials for plain bearings, lubricated with water*

**Введение.** Одним из важных направлений развития современного машиностроения является создание экономичных и экологически безопасных в эксплуатации машин. Согласно статистике, порядка 90% крупных аварий на ТЭС, вызванных отказами в работе оборудования, сопровождаются пожаром. Пожары связаны с нарушениями целостности систем смазки и регулирования турбоагрегатов, содержащих масло. При эксплуатации турбин используется значительное его количество. Для энергоблоков мощностью 300 МВт объем масло-системы составляет  $47\text{м}^3$ , а для блоков мощностью 800МВт достигает  $58\text{м}^3$ . В основном в них используется нефтяное турбинное масло, температура воспламенения которого составляет  $180^\circ\text{C}$  [1].

В 1981 году на Сырдарьинской ГРЭС огонь, разбушевавшийся на одном из турбогенераторов мощностью 300 МВт, добрался до кровли машзала, которая обрушилась, уничтожив остальные шесть таких же агрегатов. В 1986 году вытекшее масло загорелось на ТЭЦ Ханасаари (Финляндия). Крыша машзала рухнула через пятнадцать минут после возникновения пожара. Ущерб составил 12 млн. немецких марок. В 1987 году обрыв маслопровода обернулся пожаром на электростанции Texas Utilities (США). Ущерб составил 41,4 млн. долларов [2]. При аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году в акваторию реки Енисей вылилось более 40 тонн машинного масла из разрушенных гидроагрегатов. Масляное пятно, образовавшееся в результате утечки трансформаторного масла, распространилось от плотины ГЭС вниз по течению Енисея на пять километров. Погибло около 400 тонн промышленной форели.

Дейдвудные подшипники на масляной смазке обладают серьезным недостатком. Они служат источником загрязнения окружающего пространства из-за недостаточной надежности применяемых кормовых уплотнений. В нормальных условиях судно может сбрасывать в воду до 6 литров масла в день, при повреждении уплотнений сетями, канатами, льдом или мусором расход масла может увеличиться. Если учитывать, что международный морской флот состоит из более 48000 лайнеров, танкеров, сухогрузов и других судов, в водоемы попадает более 86 млн. литров масла в год. Одним из вариантов решения этой проблемы является применение воды для смазки подшипниковых узлов, используемых в различных отраслях современного машиностроения. Важным фактором

является возможность использования для смазки воды, как рабочей жидкости машин, что упрощает конструкции уплотнений. В насосостроении для подшипников, работающих на смазке водой, применяются антифрикционные и графитизированные текстолиты, фторопласт, резину. Такие подшипники позволяют использовать насосы со смазкой водой, которую он и перекачивает. Это дает возможность минимизировать габариты насосных агрегатов.

**Основная часть.** Вода как смазочный материал отличается от минеральных масел значительно меньшей динамической вязкостью и имеет несколько большую теплоемкость и теплопроводность. Значительно меньше также способность воды создавать на трущихся поверхностях тонкие и прочные адсорбированные слои, которые, как известно, зависят от природы смазывающего вещества, твердых поверхностей и характера взаимодействия молекул смазки и твердого тела.

Условия работы подшипниковых узлов и требования к ним по жесткости, теплостойкости и другим параметрам отличаются в различных отраслях. Этот факт потребовал выработки комплекса требований для неметаллических антифрикционных материалов, применяемых в судостроении, для гидравлических турбин, турбобуров и других машин.

Износостойкость материалов должна обеспечивать требуемый срок службы материала и исключать вероятность заедания. В зоне контакта должны быть исключены схватывание, повреждение трущихся поверхностей. Не менее важны требования высокой теплопроводности, стабильности линейных размеров при погружении в воду. При заданных условиях эксплуатации долговечность узлов трения во многом определяется свойствами контактирующих материалов. Основными материалами, которые применяются в качестве антифрикционных вкладышей подшипников, являются резина, бакаут, текстолит, древесно-слоистый пластик, капролон, ФУТ-7.

**Резины.** Основу резин составляют каучуки (натуральный и синтетический), представляющие собой высокомолекулярные соединения с двойными связями в основной цепи. В процессе вулканизации (например, серой) происходит ее присоединение по месту этих связей и образование трехмерной пространственной структуры, придающей резине твердость, эластичность и прочность [6]. В подшипниках для гребных валов кораблей применяются резины из натурального каучука ИРП-1626 и из синтетического каучука ИРП-8130. В опорных узлах гидравлических турбин используется резина ИРП-3825, которая показала хорошие результаты в условиях работы на Киевской ГАЭС и Плявинской ГЭС. Для горизонтальных агрегатов Камской ГЭС применяется более твердая резина ИРП-7765. В буровых насосах используется резина ИРП-1293 с твердостью 75–80 ед. по Шору. В ряде случаев в подшипниках, смазываемых водой, находят применение резины ИРП-1025 и ИРП-1258. Твердость неразъемных подшипников в судостроении рекомендуется в пределах 55–65 единиц по Шору, а в турбобурах – 70–80. Отличаются также требования по прочности крепления к металлу, пределу прочности при разрыве, относительному удлинению, набуханию в пресной или морской воде и другим параметрам [3].

## Характеристики резин

Марка	Тип каучука	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве %	Относительное остаточное удлинение %	Твердость по ТМ-2 (по Шору)	Модуль упругости, МПа
1626	СКН	16	400	35	55–65	6
3825	СКН	10	120	10	80–95	
8130	СКИ+СКД	9	100	10	80–90	1
8075	СКИ+СКД	9	150	10	70–80	1

В гидравлических турбинах окружная скорость вала  $U$  колеблется от 1,65 до 12,5 м/с, доходя при разгонах до 19 м/с. Допускаемое давление обычно менее  $0,8 \div 0,9$  МПа. ОСТ 108.129.14-81 [4] требует соблюдения условия по допускаемому удельному давлению  $[p] < 0,05 \cdot U$  МПа. В вертикальных артезианских насосах окружная скорость составляет 4–5 м/с, в турбобурах – 7–12 м/с. Удельные давления в подшипниках турбобуров по данным И.Я. Альшица [5] для мягких резин не должны превышать 1–2 МПа, а для твердых – давление можно повысить до 6–8 МПа. Верхние пределы обычно лимитируются общей величиной упругих деформаций: в дейдвудных подшипниках гребных валов редко превышает 0,25 МПа. ГОСТ 71099-77 [6] допускает удельные давления на судовые резиновые подшипники до 0,35 МПа при окружной скорости вала 0,5–10 м/с.

**Полиамиды.** Полиамид – новый класс термостойких полимеров, ароматическая природа молекул которых определяет их высокую прочность вплоть до температуры разложения, химическую стойкость, тугоплавкость. К полиаидам относятся как синтетические, так и природные полимеры, содержащие амидную группу  $-CONH_2$  или  $-CO-NH-$ . В судостроении широко используется полиамид марки «полиамид 6-тиблочный» [7] для производства цилиндрических втулок и роликовых подшипников для гребных валов с ограниченными деформационными нагрузками.

Капролон (полиамид-6-тиблочный, ПА-6-тиблочный) разделяется на марки по качеству полимера и в зависимости от наполнителей.

Капролон В – марка модифицированного капролона, полученная ВНИИПИМ (г. Тула) в 1970-х годах, с 2006 г. не выпускается, т.к. сырье для этой марки больше не производится. Аналог капролона В – капролон марки У.

Подшипники, изготовленные из капролона, обеспечивают: длительный безремонтный период работы гребных валов независимо от района плавания судов, устойчивое тепловое состояние узла трения на всех режимах работы, в том числе при аварийном отключении системы смазки подшипников. В случае аварийного отключения подачи смазки температура поднимается до 140–150°C, происходит частичное расплавление капролонового вкладыша, в увеличившийся зазор поступает смазка (вода), которая охлаждает подшипник. Таким образом, пара трения сохраняет работоспособность.

## Физико-механические характеристики капролона

Наименование показателя	Значение показателя
Внешний вид	Блок от белого до кремового цвета без сколов и раковин Число пор размером не более 1,5 мм на 1000 мм <sup>2</sup> площади поверхности блока не более 15 шт.
1. Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,15 – 1,16
2. Температура плавления, °С	215 – 235
3. Рабочая температура, °С	от –50 до +120, кратковрем. до +180
4. Теплостойкость по Мартенсу, °С	75 – 76
5. Водопоглощение за 24 часа, %	0,9 – 1,2
6. Твердость по Бринелю (по ГОСТ 4670), МПа	160 – 190
7. Модуль упругости при растяжении, МПа	2300
8. Разрушающее напряжение при растяжении (по ГОСТ 11262), МПа	65 – 90
9. Относительное удлинение при разрыве (по ГОСТ 11262), %	14
10. Изгибающее напряжение при величине прогиба равной 1,5 толщины образца (по ГОСТ 4648), МПа	80
12. Напряжение при сжатии при установленной (6%) относительной деформации (по ГОСТ 4651), МПа	90 – 100
16. Абразивный износ (по ГОСТ 11012), г	0,055
17. Коэффициент трения по стали (по ГОСТ 11629) по стали со смазкой водой	0,04 – 0,08.
18. Интенсивность изнашивания (по ГОСТ 11629) $I_m \cdot 10^{-6}$ г/м Капролон Б Капролон Г	1 – 1,9 0,4

**Фторопласт, текстолит.** Конструкционный текстолит выпускается по ГОСТ 5-78. Текстолит и асботекстолит конструкционные. Технические условия. Антифрикционный текстолит имеет предел прочности при сжатии 250 МПа, плотность 1,4 г/см<sup>3</sup>. Графитизированный текстолит – предел прочности при сжатии 200 МПа, плотность 1,4 г/см<sup>3</sup>. Подшипники из текстолита работают при температуре не выше 80 °С. При смазке водой они допускают нагрузку  $p = 30-35$  МПа,  $pv = 20-25$  МПа·м/с. Коэффициент трения текстолита 0,01–0,005 при смазке водой.

Свойства фторопласта-4 (ГОСТ 10007-80): плотность 2,2 г/см<sup>3</sup>; химическая стойкость к минеральным и органическим кислотам, щелочам и другим агрессивным средам; в воде смачивается, но не набухает; недостаточно стоек к радиационному излучению; при длительном нагревании подвержен ползучести; используется при температурах до 230 °С.

Таблица 3

## Сравнение свойств фторопластов

Наименование показателя	Ф-4К20	Ф-4С15	Ф-4С15М5	Ф-4
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2050–2170	2170–2210	2190	2120–2200
Деформация под нагрузкой 10 МПа (24ч., 22°C), %	2,9–3,0	3,0–4,0	3,3–3,9	–
Напр. при 10% деформации, МПа	21,5	19,5–20,5	–	–
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	11,8–14,6	9,8–17,1	13,9–14,7	14,7–34,5
Относительное удлинение при разрыве, %	120–160	150–300	150–200	250–500
Модуль упругости при сжатии, МПа	805	520	–	686,5
Модуль упругости при растяжении, МПа	1500	480	–	410
Твердость по Бринеллю, МПа	49,0–53,8	39–43	39–43	29,4–39,2
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,23	0,25	–	0,25
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,71	0,9	–	1,04
Коэф. лин. расширения · 10 <sup>-5</sup> , °С <sup>-1</sup> от -60 до +20	8–11	14,5–12,5	–	–
Коэф. лин. расширения · 10 <sup>-5</sup> , °С <sup>-1</sup> от -30 до +250	11–18	12,5–9,5	–	–
Теплостойкость по Вика, °С	145–160	130–140	–	110
Водопоглощение через 24 ч, %	0,03	0,04	–	0,00
Предельное PV, кПа·м/с V=0,05 м/с	490	343	392	–
Предельное PV, кПа·м/с V=0,5 м/с	687	442	490	–
Предельное PV, кПа·м/с V=5 м/с	1078	542	608	–
Интенсивность износа, мкг/с	0,25–0,56	0,56–0,83	0,69	–
Интенсивность износа, мм/км (через 3 ч.)	0,03	0,05	–	–
Коэффициент трения по стали	0,14–0,30	0,15–0,30	0,1–0,2	0,04

**Бакаут.** В течение многих лет основным материалом для изготовления вкладышей подшипников гребных валов был бакаут. Бакаут является природным композиционным материалом, высокие антифрикционные свойства которого при трении в воде объясняют содержанием в ядровой части гваяковой смолы (до 26%). Плотность гваяковой смолы 1200–1250 кг/м<sup>3</sup>, температура плавления 85 °С. Удаление ее из древесины приводит к возрастанию коэффициента трения примерно в 40 раз. Гваяковая смола содержит до 70% гваяковой смоляной кислоты, а также гваякол, гуммин, ванилин, эфирные масла и другие вещества. Помимо этого в древесине гваякового дерева содержится сапонин (органические соединения из группы глюкозидов), который образует в воде коллоидные растворы, снижающие поверхностное натяжение воды и образующие пену подобно мылам. Предполагают, что поведение бакаута при трении в воде обусловлено именно содержанием смолы и сапонина, поскольку на поверхности образуется водная эмульсия, которая действует как естественная смазка. Предел прочности бакаута при сжатии 70–75 МПа. Твердость применяемого для подшипников бакаута не менее 140 МПа по шкале Янка. Бакауту свойственна анизотропия антифрикционных свойств. Износостойкость вкладыша с торцевым расположением волокон в 2–3 раза выше, чем с продольным. Полное водонасыщение бакаута после пребывания в воде 19–21%. Годным для изготовления вкладышей гваяковое дерево становится в возрасте 200–300 лет

[8]. В современных условиях наблюдается дефицит бакаута для изготовления дейдвудных подшипников.

Канадская компания **Thordon Bearings** в течение 25 лет специализируется в производстве морских подшипниковых систем морского гребного вала. Компания разрабатывает и производит полный спектр неметаллических втулочных подшипников для морских экологических двигателей, насосов, для морских нефтедобывающих установок и других отраслей промышленности. Thordon Bearings разработала подшипники, сделанные из эластомерных полимеров, состава, объединяющего в себе качества пластмассы и резины, которые могут смазываться морской водой.

Подшипники гребных валов - comras:

Эксплуатационные характеристики:

Скорость скольжения – до 20 м/с;

Удельная нагрузка, регистровая – до 0,7 МПа.

Подшипники гребных валов – riverthrough:

Эксплуатационные характеристики:

Скорость скольжения – до 10 м/с;

Удельная нагрузка – до 0,5 МПа;

Смазка – вода, в том числе с песком;

Безремонтный период работы при работе в грязной речной воде – 10–12 лет;

Гарантийный период эксплуатации – 5 лет до основного докования, при условии установки упрочненных облицовок гребного вала.

Подшипники из материала – thorplas.

Эксплуатационные характеристики:

Скорость скольжения – не ограничена;

Удельная нагрузка – до 71 МПа;

Смазка – не требуется;

Безремонтный период работы – до списания судна;

Назначение – замена баббитовых дейдвудных втулок, подшипники водяных насосов и роликовые подшипники низкого трения, сферические подшипники рулевых машин, подшипники гидротурбин и лопаточных затворов.

### Антифрикционные углепластики марок УГЭТ и ФУТ.

Таблица 4

Сравнительные характеристики антифрикционных полимерных материалов

Свойства	Бакаут	Полимерные композиционные материалы							Резины
		Термопласты			Терморектопласты				Резина марки 8075
		Ф4К20	Капролон Б	Тордон XL	Текстолит	Оркот	УГЭТ до 1 м/с	ФУТ до 40 м/с	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1200	2100	1150	1200	1400	1300	1450	1450	1300
Прочность при растяжении, МПа	70	12,5	80	35	90	55	280	200	9
Модуль упругости, ГПа	–	0,805	2	0,5	5	7	15	15	0,006

Объемное изменение размеров при работе в воде, %	4	0	5	1,3	10	5,4	0	0	2,0
Диапазон рабочих температур, °С	-60 +120	-200 +230	-40 +70	-60 +107	-30 +80	-30 +120	-80 +100	-80 +140	-10 +45
Максимально допустимое контактное давление, МПа	20	12	25	15	25	30	60	5	7
Коэффициент трения	0,05	0,005 –0,1	0,03– 0,1	0,03–0,1	0,005 –0,01	0,03– 0,1	0,12	0,06	0,03– 0,1
Линейная интенсивность изнашивания $\cdot 10^{-9}$	11	70	10	30	50	10	0,3	0,5	30

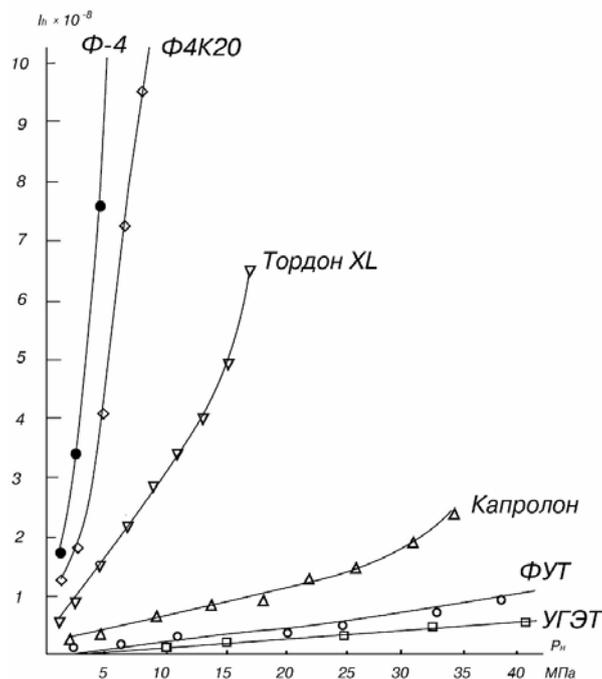


Рис. 1. Износостойкость антифрикционных полимерных материалов при трении со смазыванием водой [9]

С 1996 года фенольный углепластик ФУТ применяется в секторах торцевых уплотнений более чем на 40 гидротурбинах (в том числе на ДнепроГЭС), в сегментах щелевых уплотнений вала на 3 гидротурбинах каскадов Камских и Выгских ГЭС (Россия). Подшипники из углепластика ФУТ эксплуатируются при контактных давлениях до 5 МПа и скоростях скольжения до 40 м/с при смазке водой или маслами в паре с валом из стали, бронзы и др.

Подшипники из углепластика УГЭТ установлены и успешно эксплуатируются на многих ГЭС. Подшипники из эпоксидного углепластика горячего прессования УГЭТ эксплуатируются при контактных давлениях до 60 МПа и

скоростях скольжения от 0,005 м/с до 0,5 м/с при смазке водой или маслами в паре с валом из стали, бронзы и др.

Антифрикционные свойства углепластика анизотропны. Когда слои ткани перпендикулярны поверхности трения, интенсивность изнашивания снижается в 2–4 раза.

Таблица 5

Сравнение скоростей износов материалов при нормальных условиях

Материал	Max-Min скорость износа, мм/1000 ч	Средняя скорость износа, мм/1000 ч
Бакаут	0,01-0,3	0,16
Капролон	0,08-0,5	0,29
Резина	0,05-0,5	0,3
Текстолит	0,25-0,35	0,3
Баббит	0,005-0,01	0,008

**Выводы.** Наименьшую скорость износа имеют подшипники с баббитовыми вкладышами при смазке минеральными маслами. Но они имеют наибольшую экологическую и пожарную опасность. В условиях абразивного загрязнения наибольшую стойкость к истиранию имеют резинометаллические подшипники, смазываемые водой. Причем наблюдается малый износ и подшипника и шейки вала.

Подшипники из бакаута обладают хорошей износостойкостью, обеспечивают бесшумность работы, однако древесина гваякового дерева дефицитна.

Недостатком капролона является значительное водопоглощение и, как следствие, снижение механических свойств.

Перспективно применение углепластиков ФУТ и УГЭТ. Эпоксидные углепластики УГЭТ-Т, УГЭТ-Л технологично дают возможность двухслойного исполнения деталей. Они сохраняют стабильные антифрикционные, прочностные характеристики, не изменяют линейные размеры при длительной эксплуатации в пресной и соленой воде.

**Список литературы:** 1. Белов В.В. Крупные аварии на ТЭС и их влияние на компоновочные решения главных корпусов / В.В. Белов, Б.Г. Пергаменщик // Вестник МГСУ, 2013. – № 4. – С. 61–69. 2. Рубан О. Подшипниковая революция / О. Рубан // Эксперт, 2002. – №4(311.). 3. Давыдов А.П. Резиновые подшипники в машиностроении / А.П. Давыдов. – Л.: Машиностроение, 1968. – 188 с. 4. ОСТ 108.129.14–81. Подшипники направляющие на водяной смазке для вертикальных гидравлических турбин. Конструкция, размеры и технические требования. – Введ. 05.03.81. – Л.: РИО НПО ЦКТИ, 1981.– 4 с. 5. Альшиц И.Я. Опоры скольжения / И.Я. Альшиц, Н.Ф. Вержбицкий, Э.Ф. Зоммер. – К.–М.: Машгиз, 1958. – 196 с. 6. ОСТ 7199-77. Технические условия. Подшипники резино-металлические судовые. // Госстандарт СССР. – Москва, 1977 г. 7. ОСТ 5.4183-76. Общие технические условия. Подшипники гребных и дейдвудных валов капролоновые // Отраслевой стандарт. – Москва, 1976. (Материал обычный "полиамид 6 блочный" для цилиндрических и роликовых подшипников). 8. Рубин М.Б. Подшипники в судовой технике: Справочник / М.Б. Рубин, В.Е. Бахарева. – Л.: Судостроение, 1987 г. 9. carbonstudio.ru/upload/files/ugle.ppt 10. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: Справочник / А.В. Анисимов, В.Е. Бахарева, И.В. Блышко и др.; Под общ. ред. И.В. Горынина и А.С. Орыщенко. – СПб: НПО «Профессионал», 2012. – 916 с.

## ВЫБОР МЕТОДОВ БЕСПРЕССОВОЙ ШТАМПОВКИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Савченко Н.Ф.**, канд. техн. наук, **Галстян В.В.**, студент  
(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця)

*Some features of designing of pulse devices with usage of gas power supplies are esteemed*

Важнейшими задачами, стоящими в условиях рыночной экономики перед технологией машиностроения, являются, с одной стороны, повышение эффективности использования ресурсов, а, другой, увеличение конструктивной сложности и требований к точности и качеству изделий. Изделия могут быть представлены как отдельные детали, изготовленные как товар или как комплектующие для сборочных единиц. В мелкосерийном производстве для потребителей могут быть востребованы изделия также и в сфере услуг, например в процессе проведения ремонтных работ.

В этой связи необходимость уменьшения издержек производства становится все более актуальной и особенно острой для мелкосерийных производств. Большое значение имеют и затраты на приобретение основных фондов, особенно при проведении штамповочных и других работ заготовительного производства. Этим, в частности, могут быть объяснимы факты преобладания мелкосерийных предприятий в сфере услуг, а не в сфере производства.

Среди многих универсальных и технологически эффективных, с точки

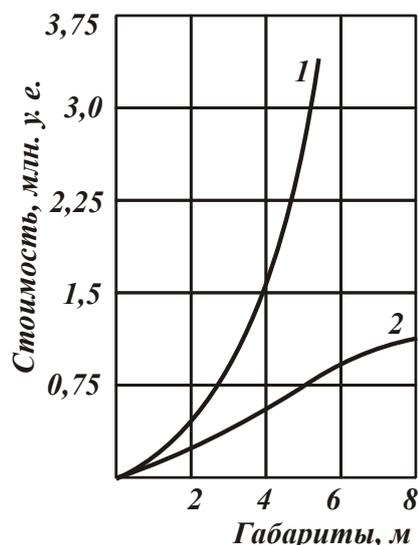


Рис. 1. Стоимость оборудования (по данным работ [1-2]):  
1 – штамповка на прессе;  
2 – беспредессовая штамповка

зрения экономии ресурсов, методов, оказывающие существенное влияние на качество, производительность и состояние поверхностей деталей и изделий [1 – 5] можно выделить:

листовую и объемную штамповку на пресовом оборудовании;

обработку потоком локальных элементов (струйную, гидроструйную обработку, обработку дробью);

беспредессовые методы (гидровзрывную, электрогидравлическую, магнито-импульсную, с использованием эластичных и газовых сред).

В условиях мелкосерийного производства более предпочтительны беспредессовые методы изготовления изделий в отдельных технологических блоках или в стендовых устройствах. Их эффективность с позиций стоимости основных фондов может быть проиллюстрирована графиком (рис. 1) [1]. Для выбора и приобретения устройств для беспредессовой штамповки необ-

ходимо учитывать назначение изделия, его конструктивную сложность: габариты, форму, соотношение размеров, относительную толщину (гибкость), наличие локальных, технологически сложных элементов, а также энергозатраты на изготовление изделий, особенности пространственного размещения устройств в технологической зоне, совместимость имеющегося (традиционного для предприятия) оборудования и устройств для беспрессовой штамповки.

При проектировании устройств для беспрессовой штамповки необходимо исходить из того, что они и их основные элементы (оснастка, вспомогательные устройства, например, для вакуумирования) могут быть представлены как гибкие технологические комплексы или их элементы. Выбор, приобретение или проектирование устройств для беспрессовой штамповки в этом случае может производиться с использованием следующих принципов [1-4]:

1. Принцип совмещения высокой производительности и универсальности. Применение устройств для беспрессовой штамповки, использующих легко перестраиваемое импульсное оборудование, позволяет совместить высокую производительность с универсальностью на оптимальном уровне, возможном при современном развитии техники.

2. Принцип технологической гибкости. Способность устройств для беспрессовой штамповки в короткие сроки и с минимальными затратами переходить к изготовлению новых объектов производства (деталей, узлов, изделий) характеризует гибкость системы.

3. Принцип модульности. Устройства для беспрессовой штамповки состоят из модулей: оснастка; основание (станина) для размещения оснастки; рабочий (силовой) орган; дополнительные технологические устройства (для вакуумирования, термообработки, нанесения покрытий и др.).

Модуль, являясь компонентом устройств для беспрессовой штамповки, также может состоять из компонентов. Важнейшие модули могут быть классифицированы по технологическому принципу (или оснащению); по виду энергоносителя; наличию или отсутствию аккумулирующих устройств; оснащению устройствами управления; сигнализации; обеспечения безопасности; возобновления ресурсов и др.

4. Принцип иерархичности. Устройства для беспрессовой штамповки в самом общем виде представляет собой многоуровневую структуру: на самом нижнем уровне находятся заготовительные операции, на самом высоком – формирование поверхностного слоя или сборка конструкции как завершающие операции.

5. Принцип функционирования при ограниченном количестве производственного персонала (принцип безлюдности). В соответствии с этим принципом решается задача максимального сокращения численности обслуживающего персонала за счет повышения уровня автоматизации выполняемых системой функций и автоматического контроля за ходом технологического процесса. Другим аспектом этой задачи является возможное продление срока функционирования системы без вмешательства человека.

6. Принцип специализации и интеграции. Этот принцип определяет возможность создания совместимых технологических систем. Может быть одним из эффективных решений при встраивании импульсных устройств в существующий производственный процесс (упрочнение, нанесение покрытий и др.).

7. Принцип универсальности выражает тенденцию к расширению технологических возможностей системы и соответственно номенклатуры обрабатываемых деталей, уменьшению числа установов, сокращению технологических маршрутов, протяженности транспортных путей, увеличению производительности системы, степени завершенности обработки детали.

8. Принцип самовосстановления направлен на поддержание и сохранение технологического потенциала системы на заданном (проектном) уровне, что достигается обеспечением системы средствами самодиагностики и самовосстановления отказавших элементов или их автоматической замены.

Дальнейший выбор решений при необходимости может проводиться с учетом приоритетности конструктивных и технологических решений и применяемых средств технологического оснащения устройств для беспрессовой штамповки. При этом все элементы такой системы могут быть двух основных видов исполнения по отношению к производственному технологическому комплексу: внешнего (вне цеха) или внутреннего.

Пример имитационной модели для таких комплексов приведен на рис. 2, а обобщенная схема листовой штамповки на рис. 3.

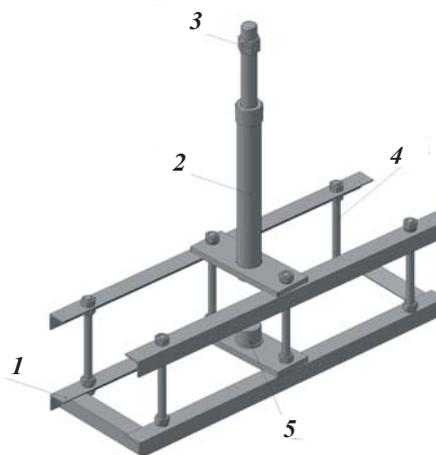


Рис. 2. Имитационная модель комплекса для беспрессовой (стендовой) штамповки: 1 – основание; 2 – устройство базирования рабочего органа – силового элемента 3; 4 – элементы крепления (размещения) элементов комплекса; 5 – элементы базирования элементов (например, оснастки)

Их особенностью можно считать возможность согласовывать на этапе проектирования технологических процессов размеры основных элементов комплекса беспрессовой штамповки, их размещение и использование. Оснастка для листовой штамповки размещается на основании 1 (рис. 2) между элементами крепления 4 или используя элементы базирования 5. Матричное кольцо 3 (рис. 3) выполняет вспомогательную роль, обеспечивая рациональные условия для перемещения периферийных зон заготовки.

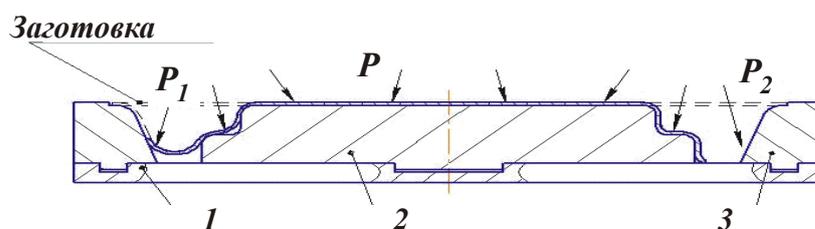


Рис. 3. Оснастка для листовой штамповки: 1 – плита; 2 – формблок; 3 – матричное кольцо.

Такого типа комплексы позволяют с минимальными капитальными затратами производить переналадку оборудования для изготовления деталей в мелкосерийном производстве. Они могут быть особенно эффективны, например, для листовой штамповки изделий прямоугольной и осесимметричной формы в плане габаритами 2 и более метров.

**Список литературы:** 1. Прогресивні технології механічної обробки: монографія / Новіков Ф.В., Крюк А.Г., Шкурупій В.Г. та ін.; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф.В. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с. 2. Савченко Н.Ф. Изготовление крупногабаритных деталей емкостей и резервуаров / Н.Ф. Савченко, Е.Н. Рубан // Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности: Межд. науч.-практ. конф. (3-5 окт. 2007). – С.103–104. 3. Модульное оборудование для гибких производственных систем механической обработки: Справочник / Р. Э. Сафраган, Г. А. Кривов, В. Н. Татаренко и др. – К.: Тэхника, 1989.– 175 с. 4. Технологичность конструкции изделия / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др. – М.: Машиностроение, 1990.– 768 с. 5. Штамповка на высокоскоростных молотах / Согришин Ю.П. и др. – М.: Машиностроение, 1978.– 167 с. 6. Высокоскоростные методы обработки металлов давлением / Шамарин Ю.Е. и др. – К.: Тэхника, 1991. – 102 с.

УДК 621.7.044

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛОКАЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ

**Савченко Н.Ф.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця)

**Третьяк В.В.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского “ХАИ”)

*To reduce the time and cost of punching work explores one of the possible methods of stamping or semi-finished products and parts for repairs in the immediate area of operation of large facilities. A method Metal s tamping of large products with artificial adjustment of imperfections. This can allow significant (10 or more) to reduce the time and cost of manufacturing of large structures such as storage tanks*

Повышение эффективности использования современных промышленных комплексов с позиций ресурсо- и энергосбережения во многих случаях свя-

заны с расширением области применения крупногабаритных тонкостенных сооружений, повышением качества крупногабаритных изделий и увеличением их номенклатуры (ассортимента). К этим изделиям относятся, прежде всего, сооружения и агрегаты, изготавливаемые для хранения сельскохозяйственной продукции, переработки и транспортировки продуктов, энергоносителей и сырья. Примеры таких конструкций – это цилиндрические, каплевидные, конические и сферические резервуары диаметрами более 3–5 м, однослойные или многослойные, а также другие металлоконструкции, изготавливаемые из цельных и штамповочных заготовок.

Как правило, их изготовление чрезвычайно трудоемко из-за отсутствия эффективных методов изготовления наиболее сложных элементов конструкции, таких, как сферические и эллиптические днища, крышки осесимметричной и неосесимметричной формы в плане. Приемлемых методов изготовления подобных изделий непосредственно в зоне сооружения или примыкающей к ней из-за их больших размеров, достигающих 20-50 и более метров, а также сложности управления качественными параметрами протяженных участков деталей, практически не существует [1–7]. Во многих случаях внутренняя поверхность в процессе эксплуатации подвергается разрушающему действию коррозии.

Решение проблемных вопросов ремонта крупногабаритных изделий или их элементов непосредственно изготовлением в зоне их сооружения уменьшит в разы стоимость ремонтных работ и позволит повысить точность и качество. Минимизация затрат и трудоемкости ремонтных работ может быть достигнута, с одной стороны, при использовании достаточно энергетически затратных технологий, например с использованием специального прессового оборудования [1,2] либо более широкого внедрения методов штамповки взрывом и других методов беспрессовой штамповки [3]. Вместе с тем, использование целого ряда прогрессивных методов штамповки, кроме трудностей, связанных с выбором оборудования и оснастки, ограничено при изготовлении тонкостенных крупногабаритных деталей возникновением гофров на поверхности изделий, способствующих возникновению чрезмерных локальных утонений, превышающих допустимые иногда в 1,5-2 раза.

Поэтому важнейшими задачами, стоящими перед технологией машиностроения, являются снижение непроизводительных затрат, обусловленных низкой точностью изготовления заготовок, улучшение эксплуатационных и прочностных свойств изделий. Особое значение приобретает совершенствование методов управления процессом формообразования – штамповкой, в первую очередь, тонколистовых заготовок в зоне сооружения и эксплуатации крупногабаритных конструкций.

Это требует решения вопросов предупреждения потери пластической устойчивости в виде гофров (бухтин) на поверхности и локальных утонений стенок, превышающих допустимые значения на различных стадиях их формоизменения (а не только на конечных) [1-7].

Целью проведенного исследования является разработка прогрессивного метода листовой штамповки деталей из конических полуфабрикатов для прове-

дения штамповочных работ непосредственно в зоне эксплуатации крупногабаритных сооружений с искусственным регулированием технологических несовершенств, например, локальных штамповок или гофрирования на поверхности полуфабрикатов, регулирования размеров зон пластической устойчивости.

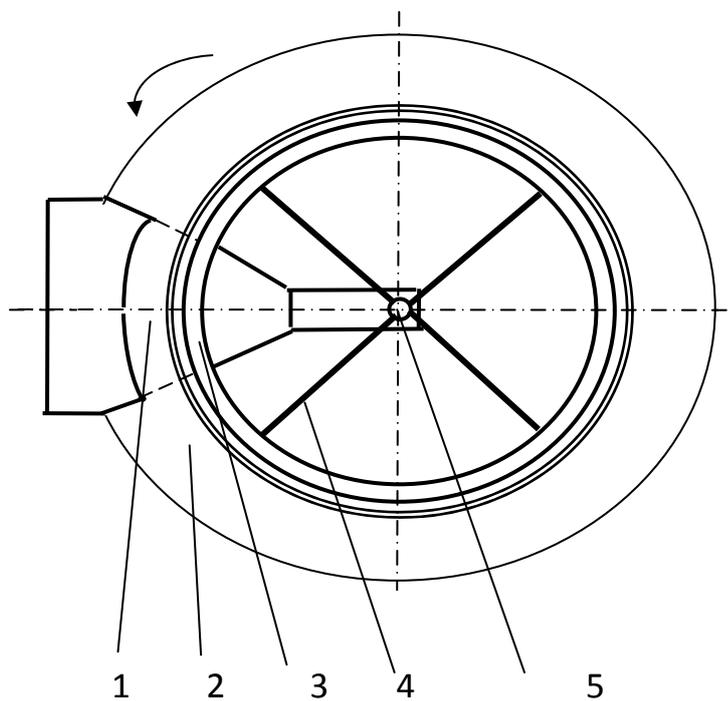
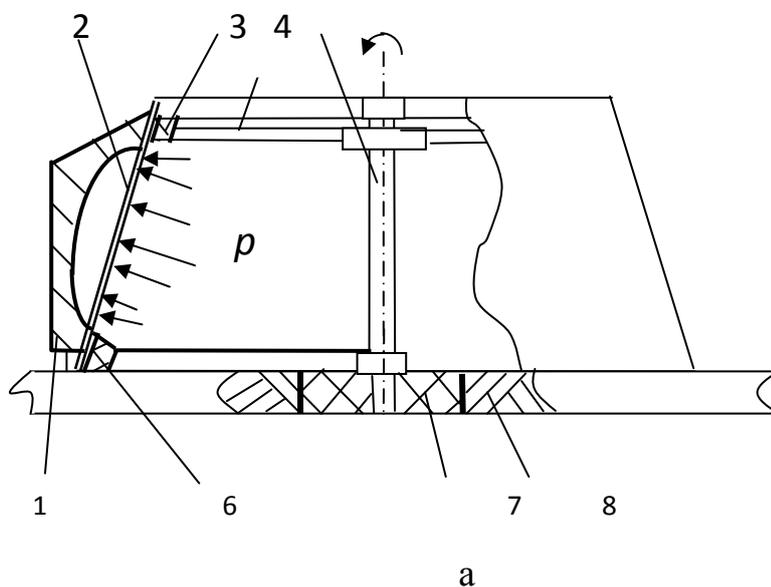


Рис.1.Схема стандовой штамповки с использованием термофизических методов локальной штамповки: а,б – фронтальный и горизонтальный вид: 1– матрица-сектор; 2 – пространственный полуфабрикат; 3 – прижим; 4 – упор; 5 – ось; 6 – основание; 7 – втулка

Это обусловлено, как правило, необходимостью и сложностью доставки крупногабаритных деталей к месту монтажа, большими объемами сварочных и подготовительных работ, низкой точностью из-за сравнительно небольших размеров отдельных частей изделий.

Предлагается способ изготовления тонкостенной сферической оболочки, который позволяет изготавливать их на монтажных площадках, используя подъемные и такелажные механизмы. Особенность способа – последовательном, по участкам формообразовании изделия в стенде (рис. 1), одна поверхность которого соответствует поверхности изделия, однако меньше ее в несколько раз (обычно в 3-10 раз). Это снижает трудозатраты на изготовление, транспортирование достаточно объемного полуфабриката к месту монтажа, что позволяет изготавливать крупногабаритные изделия сложной формы, относимых, в ряде случаев, к уникальным изделиям, в относительно простой оснастке. Способ позволяет снизить сроки изготовления за счет исключения до минимума трудоемкого процесса сварки. В то же время возможно получение тонкостенной сферической оболочки, выдерживающей рабочее давление до 4 МПа. Дополнительным преимуществом можно считать возможность использования для интенсификации процесса вытяжки методов искусственного регулирования размеров зон деформации и их величины (утонение стенок не более 10–20 %).

Пространственная или плоская заготовка 2 в соответствии со способом фиксируется на основании 6 с помощью колец-прижимов 3. Термофизическое воздействие оказывается, используя специальной конструкции камеру для создания внешних воздействий: газодетонационным методом или термовоздействием, например паром.

При проектировании технологии штамповки с ориентацией на снижение объема сварочных работ и совершенствуя методы непосредственного использования штамповки в зоне сооружения крупногабаритных сооружений, необходимо учитывать такие параметры изделий как:

- 1) гибкость (отношение ее диаметра или условного размера к толщине стенки) или относительную толщину детали (обратное гибкости значение);
- 2) относительную глубину штамповки, определяемую отношением глубины (высоты) детали к ее диаметру или условному размеру;
- 3) механические характеристики материала (пределы прочности, текучести, относительное удлинение);
- 4) требования к качеству изделий, определяемые величиной утонений, наличием и размерами гофров на поверхности.

Важно также и условие минимизации затрат на транспортировку заготовок и формообразование их до получения оболочки крупногабаритного сооружения – резервуара.

К таким методам можно отнести и предлагаемый метод стендовой штамповки с использованием беспрессовых термофизических методов локального воздействия на плоскую или, в общем случае, пространственную заготовку (рис.1).

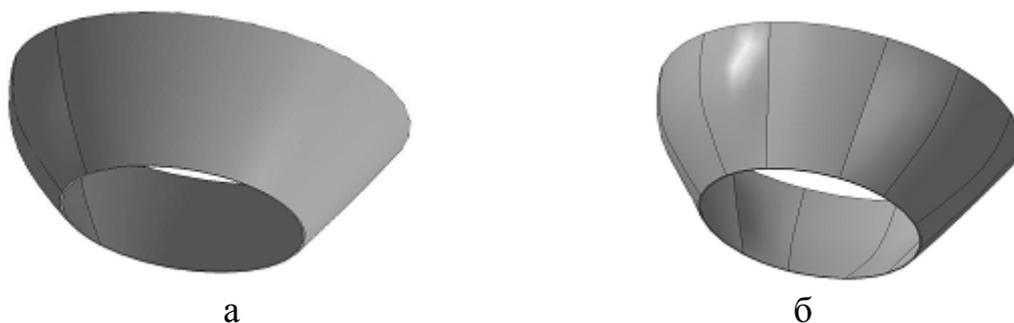


Рис. 2. Полуфабрикат, изготавливаемый стендовой штамповкой (3Dмодель): а – с одной выштамповкой; б – с тремя выштамповками

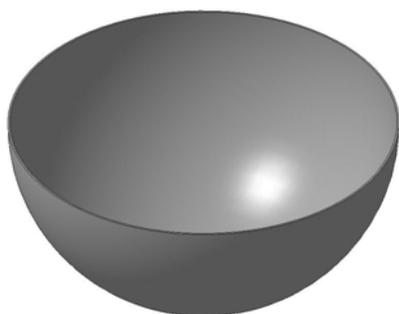


Рис. 3. Сфера (модель резервуара) после окончательного формообразования

Модель изделия после последовательных воздействий (9-12) имеет вид полусферической поверхности и представлена на рис. 3.

При выборе технологических параметров локальной выштамповки на полуфабрикате можно использовать условие, сформулированное из энергетических соображений:

$$W_{дч} \leq W_{пз}, \quad (1)$$

где  $W_{дч}$  и  $W_{пз}$  – работа пластической деформации соответственно купольной

(донной, “несущей”) и периферийной (фланцевой) зон штампуемой заготовки.

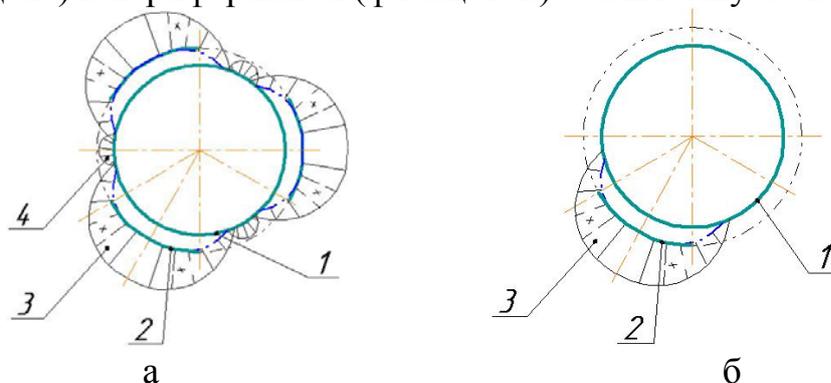


Рис. 4. Распределение деформаций: а – одна выштамповка; б – три выштамповки; 1 – исходная заготовка (в сечении); 2 – положение части заготовки после предварительной штамповки; 3 – интенсивность деформаций на отштампованном участке и прилегающей к нему зоне заготовки; 4 – деформации в зонах заготовки между локальными выштамповками

Очевидно, что интенсивность деформации участков заготовки (периферийной и части, соответствующе размерам формообразующей части матрицы) обратно пропорциональны объемам соответствующих участков заготовки [5-7].

**Выводы.** Разработан и может быть рекомендован метод последовательной локальной штамповки с искусственным регулированием зон двухосного растяжения. Как дальнейшая задача предполагается исследование особенностей

штамповки изделий с формой в плане, отличной от осесимметричной. Разработки ХНЭУ и ХАИ позволяют 80 – 90 % деталей крупногабаритных сооружений изготавливать непосредственно в зоне их эксплуатации или монтажа без использования дорогостоящего оборудования.

Отражены основные особенности оценки технологических параметров. Предложена методика оценки степени деформации в опасном сечении в зависимости от размеров периферийных зон заготовки и их деформации.

Предложенная технология локальной штамповки позволяет 80 – 90 % деталей крупногабаритных сооружений изготавливать непосредственно в зоне их эксплуатации или монтажа без использования дорогостоящего оборудования.

Использование технологий, разработанных в ХНЭУ на кафедре техники и технологии (а.с. № 1540121, 1573631, 1575418, 1658477 и других), позволяют **существенно** (в 10 и более раз) снизить сроки и стоимость ремонтных работ крупногабаритных сооружений, например, резервуаров.

**Список литературы:** 1. Мошнин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с. 2. Скакунов М.Г., Липодат К.К. и др. Способ изготовления сферических оболочек. А.с. СССР № 755388 В 21D 51/08, Е 04Н 07/14 от 27.09.77 г. 3. Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций / Степанов В.Г., Сипилин П.М. и др. – Л.: Судостроение, 1966. – 292 с. 4. Высокопроизводительные методы обработки металлов давлением / Шамарин Ю.Е. и др. – К.: Тэхника, 1991. – 102 с. 5. Савченко Н.Ф. О проектировании техпроцессов гидровзрывной тонколистовой штамповки-вытяжки крупногабаритных деталей типа днищ / Н.Ф. Савченко // Импульсная обработка металлов давлением: сб. статей под ред. канд. техн. наук В.К. Борисевича. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 51-56. 6. Савченко Н.Ф. Изготовление крупногабаритных деталей емкостей и резервуаров / Н.Ф.Савченко, Е.Н. Рубан // Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности: тезисы докладов Междун. научно-техн. конф. – Х.: Национальный аэрокосмический университет "Харьковский авиационный институт", 2007. – С. 103–104. 7. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. [http://venec.ulstu.ru/lib/2003/4\\_Kolganov\\_Dubrovski\\_Arhipov.pdf](http://venec.ulstu.ru/lib/2003/4_Kolganov_Dubrovski_Arhipov.pdf)

УДК 629. 735. 33

## **К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ ЛЕГКИХ САМОЛЕТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ МАЛОЙ АВИАЦИИ**

**Савченко Н.Ф.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

**Воронько В.В.**, докт. техн. наук

(Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ")

*A method for emergency rescue aircraft. The advantages of the method include the ability to increase the response speed of the parachute system and improving its dynamic stability*

Коммерческое и туристическое использование самолетов как наиболее эффективного транспортного средства ограничивается, в ряде случаев, большим риском совершения полетов. Риск увеличивается рядом причин:

– человеческим фактором, особенно значительном при малом опыте пилота – владельца транспортного средства или же при возникновении форс-мажорных ситуаций в полете (внезапные отказы двигателей, резкое ухудшение погодных условий, поломки жизненно важных изделий конструкции и другие непредвиденные случаи). Возможны и диверсии;

– конструктивными недоработками;

– усталостными разрушениями.

Для уменьшения катастрофических последствий аварийного приземления (посадки) самолетов в настоящее время известно достаточно большое количество способов, использующих различные устройства типа парашютов, специальные приемы приземления, дополнительные двигатели [1–3]. Тем не менее, проблема спасения экипажа и пассажиров достаточно остра. Например, существующие методы аварийного спасения самолета, как правило, не эффективны на малых высотах (30–100 м), так как парашютные системы не обеспечивают надежное развертывание купола парашюта в пространстве за минимальное время (2–7 с). В процессе наполнения парашюта развивается кабрирование самолета и, соответственно, вместе с ростом нагрузок (перегрузок) от парашютов растут перегрузки от кабрирования самолета, неустойчивость, возможно сворачивание и разрыв полотна купола и строп.

Проблемой использования существующих парашютных систем является ограниченная область их применения. К ограничениям относится также и повышенная их масса (до 5–10 % массы летательного аппарата), и сложность обеспечения динамической устойчивости традиционных схем парашютных систем. Это обусловлено их локальным креплением, сложностью и малой площадью купольной системы, опасностью перехлеста строп, длины которых достигают 5–10 м, и свертывания (гашения) купола. В результате ухудшаются аэродинамические характеристики системы «самолет–парашют», могут возникать непрогнозируемые режимы приземления самолета, завершающиеся катастрофическими последствиями. С этой целью был проведен анализ наиболее важных решений, разработанных для ликвидации авиационных аварий (например, патент США №5810293 от 22.09. 1998 г., патент РФ № 2009081 и № 2056331 соответственно от 15.03. 1994 г. и 20.03. 1996 г., патент DE № 19854410 от 16.03. 2000 г.). Из рассмотренного можно сделать вывод, что использование традиционных схем парашютных систем с локальным креплением тросов к конструкции фюзеляжа, кроме повышенной динамической неустойчивости, приводит к увеличению массы парашютной системы, усложняет конструкцию самолета (например, разделение самолета на отдельные отсеки–капсулы).

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что возможные варианты аварийного спасения летательных аппаратов могут основываться на новых прогрессивных решениях (рис. 1). Повышение эффективности и надежности аварийного спасения летательных аппаратов массой до 20–30 т, как показывает анализ данной схемы, вполне реально. Прочность материалов для купола и строп близка к прочности высокопрочной стали. Имеется широкий спектр технологических решений аварийного спасения: от простых и мно-

гокупольных парашютных систем с встроенными системами обеспечения повышенного аэродинамического качества до импульсных, одностадийных и многостадийных, устройств торможения скорости падения.

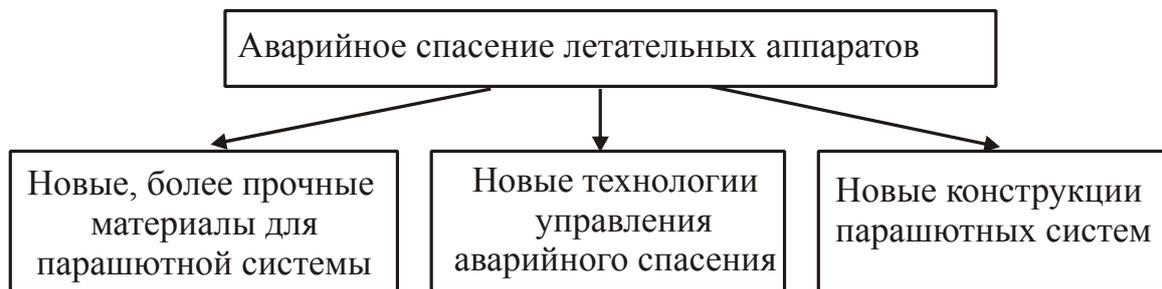


Рис. 1. Схема выбора вариантов усовершенствования парашютных систем

Как пример новых парашютных систем, включающих все компоненты из предложенной схемы выбора вариантов усовершенствования парашютных систем, можно выбрать способ аварийного спасения летательного аппарата (патент Украины № 49951). Использование этого способа, по мнению авторов, может улучшить возможность осуществлять аварийное спасение самолета или вертолета как цельной, специально не разделяемой, конструкции (рис. 2). Это достигается искусственным повышением аэродинамического качества и быстродействия систем «летательный аппарат – парашют» после возникновения и в процессе – устранения аварии.

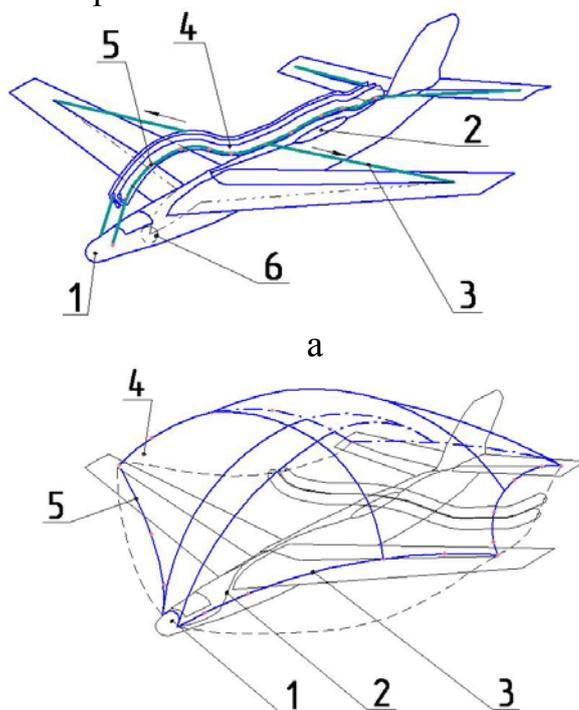


Рис. 2. Схема аварийного спасения самолета: а – освобождение парашюта в виде жгута после возникновения аварии; б – самолет после раскрытия парашюта: 1 – самолет; 2 – щелевидный технологический люк (для размещения парашюта, опорного троса, при необходимости строп; 3 – трос; 4 – парашют (а – в виде жгута; б – в раскрытом виде); 5 – элемент крепления купола к тросу (кольцо или стропа); 6 – привод

В соответствии со способом аварийного спасения самолета 1 в конструкции фюзеляжа, крыльев и оперенья выполняются щелевидные каналы–люки 2 для размещения в них собранного в жгут 3 (рис. 1) купола 4 и тросов 3 (при необходимости и строп небольшой длины, не более 1–2 м).

Пример сборки парашюта в вид жгута приведен на рис. 3. Количество гофров определится  $n = k \cdot B / l_{\Gamma}$ , где  $n$  – количество гофров,  $k$  – коэффициент;  $B$  – хорда;  $l_{\Gamma}$  – высота гофра (выбирается по конструктивным соображениям). Количество строп может быть минимальным по прочностным и конструктивным соображениям (в зоне оперенья, крыла).

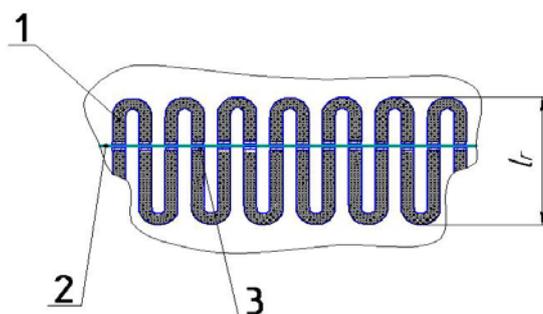


Рис. 3. Пример сборки купола в виде многослойного жгута:  
1 – полотно купольной системы; 2 – трос; 3 – кольцо для протягивания троса

Размеры щелевидных каналов–люков определяются из условия свободного освобождения из фюзеляжа и крыльев собранной в пакет парашютной системы: наибольшие размеры – примерно 0,2...0,4 м, наименьшие – на 1...3 мм больше диаметра троса (5...15 мм). Разгерметизация (раскрытие) люка осуществляется с помощью пиропатрона или пневмоцилиндра. После этого с помощью пневмопривода (впрыск воздуха) или небольшой лебедки производится вытягивание (вбрасывание) жгута во внешнюю среду (не более 0,5–1 сек). Под действием скоростного потока или дополнительных, вытяжных парашютов, производится разворачивание купола. Время срабатывания парашютной системы определяется временем вытягивания из технологического люка жгута и его раскрытием (предположительно не более 2–5 секунд).

Парашютная система при необходимости может быть снабжена механизмами ее принудительного (с земли, без участия пилота) размещения и фиксирования в пространстве, например, для того, чтобы предотвратить возможность осуществления террористического акта, том числе и по типу техногенной катастрофы (падение самолета на атомную электростанцию или химическое предприятие).

Важным обстоятельством, отличающим предложенную конструкцию парашюта и систему аварийного спасения самолета или вертолета от известных, можно считать и предусмотренную возможность осуществлять целенаправленное управление смещением строп парашюта при падении летательного аппарата (рис. 4). Это может выполняться автоматически, без участия пилота, при ликвидации аварии типа «скольжение на крыло», «пикирование», для предотвращения или выхода из штопора.

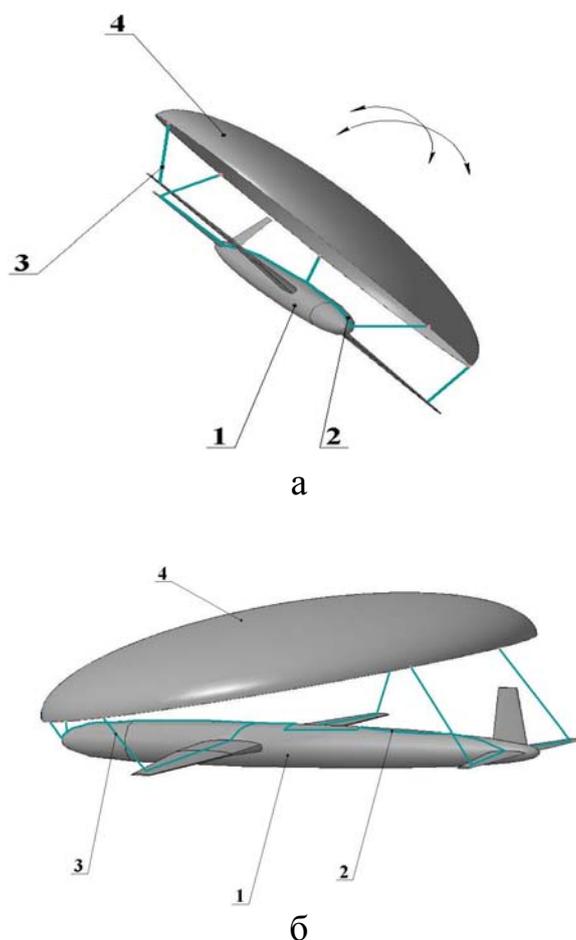


Рис. 4. Парашютная система для имитации аварийного спасения летательного аппарата: а – до смещения купола; б – при смещении: 1 – самолет; 2 – технологические люки-пазы; 3 – стропы; 4 – купол парашюта

Проведенные предварительные технико-экономические исследования позволяют считать разработанный способ и систему аварийного спасения достаточно надежным средством, использование которого возможно как с участием пилота, так и без него, в автоматическом режиме. Это требует проведения дальнейших исследований и физико-ситуационного моделирования нештатных ситуаций и выхода из них с использованием подобного типа решений или их комбинаций с другими способами аварийного спасения самолета.

Предположительная стоимость парашюта и системы аварийного спасения, как показывают предварительные расчеты, не превысит 25 – 30 тыс. долларов и может корректироваться в зависимости от стоимости средств автоматизации управления процессом устранения аварии.

**Список литературы:** 1. Касьяненко А. А. Анализ риска аварий техногенных систем: Монография / А.А. Касьяненко, К.Ю. Михайличенко. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – 182 с. 2. Средства спасения экипажа самолета / С.М. Алексеев и др. – М.: Машиностроение, 1975 – 279 с. 3. Быстродействующие парашютные системы спасения для планеров. [Режим доступа]: [http://www.aviajournal.com/arhiv/1999/799/st5\\_799.html](http://www.aviajournal.com/arhiv/1999/799/st5_799.html). 4. Быстродействующая парашютная система спасения КС-2000. [Реж. дост.]: [http://icct.by/Docs/Tatarstan/katalog/12\\_01\\_kc2000.htm](http://icct.by/Docs/Tatarstan/katalog/12_01_kc2000.htm) 5. Планирующая оболочковая парашютная система ПО-9 серии 2. [Режим доступа]: [http://www.borkodrom.ru/My/books/Spravochnik/13\\_PO-9ser2.htm](http://www.borkodrom.ru/My/books/Spravochnik/13_PO-9ser2.htm)

## ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ФТОРОПЛАСТЫ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

**Калюжный А.Б.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)

**Платков В.Я.**, докт. физ.-мат. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The effect of radiation on the strength of the porous PTFE have been studied*

**Введение.** Радиационная стойкость компактных полимерных материалов изучена в [1, 2]. Многие свойства полимерного материала в высокопористом состоянии, в том числе и радиационная стойкость, могут существенно отличаться от свойств в компактном состоянии. Среди высокопористых полимерных материалов перспективными являются высокопористые фторопласты [3] ввиду высоких химической и термической стойкости, отсутствия набухания в жидких средах, при сравнительно высоких физико-механических свойствах, что обусловило их широкое применение как фильтрующих материалов [4, 5]. Однако, радиационная стойкость и свойства облученных высокопористых фторопластов оставались не изученными. В связи с этим предприняты исследования радиационной стойкости нетермопластичного и термопластичных высокопористых фторопластов. Пористые материалы считались стойкими к определенной дозе облучения, если они сохранили структурные, гидравлические и фильтровальные свойства при допустимом снижении прочностных характеристик.

**Объекты исследования и методика эксперимента.** Высокопористые полимерные материалы изготавливались путем предварительной подготовки смеси диспергированных порообразователя и порошка полимера с последующим таблетированием, термообработкой и выщелачиванием порообразователя [6]. В качестве порообразователя использовался хлорид натрия, выщелачивание которого осуществлялось кипячением в дистиллированной воде. Объемная пористость регулировалась соотношением количеств порообразователя и полимера и изменялась в диапазоне (65–75)%, при этом размер пор определялся дисперсностью порообразователя. Средний размер пор регулировался в пределах (8–70) мкм.

Высокопористый нетермопластичный фторопласт получали на основе фторопласта-4 методом холодного таблетирования, термопластичный – на основе фторопластов 2М, 40 и 30 методами как холодного так и горячего таблетирования. При горячем таблетировании смесь порошков полимера и порообразователя после предварительного прессования при комнатной температуре нагревалась в пресс-форме и после достижения температуры ( $T_{пл} + 20K$ ) про-

водилось окончательное таблетирование заготовки тем же давлением с выдержкой ее под давлением до полного остывания.

Пористость определялась объемным методом. Средний размер пор устанавливался методом вытеснения жидкости из пор (метод Баруса-Бехгольда). Гидравлические характеристики определялись по гидравлическому сопротивлению при фиксированных расходах сжатого воздуха. Фильтрационные характеристики - в процессе фильтрования с помощью счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 по соотношению концентрации частиц механических примесей до пористого материала и после него.

Физико-механические характеристики определялись с помощью разрывной машины МР-0,5. Микроструктура поверхностных и внутренних слоев изучалась по микрофотографиям, полученным с помощью оптического микроскопа "БИОЛАМ"-Р6. Препараты для внутренней микросъемки изготавливались микротомом МС-2.

Облучение образцов осуществлялось в реакторном канале, использовались две суммарные дозы облучения: малая доза облучения (МДО) –  $8,5 \times 10^3$  Гр и большая (БДО) –  $7,2 \times 10^5$  Гр.

**Результаты и их обсуждения.** Проведенные исследования показали, что среди изученных свойств высокопористых фторопластов наибольшие изменения в результате облучения претерпевают физико-механические свойства (табл. 1). Однако эти свойства различных высокопористых фторопластов по-разному реагируют на облучение. Так высокопористый фторопласт-4, даже в результате МДО резко уменьшил предел прочности при растяжении  $\sigma_{\sigma}$  и относительное удлинение  $\delta$  ( $\approx$  в 3,5 раза). В отличие от этого,  $\sigma_{\sigma}$  высокопористого фторопласта-2М в результате МДО уменьшилось лишь на 12 %, а в высокопористых фторопластах-30 и 40, наоборот, наблюдалось упрочнение ( $\approx$  на 5% и 50%, соответственно). При этом  $\delta$  высокопористых фторопластов-2М, 30 и 40 уменьшилось приблизительно одинаково на 33 %.

Таблица 1

Полимерная матрица	П, %	До облучения		МДО		БДО	
		$\sigma_{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , %
Холодное таблетирование							
фторопласт - 4	65	1,5	20	0,43	5,5	-	-
фторопласт - 2М	65	2,5	15	2,2	10	-	-
фторопласт - 30	75	1,3	15	1,36	8	-	-
фторопласт - 40	75	1,0	9	1,5	6	-	-
Горячее таблетирование							
фторопласт - 2М	70	3,0	20	2,7	18	-	-
фторопласт - 30	75	3,5	25	3,2	24	0,54	4,8
фторопласт - 40	65	4,5	30	4,2	28	0,59	5,0

БДО вызвало деструкцию и полное разрушение всех изученных высокопористых фторопластов, полученных методом холодного таблетирования.

Наибольшую стойкость к реакторному облучению проявили высокопористые фторопласты, изготовленные горячим таблетированием. Так, в результате МДО, величины  $\sigma_g$  и  $\delta$  этих материалов лишь незначительно уменьшились. Что касается БДО, то такое облучение вызвало полную деструкцию и разрушение только высокопористого фторопласта–2М, в то время как высокопористые фторопласты–30 и 40 не разрушились, но их величина  $\sigma_g$  уменьшилась в 8–10 раз при существенном снижении  $\delta$ .

Микроструктура изучалась в исходных и неразрушившихся образцах, так как при полной деструкции материала не удается получить микротомный срез для микроскопического исследования. Установлено, что в высокопористом состоянии у всех изученных материалов при различных значениях  $P_{об}$  поровая структура внутренних слоев резко отличается от структуры тонкого поверхностного слоя, в котором средний диаметр пор и их плотность значительно меньше (в 5–8 раз), чем во внутренних слоях. Такое отличие больше выражено у высокопористых фторопластов 30 и 40, полученных методом холодного таблетирования, и особенно ярко выражено у всех высокопористых плавких фторопластов, полученных методом горячего таблетирования. Воздействие радиационного облучения на структуру изучалось как в поверхностных, так и в объемных слоях. При воздействии МДО структура как внутренних, так и наружных слоев всех исследованных материалов не претерпела заметного изменения. Что касается фторопласта–4, то визуально его поровая макроструктура существенно не изменилась, однако, прочность его настолько понизилась, что у отдельных образцов разрушение наступало при минимальной нагрузке и измерить их  $\sigma_g$  не удавалось.

Воздействие БДО не повлекло изменения внешней геометрии исследуемых образцов. При этом структура поверхностных слоев либо заметно не менялась (фторопласты 2М и 40), либо наблюдались некоторые изменения в виде появления отдельных локальных канавок (фторопласт–30). Структура внутренних слоев сильно изменялась. Изменение состояло в увеличении размеров поровых каналов и наиболее заметно у фторопласта 40 (на 8–10 %). Воздействие БДО на все изученные плавкие высокопористые фторопласты, изготовленные холодным таблетированием и на высокопористый фторопласт 2М, полученный методом горячего таблетирования, привело к практически полной деструкции материала внутренних слоев, в результате чего конфигурация образца удерживалась только наружными слоями. Гидравлическое сопротивление и эффективность фильтрования всех изученных высокопористых материалов при МДО существенно не менялись, что также косвенно свидетельствует о стабильности поровой макроструктуры при таких дозах облучения.

Гидравлические и фильтровальные характеристики высокопористых фторопластов–30 и 40 также не претерпели существенных изменений, несмотря на то, что их поровая макроструктура внутренних слоев существенно изменилась. Это свидетельствует, что указанные характеристики определяются поровой макроструктурой наружных слоев. Результаты свидетельствуют, что влияние облучения на изучаемый комплекс свойств высокопористых фторопластов обу-

словлено формированием структуры как внутренних, так и наружных слоев этих материалов. При облучении высокопористых фторопластов имеют место как процессы разрыва молекулярных цепей, ведущие к частичной или полной деструкции материала, так и процессы возникновения поперечных связей между молекулярными цепями, ведущие к упрочнению материала (аналогично компактным материалам [3]). В зависимости от того, какой из этих процессов превалирует, механические свойства высокопористых фторполимеров будут либо падать, либо возрастать, что и наблюдалось в эксперименте. Однако, до определенных доз облучения эти изменения происходят на молекулярном уровне. Это может приводить к локальным частичным разрушениям межпоровых полимерных перегородок, тем самым увеличивая средние размеры межпоровых каналов. Но, как показывают экспериментальные данные о практической независимости от дозы облучения гидравлических сопротивлений и фильтровальных характеристик, последние определяются структурной стабильностью поверхностных слоев. Такая стабильность связана с тем, что поверхностные слои в структурном отношении ближе к компактным материалам, у которых радиационная стойкость много выше радиационной стойкости высокопористых материалов.

**Список литературы:** 1. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры / А. Чарлзби. – М.: Издательство, 1962. 2. Махлис Ф.А. Радиационная физика и химия полимеров / Ф.А. Махлис. – М.: Атомиздат, 1972. 3. Паншин Ю.А. Фторопласты / Ю.А. Паншин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская. – Л.: Химия, 1978. 4. Патент РФ, № 1736569. Способ изготовления фильтрующих материалов на основе политетрафторэтилена / Т.Л. Карпова, П.Д. Гужин, А.А. Бобраков, Б.Г. Калюжный, И.Ф. Кашубина, Л.А. Коцацкая, В.А. Большов. – 1993. 5. Патент Украины, № 18975 А. Спосіб виготовлення фільтруючих елементів на основі фторопласту-4 / Б.Г. Калюжній, Т.Л. Карпова, С.В. Шевченко, Т.В. Калюжная. – 1997. 6. Пугачев А.К. Переработка фторопластов в изделия: Технология и оборудование / А.К. Пугачев, О.А. Росляков. – Л.: Химия, 1987.

УДК 658.512.011.56.001.45

## **АДАПТИВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАТРИЦ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

**Клещев Г.М.**, канд. техн. наук

(Одесский государственный институт измерительной техники)

*Using fragments of architecture PKI enabled to develop and introduce the enterprises of CIS countries and Ukraine, dozens of local and integrated systems for optimal cutting, design and preparation of control programs for the manufacture of dies in production. A significant economic effect on the timing of implementation of various enterprises ranging from 1.5 to 0.6 years, local and integrated systems*

В настоящее время на рынке появилась тенденция к переходу от единичного и индивидуального производства к серийному производству. Указанное требует новых подходов, как к проектированию, так и к производству штампов

холодной листовой штамповки (ХЛШ). В тоже время переход к серийному производству позволяет применить системный подход, стандартизацию и унификацию сохраняя гибкие, многономенклатурные методы обработки и обеспечивая возможность часто перестраивать производство, затрачивая на это минимум времени и средств. В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах, автоматизированных информационных системах и технологиях управления, позволяющих повысить производительность при серийном производстве. На основании изложенного рассматривается системный подход, представленный в виде геометрической модели информационного промышленного комплекса.

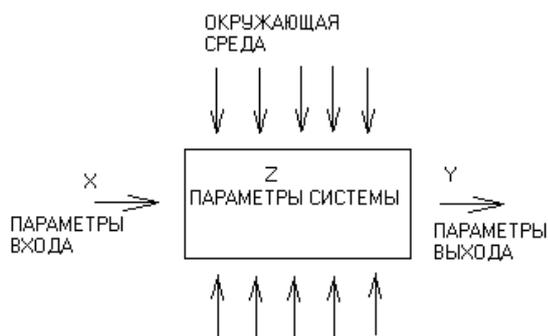


Рис. 1. Обобщенная система

Как известно информационные системы основываются на входной информации и, перерабатывая ее, создают и передают новую информацию. В тоже время любая система существует не обособленно, а под действием других систем и окружающей среды. Количество таких воздействий безгранично. На рис. 1 представлена схема обобщенной системы с основными характеристиками [1], где:

$$\begin{aligned} X &= x_1, x_2, \dots, x_n - \text{параметры входа;} \\ Z &= z_1, z_2, \dots, z_n - \text{параметры системы;} \end{aligned} \quad (1)$$

$$Y = y_1, y_2, \dots, y_n - \text{параметры выхода.}$$

Определение необходимых параметров для конкретной системы из окружающей среды используют автоматизированные схемы с обратной связью (рис. 2), которые отбирают "необходимые" воздействия, т.е. на которые настроена эта система.

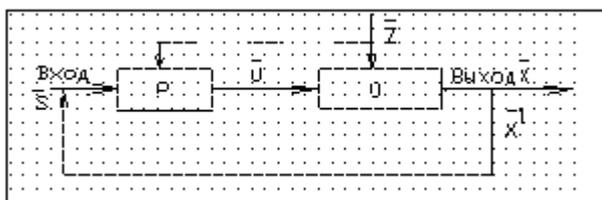


Рис. 2. Схема с обратной связью: P – управляющий орган; U – управляющий вектор; O – управляемый (обрабатывающий) орган; S – вектор входных параметров; X – вектор выходных параметров; X<sup>1</sup> – вектор обратной связи; Z – помеха

Любой из векторов состоит из N-го количества составляющих, например,  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  и т.д. (2)

С учетом приведенных составляющих управляющий вектор U примет вид:

$$U = F(S, X^1, Z, X) \quad \text{или} \quad (3)$$

$$U = F \{ (s_1, s_2, \dots, s_n), (x_1, x_2, \dots, x_n), (z_1, z_2, \dots, z_n), (x_1, x_2, \dots, x_n) \}. \quad (4)$$

На основании схемы, представленной на рис. 2, разработана адаптивная модель (рис. 3), в которую входят [2]:

ОС – основной блок;  
 БИЗМ.П.У. – блок изменений производственных условий;  
 БОИ – блок сбора, обработки и передачи информации;  
 БППВ – блок программного поля восприятия;  
 БАА – блок алгоритмов адаптации;  
 БНСИ – блок нормативно-справочной информации;  
 БЗ – блок знаний;  
 БСРиО – блок сравнения, распознавания и оценивания;  
 БУ – блок учителя (блок адаптации).

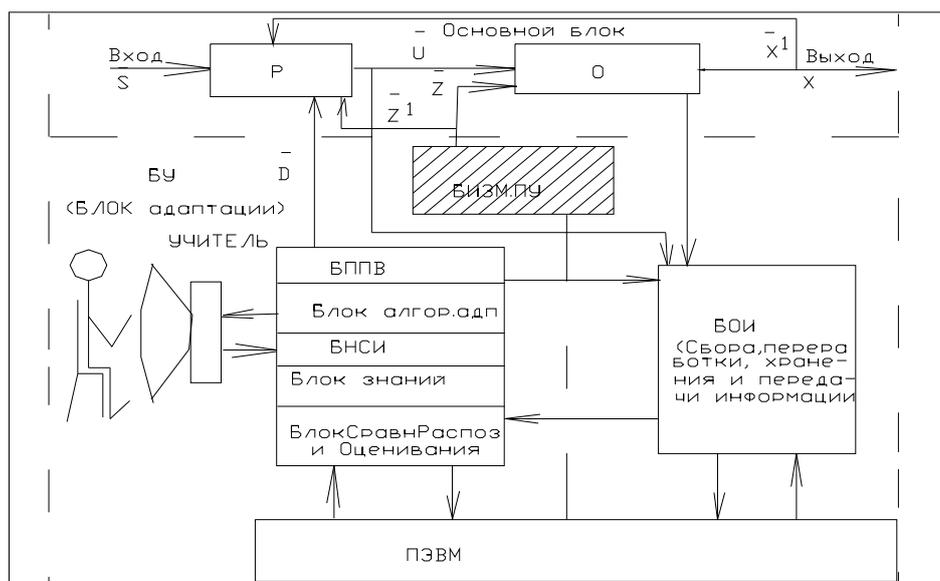


Рис. 3. Адаптивная модель проектирования и изготовления штампов

**Основной блок** фактически выполняет те же функции, что и схема, представленная на рис. 2.

**Блок изменения производственных условий** – это все производственные условия, которые возникают в период создания изделия, например, изменение материала, изменение технических требований на изготовление изделия, изменение конфигурации и габаритов изделия и т.д.

**Блок сбора, переработки и передачи информации** – вся информация, которая обрабатывается на ПЭВМ.

**Блок программного поля восприятия** – программы, которые необходимы для решения конкретных задач, на которые настроена данная модель.

**Блок алгоритмов адаптации** – алгоритмы, описывающие постановку конкретных решений по проектированию и изготовлению.

**Блок нормативно-справочной информации** – ГОСТы, ОСТы, методические и руководящие технические материалы, директивы, решения, связанные с конкретной ситуацией и т.п.

**Блок знаний** – знания, накопленные десятилетиями ведущими специалистами, формализованные решения в виде математических формул и математических высказываний, схем, моделей и т.п.

**Блок сравнения, распознавания и оценивания** – для сравнения, распознавания и оценивания используются: структурный подход, аппарат математической лингвистики, разбиение пространства признаков на области, а объектов – на классы и т.п.

**Блок учителя (блок адаптации)** – работа блока обеспечивается всеми указанными блоками, а пользователь контролирует и принимает окончательное решение, и оно выдается как окончательное в виде вектора  $D$ .

На основании адаптивной модели, введя вектор состояний  $A$  и учитывая вектор  $D$ , вектор  $U$  можно представить в виде математической модели двух векторов:

$$U = F(A, S); \quad (5)$$

$$A = \Psi(A^0, S, X, Z, D); \quad (6)$$

отсюда

$$U = F[\Psi(A^0, S, X, Z, D) S]. \quad (7)$$

Каждый из векторов может быть представлен в виде матрицы, составляющими которой, в зависимости от рода помех, могут быть, например, следующие компоненты, где:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n-1}, d_{1n} \\ d_{21}, d_{22}, d_{23}, \dots, d_{2n-1}, d_{2n} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}, \dots, d_{mn-1}, d_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$d_{11}, d_{12}, d_{13}$  – сведения об изменении, соответственно, конфигурации, например главного привода, трансмиссии, привода пода и т.п.

Количество составляющих матриц бесконечное множество: допуски, посадки, конструктивные решения, сортамент материалов и т.д. Поэтому, при моделировании сложных систем порядок данных может составлять  $10^6$  и более. В этом случае нами применялись пространственные матрицы. Теоретические основы математической модели с использованием пространственных матриц представлены в статье [3].

Адаптивная модель используется в интегрированном промышленном комплексе, в системах подготовки производства и изготовления штампов: САПР – в системе автоматизации конструкторско-технологического проектирования, АСТПП – в автоматизированной системе технологической подготовке производства и в гибкой автоматизированной системе производства.

Выводы. Использование фрагментов архитектуры ИПК позволило разработать и внедрить на предприятиях стран СНГ и Украины десятки локальных и интегрированных систем по оптимальному раскрою, конструированию и подготовке управляющих программ для изготовления штампов в производстве. Получен значительный экономический эффект со сроками внедрения от 1,5 до 0,6 лет. По совокупности требований, предъявляемых к системам, с учетом имеющегося опыта стандартизации и унификации при внедрении и применении в учебном процессе, целесообразно в дальнейшем развивать имеющийся опыт.

**Список литературы:** 1. Інформаційні системи і технології в економіці: Посібник / За редакцією д.е.н. В.С. Пономаренко. – К.: В.Ц. “Академія”, 2002. 2. Клещев Г.М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов. Серия 6. “Технология тракторного и сельскохозяйственного машиностроения”: Экспресс-информация / Г.М. Клещев. – М., 1982. 3. Клещев Г. М. Математическая модель теоретических основ создания автоматизированных интегрированных систем сельхозпроизводства / Г.М. Клещев, А.Н. Богач, В.И. Живица //MOTROL’2005: V Ювілейна міжнародна науково-технічна конференція. – Люблин–Одеса, 2005. 4. Компакт диски-CD AutoCAD<sup>R</sup> (2000, 2002).

УДК 658.512.011.56.001.45

## **КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СОЗДАНИИ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

**Моргун Б. А.**, канд. техн. наук, **Клещев М.Г.**

(Одесский национальный политехнический университет)

**Клещев Г.М.**, канд. техн. наук, **Грабовский О. В.**, **Кулиш Н. В.**

(Одесский государственный институт измерительной техники)

*The paper presents the concept of adaptive management model for automated creation of cold stamping dies. The results of practical application development*

В последние несколько лет в связи с нехваткой специалистов по предметной области сменился спрос рынка от индивидуализации производственных процессов на повышенный интерес к компьютерным системам, посредством которых можно обеспечивать серийное безбумажное, безлюдное и эффективное управление производством. Причем растет спрос именно на интегрированные системы управления – автоматизация отдельной функции, вроде бухгалтерский учет, сбыт готовой продукции, расчет заработной платы – считается уже пройденным этапом для многих предприятий [1]. Указанное требует новых подходов, как к проектированию, так и к производству изделий.

Поэтому, представленная в докладе и описанная в статье [2], модель интеллектуального информационного интегрированного промышленного комплекса (МИИПК) с адаптивной моделью, является своевременной и необходимой. В тоже время переход к серийному производству и компьютерным технологиям позволяет применить системный подход, стандартизацию и унификацию, сохраняя гибкие, многономенклатурные методы обработки и обеспечивая возможность часто перестраивать производство, затрачивая на это минимум времени и средств. В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах, автоматизированных информационных системах и технологиях управления, позволяющих повысить производительность при серийном производстве. При создании указанной модели ИИПК с адаптивной моделью управления использован системный подход, что позволяет применять модель во всех областях промышленности: тяжелой, легкой и в создании бытовой технике.

В качестве объекта исследования нами принята структура адаптивной модели информационного интегрированного промышленного комплекса процесса управления механическим производством при создании систем по проек-

тированию и изготовлению штампов: вырубных, совмещенных и последовательного действия холодной листовой штамповки, а в качестве предмета исследований – математический аппарат и модели принятия решений.

Для описания математической модели интегрированного комплекса использованы алгоритмы и методы теории системного анализа, а также синтез оптимизации организационных структур.

Рассматриваемая модель базируется на теоретико-множественном подходе, в основе которого лежит представление системы в виде совокупности множества элементов. МИИИПК состоит из 15 систем: 9 систем производственных и 6 систем экономического направления, каждая из которых имеет свою базу данных и знаний, объединенных в общий банк данных и знаний предприятия. Шесть систем экономического направления «отвечают» за: рентабельность, конкурентоспособность, прибыльность, безубыточность предприятия, а так же за прогноз спроса и сбыта продукции на ближайшие годы.

Использование указанной адаптивной модели, МИИИПК и штамп-заготовок при проектировании и изготовлении указанных видов штампов и локальных составляющих систем, позволило провести испытания комплексной (интегрированной) системы на Одесском заводе штампов НПО «Спецтехоснастка» и Чебоксарском заводе промышленных тракторов. Промышленное испытание показало, что спроектировать и изготовить штамп в металле при использовании штамп-заготовок, возможно за одни сутки вместо традиционных трех-четырёх лет при неавтоматизированном способе (вручную: проектирование раскроя листа; проектирование деталей и общего вида еще не существующего штампа; выдача за год раньше заказных ведомостей на материалы и комплектующие для изготовления деталей штампа; проектирование технологических карт на каждую деталь спроектированного штампа; промежуточные утверждения у себя и согласования с заказчиком каждого вида разработанных проектов; промежуточная выдача (разработка) конструкторско-технологической документации: калек, синек и т.д.). Безусловно, в каждом случае используются: стандартизация – ГОСТы, ОСТы штамповой оснастки; унификация – использование блоков, пакетов и деталей штампов для разных типоразмеров штампов и как итог – применяется высокоточная измерительная техника контроля, т.к. штампы являются особо точной инструментальной оснасткой.

Адаптивная модель используется в интегрированном промышленном комплексе, в системах подготовки производства и изготовления изделий: САПР – в системе автоматизации конструкторско-технологического проектирования; АСТПП – в автоматизированной системе технологической подготовки производства; ГАСП – в гибких автоматизированных системах производства.

Использование фрагментов архитектуры МИИИПК позволило разработать и внедрить на предприятиях стран СНГ и Украины десятки локальных и интегрированных систем по оптимальному раскрою, конструкторско-технологическому проектированию и подготовки управляющих программ для изготовления штампов в металле на производстве. Получен значительный экономический эффект не только от внедрения систем комплекса, но и от изготов-

ления в металле более 1000 штампов. По совокупности требований, предъявляемых к системам, с учетом имеющегося опыта по стандартизации и унификации при внедрении на производстве и многолетнем использовании моделей в учебном процессе, целесообразно в дальнейшем развивать имеющийся опыт.

**Список литературы:** 1. Гужва В.М. Інформаційні системи і технології на підприємствах / В.М. Гужва. – К.: Київський національний економічний університет, 2001. 2. Gennadiy Kleshchev. Integrated industrial information complex of economic systems control for farming industry // MOTROL'2006: Сб. трудов международной научно- технической конференции. – Том 8А. – Люблин (Польша), 2006. – С. 158–167. 3. Клещев Г.М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов. Серия 6. “Технология Тракторного и сельскохозяйственного машиностроения” / Г.М. Клещев // Экспресс-информация. – М., 1982.

УДК 666.9-16

## **ВИКОРИСТАННЯ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ**

**Саввова О. В.**, докт. техн. наук, **Брагіна Л. Л.**, докт. техн. наук,  
**Бабіч О. В.** канд. техн. наук, **Гривцова А.О.**, студентка  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,  
Національний технічний університет «ХПІ»)

*The prospect of usage a set of high-strength composite materials - elements of body armor was established. The methodological approach was developed. On the basis of scientific principles the initial lithiumaluminosilicate systems for the preparation of high-strength lightweight glass-ceramic materials were chosen*

**Вступ.** Одвічна боротьба розвинених країн за господарювання у світі та визначення місця й впливу інших у економічному та територіальному аспектах дедалі більше веде до виникнення локальних та масових конфліктів, що супроводжуються руйнуванням будівель, споруд та масовими кульовими, вогневими та осколковими ураженнями як військового контингенту, так і мирного населення. Поряд з цим стрімкий розвиток у галузі вибухових речовин, боєприпасів, стрілецької зброї сприяє наростанню балістичної загрози, з якою стикаються співробітники правоохоронних органів. Тому зараз існує нагальна потреба у створенні надійного технологічного матеріалу для виготовлення елементів засобів індивідуального захисту, який забезпечить підвищений рівень їх бронестійкості, а отже збереження життя людей у зоні конфліктів.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** На сьогоднішній день розроблені та використовуються різноманітні матеріали для виготовлення елементів бронезахисту. Так, для захисту від низькоенергетичних засобів ураження – револьверних і пістолетних куль – широко використовується текстильна броня з високомодульних і високоміцних поліарамідних або поліетиленових ниток. Ефективний захист від високоенергетичних засобів ураження з високою проникаючою здатністю – бронебійних гвинтівкових куль з термозміцненими серцевинами – неможливий без використання як елемента захисної структури

металевих сплавів, керамічних та склокристалічних матеріалів [1].

Однак використання броньованих сталей обмежується їх значною вагою, а титанові сплави внаслідок їх низької теплопровідності при інтенсивному динамічному навантаженні мають схильність до локалізації зсувних пластичних деформацій – утворення смуг адіабатичного зсуву.

Що стосується керамічних матеріалів, то поряд з їх функціональною ефективністю, вони або характеризуються відносно невисокою вартістю при високій щільності (корундова кераміка  $Al_2O_3$  20 – 40 ум. од./1 кг з щільністю 3,85 – 3,95 г/см<sup>3</sup>), або високою вартістю при низькій щільності (кераміка на основі  $B_4C$  вартістю більше 150 ум. од./1 кг з щільністю 2,40 – 2,50 г/см<sup>3</sup>) та складністю технологічного процесу виробництва.

На сьогодні технологічні розробки відносно полегшених елементів бронезахисту на основі високоміцних склокристалічних матеріалів в Україні відсутні. Тому актуальною задачею буде встановлення можливості створення високоміцного склокристалічного матеріалу та методологічного підходу одержання елементів бронезахисту на його основі, що й було поставлено за мету для даної роботи.

**Розробка методологічного підходу при одержанні високоміцних полегшених склокристалічних матеріалів – елементів бронезахисту.** На кафедрі технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» проводяться фундаментальні роботи, спрямовані на створення високоміцних полегшених склокристалічних матеріалів – елементів індивідуального бронезахисту з відповідними значеннями фізико-механічних властивостей, їх бронестійкості та вартості (табл. 1).

Таблиця 1

Значення критеріїв для бронеситалів за вітчизняними та закордонними стандартами

Критерії	Значення	Стандарт
<b>Фізичні властивості</b>		
щільність, г/см <sup>3</sup>	2,3 – 2,45	ГОСТ 9553-74
ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup> ;	5,0 – 6,0	ГОСТ (GOST)11067-2013 (EN1288-1:2000)
в'язкість руйнування, МПа·м <sup>0,5</sup>	2,5 – 4,0	ГОСТ 25.506-85
міцність на згин, МПа	400 – 500	ГОСТ (GOST) 32281.1-2013
модуль Юнга, ГПа	80,0 – 120	ГОСТ 9900-2013
мікротвердість, МПа	7000 – 8000	ГОСТ 9450-76
<b>Бронестійкість</b>		
рівень захисту композиційного бронелементу, клас	IV – V	ДСТУ В 4104-2002
<b>Вартість, у.о./кг</b>	нижче 150	

Досягнення високих значень міцності та в'язкості руйнування при одночасно низьких значеннях щільності та модуля пружності склокристалічних матеріалів як бронеелементів – засобів індивідуального захисту – може бути за-

безпечене шляхом проектування необхідного складу вихідних композицій стекол та формування в них в процесі низькотемпературної термообробки нано- та мікроструктури високоміцних кристалічних сполук. В цілому утворюється значна кількість дрібних кристалів, які частково зростаються один з одним. Завдяки крихкому руйнуванню склокераміки на фрагменти до 1 мкм роль з утворенням радіальних тріщин дроблячо-відхиляючого шару зростає.

Експериментальне втілення цих положень дозволить забезпечити необхідний ступінь захисту конструкційних матеріалів (4 – 5 рівень за ДСТУ В 4104-2002) за рахунок високих експлуатаційних властивостей бронеситалів, що розроблятимуться. При цьому вартість склокристалічних матеріалів повинна бути суттєво нижчою за вартість керамічних та відомих склокерамічних бронелементів.

**Проектування та розробка складів склокристалічних матеріалів як елементів індивідуального бронезахисту.** Відомо, що термостійкі високоміцні склокристалічні матеріали з високими механічними параметрами, опором корозії до окиснення при підвищених температурах, які можуть бути використано як бронееlementи, отримують здебільшого на основі сподуменових і кордієритових ситалів [2]. Однак, ситали на основі системи  $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2$  характеризуються достатньо високими показниками щільності на відміну від ситалів на основі систем  $Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2$ , що не дозволяє отримати на їх основі ситали зі зниженою вагою.

На Україні розробки сподуменових ситалів стосуються, головним чином, матеріалів для каталізаторів окиснення аміаку [3].

Для встановлення області існування стекол як основи для синтезу літійалюмосилікатних матеріалів для індивідуального бронезахисту було обрано систему  $R_2O - RO - RO_2 - R_2O_3 - RF_2 - P_2O_5 - SiO_2$ , де  $R_2O - Na_2O, Li_2O, K_2O, RO - CaO, MgO, ZnO, RO_2 - ZrO_2, TiO_2, R_2O_3 - Al_2O_3, B_2O_3, RF_2 - LiF, CaF_2$ . В дослідній системі було обмежено область та синтезовано склади модельних стекол серії СП як основи для одержання сподуменових склокристалічних матеріалів та склади модельних стекол серії СЛ як основи для одержання матеріалів на основі дисилікатів літію.

Стекла серій СЛ та СП отримували шляхом варки шихти, яка складалася з традиційних для скляної промисловості сировинних матеріалів, в однакових умовах при 1250 – 1600 °С в корундових тиглях з наступним охолодженням на металевому листі. В модельних стеклах серій СП та СЛ оксиди знаходяться у співвідношеннях, близьких до стехіометричних для кристалізації сподумену та дисилікату літію. Наявність даних кристалічних фаз у складі склокерамічних матеріалів дозволить забезпечити їх високі експлуатаційні властивості.

Для одержання об'ємно закристалізованої структури було обрано традиційні каталізатори кристалізації з різним механізмом дії:  $TiO_2, ZrO_2$  та  $LiF$ . Особливістю складів модельних стекол є наявність  $P_2O_5$  та  $ZnO$ , що пояснюється їх здатністю до формування тонкокристалічної взаємозв'язаної структури. Разом з цим наявність  $P_2O_5$  у структурі модельних стекол дозволяє зменшити деформацію зразка та напруги, які виникають при поглинанні енергії удару. Введення

до складу дослідних стекол  $\text{Na}_2\text{O}$  та  $\text{K}_2\text{O}$  дозволить суттєво знизити їх температуру варки та термічної обробки, а також, поряд з введенням  $\text{V}_2\text{O}_5$  та  $\text{MnO}_2$ , дозволить зменшити їх щільність, що є важливою умовою одержання технологічних полегшених склокристалічних матеріалів.

Склокристалічні матеріали на основі стекол були одержані за скляною технологією послідовному двостадійному нагріванні впродовж 4 годин на кожній стадії в силітовій печі. Одержані склокристалічні матеріали серій СЛ та СП в умовах низькотемпературної термічної обробки характеризується об'ємною тонкодисперсною кристалізацією високоміцних кристалічних фаз дисилікату літію або  $\beta$ -сподумену.

Для дослідних матеріалів серій СЛ та СП показники механічних та термічних властивостей є характерними для високоміцних склокристалічних матеріалів (табл. 2). Відносно високі значення показнику  $K_{IC}$  для розроблених склокристалічних матеріалів пов'язані зі структурними характеристиками ситалів, а саме з блокуванням мікротріщин порами та кристалічною фазою [1]. Саме поєднання вказаних властивостей поряд з їх низькою щільністю дозволить використовувати дані склокристалічні матеріали як основу при розробці матеріалів у складі композиційних бронееlementів, які будуть забезпечувати одночасно захист від дії куль та уламків та виконувати роль демпфера.

Таблиця 2

Експлуатаційні властивості розроблених склокристалічних матеріалів

Серії дослідних матеріалів	Механічні властивості				$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
	$H$ , ГПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$HV$ , ГПа	$E$ , ГПа		
СЛ	6,75 – 6,95	2,85 – 3,0	6,8 – 7,1	84 – 90	22,5 – 60,0	2,38 – 2,40
СП	6,8 – 7,0	2,99 – 3,1	6,95 – 7,1	74 – 95	10,0 – 22,4	2,40 – 2,45

**Висновки.** В обраних на основі літературного аналізу, розробленого методологічного підходу та наукових засад вихідних літійалюмосилікатних системах синтезовано серії модельних стекол для одержання високоміцних полегшених склокристалічних матеріалів. Встановлено, що отримані склокристалічні високоміцні полегшені матеріали характеризуються високими експлуатаційними властивостями.

**Список літератури :** 1. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с. 2. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: учеб. пособие / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 239 с. 3. Пат. 33014 А, Україна, МПК В01J 23/76. Катализатор для окислення аміаку / О.С. Трет'яков, І.П. Челпанов, Б.Д. Жигайло, А.І. Сердюк, В.І. Голеус, О.В. Носенко, Н.Ю. Ільченко. – Науково-виробниче підприємство "ТЕПЛОЕНЕРГОМАШ". – № 98105298; заявл 07.10.1998; опубл. 15.02.2001.

## РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ И РАДИАЦИОННОСТОЙКИХ ЦЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$

Цапко Н.С., канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

*The article presents general information about the system  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  and other materials based on it. A selection of chemical and phase composition of refractory materials on the basis of the presented system. The main components of technological parameters of synthesis. The results of the tests of physico-mechanical properties of refractory cements obtained on the basis of the system  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  and are given General guidelines about the scope of the designed binders*

**Введение.** Необходимость решения проблемы защиты от ионизирующих излучений возникла одновременно с открытием ядерной энергии. Темпы развития современных энергетических установок, быстрый технический прогресс в области строительства АЭС, ядерных энергетических установок, ускорителей заряженных частиц требуют новых, более эффективных материалов, удовлетворяющих высокой степени защиты от радиации и обеспечивающих надежность эксплуатации.

Для современных ядерных реакторов требуются конструкционные материалы, обладающие не только защитными, но и другими строительнотехническими и специальными свойствами. В частности, необходимы огнеупорные защитные цементы и бетоны для футеровок тепловых агрегатов реакторов и их конструктивных элементов [1]. С целью нормализации радиационной обстановки в Украине, в том числе на территории ЧАЭС, является актуальной разработка конструкционных материалов, обладающих защитными свойствами от воздействия радиационного излучения, с высокой степенью биологической защиты в сочетании с высокой прочностью и огнеупорностью.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В конструкциях защиты от ионизирующего излучения используют материалы с большой защитной эффективностью, среди которых наибольшее значение имеют бетоны, так как применение различного рода добавок и заполнителей позволяет модифицировать физико-химические свойства, оказывающие решающее воздействие на эффект ослабления излучения.

Для строительства биологической защиты применяют в основном портландцемент, который после твердения содержит до 16 масс. % воды в связанном состоянии. Однако, при нагревании материала, вода затворения, в том числе и связанная, удаляется из бетона на основе портландцемента при достаточно низкой температуре, что снижает защитные свойства этого материала и приводит к разупрочнению цемента до 60 %. Поэтому, для повышения жаростойкости обычных бетонов, приготовленных на основе портландцемента, вводят тон-

комолотые добавки. Наилучшими из них являются: тонкомолотый шамот, керамзит, зола – унос, гранулированный шлак, базальт и др. [2].

При повышенных температурах целесообразно применять глиноземистый цемент с содержанием воды до 7 масс.%. Недостатком глиноземистого цемента при затворении его водой является выделение большого количества тепла, которое вызывает возникновение внутренних напряжений в сооружениях [3, 4].

В качестве вяжущего материала для защитных бетонов можно использовать бариевые цементы [5, 6]. Соединения бария можно также вводить в состав портландцемента до 5-10 масс. %. Получаемый моноалюминат бария повышает огнеупорность и защитные свойства бетона. Также можно использовать вяжущие, содержащие свинец, фосфаты алюминия, магния, сульфатно-шлаковые цементы [7, 8]. В некоторых работах рассматривается возможность применения барийсерпентинитового цемента с чугуном в качестве заполнителя в закрытых конструкциях ядерного реактора [9–11]. Этот материал хотя и обладает повышенной защитной способностью, но все же имеет ряд недостатков: высокую степень разупрочнения при нагревании до 400 °С, обильное выделение при нагревании паров воды и газа, содержащего в основном водород и растворы солей бария. Хорошо зарекомендовали себя цементы на основе силикатов бария [12]. При нагревании такой цементный камень сохраняет плотную керамическую структуру, так как прерывается процесс перекристаллизации и сохраняется высокая прочность. Такие бариевые цементы резко отличаются от аналогичных кальциевых составов. Наилучшие защитные свойства были получены для составов из бариевого силикатного цемента с заполнителем из фракционированного клинкера того же состава, однако, содержание значительного количества алюмината бария приводит к снижению его водостойкости.

**Постановка задачи и ее решение.** Из вышесказанного видно, что любой из применяемых материалов имеет свои преимущества и недостатки. Вероятнее всего, нет универсального материала, одновременно отвечающего следующим требованиям, предъявляемым к материалам защиты: высокая степень защиты от ионизирующих излучений, жаростойкость, высокая прочность, низкая стоимость. Создание вяжущих материалов для защиты от различных видов излучений, является актуальной задачей.

Система  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  представляет существенный интерес для синтеза стойких к термоударам материалов, к которым относятся огнеупорные бариевые цементы. Основными соединениями в этой системе, обладающие вяжущими свойствами и высокой температурой плавления (свыше 1800 °С), являются  $BaAl_2O_4$  и  $Ba_2SiO_4$ .

Поэтому наиболее приемлемыми для получения огнеупорных радиационно-стойких вяжущих материалов, с нашей точки зрения, являются композиции бинарного сечения  $Ba_2SiO_4-BaAl_2O_4$ , эвтектический состав которого плавится при самой высокой температуре – 1995 К [2-3].

Для синтеза силикатных алюмобариевых цементов и клинкерных минералов, входящих в их состав, были приготовлены сырьевые смеси различного химического и фазового составов, которые приведены в табл. 1. Тщательное

измельчение и смешивание сырьевых компонентов осуществлялось в лабораторной фарфоровой мельнице «мокрым» способом (влажность 50 %). Тонкость помола контролировалась методом низкотемпературной адсорбции азота и ситовым анализом (полный проход через сито № 008).

Сырьевые смеси брикетировались на гидравлическом прессе при удельном давлении прессования 60-80 МПа.

Таблица 1

Химический и фазовый состав силикатных алюмобариевых цементов

№ п/п	Химический состав, масс. %			Фазовый состав, масс. %	
	BaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	BaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Ba <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
1	60,07	39,93	-	100	-
2	62,42	35,94	1,64	90	10
3	64,78	31,94	3,28	80	20
4	67,13	27,95	4,92	70	30
5	69,49	23,96	6,55	60	40
6	71,84	19,97	8,19	50	50
7	74,20	15,97	9,83	40	60
8	76,55	11,98	11,47	30	70
9	78,90	7,99	13,11	20	80
10	81,26	3,99	14,75	10	90
11	83,62	-	16,38	-	100

Обжиг брикетов производился в криптоловой печи, измерение температур в зоне обжига проводилось при помощи оптического пирометра «Смотрич–5П–01». Температура обжига цементов колебалась в пределах 1650-1750 °С в зависимости от фазового состава; изотермическая выдержка при максимальной температуре составляла 3 часа.

Физико-механические испытания цемента проводились согласно методике малых образцов М.И. Стрелкова, а оптимальные составы цемента испытывались в соответствии с ГОСТ 310.1–96–310.4–96. Результаты испытаний физико-механических свойств полученных цементов приведены в табл. 2.

Как видно из приведенных результатов, полученные цементы являются высокопрочными – до 82 МПа; быстросхватывающимися – начало схватывания от 25 до 38 мин., конец – от 45 до 55 мин.; быстротвердеющими – прочность при сжатии через 1 сутки твердения до 59 МПа; воздушными вяжущими с низким водоцементным отношением 0,17-0,20; обладающими высоким коэффициентом массового поглощения  $\mu$  до 276 см<sup>-1</sup>. Установлено, что с увеличением содержания в цементах оксида бария увеличивается водоцементное отношение и коэффициент массового поглощения  $\mu$ , сокращаются сроки схватывания. Изменение предела прочности при сжатии в этом случае неоднородно. С увеличением количества оксида бария нарастание прочности происходит до 50 масс.% Ba<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Далее взаимодействие цемента с водой протекает все быстрее, что сопровождается выделением большого количества тепла. Это приводит к возникновению внутренних напряжений и, как следствие, к снижению механической прочности. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является состав № 6, имеющий следующий фазовый состав: 50 % Ba<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> и 50 % BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Этот це-

мент характеризуется высокой прочностью – 82,0 МПа к 28 суткам твердения, высоким коэффициентом массового поглощения  $\mu = 241,5 \text{ см}^{-1}$ , началом схватывания 31 мин., конец – 50 мин, огнеупорностью 1720 °С. Цемент состава № 10 отличается более высоким коэффициентом массового поглощения  $\mu = 268,2 \text{ см}^{-1}$ , но характеризуется снижением прочности по сравнению с оптимальным.

Таблица 2

Физико-механические свойства силикатных алюмобариевых цементов

№ п/п	В/Ц	Сроки схватывания, час-мин		Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут			
		начало	конец	1	3	7	28
1	0,17	0-38	0-55	35,8	51,2	56,3	58,2
2	0,17	0-34	0-51	43,5	56,3	58,2	59,0
3	0,17	0-31	0-49	48,1	58,2	60,6	64,4
4	0,18	0-28	0-45	51,2	59,0	64,0	69,0
5	0,18	0-29	0-48	56,3	60,1	69,1	71,7
6	0,19	0-31	0-50	59,0	64,4	76,8	82,0
7	0,19	0-26	0-32	58,1	64,0	68,3	70,8
8	0,19	0-20	0-26	51,2	53,2	56,2	64,0
9	0,19	0-18	0-20	41,0	43,5	46,1	51,2
10	0,20	0-10	0-15	32,2	35,4	38,4	40,5
11	0,20	мгновенное		25,0	28,1	31,6	35,8

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что полученный цемент можно использовать как самостоятельный материал, так и в качестве связки при изготовлении специальных бетонов и материалов, сохраняющих свои свойства при воздействии высоких температур.

**Список литературы:** 1. Широков Ю.М. Ядерная физика / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин – М.: Наука, 1990. – 727 с. 2. Дубровский В.Б. Строительство атомных электростанций. / В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, Б.К. Пергаменщик, Н.Я. Турчин – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 160 с. 3. Дубровский В.Б. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений / В.Б. Дубровский, З.П. Аблевич – М.: Стройиздат, 2003. – С. 23–25. 4. Защита от ионизирующих излучений / Н. Г. Гусев, В.П. Маликович и др. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 334 с. 5. Пашенко О.О. В'язучі матеріали: навч. посібник / О.О. Пашенко, В.П. Сербін., О.О. Старчевська. – К.: Вища школа. 1995. – 416 с. 6. Воробьев В.А. Строительные материалы / В.А. Воробьев, А.Г. Комар – М.: Изд. Литературы по строительству, 1991. – 496 с. 7. Кузнецова Т.В. Глиноземистый цемент / Т.В. Кузнецова – М.: Стройиздат, 1988. – 265с. 8. Мельник М.Т. Огнеупорные цементы / М.Т. Мельник, Н.Г. Илюха, Н.Н. Шаповалова – К.: Вища школа, 2012. – 223 с. 9. Федоров К.Н. О применении барийсерпентинитового цемента в защите ядерных реакторов / К.Н. Федоров, А.И. Аримов И.А. // Сб. Вопросы атомной науки и техники. – М.: Строительство, 2006. – Вып. 1. – С. 3–15. 10. Панченко В.П. Высокоогнеупорный защитный гидратный бетон с химическими добавками // В.П. Панченко, В.И. Петин / Сб. Вопросы атомной науки и техники. – М.: Проектирование и строительство, 2007 – № 1. – С. 29–33. 11. Воскресенский Е.В. К вопросу о применении барийсерпентинитового цемента в защите реакторов ядерных электростанций / Е.В. Воскресенский, Ю.А. Егоров // Сб. Вопросы физики в защите ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1994. – Вып. 6. – С. 191–201. 12. Вылков В.А. Получение и свойства бариевых и алюминатных цементов / А.В. Вылков // Цемент, 2006. – № 4. – С. 21–23.

## КВАДРАТИЧНО-НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ РУХУ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ НА ПЛОСКОМУ ВІБРОРЕШЕТІ

Тіщенко Л.Н., докт. техн. наук, Ольшанський В.П., докт. фіз.-мат. наук,  
Ольшанський С.В., канд. фіз.-мат. наук  
(Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка)

*With the use of hydrodynamic analogy a withstand motion of layer of the pseudoreified mixture is described on the inclined flat vibrosieve. Quadratic dependence of tangent tension of change is taken over a derivative from a flowrate after a transversal coordinate. Formulas are shown out for the calculation of flowrate of mixture and by volume productivity of vibrosieve*

**Вступ.** Для опису усталеного руху шару сепарованої суміші по поверхнях віброрешіт розроблено різні варіанти гідродинамічних моделей за умови пропорційності дотичного напруження градієнту швидкості потоку [1-4]. У названих публікаціях припускається повна аналогія між рухом сипкого середовища сепарованої суміші та в'язкої нестисливої ньютонівської рідини, що підтверджується експериментально лише при малих швидкостях зсуву [5]. Але по мірі зростання цієї швидкості спостерігається відхилення від лінійної теорії. Тому в ряді робіт, зокрема в [6-8], розглядають варіант квадратичної залежності між дотичним напруженням і похідною швидкістю потоку за просторовою поперечною координатою. Його будемо теж використовувати в даній роботі.

**Метою роботи** є одержання формул для обчислень швидкості усталеного потоку шару зернової суміші та об'ємної продуктивності решета на базі нелінійної моделі з двома реологічними коефіцієнтами.

**Диференціальне рівняння руху та його розв'язок.** Як і в публікаціях [2, 3], нехтуючи краєвим ефектом, при усталеному русі, швидкість частинок шару суміші товщиною  $h = \text{const}$  вважаємо залежною лише від поперечної координати  $y$ , що показано на рисунку.

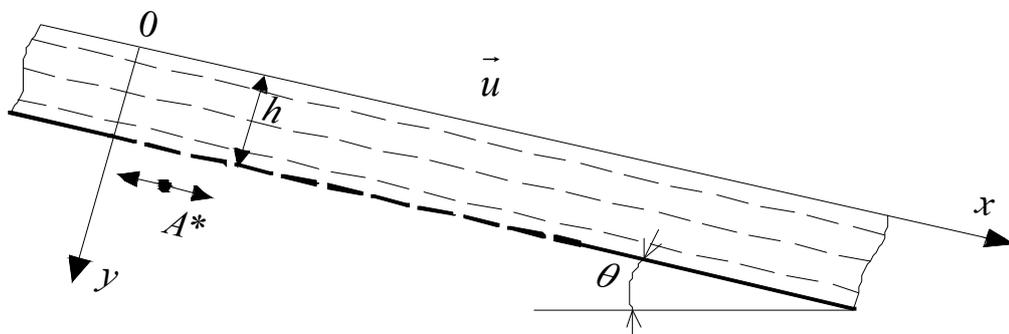


Рис. Розрахункова схема руху шару зернової суміші на плоскому віброрешеті

Тоді, дотичне напруження  $\tau$  в суміші задовольняє диференціальному рівнянню:

$$\frac{d\tau}{dy} = -\rho g \sin \theta, \quad (1)$$

де  $\rho$  – питома маса суміші;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\theta$  – кут нахилу решета до горизонту.

Проінтегрувавши (1) при граничній умові  $\tau(0) = 0$ , одержуємо:

$$\tau = -\rho g \sin \theta \cdot y. \quad (2)$$

Дотримуючись [6–8], далі приймаємо зв'язок між дотичним напруженням зсуву та похідною швидкості потоку у вигляді:

$$\tau = \left( \mu + \mu_* \left| \frac{du}{dy} \right| \right) \frac{du}{dy}, \quad (3)$$

де  $\mu, \mu_*$  – реологічні сталі;  $u$  – швидкість потоку суміші в напрямі вісі  $ox$ .

При  $\mu_* = 0$  залежність (3) переходить у відому формулу Ньютона.

Враховуючи, що  $\frac{du}{dy} < 0$ , після підстановки (2) в (3), одержуємо квадратне

рівняння відносно  $\frac{du}{dy}$ :

$$\mu_* \left( \frac{du}{dy} \right)^2 - \mu \frac{du}{dy} - \rho g \sin \theta y = 0.$$

Із нього випливає, що:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\mu}{2\mu_*} - \sqrt{\frac{\mu^2}{4\mu_*^2} + \frac{\gamma}{\mu_*}} y. \quad (4)$$

Тут  $\gamma = \rho g \sin \theta$ .

Проінтегрувавши (4) по  $y$ , знаходимо:

$$u(y) = \frac{\mu y}{2\mu_*} - \frac{2}{3} \frac{\mu_*}{\gamma} \left( \frac{\mu^2}{4\mu_*^2} + \frac{\gamma y}{\mu_*} \right)^{3/2} + c,$$

де  $c$  – довільна стала.

При визначенні сталої  $c$  розглянемо два варіанти граничних умов.

1. При малих кутах нахилу решета до горизонту приймаємо відсутність ковзання суміші по поверхні решета, тобто  $u(h) = 0$

Обмеження, яким при цьому повинен задовольняти кут  $\theta$  викладені в [2, 3] і їх тут виписувати не будемо. Визначивши  $c$  із умови відсутності ковзання, одержуємо наступний розподіл швидкості:

$$u(y) = \frac{\mu}{3\rho\mu_*} \left[ (1 + ph)^{3/2} - (1 + py)^{3/2} \right] + \frac{\mu}{2\mu_*} (y - h), \quad (5)$$

де  $p = \frac{4\gamma\mu_*}{\mu^2}$ .

Найбільша швидкість досягається на вільній поверхні суміші і, згідно з (5), становить:

$$u(0) = \frac{\mu}{3\rho\mu_*} \left[ (1+ph)^{3/2} - 1 \right] + \frac{\mu h}{2\mu_*}. \quad (6)$$

Використовуючи (5), для обчислення об'ємної продуктивності решета  $Q$  з урахуванням ширини робочої поверхні решета  $H$ , виводимо формулу:

$$Q = H \int_0^h u(y) dy = \frac{H\mu}{15\rho\mu_*} \left[ (1+ph)^{3/2} \cdot \left( 3h - \frac{2}{p} \right) + \frac{2}{p} \right] - \frac{H\mu}{4\mu_*} h^2. \quad (7)$$

У асимптотичному наближенні, коли  $\mu_* \rightarrow 0$ ,  $ph \ll 1$ , із (6) і (7) одержуємо відповідно:

$$u(0) \approx \frac{\gamma h^2}{2\mu} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{\mu_* h \gamma}{\mu^2} \right); \quad Q \approx \frac{\gamma h^3 H}{3\mu} \left( 1 - \frac{3\gamma \mu_* h}{4\mu^2} \right). \quad (8)$$

При  $\mu_* = 0$  ці формули переходять у ті, що було надруковано в [2, 3].

2. При більших кутах  $\theta$  доводиться враховувати ковзання суміші по поверхні решета. Тоді при  $y = h$  [2]:

$$\lambda_1 u(h) + \lambda_2 = -\tau(h). \quad (9)$$

Формули для обчислення  $\lambda_1, \lambda_2$  наведено в [2, 3]. Тут їх виписувати не будемо. Підставивши (2) і (5) в (9) знаходимо сталу  $c$ , що призводить до наступного розподілу швидкості потоку:

$$u(y) = \frac{\mu}{3\rho\mu_*} \left[ (1+ph)^{3/2} - (1+py)^{3/2} \right] + \frac{\mu}{2\mu_*} (y-h) + \frac{\gamma h}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}. \quad (10)$$

Цьому розподілу відповідає така об'ємна продуктивність решета:

$$Q = \frac{H\mu}{15\rho\mu_*} \left[ (1+ph)^{3/2} \left( 3h - \frac{2}{p} \right) + \frac{2}{p} \right] - \frac{H\mu}{4\mu_*} h^2 + \frac{Hh}{\lambda_1} (\gamma h - \lambda_2). \quad (11)$$

Умови, коли доцільно використовувати співвідношення (8), наведено в [2, 3]. Тут зазначимо, що при  $\lambda_1 \rightarrow \infty$  формули (10) і (11) переходять відповідно в (5) і (7). Отже, є можливість врахувати і ковзання суміші по поверхні решета, яке дещо стримується просіюванням насіння через отвори.

**Результати розрахунків.** Обчислення  $u(0)$  і  $Q$  проводили по формулах (6) і (7) при  $\rho = 750$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 8^\circ$ ;  $H = 0,9$  м;  $h = 0,004$  і  $0,008$  м та різних  $\mu$  і  $\mu_*$ . Результати записано в табл. 1-4, де введено додаткове позначення  $\eta = \mu_*/\mu$ .

Таблиця 1

Швидкість  $u(0)$  при  $h = 0,004$  м

$\mu$ , Па·с	$\eta = 0,001$ с	$\eta = 0,005$ с	$\eta = 0,01$ с	$\eta = 0,05$ с	$\eta = 0,1$ с
	Значення $u(0)$ , м/с				
0,020	0,37	0,28	0,24	0,14	0,10
0,025	0,30	0,24	0,20	0,12	0,09
0,030	0,25	0,21	0,18	0,11	0,08
0,035	0,22	0,18	0,16	0,10	0,07

Таблиця 2

Продуктивність  $Q$  при  $h = 0,004$  м

$\mu$ , Па·с	$\eta = 0,001$ с	$\eta = 0,005$ с	$\eta = 0,01$ с	$\eta = 0,05$ с	$\eta = 0,1$ с
	Значення $10^{-4}Q/H$ , м <sup>2</sup> /с				
0,020	9,64	7,30	6,03	3,38	2,53
0,025	7,88	6,16	5,16	2,96	2,22
0,030	6,66	5,34	4,52	2,64	2,00
0,035	5,78	4,72	4,04	2,40	1,83

Таблиця 3

Швидкість  $u(0)$  при  $h = 0,008$  м

$\mu$ , Па·с	$\eta = 0,001$ с	$\eta = 0,005$ с	$\eta = 0,01$ с	$\eta = 0,05$ с	$\eta = 0,1$ с
	Значення $u(0)$ , м/с				
0,04	0,73	0,57	0,48	0,27	0,21
0,05	0,60	0,48	0,40	0,24	0,18
0,06	0,50	0,41	0,35	0,21	0,16
0,07	0,44	0,36	0,31	0,19	0,15

Таблиця 4

Продуктивність  $Q$  при  $h = 0,008$  м

$\mu$ , Па·с	$\eta = 0,001$ с	$\eta = 0,005$ с	$\eta = 0,01$ с	$\eta = 0,05$ с	$\eta = 0,1$ с
	Значення $10^{-4}Q/H$ , м <sup>2</sup> /с				
0,04	38,54	29,21	24,13	13,51	10,10
0,05	31,51	24,63	20,62	11,82	8,89
0,06	26,66	21,35	18,08	10,58	8,00
0,07	23,11	18,87	16,14	9,62	7,31

Із таблиць витікає, що як  $u(0)$  так і  $Q$ , суттєво залежать від значень  $\mu$  і  $\mu_*$ . Тому для узгодження теорії з експериментом треба належним чином задати ці константи. Цьому може сприяти проведення ідентифікації на базі розв'язку оберненої задачі. Вона полягає в тому, щоб за даними вимірювань продуктивності решета при різних товщинах рухомого шару обчислити  $\mu$  і  $\mu_*$ . З цією метою, користуючись формулою (7), запишемо два рівняння:

$$Q_1 = \frac{H\mu h_1^2}{\mu_*} \left\{ \frac{1}{15ph_1} \left[ (1+ph_1)^{3/2} \left( 3 - \frac{2}{ph_1} \right) \right] - \frac{1}{4} \right\};$$

$$Q_2 = \frac{H\mu h_2^2}{\mu_*} \left\{ \frac{1}{15ph_2} \left[ (1+ph_2)^{3/2} \left( 3 - \frac{2}{ph_2} \right) \right] - \frac{1}{4} \right\}. \quad (12)$$

Тут  $Q_1, Q_2$  – продуктивність решета відповідно при товщинах рухомого шару  $h_1, h_2$ .

Поділивши перше рівняння в (12) на друге, після введення позначень:  $\delta = h_2/h_1$ ;  $\beta = Q_1/Q_2$ ;  $x = ph_1$ , отримуємо нелінійне рівняння з одним невідомим:

$$\beta\delta \left[ (1 + \delta x)^{3/2} \left( 3 - \frac{2}{\delta x} \right) - 3,75\delta x \right] - (1 + x)^{3/2} \left( 3 - \frac{2}{x} \right) + 3,75x = 0. \quad (13)$$

Корінь цього рівняння  $x = x^* > 0$  доводиться з заданою точністю обчислювати на комп'ютері, наприклад, методом дихотомії [9].

Після обчислення кореня, легко знайти  $\mu$  і  $\mu_*$ , бо:

$$\alpha = \frac{\mu_*}{\mu} = \frac{Hh_1^2}{Q_1} \left\{ \frac{1}{15x^*} \left[ (1+x)^{3/2} \cdot \left( 3 - \frac{2}{x^*} \right) \right] - \frac{1}{4} \right\}; \quad \mu = \frac{4\gamma\alpha h_1}{x^*}.$$

Як приклад, знайдемо значення  $\mu$  і  $\mu_*$ , коли  $h = h_1 = 0,005$  м  $Q_1/H = 2,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с, а при  $h = h_2 = 0,008$  м –  $Q_2/H = 9,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Для суміші й решета, як і раніше, приймаємо:  $\rho = 750$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 8^0$ . Тоді:  $\delta = 1,6$ ;  $\beta \approx 0,2917$ ;  $\beta\delta \approx 0,467$ ;  $\gamma \approx 1023,966$  Н/м<sup>3</sup>. Методом дихотомії знаходимо, що корінь рівняння (13) наближено дорівнює  $x^* \approx 19,769$ . Йому відповідають:  $\alpha \approx 0,0603$  с;  $\mu \approx 0,06247$  Па·с;  $\mu_* \approx 0,00377$  Па·с<sup>2</sup>. Точність розв'язання оберненої задачі легко перевірити підстановкою отриманих значень  $\mu$  і  $\mu_*$  в (12). Так підстановка дає:  $Q_1/H \approx 2,799 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;  $Q_2/H \approx 9,592 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Ці значення  $Q_1/H$  і  $Q_2/H$  близькі до тих, що використали для проведення ідентифікації. Додатково підкреслимо, що згідно з викладеною теорією ідентифіковані реологічні константи повинні попадати в проміжки  $\mu \in [0; \mu_\Gamma]$ ;  $\mu_* \in [0; \mu_{*\Gamma}]$ . Щоб знайти  $\mu_\Gamma$  покладемо в (8)  $\mu_* = 0$ . Тоді:

$$\frac{Q}{H} = \frac{\gamma H h^3}{3\mu_\Gamma} \Rightarrow \mu_\Gamma = \frac{\gamma H h^3}{3Q}. \quad (14)$$

Розв'язавши поставлену тут задачу потоку суміші при  $\mu = 0$ , одержуємо:

$$\frac{Q}{H} = \frac{2\sqrt{\gamma} h^{5/2}}{5\sqrt{\mu_{*\Gamma}}} \Rightarrow \mu_{*\Gamma} = \frac{4\gamma H^2}{25Q^2} h^5. \quad (15)$$

Розрахунки за формулами (14), (15) призводять до  $\mu_\Gamma \approx 0,152$  Па·с,  $\mu_{*\Gamma} \approx 0,00653$  Па·с<sup>2</sup> при  $h = h_1 = 0,005$  м;  $Q_1/H = 2,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с і до  $\mu_\Gamma \approx 0,182$  Па·с,  $\mu_{*\Gamma} \approx 0,00583$  Па·с<sup>2</sup> при  $h = h_2 = 0,008$  м;  $Q_2/H = 9,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Отже, граничні значення реологічних констант значно більші, ніж ідентифіковані їх значення.

### Висновки:

1. Дослідження показало, що при квадратичній залежності дотичного напруження від швидкості деформацій обчислення кінематичних характеристик потоку зернової суміші на плоскому віброрешеті зводиться до простих розрахункових формул.

2. У залежності від значень реологічних констант в декілька разів можуть змінюватись розрахункові швидкість потоку та продуктивність решета. Тому є

можливість підбирати такі значення цих двох параметрів, щоб теорія узгоджувалась з експериментом, а математична модель руху була адекватною.

**Список літератури:** 1. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л. Н. Тищенко. – Х.: Основа, 2004. – 224 с. 2. Тищенко Л. Н. Гидродинамика сепарирования зерна / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Х.: Міськдрук, 2010. – 174 с. 3. Тищенко Л. Н. Виброрешетчатая сепарация зерновых смесей / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Х.: Міськдрук, 2011. – 280 с. 4. Динамика вибродетрижерної зерноочистки / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский и др. – Х.: Міськдрук, 2013. – 440 с. 5. Ragnold R.A. Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under sheara / Pros. Roy Soc. – London, 1954. – V. A225. – P. 49-63. 6. Долгунин В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, техническое применение / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев. – М.: Машиностроение, 2005. – 73 с. 7. Шваб А.В. Модель движения высококонцентрированной гранулированной среды / А.В. Шваб, М.С. Марченко // Вестник Томского государственного университета. – Томск, 2011. – № 3 (15). – С. 108-116. 8. Способ повышения эффективности пневмосепарирования зерновых смесей в пневмосепарирующих устройствах / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, Ю.П. Борщ и др. // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2014. – Вип. 148. – С. 150-159. 9. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельников. – М.: Бинум, 2001. – 630 с.

УДК 621.793.7

## КАЧЕСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ РИФЛЕННЫХ ВАЛКОВ

**Автухов А.К.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко)

*Substantiated conditions increase the resistance of corrugated rolls due to changes in the chemical composition of the alloy rollers to crush the inclusion of the carbide phase*

**Введение и постановка задачи.** Непрерывный широкополосный стан «1700» горячей прокатки Мариупольского металлургического комбината имени Ильича предназначен для прокатки и смотки в рулоны листа толщиной от 2 до 12 мм и шириной до 1550 мм. Черновая группа стана состоит из окалиноломателя дуо и 5-ти четырехвалковых клетей. В состав чистовой группы входят: чистовой окалиноломатель и 6 четырехвалковых клетей. На стане прокатывают сталь листовую с ромбическим рифлением по ГОСТ 8568 размерами 3...8×1000...1250 мм, по ТУ 14-2-413-80-4...8×1000...1300 мм. Для производства рифленой полосы используют слябы из кипящих, полуспокойных, спокойных низколегированных сталей. Температура нагрева металла перед прокаткой составляет 1190...1220 °С, что является необходимым условием для обеспечения конца прокатки не менее 960...1020 °С. При более низких температурах нагрева заготовок ухудшается качество поверхности листов. При прокатке рифленых полос из низколегированных марок сталей температура подката за клетью 4-а должна быть не менее 1040 °С, а из углеродистых марок сталей – не менее 1000 °С. При прокатке в чистовой клетке листа толщиной от 4 до 8 мм и

высотой элементов рифления от 0,5 до 2,0 мм обжатие составляет 14...25 %. Одним из сдерживающих факторов объема производства рифленого листа на комбинате является относительно низкая стойкость рабочих чугуновых валков, обусловленная скалыванием, выкрашиванием элементов рифления на бочке валка, что в свою очередь отражается на качестве готового проката [1, 2, 3].

**Анализ публикаций.** Элементы рифления практически во всех случаях при прокатке находятся в более тяжелых условиях, чем гладкая поверхность валка. Они быстрее и до более высокой температуры нагреваются, «погружаясь» в горячий прокатываемый металл, а затем быстрее охлаждаются, на них действуют усилия, связанные не только с возникающими силами контактного трения, но и с непосредственным воздействием полосы на валок. Ранее выполненные работы были направлены на повышение стойкости валков и качества прокатываемых полос, исследования влияния рифлений на изменения геометрических сечений проката, усовершенствование конструкции валков и валковых узлов [4-7]. Целью работы является оценка эксплуатационной надежности двухслойных рифленых валков стационарной отливки, установление характера их повреждаемости и причин, определяющих их выход из эксплуатации.

**Методика проведения исследований.** Общая методика проведения работы заключалась в статистической оценке эксплуатационных свойств валков текущего производства, характера изнашивания рабочей поверхности, исследовании свойств и структуры металла. Закономерности изнашивания и разрушения прокатных валков изучали методом электронной фрактографии с использованием двухступенчатых угольных отпечатков и электронного микроскопа «TESLA». Структуру металла оценивали металлографически и с использованием оптической и электронной микроскопии.

**Результаты исследований.** Для решения поставленной цели было необходимо оценить качество валков и его влияние на их эксплуатационную стойкость. В результате анализа эксплуатационная стойкость рифленых валков исполнения ЛПХНд-70 стана «1700», выполненного на протяжении 7 лет, было установлено, что основными причинами нарушения их работоспособности являются естественный износ и выкрашивание рабочей поверхности. При этом средняя наработка валков по естественному износу находится в пределах от 2078 до 2611 т/валок, а по преждевременным отказам (выкрашиванию их рабочей поверхности) от 1153 до 2061 т/валок. Разброс значений показателей наработки валков выбракованных по естественному износу не превышает 20,4 %, а по выкрашиванию поверхности достигает 44 %.

В результате анализа рабочего слоя валков было установлено, что глубина отбеленного слоя валков стана «1700» большей частью не превышала 12...15 мм, а в некоторых случаях использовались валки, элементы рифления на которых были выполнены в зоне переходного слоя. По сравнению с отбеленным слоем в нем более крупное зерно, повышенное количество графита в виде розеток и малоразветвленных включений (рис. 1). Кроме того, в переходном слое имелись более крупные неметаллические включения сульфидов и фосфидов, чем в отбеленном, что связано с ликвационными явлениями при кристаллиза-

ции отливок. Наличие грубой структуры на поверхности и в переходном слое валков может способствовать скалыванию и выкрашиванию граней рифлей при прокатке рифленого листа. Микроструктура рабочего слоя металла валков исполнения ЛПХНд-70 представляет собой мартенситную основу (рис. 2) с участками нижнего бейнита и троостита, количество карбидной фазы не превышает 25%. Уровень свойств металла валков исполнения ЛПХНд-70 оценивали по глубине рабочего слоя (до 15 мм, 15...25 мм, более 25 мм).

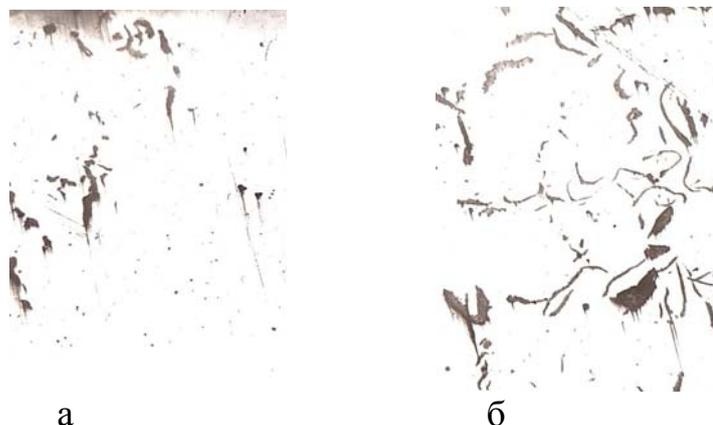


Рис. 1. Включения графита в рабочем слое вала ( $\times 100$ ): а – на расстоянии 5 мм от поверхности; б – на расстоянии 10 мм от поверхности.

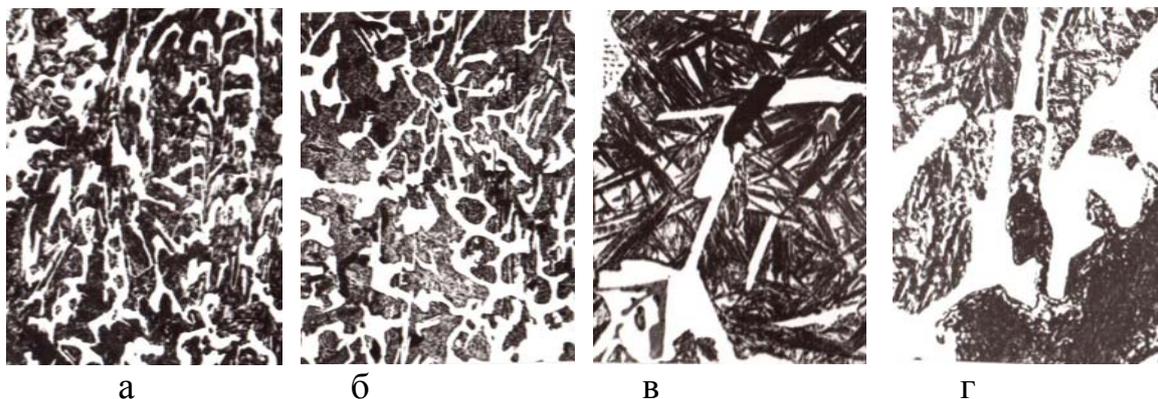


Рис. 2. Микроструктура металла рифленых валков текущего производства.

Травление 4 %-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте: а, в – на расстоянии 5 мм от поверхности; б, г – на расстоянии 20 мм от поверхности; а, б –  $\times 100$ ; в, г –  $\times 500$ .

Результаты испытания приведены в табл. 1. Временное сопротивление при разрыве по глубине рабочего слоя снижается на 14%, а при изгибе – на 5 %. Ударная вязкость практически не изменяется и составляет 2,2...3,0 Дж/см<sup>2</sup>. Наиболее интенсивное снижение характерно для твердости. Она снижается на 42 % (с 70...74 до 41...43 HSD). Такой спад твердости способствует выкрашиванию рабочей поверхности валков и сокращению их срока службы по естественному износу. Электронно-микроскопическими исследованиями процесса трения выявлено, что на 20 % поверхности имеются следы окислительного износа (рис. 3,а) с элементами – избирательного; около 40% структуры поверхно-

сти имеет фрагментированное строение (рис. 3,б), что свидетельствует о наличии процессов термоусталостного изнашивания. До 10 % поверхности имеет следы микрореза (рис. 3,в) вследствие протекания процессов абразивного изнашивания в механической форме. Микротрещины выявлены на фрагментированных участках (рис. 3,г) и вокруг неметаллических включений (рис. 3,д).

Таблица 1

Уровень свойств металла валков исполнения ЛПХНд-70 по глубине рабочего слоя, используемых на стане «1700»

Механические характеристики	Ед. изм.	Уровень свойств по глубине рабочего слоя валков			Термическая выносливость, количество циклов до разрушения (глубина вырезки образцов - до 15 мм)
		До 15 мм	15...25 мм	Более 25 мм	
1	2	3	4	5	6
$\sigma_e$	Н/мм <sup>2</sup>	<u>270...320</u> 290	<u>250...290</u> 275	<u>240...260</u> 250	<u>1600...1800</u> 1750
$\sigma_u$	Н/мм <sup>2</sup>	<u>400...430</u> 415	<u>380...440</u> 390	<u>380...400</u> 390	-
КС	Дж/см <sup>2</sup>	<u>2,5...3,</u> 2,8	<u>2,2...2,5</u> 2,35	<u>2,2...2,4</u> 2,3	-
Твердость	HSD	<u>70...78</u> 72,5	<u>62...68</u> 66	41...43415	-

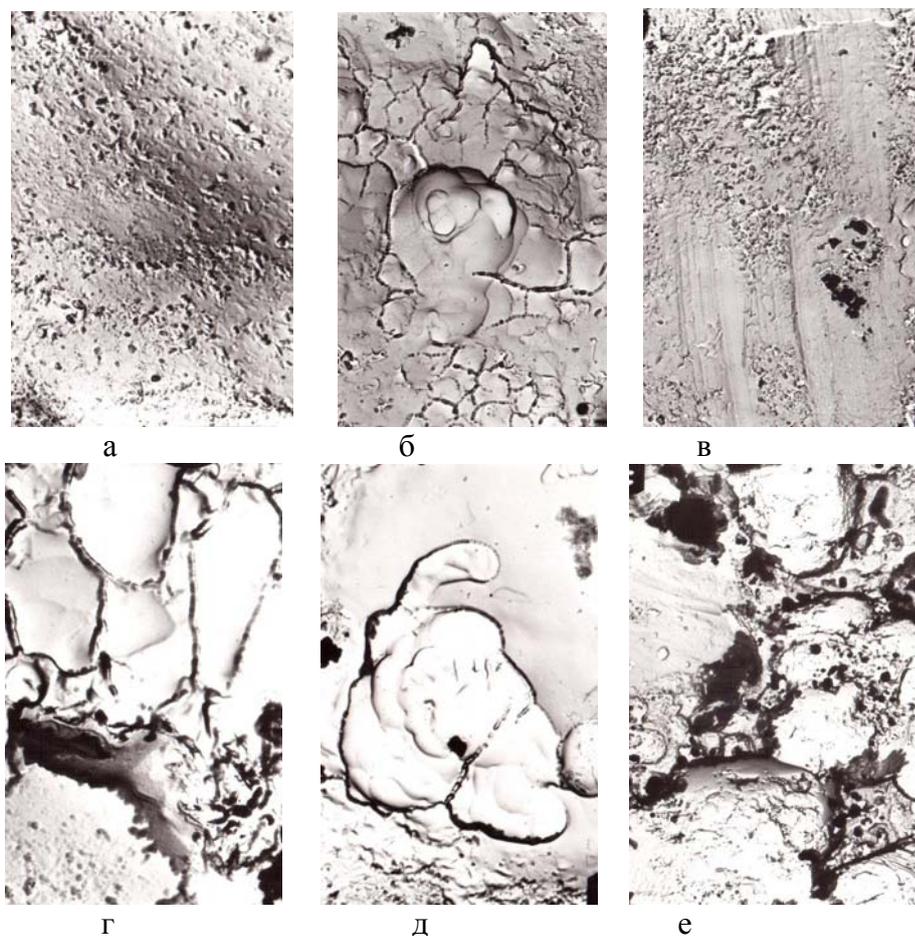


Рис. 3. Микротопография рабочей поверхности рифленого валка:  
а, б, в, г, д, е –  $\times 4700$ ; г –  $\times 10000$ .

На боковой поверхности элементов рифления отмечается большое количество микротрещин (рис. 3,е), что может быть связано с большой долей крупных включений карбидной фазы и технологией нарезки рифлей, которые приводят к зарождению повреждаемости, а также с условиями эксплуатации валков (наличие термоциклического воздействия и значительных удельных нагрузок).

На поверхности канавок рифлей выявлены включения нитридов титана (рис. 4,в), наличие которых подтверждается химическим анализом. Это связано с тем, что титан в металл попадает вместе с шихтой. Наличие титанистых включений стимулируют зарождение трещин термической усталости из-за различия в коэффициентах линейного расширения с матрицей.

Рельеф поверхности по излому в зоне скола также свидетельствует о термоусталостном разрушении (рис. 4,а). Также было выявлено развитие процессов микронеоднородной деформации и трещинообразование у концентраторов напряжений (рис. 4,б).

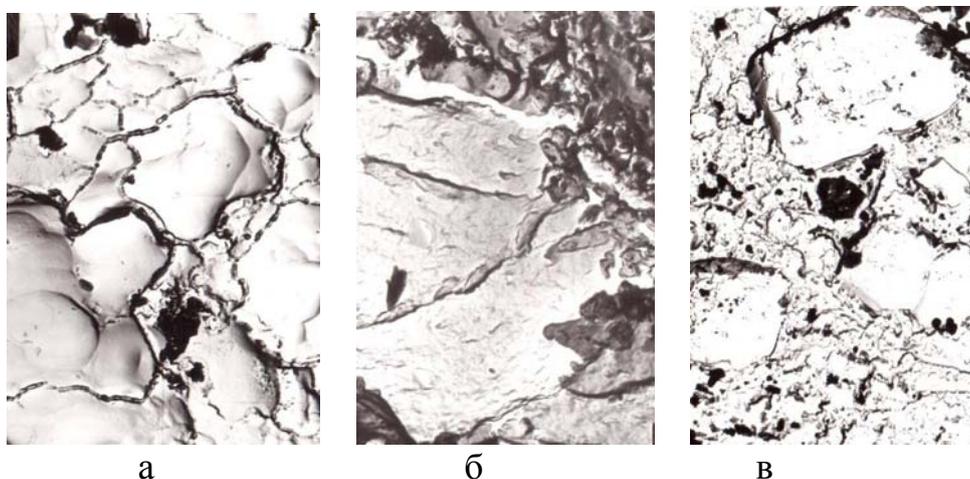


Рис. 4. Микротопография поверхности скола рифленого валка:  
а, в –  $\times 4700$ , б –  $\times 10000$

Таким образом, стойкость исследованных валков определяется термоусталостной прочностью чугуна, на которую оказывают влияние гетерогенность структуры, большая доля карбидной фазы, неметаллические включения и технология изготовления рифлей. Представленные выше исследования свидетельствуют о том, что недостаточная стойкость валков исполнения ЛПХНд-70 при производстве листа на стане «1700» объясняется малой глубиной рабочего (отбеленного) слоя, неоптимальными и нестабильными параметрами профиля, низким качеством механической обработки, химическим составом сплава, определяющим его фазовый состав. Целесообразным является изготовление таких валков центробежнолитыми, что позволит получить рабочий слой до 40 мм и более, а также измельчить зерно.

**Выводы.** Для повышения стойкости рифленых валков необходимо изменить химический состав сплав валков для дробления включений карбидной фазы. При сохранении химического состава и центробежном литье твердость повысится незначительно. Поэтому целесообразно для таких валков использовать

дополнительное модифицирование современными сплавами Superseed® 75(Sp) и Reseed® (Rd) Inoculant. Это уменьшит долю неметаллических включений, но одновременно повысит прочность и термическую выносливость, т.е. уменьшит склонность к скалыванию элементов рифления в процессе эксплуатации. При этом следует не только повысить стабильность рабочего слоя при эксплуатации, но и использовать валки с увеличенной глубиной рабочего слоя (не менее 30–40 мм). Важным может оказаться и изменение конфигурации элементов рифления для уменьшения склонности их к скалыванию, а также усовершенствование условия эксплуатации валков путем их подбора по близким показателям твердости и коэрцитивной силы.

**Список литературы:** 1. Производство и применение прокатных валков: справочник / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, Н.М. Александрова и др. / под ред. проф. Т.С. Скобло – Х.: ЦД №1.2013 – 572 с. 2. Производство листа с рифленой поверхностью / А.М. Мелешко, Ю.Е. Кузнецов, А.М. Добросовестнов и др. – М.: Металлургия, 1985. – 165 с. 3. Груднев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Груднев, А.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М.: Металлургия, 1994. – 650 с. 4. Плещенцов Ю.А. Исследование влияния размеров рифлений на изменение геометрических характеристик сечения / Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2005. – №3/1(15). – С. 43-45. 5. Повышение эксплуатационной стойкости рабочих чугуновых валков для производства рифленого листа / В.Г. Бендрик, А.Ф. Тодуров, В.В. Климанчук и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1987. – Л I. – С. 71–72. 6. А.С. 774631 Прокатный валок / В.С. Лиханский, В.А. Сорокин, В.А. Голубев и др. – БИ, 1980. – № 40. 7. Патент РФ №2121402 В21В27/02 Валковый узел / Баратинский В.П., Шамрин А.В., Тищенко А.Д. и др. – Заявка №97118479/02, подана 11.11.1997, опубл.1011.98.

УДК 550.388; 520.16+523.31

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИСТЛЕРОВ ИНФРАЗВУКОМ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОДЫ ПРОХОЖДЕНИЯ МОЩНОГО АТМОСФЕРНОГО ФРОНТА**

**Гоков А. М.,** канд. физ.-мат. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецова)

*Experimentally confirmed that by passing of powerful atmospheric fronts can generate the infrasound waves with frequencies of 0.4 – 0.8 Hz, which penetrate to the heights of the E-region of the ionosphere ( $z \geq 100 - 170$  km). On the basis of the mechanism of transformation of infrasonic waves in the ionosphere in the low-frequency whistlers and the resulting dispersion relation there were experimentally determined frequencies of whistler 7 – 11.3 kHz, which are in good agreement with theoretical calculations and the known experimental data in the literature*

**Введение.** Известно, что мощные атмосферные процессы (циклоны, струйные течения, ураганы, сильные грозы и т.д.) сопровождаются генерацией АГВ и, в частности, инфразвуковых волн. Последние, распространяются как в горизонтальном направлении от источника, так и вверх, достигают высот 170 – 200 км и выше и взаимодействуют с магнитоактивной плазмой, что приводит к появлению дополнительных токов и возмущению электрических и магнитных

полей, то есть к генерации или усилению различных волн. В работе [1] показана возможность генерации низкочастотного вистлера инфразвуком и разработана методика определения частот низкочастотных вистлеров, генерируемых инфразвуком в среднеширотной нижней ионосфере вблизи эпицентра сильной грозы и при прохождении мощного атмосферного фронта (АФ) в атмосфере земли. Определена связь между частотами инфразвука  $f_1$  и частотами вистлеров  $f_3$ , генерируемых в этой области высот:

$$f_3 = \frac{c^2}{\nu_1^2} \frac{f_1^2 f_{Be}}{f_p^2} \cos \theta \cos \theta_1, \quad (1)$$

где  $\theta_1$  – угол между вертикалью и направлением распространения инфразвуковых волны в ионосфере;  $c$  – скорость света;  $\nu_1$  – скорость инфразвука;  $f_{Be}$  – гирочастота электронов;  $f_p$  – плазменная частота. В работе выполнена экспериментальная проверка возможности генерации низкочастотного вистлера инфразвуком и определены частоты вистлеров, генерируемых инфразвуком в среднеширотной нижней ионосфере при прохождении мощного АФ в атмосфере Земли.

**Основная часть.** Экспериментальные исследования проведены в периоды прохождений 4 мощных АФ с помощью комплекса аппаратуры [2] методами частичных отражений (ЧО) и вертикального доплеровского зондирования (ВДЗ) вблизи г. Харькова в радиофизической обсерватории ХНУ им. В. Н. Каразина. Измерения выполнялись в течение 3 – 5 суток при прохождении мощного АФ (в спокойных гелио-геомагнитных условиях). Временные параметры АФ определялись по метеорологическим показателям в Харьковском гидрометеоцентре. Решались три задачи: 1) по измерениям доплеровского сдвига частоты  $f_d$  при вертикальном зондировании ионосферы в зоне прохождения мощного АФ определить частоту инфразвуковых волн как  $f_1 = f_d$ ; 2) по измерениям амплитуд частично отраженных радиосигналов  $A_{so,x}(z,t)$  и радиозумов  $A_{no,x}(z,t)$  попытаться экспериментально получить подтверждение генерации инфразвуковых волн в атмосфере при прохождении мощного атмосферного фронта. С применением спектральной обработки высотно-временных записей амплитуд  $A_{so,x}(z,t)$  определить частоту инфразвуковой волны  $f_1$ ; 3) при одновременных измерениях методами ЧО и ВДЗ сравнить полученные значения частот инфразвука  $f_1$  и по соотношению (1) вычислить частоты низкочастотных вистлеров  $f_3$ , генерируемых в этой области высот.

Анализ экспериментальных данных показал, что при прохождении АФ в отличие от времени до и после него наблюдаются квазипериодические изменения  $A_{so,x}(z,t)$  в течение десятков минут [1].

При этом имеет место перемещение процесса по высоте с кажущейся скоростью  $\sim 330 - 380$  м/с. При спектральной обработке зависимостей  $A_{so,x}(z,t)$  (проведена для  $z = 75 - 93$  км) обнаружено заметное увеличение энергии спектральной составляющей на частоте  $f \approx 0,4$  Гц (см. пример на рис. 1), что соответствует инфразвуковому диапазону. Можно предположить, что такое поведе-

ние  $A_{so,x}(z,t)$  при прохождении АФ может быть обусловлено появлением инфразвуковых акустических волн, которые с малыми потерями распространяются в атмосфере от источника. На рис. 2 приведен пример доплеровских спектров, полученных в этом же эксперименте.

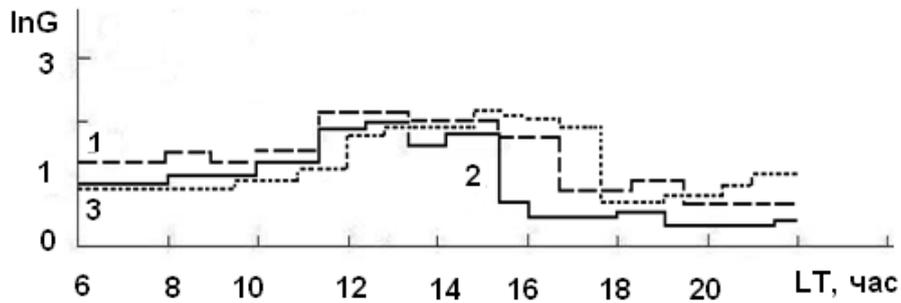


Рис. 1. Временные зависимости спектральной плотности  $G$  для  $A_{so}(t)$ , полученные при прохождении АФ методом ЧО 29.10.2004 г., кривые: 1 -  $z = 75$  км; 2 -  $z = 84$  км; 3 -  $z = 93$  км ( $f = 0,4$  Гц)

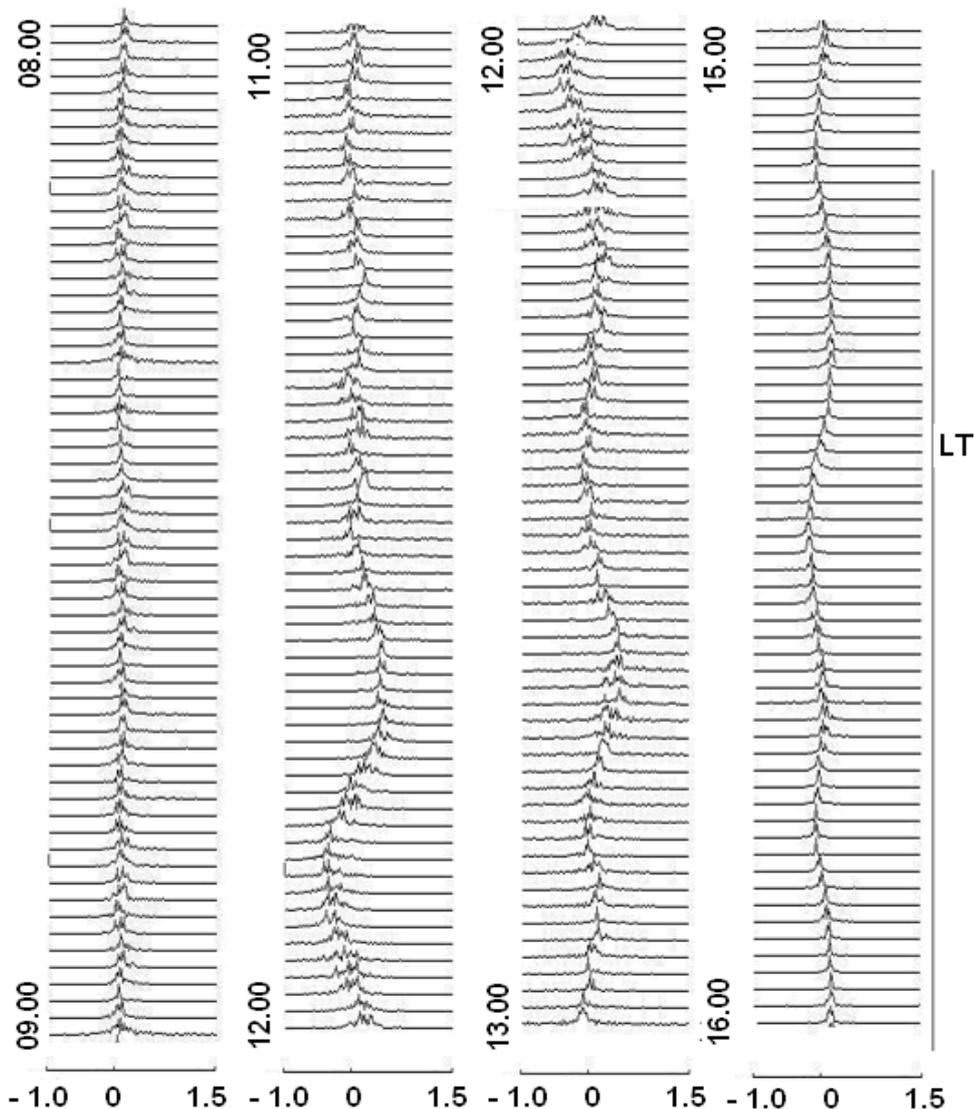


Рис. 2. Пример доплеровских спектров, полученных в эксперименте 29.10.2004

Из рис. 2 видно, что примерно после 11.30 ЛТ четко прослеживается сначала рост значений  $f_d$  до  $f_{dm} \approx 0,3$  Гц (максимальное значение  $f_d$ ) с последующим уменьшением их до  $f_d \approx -0,4$  Гц в течение 15 минут и последующими увеличениями и уменьшениями значений  $f_d$  в пределах  $f_d \approx \pm 0,3 - 0,35$  Гц. После прохождения АФ в течение примерно 60 мин.  $f_d \sim 0 - 0,1$  Гц как и до него. Такое изменение  $f_d$ , по-видимому, связано с генерацией инфразвуковых волн при прохождении АФ. Важно, что в фоновых измерениях в контрольный день 27.10.2004 г. подобных изменений не установлено (как и в ряде других экспериментов в невозмущенных условиях).

В других экспериментах наблюдалось подобное поведение  $f_d$  и  $A_{so,x}(z,t)$  (значения  $f_d$  изменялись в пределах  $f_d \approx \pm 0,4 - 0,55$  Гц). На основе механизма трансформации инфразвуковых волн в Е-области ионосферы в низкочастотные вистлеры и полученного дисперсионного соотношения (1) на основе экспериментальных данных определены частоты вистлеров  $f_3 \approx 7 - 11,3$  кГц. Расчеты выполнены в предположении, что вистлер распространяется вдоль направления геомагнитного поля  $\theta = 0^\circ$ ; инфразвуковая волна распространяется вертикально вверх и  $\theta_1 = 30^\circ$ , что соответствует магнитному наклонению  $\sim 60^\circ$  в средних широтах. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов частот вистлеров

Дата	$h$ , км	$f_1$ , Гц (Hz)	$f_3$ , кГц
29.10.2004	170	0,4	7,2
02.04.2004	170	0,4	7,2
08.02.2007	160	0,5	11,3
22.03.2007	160	0,4	7,2

**Заключение.** 1. Экспериментально установлено с использованием методов ВДЗ и ЧО, что при прохождении мощного АФ возможна генерация инфразвуковых волн с частотами  $f_1 \approx 0,4 - 0,8$  Гц, которые проникают до высот Е-области ионосферы ( $z \approx 100 - 200$  км).

2. На основе механизма трансформации инфразвуковых волн в Е-области ионосферы в низкочастотные вистлеры и полученного дисперсионного соотношения экспериментально определены частоты вистлеров  $f_3 \approx 7 - 11,3$  кГц, которые согласуются с теоретическими расчетами и известными в литературе экспериментальными данными.

*e-mail: amg\_1955@mail.ru*

**Список литературы:** 1. Гоков А.М. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на природные явления [The response of the midlatitude D-region of the ionosphere on natural phenomena]: монография. ISBN 978-3-659-62182-6 LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland (Germany). 2014. 300 p. 2. Tyrnov, O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kontzevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsymbal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere. Turkish Journal of Physics, 1994, Vol. 18, No. 11, pp. 1260–1265.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ НА ПРОХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА

Гоков А. М., канд. физ.–мат. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця)

*There are established and explained changes of parameters of partially reflected HF signals, radio noises and the electron density in middle latitude D-region of the ionosphere accompanying of the terminator passage. Within the hypothesis of electron precipitation from the magnetosphere were demonstrated the possibility of precipitation of electrons stimulated by the solar terminator. The estimated flux density of electrons with energies of 40–80 keV amounted  $10^7 - 10^8 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$*

**Введение.** Известно, что солнечный терминатор (СТ) является регулярным мощным природным источником различных возмущений в атмосфере и ионосфере земли. Влияние СТ на параметры нижней ионосферы (D-область) изучено мало, что обусловлено трудностями и дороговизной проведения длительных непрерывных (часы-сутки) систематических измерений. Известны лишь эпизодические экспериментальные исследования. Из-за быстрого изменения потока солнечной радиации прохождение терминатора сопровождается рядом физических процессов в атмосфере. Их энергетика достаточно велика. В работе [1] показано, что энергия и мощность теплового источника возмущения, вызванные утренним терминатором (Ут), очень значительные. Поэтому в период и после прохождения Ут следует ожидать ряд характерных изменений в ионосферной плазме (волновые возмущения различных периодов и длительностей, изменения ветрового режима, динамики концентрации электронов и т. д.) Не только в области тени или полутени, но и далеко за их пределами, которые, в зависимости от условий в ионосфере, атмосфере и магнитосфере земли, будут в целом повторяться изо дня в день, проявляя при этом новые характерные особенности, которые обуславливаются другими факторами (ими могут быть, например, циклические и спорадические изменения геомагнитной и солнечной активностей, солнечные вспышки, магнитные бури и др.). Изучение таких изменений в ионосферной плазме важно как для решения прикладных задач распространения радиоволн, радионавигации, радиосвязи и т.д., так и для исследования физических и химических процессов в ней, поскольку эта часть ионосферы еще остается плохо изученной.

В работе приведены результаты исследования влияния солнечного терминатора на параметры среднеширотной D-области ионосферы, характеристики ЧО-сигналов и радишумов в естественных условиях, выполненного на основании данных, полученных в ХНУ им. В. Н. Каразина методом ЧО в 1983 – 2010 гг. на аппаратуре [2].

**Основная часть.** Продолжительность непрерывных измерений методом ЧО составляла не менее 5 – 8 час (по 2 – 4 часа. до и после прохождения СТ). Общее количество сеансов наблюдений – около 200 (примерно поровну для

утренних и вечерних условий). Анализировались высотно-временные вариации амплитуд ЧО сигналов  $\langle A_{o,x}^2 \rangle(z,t)$ , радиошумов  $\langle A_{no,x}^2 \rangle(z,t)$  и концентрации электронов  $N(z,t)$ .

Отметим основные особенности, которые характерны для УСТ: 1) уменьшение в несколько раз интенсивности шума и ее дисперсии. Этот процесс начинается сразу после начала прохождения УСТ или через некоторое время ( $\sim 30$  мин) до него; 2) увеличение средних интенсивностей ЧО сигнала и их дисперсии сразу после (иногда через 10 – 30 мин) или за 20 – 30 мин до момента прохождения терминатора длительностью  $\sim 30 - 90$  мин; 3) уменьшение в 1,5 – 2 раза отношения  $R = \langle A_x^2 \rangle / \langle A_o^2 \rangle$  после и наличие квазипериодов в зависимостях  $R(t)$  до момента прохождения терминатора; 4) рост  $N$  при прохождении УСТ как вблизи момента прохождения терминатора, так и через 40 – 60 мин после него. Продолжительность таких событий составляет  $\sim 30 - 90$  мин. В вечернее время перестройка в D-области начинается за  $\sim 1 - 1,5$  часа (иногда раньше) до прохождения терминатора.

Основные особенности пространственно-временных изменений характеристик ЧО-сигналов, радиошумов и параметров ионосферы, которые характерны для экспериментов, проведенных в период прохождения вечернего терминатора (ВСТ):

1) увеличение в несколько раз интенсивности шума и ее дисперсии. Этот процесс начинается, как правило, за 1 – 1,5 часа до начала прохождения терминатора и продолжается в течение 1 – 2 часов после (рост интенсивности шума составляет  $\sim 10 - 100$ );

2) уменьшение в несколько раз средних интенсивностей ЧО-сигналов и их дисперсии за 1 – 1,5 часа до начала прохождения терминатора и полное их пропадание во всем высотном диапазоне D-области через 30 – 120 мин. после;

3) увеличение в  $\sim 1,5 - 4$  раза отношения  $R$  во время и после прохождения вечернего терминатора и наличие квазипериодов в зависимостях  $R(t)$ ;

4) кратковременное (длительностью  $\sim 20 - 50$  мин.) в течение 1 – 2,5 часов увеличение концентрации электронов на 50 – 150 % во время прохождения ВСТ в D-области ионосферы.

На рис. 1 приведены примеры типичных для среднеширотной D-области вариаций концентрации электронов в спокойных условиях включая периоды прохождения УСТ и ВСТ.

Наблюдаемый при прохождении терминатора и после него рост  $N$  может быть вызван разными причинами. Выполненные оценки для разных источников показали, что наиболее вероятным представляется поток электронов из радиационного пояса. На основе этого механизма выполнены оценки параметры потоков по методике [3]. Результаты расчетов для ряда экспериментов приведены в табл. 1. Они не противоречат известным из литературы данным о потоках электронов, полученных экспериментально (или оцененных) во время возмущений различной природы. Плотности потоков электронов и их энергетические характеристики соответствуют теоретическим расчетам (см., напр., [3]) и могут обеспечить наблюдаемый рост  $N(z,t)$  на высотах 81 – 87 км.

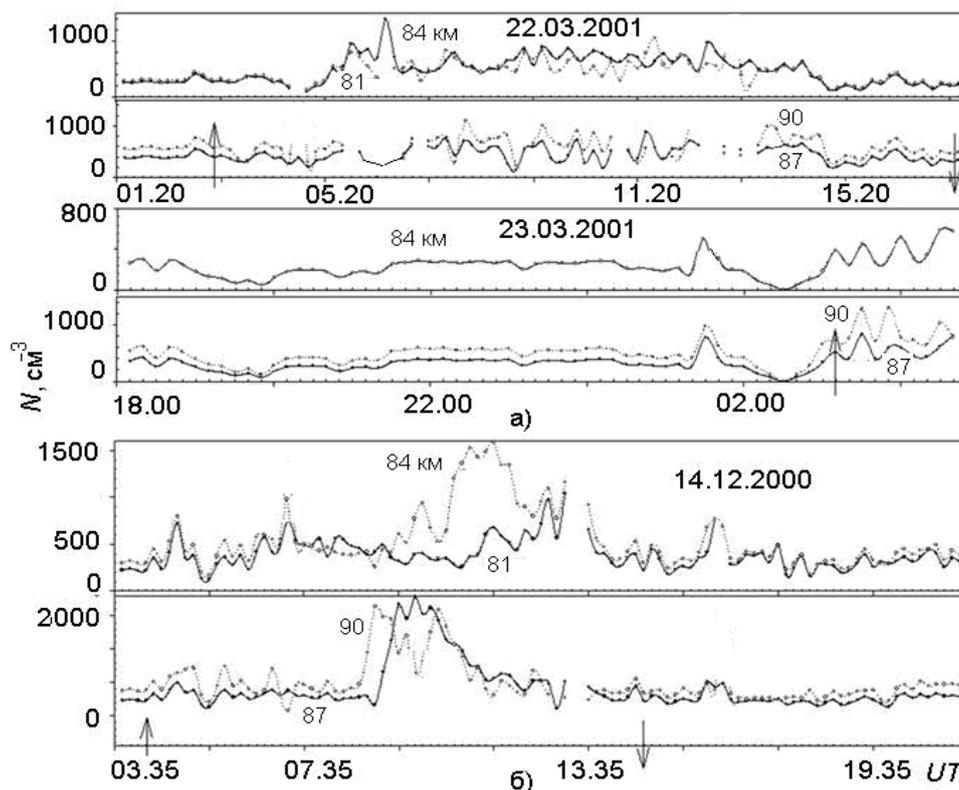


Рис. 1. Примеры типичных для среднеширотной D-области вариаций концентрации электронов в спокойных условиях, включая периоды прохождения УСТ и ВСТ (моменты прохождения терминатора для высоты 85 км отмечены стрелками)

Таблица 1

Результаты расчетов частот параметров потоков

Дата	05.12.2000 г.		15.11.2000 г.	
$z$ , км	84	87	84	87
$N_0$ , $m^{-3}$	$3,5 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$
$N$ , $m^{-3}$	$7,5 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^8$
$\Pi$ , $J m^{-2} s^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
$p$ , $J m^{-2} s^{-1}$	$1,8 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$	$9,4 \cdot 10^7$
$\varepsilon$ , MeV	0,1	0,04	0,1	0,04
$P$ , Вт	$2,9 \cdot 10^8$	$5,1 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$
$E$ , Дж	$3,1 \cdot 10^{11}$	$6,1 \cdot 10^{10}$	$4,9 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$

**Заключение.** 1. Экспериментально исследован отклик среднеширотной D-области ионосферы на прохождение солнечного терминатора в невозмущенных условиях. Установлены и объяснены сопутствующие прохождению терминатора изменения параметров ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы.

2. Экспериментально установлено увеличение концентрации электронов на 50 – 150 % как при прохождении УСТ, так и после него. Впервые экспериментально обнаружено кратковременное (продолжительностью 20 – 50 мин) в течение 1 – 2,5 часов увеличение концентрации электронов на 50 – 150 % после прохождения ВСТ в D-области. В рамках гипотезы о высыпания электронов из

магнитосферы выполнены расчеты и показана возможность стимулированного высыпания электронов терминатором. Оценены плотности потоков электронов с энергиями 40 – 80 кэВ, которые высыпаются из магнитосферы, величины которых составили  $10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

*e-mail: amg\_1955@mail.ru*

**Список литературы:** 1. Гоков А.М. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на природные явления [The response of the midlatitude D-region of the ionosphere on natural phenomena]: монография. ISBN 978-3-659-62182-6 LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland (Germany). 2014. 300 p. 2. Tyrnov, O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kontzevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsymbal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere. Turkish Journal of Physics, 1994, Vol. 18, No. 11, pp. 1260–1265. 3. Chernogor, L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere. Radio Physics and Radio Astronomy, 1998, Vol. 3, No 2, pp. 191–197.

УДК 620.9.62-6

## **О ТОПЛИВЕ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

**Воинов А. П.**, докт. техн. наук, **Воинова С. А.**, канд. техн. наук  
(Одесский национальный политехнический университет)

*The expediency of creation in Ukraine of the power steam-gas units on gas of the pirolis-process of coal is offered. About fuel for the power steam-gas units*

Как известно, перспективным путем развития стационарной энергетики является замена действующих ныне паротурбинных установок парогазовыми установками (ПГУ). Они позволяют поднять коэффициент полезного использования энергии топлива от современного уровня 35–49 % до уровня выше 50 % и более. Особенностью ПГУ является применение газотурбинного и паротурбинного двигателей, технологически тесно взаимосвязанных в ее тепловой схеме. Первый получает энергию сжигаемого газообразного или жидкого топлива, второй – топлива любого вида, в том числе твердого.

Развитие стационарной энергетики Украины, как и энергетики других стран, ориентировано на сооружение ПГУ. Однако вопрос о топливной базе ПГУ усложнен рядом жестких условий, весьма существенных обстоятельств:

а) газотурбинные установки (ГТУ) приемлемо долговечны только при работе на газообразном или беззольном жидком топливе,

б) с учетом относительно скромных (по сравнению с запасами твердого топлива) разведанных запасов газообразного и жидкого топлива на территории Украины, с учетом растущей потребности в нем в транспортной энергетике и неэнергетических отраслях производства, а также с учетом ускоряющегося роста его цены на мировом рынке, приходится признать нецелесообразность применения газообразного и жидкого топлива в отечественных ПГУ будущего,

в) весьма крупные разведанные запасы твердого топлива на территории страны выдвинули условие: целесообразно развивать отечественную, прежде всего стационарную, энергетику на основе использования топлива этого вида.

Анализ изложенного убеждает в том, что единственным целесообразным и одновременно реально возможным следует признать применение ПГУ, газотурбинная часть которых будет работать на искусственном газообразном топливе, получаемом газификацией твердого топлива, а паротурбинная часть будет работать на твердом топливе. Это в полной мере будет соответствовать общей концепции развития структуры топливного баланса энергетики Украины [1]. Подобные – «твердотопливные» – ПГУ окажутся вне зоны влияния структуры топливного баланса отрасли, влияния ценообразования на рынке импортируемых газообразного и жидкого топлива, позволят оздоровить указанную структуру. Искусственное газообразное топливо получают при газификации натурального твердого топлива в процессе его пиролиза (пирогенетического разложения). При этом также получают твердую горючую часть (полукокс) и жидкую углеводородную составляющую – ценное химическое сырье.

Газ пиролиза (ГП) можно сжигать не только в камерах сгорания ГТУ, но и в других огнетехнических установках. Полукокс – ценное твердое топливо; его можно сжигать в котлах–утилизаторах ПГУ или в топках других котлов. Жидкий продукт пиролиза подлежит направлению в химическую промышленность; его также можно сжигать в топках котлов.

Известно несколько технологических схем пиролиза твердого топлива; некоторые из их числа освоены в производстве с высокой эффективностью. Все они относительно сложны, требуют высокой научно-технической и организационно-технической культуры в постановке, проведении и управлении процессом получения ГП.

Однако альтернативы рассматриваемому пути получения искусственного газообразного топлива нет. Важно отметить, что при широкомасштабном производстве, с учетом использования всех продуктов процесса пиролиза, цена получаемого ГП оказывается ниже цены природного газа. Поэтому создание отрасли производства ГП в составе топливно-энергетического комплекса может оказаться высокорентабельным. Количественная оценка указанных показателей должна опираться на комплексно-системный анализ производства ГП в конкретных условиях, с учетом его масштаба, уровня и динамики изменения цены используемых твердого топлива, энергии, расходных материалов, с учетом удельных капиталовложений, технического обслуживания установок пиролиза, цен на рынке труда, услуг, а также других факторов.

Отметим, что при разработке ПГУ необходимо применять новые высокоэффективные технологические решения в элементах, схемах и режимах работы оборудования. В частности, при создании ПГУ для сжигания твердого топлива пониженного качества целесообразно применение в котлах технологий низкотемпературного кипящего слоя, объемного охлаждения топочной среды, двухступенчатого сжигания. В создаваемых ПГУ необходимо применение оборудования, носящего черты нового поколения. Значительный интерес представляют

новые разработки Харьковского турбогенераторного завода в области паровых турбин и разработки Николаевского завода «Заря» в области газовых турбин. Котельное оборудование можно производить на Монастырищенском заводе «ТЕКОМ», предприятиях Харькова, судостроительных заводах Николаева.

Существующий научно-технический потенциал и накопленный задел можно продуктивно использовать в программе создания ПГУ разной единичной мощности. При этом, целесообразно создавать на твердом топливе ПГУ большой единичной мощности и, частично, установки средней мощности. Часть ПГУ средней и все установки малой мощности, их ГТУ следует оставить на природном газе и жидком топливе, т. к. обеспечение их ГП сложно, по крайней мере в первый период освоения производства и средств распределения ГП по потребителям.

Необходимо применять системы автоматического управления (САУ), способные обеспечить реальную технологическую эффективность работы оборудования ПГУ, близкую ее потенциальному уровню. Это, прежде всего, относится к обеспечению доступного предельно высокого уровня экологической эффективности оборудования ПГУ. Особый интерес представляют САУ прямого управления экологической эффективностью ПГУ. Системам данного назначения необходимо современное алгоритмическое и техническое обеспечение [2, 3]. Создание и использование новых ПГУ, подготовка топлива для них, оценка показателей функционирования систем и отдельных их элементов должны отвечать возросшему уровню научно-технической культуры в отрасли.

В ВУЗах целесообразно по ускоренной программе выпускать специалистов химиков и энергетиков по профилю термической переработки твердого топлива.

Задачи программы создания ПГУ на твердом топливе соответствуют проблематике институтов НАН Украины, в частности, ИТТФ и ИПМ, тематике научно-исследовательских работ отраслевых НИИ, ВУЗов и факультетов энергетического профиля. Научный потенциал действующих специалистов позволяет решить комплекс задач создания отечественных ПГУ на твердом топливе в ограниченные сроки.

**Выводы.** 1. Надлежащее обеспечение топливом создаваемых ПГУ является важной и сложной научно-технической и научно-организационной проблемой государственного значения.

2. В нынешних условиях и в видимой перспективе единственно целесообразным является отечественные ПГУ высокой и средней мощности создавать на основе использования твердого топлива.

3. В газотурбинных установках создаваемых ПГУ целесообразно применять газ пиролиза твердого топлива.

4. Для получения газа пиролиза твердого топлива, необходимо осуществить научно-техническую и научно-организационную программу создания в топливно-энергетическом комплексе производственных мощностей для термохимической переработки твердого топлива и получения искусственного газообразного топлива.

5. В программе создания ПГУ на твердом топливе должны быть использованы новейшие высокоэффективные технологические, конструкторские и режимные решения в области энергетики.

**Список литературы:** 1. Воинов А.П. Проблематика использования низкокачественного твердого топлива в котельных установках / А.П. Воинов // Стратегия качества в промышленности и образовании: материалы Междунар. конф. (1–8 июня 2007 г., Варна, Болгария). – Днепропетровск – Варна: „Форум”, ТУ Варна, 2007. – Т. 1. – С. 105–106. 2. Воинова С.А. Актуальные задачи управления экологической эффективностью технических объектов / С.А. Воинова // Стратегия качества в промышленности и образовании: материалы Междунар. конф. (1–8 июня 2007 г., Варна, Болгария). – Днепропетровск – Варна: „Форум”, ТУ Варна, 2007. – Т. 1. – С. 102–104. 3. Воинова С.А. Пути непосредственного управления экологической эффективностью котельно-топочных систем / С.А. Воинова, Л.М. Сычук // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159-161.

УДК 621.181:66.096.5

## **ПРОБЛЕМАТИКА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОТЕЛЬНО-ТОПОЧНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ**

**Воинов А. П.**, докт. техн. наук

(Одесский национальный политехнический университет)

*The main scientific and technical tasks of a problem of progressing of boiler-furnace low temperature bubble fluid bed technology are reviewed*

Основу разведанных запасов ископаемого органического горючего в Украине составляет твердое топливо. Однако его доля в структуре топливного баланса отечественной энергетики составляет лишь немногим более половины. Остальную часть занимает жидкое и газообразное топливо, в основном, импортное, отличающееся весьма высокой ценой. В сложившихся сложных условиях нормализовать структуру указанного баланса можно единственным путем – широким последовательным переводом огнетехнических топочных устройств, работающих ныне на жидком или газообразном топливе, на сжигание твердого топлива. Эта проблема относится, прежде всего, к котельно-топочным системам промышленной энергетики. Одной из важных частей этой проблемы является научно-техническая задача освоения высокоэффективного сжигания низкокачественного твердого топлива.

Среди известных котельно-топочных технологий наиболее полно решить указанную задачу позволяет технология низкотемпературного пузырькового кипящего слоя (КС). Это обстоятельство обусловило целесообразность скорейшего широкого применения котельно-топочных систем низкотемпературного пузырькового КС, способных высокоэффективно работать на энергетическом твердом топливе низкого качества [1, 2].

Проблематика развития технологии котельно-топочного КС определяется содержанием и темпом решения научно-технических задач, ее формирующих.

Коротко остановимся на основных из их числа.

Первая задача - ограничение интенсивности внешней эрозии – процесса эрозионного поражения котельных труб, соприкасающихся с инертом КС.

Известно, что интенсивность внешней эрозии определяет ресурс поверхностей нагрева, следовательно, ресурс котла (Кт). Утончение стенки котельных труб при этом может достигать нескольких миллиметров в год.

Основные факторы, влияющие на скорость внешней эрозии в конкретных физических условиях работы топки:

- эрозионная агрессивность частиц золы, образующих инерт КС,
- эрозионная стойкость материала труб,
- уровень нагрузки Кт.

Как показали выполненные исследования, каждый из перечисленных факторов поддается управляющему воздействию. При комплексном подходе к решению рассматриваемой задачи ресурс котельных труб, погруженных в КС, можно увеличить до нескольких десятков тысяч часов [3-5].

Вторая задача - сокращение длительности и повышение эффективности процесса растопки Кт, оснащенных топками КС.

Известно, что растопка Кт с КС на твердом топливе отличается значительной длительностью: до нескольких часов. Это объясняется особенностями физической модели рассматриваемого топочного процесса: осуществляемому при растопке нагреву инерта сверху противодействует (охлаждает) поток пронизывающего его псевдоожижающего агента – холодного дутьевого воздуха.

Используемые на производстве технологические приемы растопки пока не позволяют радикально решить данную задачу.

Рассматриваемая задача существенно обостряется в условиях промышленных котельных, которые обслуживают потребителей с одно- или двухсменным режимом работы и резкопеременным графиком нагрузки. В этих условиях становится неизбежным ежедневный останов части Кт и последующая их растопка из холодного состояния, так как поддержание Кт КС в состоянии «горячего резерва» нецелесообразно, из-за высокой сложности и трудности управления осуществлением этого режима их работы.

Применение в котельных с Кт КС растопочного топлива жидкого или газообразного, из-за усложнения их топливной системы и высокой цены топлива этих видов, нельзя признать целесообразным.

Третья задача – повышение важного элемента технологической эффективности Кт КС – надежности. Это касается, прежде всего, нештатных условий использования Кт.

Наиболее существенной задачей является обеспечение надежности топочного устройства после внезапного возникновения нештатной обстановки, спровоцированной отказом тягодутьевых машин или аварийным исчезновением электропитания котельной.

Вследствие этого происшествия, особенно если до этого момента нагрузка Кт была высокой, из-за останова дутьевого вентилятора, прекращается подача дутьевого воздуха в топку, отвод из нее золы и отвод газов. Складывается острая напряженная нештатная опасная обстановка.

Находящийся в топке инерт массой порядка десятков-сотен кг/м<sup>2</sup> площади КС и температурой 850-950 °С обладает большой суммарной теплоемкостью. Аккумулированная им теплота после прекращения подачи дутьевого воздуха начинает передаваться конструктивным элементам топки, которые касаются раскаленного инерта. Нештатный нагрев до высокой температуры вызывает в них термическую деформацию и окалинообразование, чем необратимо их повреждает. В этих условиях в общем случае невозможно удаление из топки горячего инерта. Передача теплоты инертном топочным поверхностям нагрева Кт с естественной циркуляцией опасности не представляет.

Задача удаления из топочной камеры выделяемых КС продуктов газификации содержащегося в нем топлива подлежит оперативному решению общеизвестными средствами.

Работу над решением рассмотренных трех задач необходимо вести как на этапе конструкторско-проектной разработки новых Кт КС, так и на этапе промышленной эксплуатации действующих агрегатов. Полнота и качество полученных решений существенно влияют на уровень экологической эффективности создаваемого Кт и котельной установки в целом.

При этом следует заметить, что при выборе целесообразного решения каждой из указанных задач, необходимо учитывать конкретные условия применения Кт. Главными из числа этих условий являются следующие:

- единичная мощность Кт,
- характер и режим нагрузки Кт,
- качественная характеристика проектного твердого топлива, в том числе ожидаемый диапазон колебаний ее показателей (особенно, гранулометрического состава, зольности, эрозионной агрессивности золы).

Необходимо отметить, что в условиях промышленной эксплуатации Кт КС, для получения надлежащих технологических показателей их работы, необходимо обеспечить высокое качество управления оборудованием котельной установки [6].

В проектных разработках Кт должны быть использованы, естественно, значения каждого из указанных показателей, принятые по пределу, который соответствует наиболее неблагоприятным условиям работы Кт. Это позволит заложить на этапе проектирования определенный запас его надежности.

Для решения указанных задач, необходимо провести комплекс научно-технических и научно-организационных работ. Полученные решения должны быть типовыми для каждой из групп Кт, отвечающей определенным условиям применения, прежде всего, приведенным выше трем условиям.

**Выводы.** 1. Котельно-топочная технология низкотемпературного КС занимает приоритетное положение в сфере использования в энергетике топлива всех видов и сортов, включая твердое низкокачественное топливо.

2. Для повышения технологической эффективности Кт КС, необходимо получить высокоэффективное решение ряда научно-технических задач, в первую очередь, рассмотренных выше.

3. Каждое из разрабатываемых типовых решений указанных задач необходимо ориентировать на применение к Кт характерных групп, отличающихся единичной мощностью, режимом работы, свойствами проектного топлива.

4. Обеспечение высокоэффективного широкого использования Кт КС на твердом топливе является одной из важнейших задач развития энергетики Украины.

**Список литературы:** 1. Сжигание топлива в псевдооживленном слое / К.Е. Махорин, П.А. Хинкис; Отв. ред. И.Я. Сигал. – К.: Ин-т газа АН УССР. – Наук. думка, 1989. 2. Воинов А.П. Проблематика применения топочного псевдооживленного слоя в котельно-топочных процессах / А.П. Воинов // Удосконалення хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: тези доповідей 9-ї Міжнар. конф. (10–13 вересня 1998 р.) – Одеса, 1996. – С. 28. 3. Воинов А.П. Влияние условий работы на эрозию поверхностей нагрева котла, погруженных в кипящий слой / А.П. Воинов, В.В. Захарченко // Известия вузов СССР. Энергетика, 1984. – № 1. – С. 74–77. 4. Воинов А.П. Положение трубы в кипящем слое и ее внешняя эрозия / А.П. Воинов // Теплоэнергетика, 2003. – № 8. – С. 59–61. 5. Воинов А. П. Возможность управления внешней эрозией в котлах с кипящим слоем / А.П. Воинов, С.А. Воинова // Теплоэнергетика, 2008. – № 9. – С. 29–33. 6. Воинов А.П. Особенности автоматического управления котлами с низкотемпературным пузырьковым кипящим слоем / А.П. Воинов, С.А. Воинова // Вісник Інженерної академії України. – 1997. – № 2.

УДК 622.75:629.7

## УНІВЕРСАЛЬНЕ ГІДРОДИНАМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА

Умінський С.М., канд. техн. наук  
(Одеський державний аграрний університет)

*Dialogue is carried out and installation for reception of biodiesel fuel in conditions many-faktyre is created*

Європейські країни (Німеччина, Австрія, Франція й ін.) успішно організують виробництво біодизпалива «БДП» для тракторної техніки та автомобілів [1]. Принцип виробництва «БДП» – відбувається етерифікація рапсового масла з метиловим або етиловим спиртом при наявності молочного каталізатора. Результатом етерифікації є активізована суміш, вміщуюча біодизельне паливо, гліцерин і інші компоненти. За кордоном, наприклад, країнах ЄС, комплекс «виробництво олії – отримання біодизеля» збирається в єдиному виробничому циклі. Основні виробники «БДП» в країнах ЄС: Diester Industrie (Франція); INEOS Chlor (Великобританія); ADM, RVM (Німеччина); Novaol, DR Zubrificanti (Італія); Bionet Europa SC (Іспанія).

В Європі щорічно виробляється 600 тис. т. біопалива. за останні 10 років попит на «БДП» виріс на 5 млн. т. Прогнозується в закордонних країнах виробництво біодизпалива до кінця 2010 р. – 12 млн т. Загальна ж потреба – 25 млн. т. В Україні склались об'єктивні умови для освоєння виробництва «БДП» на основі рапсового масла, перед усім на міні заводах, агро-виробництвах. Такий прецедент вже є, наприклад, Польська компанія «Man-Zoil». Вирішення проблеми виробництва біодизеля передбачено і в Україні ( Указ Президента, Укра-

їни №1094). Згідно указу, міністерством аграрної політики України сформульована концепція державної програми по розробці и впровадженню технологій і обладнання для виробництва альтернативного палива включаючи «БДП» [2, 3].

Мета досліджень: розробити універсальну гідродинамічну установку для виробництва «БДП» на основі диспергування на молекулярному рівні рапсової олії з етанолом в присутності молочного каталізатору (наприклад, гідроксиду натрію).

Принципова схема універсальної установки для отримання «БДП» представлена на рис. 1. Установка включає в себе технологічну ємність 1 для сировини (рапсове масло), гідростанцію, що складається з електродвигуна 3, муфти 4, насоса 5, бай – паса 6 і вентилятора 7 для регулювання тиску олії в системі. Бай – пас 6 нагнітаючою магістраллю 8 і через кран 9 з'єднаний з дозатором – змішувачем 10 інжекторного типу і гідродинамічним диспергатором 19. Дозатор – змішувач 10 і диспергатор 19 встановлені послідовно, при чому вихід дозатора з'єднаний з виходом диспергатора. Дозатор – змішувач 10 має полость розрідження «Р» між соплом 11 і розширювачем 12, розміщеним в його корпусі назустріч одне одному. Порожнина розрідження дозатора трубопроводом 17 через кран 18, з'єднана з колектором 13. Колектор 13 з'єднаний арматурою через крани 14, 15 і 16 з внутрішніми порожнинами бака 35, що має три секції 20, 21 і 22 для компонентів. Секція 20 призначена для дизельного палива нафтового походження, секція 21 – для метанолу, секція 22 – каталізатора (гідроксид натрію). Вихід дозатора 10 з'єднаний з виходом гідродинамічного диспергатора 19. Одночасно вихід із диспергатора трубопроводом з'єднаний з технологічною ємністю 24, для гідродинамічної активної суміші рапсового масла з компонентами, що надходять із секції 20, 21 і 22 бака 35 через колектор 13 і дозатор – змішувач 10. Ємність 24 через кран 25 з'єднана з сепаратором 26 для розділення фаз «біодизель» і «водно – гліцерінова суміш», відповідно поступаючих в ємності 27 і 28. Ємність 28 для «водно-гліцерінової суміші» з'єднана з фільтром волого-очисником 29, який в свою чергу з'єднаний з ємністю 30 для гліцерину і 31 для збору вологи (води). Ємність 24 оснащена дренажним трубопроводом 32 з краном 33 для видачі готової продукції. Установка обладнана вимірювальними приборами (манометром 36, датчиком температури 37, витратоміром біодизеля 34) [4,5,6].

Установка конструктивно виконана по модульно-блочному типу, вона універсальна [7,8].

Універсальність установки передбачується її можливістю працювати в трьох режимах, а саме:

1. Отримання «БДП» на основі диспергування холодно пресованого очищеного рапсового масла (РМ), дизельного палива (ДП) нафтового походження і метанолу (М), з впливом каталізатора (К).

2. Отримання «БДП» на основі чистого метилового ефіру (МЕ), з динамічно активізованої суміші (РМ) і (М) обробленого каталізатором (К).

3. Отримання «БДП» з суміші «ДТ» та «РМ» диспергуванням компонентів на молекулярному рівні.

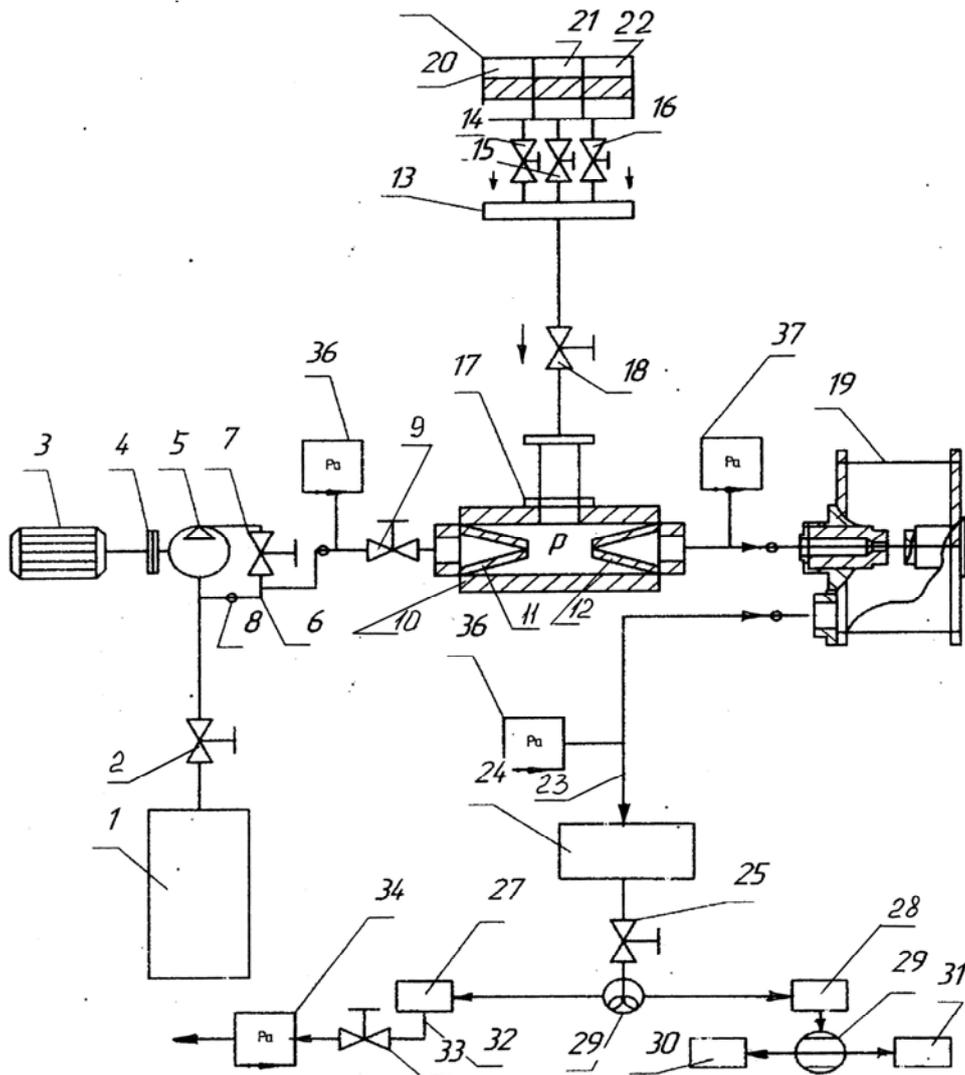


Рис. 1. Універсальна установка для виробництва біопалива

Універсальна установка працює в режимах 1, 2 і 3 таким чином. В режимі 1 – крани 14, 15, і 16 бака 35 відчинені для проходження в дозатор змішувач 10 всіх компонентів. При включенні приводного електродвигуна 3 через муфту 4 починає обертати гідронасос 5, який всмоктує «РМ» з ємності 1 в бай – пас 6 і напірну магістраль 8, установки. Після цього краном 6 бай паса регулюється робочий тиск в магістралі 8, який контролюється манометром 36. Рапсове масло під тиском проходить по напірній магістралі 8 при відкритому крані 9 і попадає в дозатор–змішувач 10. Одночасно при відкритих кранах 14, 15 і 16 із секцій 20, 21 і 22 бака 35 в колектор 13 потрапляють компоненти («ДТ», «МТ» і «К»), які завчасно в ньому змішавшись, всмоктуються через відкритий кран 18 і трубопровід 17 в порожнину розрідження «Р» дозатора 10. В дозаторі–змішувачі 10 рапсове масло інтенсивно насичується компонентами («ДТ», «М» і «К»). Попередньо насичена суміш попадає в гідродинамічний кавітатор 19. В кавітаторі 19 виконується глибоке диспергування суміші компонентів з «РМ» на молекулярному рівні. Активована суміш одержуючи властивості «БДП» поступає по трубопроводу 23 в технологічну ємність 24, а потім – в сепаратор 26

при відкритому крані 25. В сепараторі 26, суміш розділяється на фази «біодизель» и «водно- гліцерина суміш», потім кожна фаза поступає в відповідні ємності 27 і 28. Далі «водно-гліцерина суміш» подається з ємності 27 в фільтр-вологоочисник 29, де розділяється на гліцерин і воду. Гліцерин зливається в ємність 30, а волога (вода ) в ємність 31. В результаті готова продукція «БДП» з ємності 27 по трубопроводу 32 при відкритому крані 33 через витратомір 34 видається споживачеві. Гліцерин може бути використаний при виробництві кормових добавок .

В режимі 2 – установка працює при закритому крані 14 і відкритих кранах 15 і 16 для потрапляння відповідних компонентів (метанолу і каталізатора) через колектор 13 в порожнину розрідження «Р» дозатора змішувача 10. Технологічний процес отримання «БДП» аналогічний роботі в режимі 1.

В режимі 3 – установка працює при закритих кранах 15 і 16 бака 35 и відкритому крані 14 для потрапляння «ДТ» нафтового походження через трубопровод 13 в порожнину розрідження «Р» дозатора-змішувача 10. В подальшому, подібним чином, як і по п.п. 1 і 2, протікає технологічний процес отримання «БДП» на основі диспергування «ДТ» і «РМ». Установка апробована, отримані результати наведені у табл. 1.

Універсальна установка для виробництва біодизельного палива випробувана в ЮНТЦ (УААН), отримані обнадіюючі результати, а саме:

- біодизельне паливо по своїм фізико – експлуатаційним властивостям практично не відрізняється від дизельного палива нафтового походження;
- викиди відпрацьованих газів значно зменшуються;
- викиди твердих частин зменшуються до 50 %;
- працездатність дизелів практично не змінюються без конструктивної модернізації основних вузлів і агрегатів;
- робота дизельних двигунів на біодизельном паливі екологічно безпечна, що має велике значення для захисту навколишнього середовища;
- продуктивність установки 1100 л/год біодизельного палива.

Таблиця 1

Властивості біодизельного палива та дизельного палива нафтового походження

Вид палива	Показники			
	Цетанове число	Кінематична вязкість при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{с}$	Температура спалаху, $^{\circ}\text{C}$	Щільність при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$
Біодизельне паливо з рапсової олії	50	7,83	50	850
Дизельне паливо нафтового походження	48	6,0	40	860

Виробництво біодизельного палива можна легко організувати, в т.ч. в умовах фермерського господарства. Вартість біодизельного палива в даний час не перевищує вартість традиційного нафтового дизельного палива і має тенде-

нцію до зниження. Біодизельне паливо отримало широке розповсюдження в багатьох країнах світу, серед яких, Германія, Австралія, Австрія, Чехія, Франція, Італія, Швеція, США, а також інші країни. Спеціалісти по моторній техніці вважають біодизельне паливо кращим паливом для двигунів з samozапалюванням. Спираючись на закордонний досвід, розроблена установка буде корисною для вирішення проблем забезпечення виробництва України дизельним паливом.

**Список літератури:** 1. Біопалива (технології і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О. Корчений, І.П. Масло та інш. – К.: «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с. 2. Установка БДД для производства биодизельного топлива. – инф. Листок EXW(FCA) Днепропетровск, @ 2005 biodisel. dr. ua. Allrights reserved/ last update: Thu, 16 Mar 2006 19:37:57 GMT. 3. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Гідродинамічна установка для отримання біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 31463 C10L8/00. – Заявлено 05.12.2007. – Опубл. 10.04.2008. – Бюл. –№7. 4. Топілін Г.Є. Розвиток методів та технологічних засобів виробництва біодизельного палива / Г.Є. Топілін, С.М. Умінський // Аграрний вісник Причорноз'я: Збірник наукових праць. Технічні науки. – Одеса, 2007. – Вип. 40. – С. 84–88. 5. Топілін Г.Є. Гідродинамічний апарат для отримання екологічно чистого біодизельного палива / Г.Є. Топілін, С.М. Умінський // Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: матеріали 12 міжнародної наукової конференції (8–12 вересня 2008 р.). – Одеса, 2008. – С.119–121. 6. Genadiy Topilin, Sergiey Uminski. Biodiesel fuel for agricultural manufacture. Polish Academy of science. Departament in Lublin. Commission of motorization and power industry in agriculture. – Тека. – Lublin. 2008. – Volume 8–7. – P. 283–287. 7. Топілін Г.Є. Использование гидродинамических аппаратов в агропроизводстве / Г.Є. Топілін, С.М. Умінський // Аграрний вісник Причорноз'я: Збірник наукових праць. Технічні науки. – Одеса, 2007. – Вип. 40. – С. 64–79. 8. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Універсальна установка для виробництва біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 37619 C10I 5/40. – Заявлено 18.04.2008. – Опубл. 10.12.2008. – Бюл. № 23.

УДК 621.18:66.096.5

## МОЖЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Воїнова С. О.**, канд. техн. наук

(Одеський національний політехнічний університет)

*The opportunities of control of the technical objects' efficiency are considered. Opportunities of control of the technical objects' efficiency*

Ефективність (Еф) технічного об'єкта (ТО) характеризує ступінь його досконалості. Еф – поняття комплексне. Його складові – соціальна Еф і технологічна Еф – також є комплексними поняттями. Становить значний інтерес аналіз технологічної Еф, її складових (рис. 1), головною серед яких є екологічна Еф – ЕлЕ. Першорядне значення придбало завдання керування нею.

Важкість зазначеного завдання обумовлена рядом наступних обставин:

- висока складність, найтісніший взаємозв'язок природних процесів, що визначають екологічну обстановку в глобальному масштабі й на місцях,
- мала вивченість зазначених процесів, що обмежує можливості впливу на стан природного середовища,

- малі доступні можливості впливу на стан природного середовища в умовах антропогенного діяння, що підсилюється, на нього,
- низька екологічна культура в побуті й на виробництві.

Встає питання: які є можливості вирішувати завдання управління ЕлЕ.

На ЕлЕ ТО впливає ряд чинників. По-перше, це чинники, що визначають екологічні можливості використовуваної в ТО технології. По-друге, це чинники, що відбивають вплив екологічних можливостей самого ТО. По-третє, це

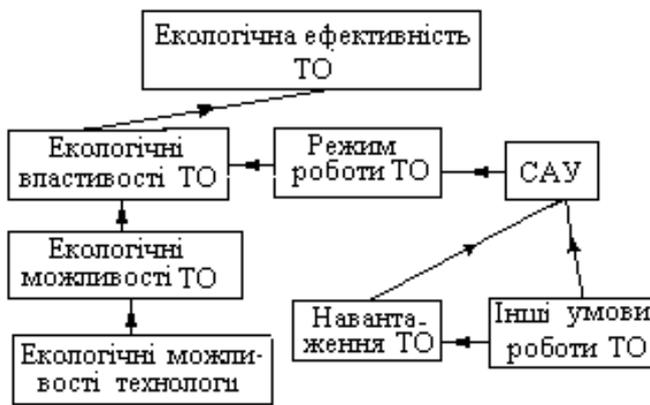


Рис. 1. Структурно-логічна схема взаємодії чинників, які впливають на екологічну ефективність ТО

чинники оперативного характеру, що відбивають вплив режимних умов функціонування ТО (рис. 1). Серед останніх важливою є роль навантаження об'єкта.

Викладене свідчить про те, що ЕлЕ ТО залежить від його екологічних можливостей, екологічних можливостей використовуваної технології й режиму його функціонування, що задає система автоматичного управління (САУ) [1-3].

Наведена картина впливу розглянутих чинників на ЕлЕ є характерною в загальному випадку, включаючи випадок впливу їх на формування технологічної ефективності ТО в цілому.

Становить інтерес аналіз механізму управління процесом формування ефективності ТО протягом усього періоду, від початку розробки ідеї створення ТО до закінчення його використання на виробництві. Цей період складається з наступних трьох етапів (рис. 2):

- Етап I – стратегічний: управління вибором технології виробничого процесу (що підлягає втіленню в створюваний ТО), з позицій пошуку кращого її варіанта. Завдання етапу виконують у головному галузевому науково-дослідному інституті.

- Етап II – тактичний: управління вибором конструкції ТО, з позицій пошуку кращого її варіанта. Завдання етапу виконують у конструкторському бюро заводу-виготовлювача.

- Етап III – оперативний: управління вибором режиму роботи ТО, пошук кращого його варіанта в кожний момент часу. Завдання етапу виконують у технічному відділі підприємства, що встановило створений ТО, вибирають кращий режим його роботи, потім за допомогою САУ реалізують його в процесі використання об'єкта, тобто вибирають такий режим роботи ТО, у якому його екологічні можливості реалізуються у вигляді його технологічних властивостей.

Таким чином, фактична технологічна Еф ТО, тобто ступінь реалізації його потенційних технологічних властивостей, визначається якістю процесу управління цим об'єктом.

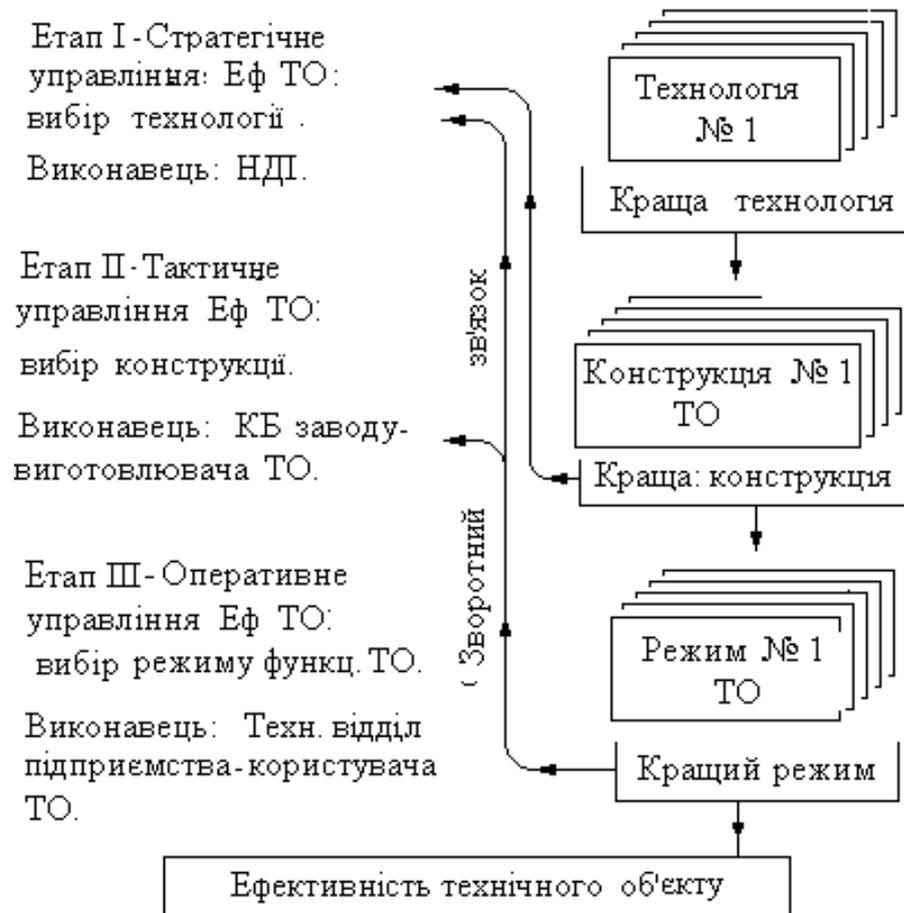


Рис. 2. Структурно-логічна схема комплексного управління ефективністю технічного об'єкту

**Висновки.** 1. Управління Еф ТО – комплексний процес, здійснюваний у три етапи: стратегічний, тактичний і оперативний.

2. Управління на всіх етапах носить організаційно-технічний і науково-технічний характер.

3. Еф працюючого ТО, тобто ступінь реалізації його потенційних технологічних властивостей, визначається якістю процесу управління цим об'єктом, здійснюваного САУ.

4. Високоякісно працююча САУ технологічні можливості ТО перетворює в його технологічні властивості, які стають доступними для практичного використання.

**Список літератури:** 1. Воїнова С.О. Автоматичне управління – інструмент реалізації потенційної технологічної ефективності технічних об'єктів / С.О. Воїнова, О.П. Воїнов // Научн.-техн. сб. кафедры «Тепловые эл. станции и энергосберегающие технологии» по энергосберегающим технологиям в теплоэнергетике.– Одесса, ОНПУ, 2007. - С. 19-22. 2. Воїнова С. О. Можливості управління екологічною характеристикою технічних об'єктів / С.О. Воїнова // Физические и компьютерные технологии: Труды 11-ой Междунар. научн.-техн. конф. (02–03 июня 2005 г., Харьков). – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. - С. 221–223. 3. Воїнова С.А. Пути непосредственного управления экологической эффективностью котельно-топочных систем / С.А. Воїнова, Л.М. Сычук // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159-161.

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Воїнова С. О.**, канд. техн. наук  
(Одеський національний політехнічний університет)

*Some features of a control's task by the technical objects' ecological efficiency are considered. Some features of a control's task by the technical objects' ecological efficiency*

Стан навколишнього середовища (НС), особливо живої природи, вимагає рішучого підвищення екологічної ефективності (ЕлЕ) виробництва, кожного технічного об'єкта (ТО).

Ступінь досконалості ТО можна оцінювати різними показниками. Найбільш загальним і важливим серед них варто визнати його ЕлЕ. Ця обставина додала задачі управління ЕлЕ ТО пріоритетне положення серед задач управління складовими технологічного процесу, що протікає в об'єкті.

Зазначена задача є неординарною за змістом, актуальною, складною й винятково цікавою.

До числа істотних особливостей згаданої задачі ставляться властивості системи, утвореної об'єктом управління – ТО – і його навколишнім природним середовищем, що включає живу природу й неживу природу. Антропогенний шкідливий вплив вражає обидві частини НС. Застосування систем автоматичного управління (САУ) ТО покликані забезпечити ведення режимів працюючих ТО по траєкторіях, які зводять до доступного мінімуму шкідливий вплив на НС. Традиційно цю задачу перед САУ не ставили, їй доручали задачу підтримки на заданому рівні економічної ефективності й загальнотехнічної ефективності (насамперед, високої надійності). Нинішнє, тяжке становище НС, особливо живої природи, змушує перейти до нової концепції управління виробничими об'єктами: перейти до прямого, безпосереднього управління їхньою ЕлЕ. САУ цього типу варто віднести до нового покоління засобів автоматизації.

При розробці задачі управління ЕлЕ ТО зіштовхуються з низкою складних, мало розроблених, досить специфічних питань; вони утворюють комплекс, що носить характер великої науково-технічної проблеми. Торкнемося основних особливостей зазначеного комплексу.

Приведемо найбільш істотні із числа згаданих питань стосовно довільно обраного випадку впливу виробничого процесу на НС.

- Які складові (елементи, чинники) шкідливого впливу (ШВ) ТО на НС, включаючи (а це надзвичайно важливо!) нові, нехарактерні, нетрадиційні?
- Які механізм, результат і інтенсивність ШВ кожного чинника, у різних умовах реалізації; вплив на них цих умов, у тому числі динаміки впливу?
- Який характер (антагоністичний, адитивний, синергічний) спільного ШВ чинників у різних їхніх сполученнях, за різною їхньою силою й за різних умов?

- Який порівняльний результат ШВ різних з діючих чинників на кожний з об'єктів живої природи, що входять у кожний з розглянутих біоценозів?

- Як впливають на результат ШВ кожного чинника в різних умовах власливості організму, стать, вік, стан здоров'я, спадкоємні особливості, нервово напруження, умови життя й ін.?

- Як змінилися, внаслідок антропогенного ШВ, умови життя виду в межах минулого періоду, що піддається надійному науковому аналізу, як змінюються ці умови тепер?

- Як змінилися, внаслідок антропогенного ШВ, стан живих організмів кожного досліджуваного виду й відповідного біоценозу в цілому, як змінилася їхня піддатливість ШВ?

- Чи можна й, якщо так, то як, урятувати, зберегти тих представників живої природи, які виявилися в критичному стані?

Аналіз викладеного показує, що безліч чинників ШВ, об'єктів живої природи - мішеней ШВ, - умов впливу перших на других, все це сформувало гігантську безліч обставин, результатів ШВ на елементи живої природи.

Звертає на себе увагу той дивний факт, що виробнича діяльність людини створила, сформувала зазначену гігантську безліч сумних фактів гноблення й знищення живих організмів, більше того, продовжує цю "роботу" у зростаючому темпі.

Разом з тим, об'єм наукових вишукувань екологічного характеру незрівнянно малий на фоні зазначеної гігантської безлічі обставин. У підсумку, проглядається грандіозна за масштабом й важливістю, соціальна не в загальнолюдському, але в загальноприродному, планетарному відношенні проблема порятунку природного середовища, і насамперед, – живої природи.

Дана проблема містить ряд основних, великих науково-технічних задач, кожна з яких складається з масиву окремих задач. Унікально широка масштабність проблеми робить доступною розробку лише деякої частини цих, окремих задач. Більшість із них, в абсолютному вираженні, представляє великі науково-технічні задачі, у тому числі – системного характеру. У їхньому числі становить істотний інтерес задача підвищення ЕлЕ ТО, шляхом прямого (безпосереднього) управління режимом їхньої роботи [1-3].

Ступінь вивченості проблеми, її елементів, як у статиці, так і в динаміці, досить мала; вона не відповідає проблемі за значенням (актуальністю) і ступенем складності.

Екологічну ефективність ТО формує ряд чинників. Серед них провідну роль грають його екологічні властивості й режим роботи.

Режим роботи ТО визначає САУ під дією сигналів, що відбивають умови його роботи, і відповідно до встановленого для неї алгоритму управління. Умови роботи представлені сигналами, що відбивають показники технологічного процесу, і, у першу чергу, показники ЕлЕ ТО. Регулятори САУ впливають на чинники, що визначають зазначені показники ЕлЕ ТО.

Важливо відзначити, що САУ ЕлЕ ТО не підмінює, а доповнює традиційну САУ технологічним процесом ТО. Однак, вона виконує головну задачу

управління ТО. У САУ ЕлЕ ТО – системах нового покоління – варто застосовувати сучасне алгоритмічне й технічне забезпечення [4].

В області управління ЕлЕ ТО ускладнюючі обставини перебувають не в сфері теорії й практики автоматичного управління, вони перебувають у сфері постановки й технологічного принципового рішення конкретної задачі підтримки обраного параметра ЕлЕ об'єкта на заданому рівні із заздалегідь прийнятим рівнем статичної й динамічної помилок.

Є підстава затверджувати, що успіх майбутнього широкого освоєння прямого управління ЕлЕ ТО й темп його досягнення будуть визначатися, насамперед, відповідними успіхами в сфері створення технологій і ТО, здатних забезпечити високу ЕлЕ роботи при високій якості процесу управління.

Рішення задач розглянутої проблеми можливо за умови надання виконавцям необхідного ресурсного забезпечення. Рішення задач проблеми повинне опиратися на комплексно-системний підхід у всіх її ланках і на всіх етапах розробки.

У проблемі підвищення ЕлЕ виробництва істотне значення має рівень екологічної культури виробничого персоналу. Підвищення її рівня - неодмінна умова забезпечення належної ЕлЕ ТО [5].

#### **Висновки.**

1. Задача прямого управління ЕлЕ ТО характеризується гранично високим ступенем складності об'єкта управління, з одного боку, і малою вивченістю впливу на нього з боку виробничої діяльності людства, з іншої.

2. Необхідне розширення науково-дослідних вишукувань у сфері порятунку НС, у тому числі розробок по прямому управлінню ЕлЕ ТО.

3. САУ ТО дозволяє реалізувати його потенційну технологічну ефективність, у тому числі найважливішу її складову – ЕлЕ.

4. САУ режимом роботи ТО є найважливішою частиною його загальної системи управління.

5. Програма виконання комплексу робіт проблеми порятунку природного середовища повинна займати пріоритетне положення серед провідних науково-технічних і виробничих програм сучасності.

**Список літератури:** 1. Воїнова С.О. Можливості управління екологічною характеристикою технічних об'єктів / С.О. Воїнова // Физические и компьютерные технологии: Труды 11-ой Международ. научн.-техн. конф. (02-03 июня 2005 г., Харьков). – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С. 221-223. 2. Воїнова С.А. Актуальные задачи управления экологической эффективностью технических объектов / С.А. Воїнова // Стратегия качества в промышленности и образовании: материалы Международ. конф. (1–8 июня 2007 г., г. Варна, Болгария). – Днепропетровск – Варна: «Фортуна». – Ту Варна.– 2007 г., Т. 1.- С.102-104. 3. Воїнова С. А. Пути непосредственного управления экологической эффективностью котельно-топочных систем / С.А. Воїнова, Л.М. Сычук // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159–161. 4. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / В.А. Хобин. – Одесса: «ТЭС», 2008. – 306 с. 5. Воїнова С.О. Проблема підготовки для промисловості кадрів високої екологічної культури / С.О. Воїнова // Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств: материалы Международ. научн.-практ. конф. (4–7 июня 2007 г., Одесса). – Одесса: ОНАХТ, 2007. (Электронная версия). – С. 153–154.

## НОВЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ РАСЧЕТУ И ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПОСАДОК С НАТЯГОМ

**Литовченко П.И.**, канд. техн. наук, **Нечипоренко В.Н.**, канд. техн. наук,  
**Сало В.А.**, докт. техн. наук, **Иванова Л.П.**  
(Национальная академия Национальной гвардии Украины, г. Харьков)

*A new approach to the automated calculation and selection interference fits in a smooth connection of engineering applications. The method allows to formalize the process of automated calculation interference fits, increase the speed and accuracy of the design decisions. The method is based logical analysis of the constraints imposed on the operational and technological parameters of the landings, followed by the creation of  $n$ -parametric domain of their existence and use it to select the most efficient fit criteria*

**Введение и постановка задачи.** Посадки с гарантированным натягом (прессовые посадки) являются одним из наиболее распространенных видов неразъемных соединений, которые используются в современных машинах. От правильного расчета и подбора прессовой посадки целиком зависит прочность, надежность и долговечность, как всего соединения, так и отдельных деталей.

Как известно, прочность соединения зависит от фактической величины натяга в посадке, который создается во время сборки. Фактический натяг в соединении является случайной величиной, значение которой зависит от многих факторов различного характера, а именно:

- технологических (точность изготовления деталей, шероховатость рабочих поверхностей, способ получения соединения и т.п.);
- физико-механических свойств материалов деталей соединения, которые определяются при выборе материала и назначении соответствующей термообработки;
- эксплуатационных (рабочая температура соединения, характер нагрузки элементов, степень ответственности машины, в которой применяется соединение и т.п.).

Именно случайный характер и многочисленность основных факторов, которые обеспечивают прочность посадки, обуславливают нестабильность ее прочностных характеристик. Кроме того, случайный характер параметров посадки не позволяет определить точного значения фактического натяга ни теоретически, ни экспериментальным путем, а значит, не позволяет спрогнозировать ее прочность и надежность во время эксплуатации.

Цель работы – создание системы ограничений на исходные параметры и промежуточные результаты расчета посадок с натягом, а также в установлении функциональных связей этих параметров с конечным множеством посадок, отвечающим условиям расчета, с целью обеспечения непустого значения этого множества. Кроме того, предусмотрена реализация полученных результатов в виде программы автоматизированного расчета и выбора посадок с натягом, значительно повышаю-

щей производительность итерационного процесса их проектирования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В основу существующих методов расчета посадок с натягом [1, 2, 3] положены следующие основные этапы:

- определение минимально необходимого натяга, обеспечивающего неподвижность соединения под действием нагружающих его сил;
- определение максимально допустимого натяга из условий обеспечения прочности наиболее слабой детали соединения;
- выбор табличной (стандартной) посадки, которая отвечает условиям расчета;
- проверка прочности наиболее слабой детали соединения под действием максимального давления в нем, возникающего при максимальном вероятностном натяге в посадке;
- расчет технологических параметров получения соединения (силы пресования при механических способах, температуры нагрева или охлаждения при термических способах получения соединения).

Условиям расчета могут отвечать: 1) одна посадка; 2) несколько посадок; 3) ни одной посадки. В первом случае принимается одна безальтернативная посадка. Во втором случае необходимо выбрать наиболее подходящую посадку из конечного множества табличных посадок. При отсутствии однозначно определенных критериев выбора, такой подход носит субъективный характер, зависящий, в основном, от квалификации и опыта проектировщика.

Наиболее сложным является третий случай, когда не существует ни одной посадки, отвечающей условиям расчета. Задачей проектировщика в этом случае является корректирование исходных данных и промежуточных результатов расчета таким образом, чтобы обеспечить существование хотя бы одной, а лучше нескольких посадок, которые отвечают условиям нагружения и эксплуатации соединения. Возвращение к корректировке исходных данных может осуществляться несколько раз, при этом проектировщик постепенно приближается к конечному результату, а алгоритм расчета посадки носит итерационный характер.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи необходимо установить функциональную связь исходных параметров расчета с конечным множеством посадок, которые отвечают условиям нагружения и эксплуатации. Представим эту связь в виде некоторой функции

$$k = f(a, b, c, d), \quad (1)$$

где  $k = \{0, 1, 2, \dots, m\}$  – конечное множество стандартных посадок с натягом, которые отвечают заданному набору значений входных параметров и характеризуют условия нагружения и эксплуатации соединения, а также технологию его получения;  $m$  – все множество стандартных посадок, которые рекомендуется или разрешается к применению определенным нормативным документом, используемым при выборе стандартных посадок.

Например, согласно [3, табл. 5.4] такое множество составляет пятнадцать посадок с натягом в системе отверстия ( $m = 15$ ), из которых три посадки предпочтительного применения, семь – рекомендуются к применению, пять – раз-

решается применять в отдельных случаях при наличии достаточных оснований;  $a, b, c, d$  – группы ограничений, которые накладываются на входные параметры посадок и позволяют сформировать конечное множество возможных посадок  $k$ .

Цель наложения ограничений – исключение всех нежелательных сочетаний значений расчетных параметров уже на этапе формирования массива исходных данных, формализации и создания рационального алгоритма автоматизированного расчета и выбора посадок с натягом. Авторы из массива параметров, влияющих на прочностные и эксплуатационные характеристики посадок, отбросили недопустимые и несущественные, и предложили систему ограничений, накладываемых на значения этих параметров.

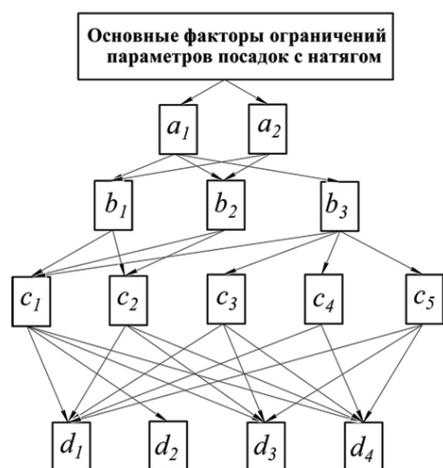


Рис. 1. К определению факторов ограничений

Рассмотрим более детально систематизацию факторов нагрузочного, эксплуатационного и технологического характера, которые положены в основу принятых ограничений (рис. 1).

Группа факторов ограничений  $a = \{a_1, a_2\}$  определяет тип посадочной гладкой поверхности, где  $a_1$  – цилиндрическая поверхность;  $a_2$  – коническая поверхность.

В известных методиках расчета посадок факторы ограничений группы  $a$  фактически идентифицируются с фактором  $a_1$ , когда значение величины минимального допустимого натяга  $[N_{\min}]$  зависит от минимального давления  $p_{\min}$  на контактирующих цилиндрических поверхностях и определяется величинами действующих

нагрузок (осевой силы  $F_a$  или вращающего момента  $T$ , а также в случае их совместного действия).

Методы расчета значения минимального давления  $p_{\min}$  при действии вращающего момента  $T$  на конической поверхности в литературе представлены мало. Авторы данной статьи для повышения универсальности алгоритма расчета посадок учитывают все силовые факторы для обоих типов посадочных поверхностей ( $a_1$  и  $a_2$ ).

Группа факторов ограничений  $b = \{b_1, b_2, b_3\}$  определяет вид соединения, от которого зависит характер и последовательность формирования исходных данных, алгоритм расчета и выбора посадки. В этом множестве определено 3 члена:

$b_1$  – «вал-ступица» – соединение вала механической передачи со ступицей зубчатого или червячного колеса, звездочки, шкива и т.п., при котором вращательный момент передается только за счет прессовой посадки;

$b_2$  – «вал-ступица» со шпонкой – соединение вала механической передачи со ступицей зубчатого или червячного колеса, звездочки, шкива, и т.п., при котором вращающий момент передается за счет шпонки, а посадка с натягом обеспечивает только нераскрытие (неподвижность) стыка.

Фактор ограничения  $b_2$  сам является функцией факторов ограничения подчиненного характера:  $b_2 = \{b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25}\}$ , где ограничения  $b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25}$  накладываются типом колес механической передачи, которые устанавливаются на валу (соответственно: «прямозубое цилиндрическое», «косозубое цилиндрическое», «прямозубое коническое», «коническое с круговым зубом», «червячное»). Такое ограничение необходимо потому, что тип формы зубьев зубчатого (червячного) колеса определяет набор силовых факторов, учитываемых при расчете минимально необходимого натяга в посадке;

$b_3$  – «ступица-венец (бандаж)» – соединение основы зубчатого (червячного) колеса, изготовленной из дешевого конструкционного материала, с зубчатым венцом, изготовленным из качественного дорогого конструкционного материала. Как и предыдущий, фактор ограничения  $b_3$  является функцией факторов ограничения подчиненного характера:  $b_3 = \{b_{31}, b_{32}, b_{33}\}$ , где ограничения  $b_{31}, b_{32}, b_{33}$  накладываются типом венца зубчатого или червячного колеса (соответственно: «зубчатый», «полушевроны», «червячный»), который определяет толщину бандажа, условия его местного отрыва от основы, необходимость стопорения бандажа от его сдвига под действием осевой силы.

Группа факторов ограничений  $c = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$  определяет перечень возможных сочетаний материалов охватывающей и охватываемой поверхностей. На практике чаще всего используются следующие сочетания, которые использованы авторами данной статьи как факторы ограничений группы  $c$ :  $c_1$  – «сталь-сталь»;  $c_2$  – «сталь-чугун»;  $c_3$  – «сталь-бронза (латунь)»;  $c_4$  – «чугун-бронза (латунь)»;  $c_5$  – «чугун-сталь».

При получении посадок с натягом деталей свойства и характеристики их материалов, которые регламентируются набором факторов группы  $c$ , играют очень важную роль, поскольку определяют не только способ получения соединения, но и значение технологических параметров этого процесса (силу прессования при механических способах или температуру нагревания (охлаждения) при термических способах). При анализе факторов ограничений этой группы авторы опирались на опыт и рекомендации по использованию различных материалов для прессовых соединений [2, 3]. Так, например, для конических соединений практически не применяются соединения материалов сталь-бронза (латунь) - тогда имеет место соответствующее соотношение множеств  $a_2 \notin c_3$ , а также чугун-бронза (латунь) – в этом случае  $a_2 \notin c_4$ .

Как видно на рис. 1, для цилиндрических соединений не существует ограничений ни по фактору соединению материалов, ни по способу получения соединения, за исключением гидропрессования, которое применяется только для соединения материалов «сталь-сталь», т.е.:

$$\left. \begin{aligned} a_1 \in b_1 \in c_2 \notin d_2; a_1 \in b_1 \in c_3 \notin d_2; \\ a_1 \in b_1 \in c_3 \notin d_2; a_1 \in b_1 \in c_4 \notin d_2; \\ a_1 \in b_1 \in c_5 \notin d_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Заметим, что авторы сознательно не учитывают соединений материалов «бронза-сталь» и «бронза-чугун», применяемых, например, при запрессовке тонкостенных втулок разного назначения (подшипников скольжения в ступицы чугунных или стальных деталей, тонкостенных втулок и колец в корпуса, клапанные седла и гнезда при работе в условиях вибраций, грундбуксы, корпуса сальников и др.). В этих случаях рекомендуются стандартные посадки, определенные для каждого типа соединения [3].

Эти соединения, как правило, не нагружены ни вращающим моментом, ни осевой силой, поэтому нуждаются в расчетах только на прочность втулки под действием радиальных усилий, которые возникают в результате создания натяга. Для таких соединений рекомендуются посадки по 5–7 качеству со средним натягом, например,  $\frac{H7}{p6}, \frac{P7}{h6}$ , после выбора которых осуществляется проверочный расчет на прочность втулок под действием максимального вероятностного натяга в выбранной посадке.

Группа факторов ограничений  $d = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$  регламентирует способ получения соединения:  $d_1$  – механическое прессование;  $d_2$  – гидропрессование;  $d_3$  – нагревание охватывающей детали;  $d_4$  – охлаждение охватываемой детали. Эта группа факторов ограничений влияет на формирование массива исходных параметров, последовательность расчета и формирование массива результатов.

При выборе факторов ограничений группы  $d$  учитывались соображения предельной температуры (для термических методов сборки) или относительного натяга (для механических методов сборки).

Известно, что при нагревании охватывающей стальной детали предельной является температура  $t_2 = 230...250^\circ\text{C}$ , т.е., при  $t_2 > 250^\circ\text{C}$  действует ограничение  $c_1 \notin d_3$ . Аналогично при охлаждении охватываемой детали ограничение  $c_1 \notin d_4$  вступает в силу при охлаждении охватываемой детали с помощью сжиженного воздуха ниже предельно допустимой температуры, то есть  $t_1 < -190^\circ\text{C}$ .

Применение механических методов получения соединений ограничивается условием не превышения относительного натяга в посадке, т.е.  $N_i \leq [N_i]$ , тогда действие ограничений  $c_1 \notin d_1 \notin d_2$ ,  $c_2 \notin d_1 \notin d_2$ ,  $c_3 \notin d_1 \notin d_2$ ,  $c_4 \notin d_1 \notin d_2$  наступает при  $N_i > [N_i]$ . Обычно значение  $N_i \leq 0,001$  мм/мм (1 мкм/мм) для относительно простых плотных, средних и легких посадок используется для способа механической сборки на прессах ( $d_1$ ) или при гидропрессовании ( $d_2$ ). Особо плотные посадки, в которых  $N_i > 0,001$  мм/мм, получают термическим способом ( $d_3$  и  $d_4$ ). Таким образом, некоторые ограничения действительны только при определенных условиях. Кроме того, множество факторов ограничений, некоторые из которых в свою очередь имеют подчиненные факторы ограничений, образует сложную систему логических конструкций, влияющую при расчете на процесс формирования массива стандартных посадок, отвечающих условиям их проектного и проверочных расчетов. Это означает, что функция (1) не может быть по-

лучена в виде конкретной математической зависимости, а существует в виде набора множества ограничений, которые накладываются на нагрузочные, технологические и эксплуатационные параметры проектируемых посадок.

Как видим на рис. 1, множества  $a, b, c, d$  пересекаются между собой, создавая численные подмножества. Если проанализировать схему на рис. 1, как ориентированный граф, то очевидно, что возможных соединений факторов ограничений для посадок можно получить в количестве 49 (35 – для цилиндрических поверхностей и 14 – для конических). Заметим, что это окончательное число возможных сочетаний ограничений получено путем отбрасывания тех из них, при которых решение задачи или невозможно, или нерационально.

Естественно, что при ручном расчете и выборе посадок проектировщик (при наличии достаточного опыта) интуитивно придерживается большинства этих ограничений, но при наличии многочисленных разветвлений вычислительного процесса даже опытный проектировщик не может избрать наиболее рациональное продолжение расчета на каждом из его этапов. Наиболее полно эти ограничения могут быть реализованы с помощью системы логических конструкций, реализованной в компьютерной программе.

Для решения этой задачи авторами разработана специальная компьютерная программа, послужившая важным инструментом в дальнейших научных исследованиях. Так, на начальных этапах результатом работы программы определяется перечень (в виде таблицы) стандартных посадок, из которого проектировщик, исходя из своего опыта, принимает ту или иную посадку (чаще всего, из числа предпочтительных) в качестве окончательного проектного решения. Как уже отмечалось выше, этот перечень представляет собой конечное множество, которое в частном случае может быть пустым, т.е., не содержать ни одной посадки, удовлетворяющей условиям расчета. В этом случае проектировщику предлагается скорректировать исходные данные и выполнить новый расчет. Дальнейшим этапом исследований стало определение области существования рациональных посадок, то есть определение некоторой совокупности функционально связанных диапазонов значений их параметров, которые и определяют эту область. В общем случае область существования, представленную в виде некоторого геометрического пространства, можно считать  $n$ -параметрической, где  $n$  – число критериев, по которым осуществляется выбор окончательного проектного решения. Авторы предложили использовать следующие параметры (критерии) для определения указанной области существования:

- минимальное удельное давление  $p_{\min}$ , действующее на сопряженные поверхности;
- минимально необходимая длина  $l$  сопряженных поверхностей;
- минимальная температура  $t_{2\min}$  нагрева охватывающей (максимальная температура охлаждения охватываемой  $t_{1\max}$ ) детали при термическом способе получения посадки;
- максимальный натяг в посадке  $[N_{\max}]$ , который определяется максимальным предельным давлением  $[p_{\max}]$ , допускаемым прочностью деталей соединения;

– минимальная сила прессования  $F_c$  при механических способах сборки.

На основе перечня приведенных критериев была модернизирована программа автоматизированного расчета посадок с натягом [4], которая в итоге стала представлять дополнительные возможности проектировщику, а именно:

- программа формирует и выводит в диалоговом окне список возможных проектных решений;

- в этом же окне выводится падающее меню, в котором проектировщик может выбрать один из дополнительных критериев выбора рациональной посадки;

- при выборе проектировщиком одного из дополнительных критериев список допустимых проектных решений сортируется в порядке убывания (роста) заданного дополнительного критерия;

- в отдельном окне выдается наиболее рациональное проектное решение с учетом дополнительного критерия выбора.

Для тестирования предложенного метода исследовалось посадка с натягом – безшпоночное соединение по цилиндрической поверхности, полученное путем механического прессования вала в ступицу зубчатого конического колеса (при длине соединения  $l = 63$  мм).

По результатам этого расчета получена кривая рационального сочетания удельного давления и натяга в посадках для исследуемого соединения (рис. 2).

Отметим, что при построении данной кривой учитывались следующие соображения. Значение минимального контактного давления  $p_{\min}$  должно обеспечивать нахождение деталей соединения в зоне упругих деформаций при условии обеспечения неподвижности всего соединения.

Значение максимального допустимого давления  $[p_{\max}]$  должно обеспечивать неразрушение элементов соединения [4, 6, 16, 17, 18, 19] (в большинстве случаев – отверстий, реже – валов, преимущественно полых). Из указанных соображений кривая  $F$  рационального сочетания натяга и удельного давления в

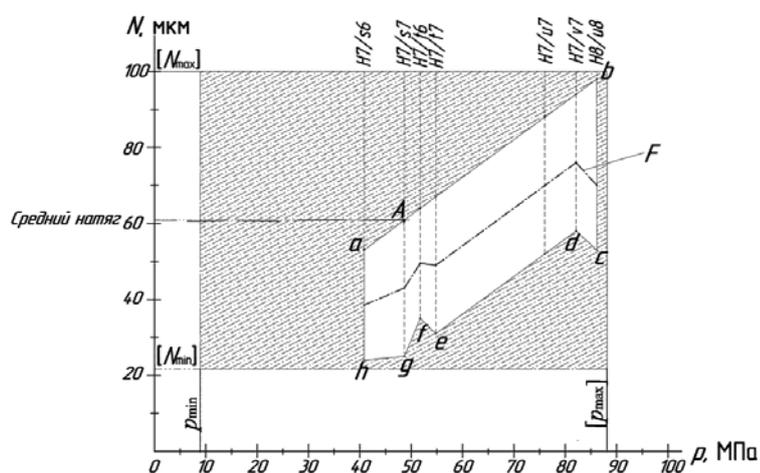


Рис. 2. Результаты исследования соединения

находиться в середине диапазонов их расчетных значений.

Как видно из рис. 2, окрестности кривой по обеим координатам создают область  $abcdefgh$  существования посадки для приведенных условий эксплуатации и способа получения соединения. При использовании посадок с валами и от-

посадке строилась, как последовательность точек пересечения линий средних натягов с линиями фактических удельных давлений (для каждой вероятностной табличной посадки). При этом авторы полагали, что вероятностное распределение натягов в посадке и удельного давления в ней подчиняются нормальному закону, а значит, математическое ожидание этих величин будет

верстиями одного качества форма указанной области должна быть параллелограммом, а искажение этой формы вызвано использованием вала более высокого (точка  $f$ ) качества, или вала и отверстия более низкого (точка  $c$ ) качества.

Совместный анализ кривой  $F$  и области  $abcdefgh$  дает возможность проектировщику назначить посадку, наиболее рациональную для данных условий эксплуатации и технологии сборки соединения. При этом наиболее рациональными будут считаться посадки, которые расположены в середине области  $abcdefgh$ , как по координате  $N$ , так и по координате  $P$ . Например, для случая, приведенного на рис. 2, это посадки  $H7/s7, H7/t6, H7/t7$ , минимальные вероятностные значения натягов которых соответствуют точкам  $g, f, e$  области  $abcdefgh$ . Эти табличные посадки, при достаточном удельном давлении  $P$ , обеспечивают наименьший необходимый натяг  $N$ . Как видим, построена 2-параметрическая плоская область существования рациональных посадок. При этом в качестве параметров, на которые накладывались ограничения, выбраны удельное давление  $P$  и натяг  $N$  – основные параметры, определяющие прочность соединения и его деталей.

Предложенная методика позволяет в значительной мере формализовать процесс автоматизированного расчета посадок с гарантированным натягом, а использование дополнительных критериев выбора повышает оперативность и вероятность принятия правильного проектного решения при проектировании посадок. Высокая степень формализации расчета, применение элементов оптимизации выбора окончательного проектного решения, реализация в виде программных средств позволяют считать данную методику эффективной и рекомендовать ее для расчета посадок с натягом в системах CAE и CAD машиностроительного назначения.

В работе решалась плоская задача, поскольку геометрической интерпретацией области существования являлась плоская (2-параметрическая) область (рис. 2). Использование большего числа критериев для принятия окончательного проектного решения значительно повышает вероятность выбора наиболее рационального его варианта. Наиболее перспективны исследования, направленные на увеличение количества используемых дополнительных критериев для принятия окончательного проектного решения. Поиск таких решений предполагается вести на основе построения и анализа  $n$ -параметрической модели (при  $n \geq 3$ ) области существования рациональных посадок.

**Список литературы:** 1. Кулиш Е.В., Турыгин Ю.В. Разработка методики расчета прессовых полисоединений. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL:http://www.istu.ru/files/materials/3509](http://www.istu.ru/files/materials/3509) – Дата обращения: 17 декабря 2010. 2. Гречищев Е.С. Соединения с натягом: Расчет, проектирование, изготовление / Е.С. Гречищев, А.А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с. 3. Дунаев П.Ф. Допуски и посадки. Обоснование выбора / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов, Л.П. Варламова. – М.: Высшая школа, 1984. – 112 с. 4. Літовченко, П.І. Універсальний алгоритм вибору посадки з натягом на основі нового методу автоматизованого розрахунку її раціональних параметрів / П.І. Літовченко, В.М. Нечипоренко, В.А. Сало, Л.П. Іванова // Збірн. наук. праць Академії ВВ МВС України, 2013. – Вип. 2 (22). – С. 72–75.

## ОПТИМАЛЬНАЯ ОТРАСЛЕВАЯ СТРУКТУРА – ОСНОВНОЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

**Богданович О.А.**

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко)

*The determinative of the effective functioning of the economic system is an optimum variant of its structure, which is in the system of the proper proportions*

**Введение.** Успешное функционирование агропромышленного комплекса какой-либо страны невозможно без научно обоснованных стратегических и тактических заданий и путей их реализации. Разработка стратегии развития обосновывается на анализе современного состояния и оценке проблем, которые возникают между отраслями агропромышленного комплекса, определении внутренних и внешних факторов, которые влияют на развитие и стратегические цели деятельности [2].

Наличие межотраслевых диспропорций наносит вред не только сельскому хозяйству, но всему государству. Одна гривна, вложенная в сельское хозяйство, дает в 10 раз больше мультипликационный эффект в других отраслях экономики. Убыточность сельского хозяйства, которая сопровождается уменьшением объемов производства, наоборот порождает минусовый эффект. В перерабатывающей промышленности он компенсируется путем импорта сельскохозяйственной продукции, что усиливает инвестиционный спрос к агробизнесу стран-импортеров, а значит и мультипликационный эффект в их отраслях. Значит, межотраслевой диспаритет, с одной стороны, вредит сельскому хозяйству Украины и экономики государства в целом, с другой – позитивно влияет на развитие экономик других государств [3]. Проблемам отраслевого развития агропромышленного комплекса посвящены работы многих отечественных ученых, таких как Б.И. Пасхавер, С.А. Гуткевич, О.М. Голованов, В.М. Петров, Н.В. Потрываева, П.Т. Саблук, В.П. Семиноженко и др.

**Основная часть.** За последнее время произошли значительные изменения в отраслевой структуре сельского хозяйства нашей страны. Наблюдается тенденция по увеличению удельного веса валовой продукции растениеводства и уменьшение удельного веса валовой продукции животноводства. Так, если в 1990 году удельный вес отрасли растениеводства был 59,2 %, а животноводства – 40,8 %, то в 2000 г. – это соотношение уже составляло 79,0 % и 21,0 %, а в 2014 г. – соответственно 75,9 % и 24,1 % [1].

Ежегодный прирост удельного веса отрасли растениеводства равен 0,56% и на эту же величину происходило уменьшение удельного веса отрасли животноводства. Таким образом, можно утверждать, что в конце 90-х годов и в начале 2000-х годов произошла относительная стабилизация структуры растениеводства и животноводства.

Следует отметить, что подобная стабилизация не может рассматриваться как стратегически оптимальная. Большинство европейских стран, а также США, имеют соотношение данных отраслей сельского хозяйства на уровне 50:50. Отдельные страны мира, такие как Аргентина, имеют больше удельный вес именно отрасли животноводства. Исходя из этого, данную структуру в сельском хозяйстве следует рассматривать как такую, которая сложилась под действием объективных факторов и должна быть в той или иной мере трансформирована в более оптимальную.

Произведя анализ состава и структуры товарной продукции в целом по Украине и Харьковской области за период 2005–2014 гг. только по сельскохозяйственным предприятиям, можем отметить, что стоимость товарной продукции за данный период увеличилась в целом по Украине больше, чем в 8 раз, а по Харьковской области – в 7,6 раза. При этом рост товарной продукции отрасли растениеводства в Украине превышал 10 раз, а товарной продукции животноводства – 4,3 раза. В Харьковской области аналогичные показатели составляли – 9,8 и 4,5 раза соответственно [1]. Таким образом, видно более чем двукратную разницу темпов изменения объемов реализации продукции между отраслями растениеводства и животноводства. Это повлияло непосредственно на структуру производимой товарной продукции.

В целом по Украине, удельный вес отрасли растениеводства увеличился за анализируемый период с 57,8 % до 77 % или увеличился на 19,2 %. В это же время, удельный вес отрасли животноводства уменьшился с 34,8 % до 18,7 % или на 16,1 % [1].

Что касается предприятий Харьковской области, то здесь тенденция была подобной. Удельный вес отрасли растениеводства увеличился на 17 %, а животноводства – на 14,3 % [1].

Данная тенденция имеет под собой целый ряд проблемных моментов. В результате ее действия, во-первых, увеличилась сезонность производства в сельском хозяйстве – это в свою очередь приводит к увеличению вариативности в поступлениях и затратах денежных средств предприятий, что заставляет их обращаться за кредитами в банк. Кроме того, много работников после окончания уборки урожая фактически теряют рабочие места или получают минимальную заработную плату.

Во-вторых, ориентация большинства предприятий на производство именно продукции растениеводства позволяет оптимизировать структуру посевных площадей. Зачастую, вместо 5–8 культур севооборот, как правило, состоит из 2–3 культур, это приводит к истощению почвы.

В-третьих, вследствие уменьшения удельного веса животноводства, существенно уменьшается и количество занятого населения в селе. Это приводит к оттоку населения с мест проживания в поисках заработка, что порождает уже социальную проблему на уровне государства.

**Вывод.** Эффективность деятельности АПК тесно связана с функционированием всех его отраслей и зависит от многих факторов. Высокоэффективное производство сельскохозяйственной продукции в перспективе может быть

обеспечено только при условии комплексного и системного пересмотра всех связующих звеньев в инновационной отраслевой структуре сельского хозяйства страны.

**Список литературы:** 1. Государственный комитет статистики Украины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua>. 2. Погрищук Б.В. Стратегический подход к организации отраслевого развития агропромышленного комплекса / Б.В. Погрищук, А.И. Гончаренко // Агросвіт. – 2013. – №19. – С.13–16. 3. Нелеп В.М. Тенденции развития сельского хозяйства в Украине и мире / В.М. Нелеп // Экономика АПК. – 2015. – №7. – С. 100–105. 4. Шпычак О.М. Реальная оценка экономического состояния АПК Украины как необходимое условие выхода его из кризиса / О.М. Шпычак // Экономика АПК. – 2011. – №5. – С. 24–29.

УДК 621.923

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ВОДИ ЛВ-4Т

**Плеханова Т.Є.**, студентка 2 року магістратури  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця)

*The article analyzes the components of the 4-tariff electronic water meter, its main characteristics and advantages over mechanical counter value calculation method for the consumption of hot water and Term of payback is calculated for different population groups*

Сьогодні існує необхідність у контролі та обліку витрат холодної (питної і технічної) та гарячої води як на промислових об'єктах, так і в господарських та домашніх умовах. Зазвичай для такої мети використовуються стандартні звужувальні пристрої з диференціальними манометрами, або механічні лічильники, наприклад, типу СГВ-1Г. Проте для одних характерна низька надійність роботи електронних блоків перетворювачів, а для інших вихід із ладу механічної частини.

Крім того, ці пристрої, маючи похибку порядку 5–10 %, не забезпечують необхідної точності вимірювання і з часом потребують держперевірки.

Але для сучасних пристроїв обліку води пред'являються перераховані нижче вимоги: здійснювати контроль температури гарячої води з метою розрахунку її вартості за тарифом, який відповідає конкретній температурі; здійснювати облік витраченої гарячої та питної води впродовж доби та зберігати результати в енергонезалежній пам'яті; розраховувати вартість та статистику витрат, які повинні зберігатися за поточний місяць по днях та за поточний рік по місяцях; давати можливість вводу поточного часу, дати, тарифів на питну та гарячу воду, причому на гарячу воду потрібно передбачити ввід даних для температур в діапазоні від 50 °С до 90 °С; мати індикацію та пульт керування.

Лічильник води 4-х тарифний електронний ЛВ-4Т призначений для вимірювання спожитого обсягу води, з одночасним контролем якості її підігріву. Комплект складається з 4 елементів, що представлені на рис. 1 – 4.

На рис. 5 представлений загальний вигляд ЛВ-4Т. Електроживлення автономне; термін служби батареї 6–8 років. Допустимі відхилення точності

лічильника води при вимірюванні об'єму: у верхньому діапазоні вимірювання  $Q_t - Q_{max} \pm 2 \%$ ; в нижньому –  $Q_{min} - Q_t \pm 5 \%$ . Межа абсолютної похибки при вимірюванні температури гарячої води  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Рис. 1. Електронний обчислювач, ЛВ



Рис. 2. Цифровий датчик температури DT05 в захисній гільзі



Рис. 3. Перетворювачі витрати – ПРГ для установки на трубопроводі гарячого водопостачання



Рис. 4. Перетворювач витрати – ПРХ для установки на трубопроводі холодного водопостачання (за замовленням)



Рис. 5. Лічильник води 4-тарифний електронний

Значення обсягу фіксується наростаючим підсумком.

- У осередок «V гв» записується спожитий обсяг гарячої води без урахування її температури.

- У осередок «V СГВ» записується скоригований по температурі об'єм води з відповідних тарифних осередків температури:

- з тарифної осередку «V<40» значення не враховуються;

- з тарифної осередку «V<45» значення враховуються з коефіцієнтом 0,7;

- з тарифної осередку «V<50» значення враховуються з коефіцієнтом 0,9;

- з тарифної осередку «V>50» значення враховуються з коефіцієнтом 1,0.

У табл. 1 представлено розрахунок терміну окупності для різних груп населення.

Таким чином, у статті було проаналізовано складові частини 4-х тарифного електронного лічильника води, його основні характеристики та переваги над

механічним лічильником, спосіб нарахування вартості за споживання гарячої води, а також розраховано строк окупності для різних груп населення.

Таблиця 1

Розрахунок терміну окупності

№	Споживачі	Середнє споживання гарячої води, м <sup>3</sup>		Вартість гарячої води за місяць, грн.		Вартість гарячої води за рік, грн.		Річна різниця, грн.	Термін окупності, рік
		місяць	рік	Механічні лічильники	ЛВ-4Т	Механічні лічильники	ЛВ-4Т		
1	2 пенсіонери	3	36,0	48,15	31,56	577,8	378,72	199,08	3,1
2	Молода пара	4	48,0	64,2	42,08	770,4	504,96	265,44	2,34
3	Родина з 3 людей	5	60,0	80,25	52,6	963	631,2	331,8	1,87
4	Родина з 5 людей	8	96,0	128,4	84,16	1540,8	1009,92	530,88	1,17

*Науковий керівник канд. техн. наук Стрельчук Р.М.*

**Список літератури:** 1. <http://www.hts.kharkov.ua> 2. <http://vodomer.kiev.ua/lv-4t-goryachaya-eto-goryachaya/> 3. [http://hgcsm.kharkov.ua/lv-4t/effekt\\_rus.htm](http://hgcsm.kharkov.ua/lv-4t/effekt_rus.htm) 4. <http://teplokom.com.ua/mnogotarifnye-schetniki/lv-4t.html>

### 3. ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 378.14:004.9

#### **ТЕСТЫ С ВОССТАНАВЛИВАЕМЫМИ ФРАГМЕНТАМИ КАК ИНСТРУМЕНТ ДИАГНОСТИКИ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ**

**Петков А.А.**, докт. техн. наук  
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

*The paper discusses the use of computer tests with recoverable fragments as a diagnostic tool to determine the residual knowledge level of residual knowledge. Experimental data on the change of residual knowledge over time*

Остаточные учебные знания являются конечной целью любой образовательной системы [1] и, в первую очередь, системы высшего образования. Но в связи с тем, что на данном этапе отсутствуют единые рекомендации, проверка остаточных знаний студентов проводится в высших учебных заведениях различными способами. Как отмечается в работе [2], «*При всей видимой простоте вопросы проверки остаточных знаний весьма многогранны и нередко противоречивы. Они требуют глубокого серьезного осмысления. Это очевидно для многих, и в ряде вузов страны ведется аналитическая работа в данном направлении*». В данной работе предложен вариант оценивания остаточных знаний с использованием компьютерных тестов с восстанавливаемыми фрагментами (ТВФ) [3].

Пусть имеется некоторая ограниченная область знаний, подлежащая изучению респондентом. Как известно [1], с момента окончания изучения, без повторения изученного учебного материала, объем знаний из данной области, выявляемый респондентом при контроле, будет с течением времени только убывать и асимптотически стремиться к нулю. Пусть также имеется средство контроля, которое с наперед заданной точностью позволяет определить часть воспроизводимого при контроле материала и сопоставлять ее с полным объемом изученного материала. Отношение этой части к полному объему будем характеризовать коэффициентом  $K$ . Если респондент проявил при контроле знание всего материала, то коэффициент  $K = 1$ , при полном отсутствии знаний значение коэффициента  $K = 0$ . Графически процесс «потери знаний» с течением времени представлен на рис. 1, а монотонно ниспадающей кривой (в предположении, что на момент окончания обучения  $T = 0$  респондент усвоил знания в полном объеме  $K = 1$ ).

Рассмотрим следующие варианты организации контроля знаний.

**Вариант №1.** После истечения времени от окончания изучения  $T_1$  проведен контроль знаний респондента, который соответствует коэффициенту  $K_1$ . Данный вариант теоретически позволяет ответить на вопрос: «Какой уровень остаточных знаний у респондента на момент  $T_1$ ?». При этом мы получаем информацию об «абсолютном знании» респондента вне зависимости от того, ка-

кой уровень знаний был у респондента на момент окончания изучения контрольного материала. Реальным прототипом данного варианта контроля является практикуемая в последнее время проверка знаний при приеме на работу и повторная проверка результатов внешнего независимого тестирования, проводимая учебными заведениями. В первом случае имеется значительная личная мотивация на успех, однако реально контроль проводится не в полном объеме. Во втором случае, имеется большая вероятность того, что респондент не будет прикладывать значительные усилия для выполнения заданий в виду того, что никаких последствий для него этот контроль не имеет (отсутствует мотивация), при этом возникает проблема достоверности результатов контроля.

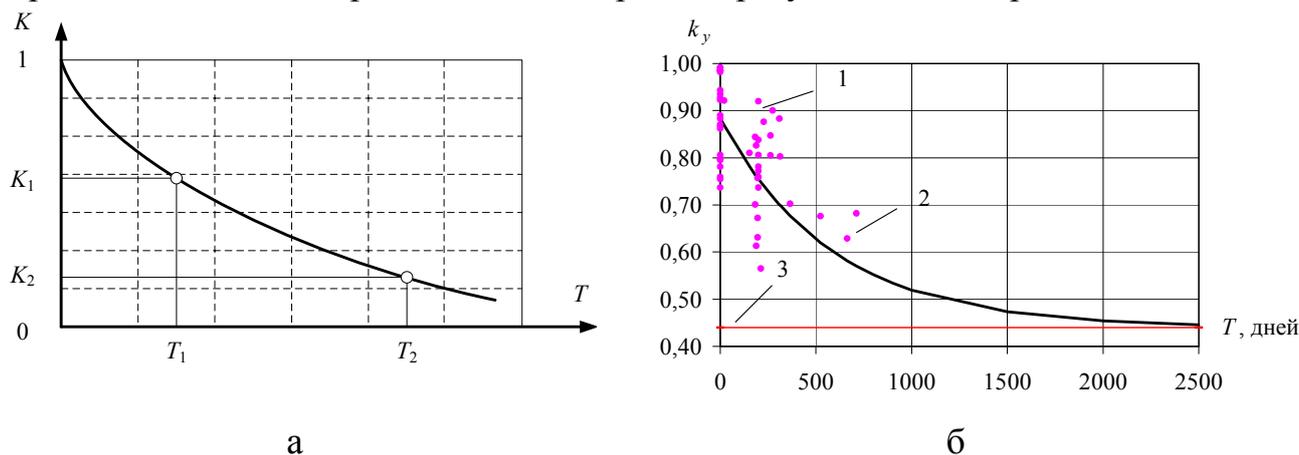


Рис. 1. Изменение коэффициента усвоения во времени: 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая зависимость; 3 – уровень значения коэффициента усвоения для варианта случайного выбора ( $k_{ysl}$ )

По **варианту №2** контроль проводится в два этапа. Первый этап соответствует зачетному контролю после изучения материала (на рис. 1,а  $T = 0$ , при этом в общем случае  $K \leq 1$ ) и обладает существенной личностной мотивацией, так как его оценивание в значительной мере влияет на статус респондента. Второй этап проводится в произвольный момент времени (на рис. 1,а  $T = T_1$ ) без какой-либо подготовки (прототипом является процедура контроля остаточных знаний в учебном заведении по изученным предметам). Данный вариант контроля позволяет ответить на вопрос: «Как изменились знания за прошедший период (между двумя контролями)?». Результаты именно этого варианта могут быть использованы для анализа деятельности учебного заведения. Однако, как и в первом варианте, остается открытым вопрос достоверности результата повторного контроля знаний в виду отсутствия мотивации его выполнения у респондентов.

Возможен контроль по **варианту №3**, который также проводится в два этапа в моменты времени после изучения контролируемого материала  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. 1,а) без какой-либо предварительной подготовки. Полученные данные позволяют определить степень «забывания» приобретенных знаний. Преимущество рассмотренного варианта заключается в том, что исключается эффект высокого уровня кратковременного запоминания контролируемого материала

перед зачетным контролем. Недостатком – проблема достоверности результатов контроля в виду отсутствия у респондента мотивации его выполнения. Конечно, утверждать, что все респонденты отнесутся безответственно к проведению незачетного контроля нельзя, но при отсутствии мотивации или наличии слабой мотивации необходимо пользоваться специальными методами статистического анализа, определяющими значительно отклоняющиеся данные [4].

Одним из средств контроля теоретических знаний ограниченной области являются ТВФ, которые обладают достаточной надежностью и абсолютной валидностью [3] при проверке теоретических знаний на уровне воспроизведения, которая имеет место при контроле «остаточных знаний».

Процедура диагностики остаточных знаний с использованием ТВФ имеет свои особенности и включает фиксирование коэффициентов усвоения, определенных после изучения контрольного материала и по истечении некоторого времени без специальной подготовки к тесту, и обработки полученных данных.

Таким образом, процесс диагностики остаточных знаний конкретного респондента с использованием ТВФ характеризуется следующими параметрами:  $T$  – промежутком времени между первым (зачетным) выполнением теста, проводимого после изучения контрольного материала и моментом выполнения теста с целью диагностики остаточных знаний;  $k_y(0)$  – значением коэффициента усвоения в момент первого (зачетного) выполнения теста (начальный коэффициент усвоения);  $k_y(T)$  – значением коэффициента усвоения при выполнении теста через промежуток времени  $T$  (остаточный коэффициент усвоения).

С точки зрения определения оставшихся знаний у конкретного респондента наиболее существенным параметром является значение остаточного коэффициента усвоения. Он позволяет оценить готовность респондента к дальнейшему обучению с использованием в качестве базы контрольного материала (для студентов) и целесообразность привлечения в качестве работника в области, использующей знания, охватываемые контрольным материалом (для специалистов). Остальные параметры процесса диагностики определяют динамику изменения объема оставшихся знаний, что *косвенно* определяет ряд личностных качеств респондента.

В общем случае для группы респондентов значения коэффициентов усвоения  $k_y(0)$  и  $k_y(T)$  имеют случайный характер, также может отличаться и время  $T$  (неодновременный контроль остаточного коэффициента усвоения различных респондентов). Это затрудняет анализ изменения уровня знаний для всей совокупности респондентов.

В силу особенностей ТВФ, пределом уменьшения коэффициента усвоения будут его значения, получаемые при случайном выборе предъявляемых в задании вариантов –  $k_{ysl}$ . Тогда можно предположить, что изменение значений коэффициента усвоения определяется по выражению

$$k_y = k_{ysl} + [k_{ycp}(0) - k_{ysl}] \exp(-\beta T), \quad (1)$$

где  $k_{ycp}(0)$  – средний коэффициент усвоения, определенный в момент зачетного тестирования.

На рис. 1,б показано изменение коэффициента усвоения во времени для группы 26 студентов. Представленные на рисунке данные были получены с использованием тестов, описанных в [3]. Определение остаточного коэффициента усвоения  $k_y(T)$  производилось без предварительного уведомления респондентов, что дает основание считать их действительным уровнем оставшихся знаний. Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы кривой, описываемой выражением (1) при  $k_{ysl} = 0,44$  и  $k_{y\text{ cp}}(0) = 0,885$  (экспериментальные данные). В результате обработки данных получено следующее аппроксимирующее выражение:

$$k_y = 0,44 + 0,445 \exp(-0,0017T). \quad (2)$$

Как видно из рис. 1,б, в среднем по группе студентов знания полностью «теряются» (отличие  $k_y$  от  $k_{ysl}$  составляет не более 1%) примерно через 7 лет. Используя соотношение (2) можно определить, что зачетный уровень знаний ( $k_{y\text{ зач}} \geq 0,75$ ) поддерживается в течение периода  $T_{\text{зач}} = 210$  дней. Достаточность (или недостаточность) данного значения требует отдельного рассмотрения. Следует отметить, что при использовании приобретенных знаний (например, при изучении смежного курса) респондент, так или иначе, производит «повторение» изученного материала. Если через  $T_{\text{зач}}$  производить повторение материала, то можно поддерживать знания на зачетном уровне.

Возможен вариант, когда предметом контроля являются четко очерченные знания, например, при поступлении на определенную должность. В этом случае целесообразно указать объем этих знаний, как требования при приеме на работу. Понятно, что при этом интересуют знания, которыми владеет респондент в момент аттестации на должность.

### **Выводы.**

Тесты с восстанавливаемыми фрагментами могут использоваться для диагностики изменения уровня знаний с течением времени, как в условиях их неиспользования (хранения), так и их применения в учебной или практической деятельности.

Экспериментально подтверждено, что уровень знаний с течением времени убывает по экспоненциальному закону до уровня случайного ответа на вопросы.

Использование ТВФ позволяет контролировать как абсолютные значения уровня знаний, так и их динамику в процессе «забывания» конкретного респондента индивидуально и группы респондентов в целом.

**Список литературы:** 1. Ясінський В. В. Дослідження еволюції залишкових знань у великих навчальних системах [Електронний ресурс] / В.В. Ясінський, А. О. Болдак // Системні дослідження та інформаційні технології, 2012. – №3. – С.66–73. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/jpdf/sdtit\\_2012\\_3\\_8.pdf](http://nbuv.gov.ua/jpdf/sdtit_2012_3_8.pdf) 2. Балабан В. Об остаточных знаниях студентов [Электронный ресурс] / В. Балабан. – Режим доступа: [http://www-old.informika.ru/text/magaz/higher/4\\_96/3raz-4.html](http://www-old.informika.ru/text/magaz/higher/4_96/3raz-4.html). – Название с экрана. 3. Петков О.О. Діагностичні характеристики комп'ютерних тестів, які формуються за методом відновлюваних фрагментів [Електронний ресурс] / О.О. Петков // Інформаційні технології і засоби навчання, 2013. – №1 (33). Режим доступу: <http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/download/779/582> 4. Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии / Е. В. Сидоренко. – СПб.: ООО "Речь", 2003. – 350с. – ISBN 5-9268-0010-2.

## **МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА – “УЗКОЕ МЕСТО” В ПЛАНИРОВАНИИ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛИ**

**Новиков Д.Ф.**

(Научный Центр НТК “Эльбор”, г. Харьков)

*The technologies used in machining solve a lot of problems, bringing the production of parts to the next level, but do not solve a major problem - reducing to a minimum the cost of production. Many technicians do not consider the actual economic performance of their activities*

В процессе проектирования и конструирования новой детали определяется себестоимость ее изготовления, на основании которой анализируется эффективность выпуска данной детали. После же запуска в производство себестоимость изготовления детали может постоянно изменяться как от внутренних, так и от внешних факторов.

Спрогнозировать затраты на производство одной детали полностью невозможно. Можно спрогнозировать затраты на сырье и комплектующие, т.к. масса заготовки указана в чертеже детали или ее легко можно определить по известным формулам. Затраты на заработную плату основных рабочих рассчитываются на основании машинного и вспомогательного времени. Зная величину машинного времени, рассчитываются затраты на электроэнергию для оборудования и смазочно-охлаждающей жидкости. Остальные затраты в основном рассчитываются пропорционально сумме затрат на сырье, заработную плату, металлорежущие инструменты, электроэнергию и смазочно-охлаждающие жидкости [1, 2].

Наибольшую проблему в расчете затрат составляют затраты на металлорежущие инструменты. В прошлом столетии в основном использовали отечественные инструменты, регламентированные ГОСТами, изученные на основе проведения многочисленных испытаний и описанные в справочниках по использованию каждого вида инструмента на разных операциях и в разных условиях. С помощью данных из справочников можно было устанавливать оптимальные режимы резания, прогнозировать стойкость инструмента. Все это позволяло перед началом обработки детали знать норму расхода инструмента, на основе которой определялись затраты на инструмент.

В настоящее время в индустриально развитых странах созданы и изготавливаются принципиально новые конструкции режущих инструментов, которые по своим техническим характеристикам превосходят отечественный инструмент. Этот инструмент уже около 15 лет активно используется на отечественных предприятиях и позволяет им получать прибыль. Но за весь период применения импортного инструмента получено мало информации об его технологических возможностях. Зарубежные производители всю основную техническую информацию о материале инструмента, о покрытии и способах нанесе-

ния засекречивают, ссылаясь на коммерческую тайну. Потребитель получает информацию о наименовании покрытия и материала в виде кодированного обозначения (например: материал CVD, покрытие T9105). Потребитель, получив данные об инструменте в виде такого обозначения, понимает, что данный инструмент производится в Японии предприятием Tungaloy, сплав предназначен для точения стали с минимальным содержанием углерода и без дополнительных добавок.

Производитель в знак “доброй воли” указывает диапазон режимов резания, с помощью которых можно достичь максимальной производительности, не теряя при этом режущей способности инструмента. Но, как показала практика внедрения инструментов на отечественных предприятиях, весьма малое количество оборудования способно выполнять обработку в диапазоне рекомендуемых режимов резания из-за большого износа основных фондов предприятий. При этом установлено, что, применяя рекомендуемые режимы резания на современном оборудовании, статья затрат на инструмент повышается и перекрывает эффект от увеличения производительности и производственных мощностей в целом по предприятию.

Часто встречается ситуация, что применяются режимы резания такие же, как и при использовании отечественного инструмента или увеличенные в два раза. В результате такого подхода к организации производственного процесса качество обработки детали и стойкость инструмента повышаются. Это позволяет уменьшить потери от брака, снизить затраты на приобретение инструмента, уменьшая тем самым себестоимость готовой детали. Если же новые режимы резания позволяют увеличить производительность, то в значительной степени снижаются затраты на заработную плату основных рабочих и социальные отчисления.

Исходя из этого, возникает два вопроса: почему именно эти режимы резания, а не другие, и что будет при других режимах резания, какова будет стойкость инструмента?

В данный момент ответить на вопрос – какова стойкость конкретного инструмента на конкретных режимах резания при обработке конкретной детали – никто не может. Исходя из многолетней практики внедрения инструмента определенного производителя, технологи поставщика могут лишь приблизительно сказать о стойкости инструмента на основании полученных опытных данных.

Выбор режимов резания в основном происходит исходя из поставленной задачи, однако практически всегда сводится к одному – показать лучший результат по сравнению с конкурентами [3]. При таком подходе к установлению режимов резания потребитель получает несовершенные режимы резания, что не позволяет получить максимальную экономическую эффективность обработки.

Многие попытки создать автоматизированные системы управления производством оставались нереализованными или же реализовывались, но не полностью. Проблемы реализации автоматизированных систем, а так же выбор

оптимальных режимов резания, при которых может достигаться максимальный экономический эффект, в основном состоит в невозможности прогнозировать норму расхода металлорежущего инструмента. Т.е. получается, что при составлении затрат на производство детали, установить точную величину себестоимости невозможно. Она определяется лишь после осуществления механической обработки детали и подсчета реально истраченных средств во время обработки.

Исходя из невозможности определить точную величину затрат на инструмент, фактически невозможно максимально точно спрогнозировать величину *необходимого* инструмента, который требуется закупить. Из-за этого у предприятия возникают два варианта: иметь финансовый резерв на случай экстренной закупки недостающего инструмента или же опираться на имеющиеся средства в каждой конкретной ситуации. Если же опираться на второй вариант, то не всегда предприятие сможет экстренно закупить недостающий инструмент в необходимом количестве.

Сбои в поставке инструмента на рабочее место создают сбои и в выполнении плана обработки партий деталей, что ведет к сбою всей производственной цепочки. Оперативно решая проблему недостачи инструмента, часто возникает ситуация, когда применяется инструмент, не позволяющий обеспечить качественную обработку детали, и за счет этого себестоимость изготовления детали увеличивается.

Система снабжения на промышленных предприятиях построена недостаточно эффективно, т.к. она не позволяет обеспечить производство по принципу “Точно вовремя” [4]. Из-за нарушения одного звена в системе снабжения может разрушиться вся система предприятия.

Решением проблемы снабжения предприятий могут быть следующие направления деятельности предприятий:

- импортозамещение металлорежущего инструмента;
- более глубокое изучение технических возможностей зарубежных инструментов за счет новых подходов к их использованию.

К сожалению, направление, связанное с импортозамещением металлорежущего инструмента, в данный момент времени практически невозможно, т.к. отечественная инструментальная промышленность не в состоянии конкурировать с зарубежными производителями и производить инструмент, отвечающий мировым требованиям качества.

Более глубокое изучение технических возможностей инструментов является более реальным. Основной проблемой в этом направлении является нежелание крупных инструментальных предприятий государства заниматься данным вопросом. При этом ученые-энтузиасты не могут произвести полноценное изучение технических возможностей зарубежных инструментов из-за отсутствия статистических данных работы инструментов на разных режимах резания на разных операциях. Полномасштабный контакт ученых и инструментальных предприятий практически невозможен из-за нежелания последних раскрывать информацию, которую они считают коммерческой. Крайне редко удается получить информацию о работе инструмента от инструментальных или от промыш-

ленных предприятий. Собирая такую информацию, специалистам НТК “Эльбор” удалось разработать новый подход к выбору оптимальных режимов резания для современного инструмента.

Предложенный подход к выбору режимов резания позволяет решить многие проблемы, описанные выше. Появилась возможность прогнозировать норму расхода инструмента до начала его использования. Выбранные режимы резания основаны не только на технических, но и на экономических факторах.

Необходимость учета экономических факторов при выборе режимов резания обусловлена изменением внешней среды. Отечественная экономика уже много лет функционирует в условиях рынка, на котором выживает сильнейшее предприятие. Для этого необходимо применять технологии, позволяющие минимизировать затраты на производство.

Традиционный подход к выбору режимов резания (который используется в данный момент на всех предприятиях) предусматривает ситуацию, когда изготовленный товар обязательно приобретут и за его реализацию не нужно бороться. Устанавливаются режимы резания, которые позволяют быстро и качественно выполнить обработку. Многие технологи считают, что фактор себестоимости производства не влияет на работу инструмента. Поэтому более чем 95 % всех режимов резания, которые используются в производстве, эффективны только с технической точки зрения. При этом экономическая эффективность не является максимальной.

Как показали результаты исследований режимов резания, рассчитанных специалистами НТК “Эльбор” и НТЦ “Ди Фокус Менеджмент”, при дополнительном учете соотношения цены инструмента и тарифной часовой ставки основного рабочего, предприятие способно сократить себестоимость металлообработки от нескольких процентов до нескольких раз. При этом не требуется вложения дополнительных средств. Новый подход позволяет минимизировать “слепое” копирование зарубежных технологий, которые были разработаны под экономику иностранных государств. Специалисты же НТК “Эльбор” и НТЦ “Ди Фокус Менеджмент” на основании анализа технического и экономического состояния предприятия, а так же экономической ситуации в государстве, разрабатывают технологии металлообработки, которые наиболее эффективны для конкретного предприятия.

**Список литературы:** 1. Гриньова В.М. Організація виробництва: підручник / В.М. Гриньова, М.М. Салун М.М. – Х.: ВД “ІНЖЕК”, 2007. – 576 с. 2. Новиков Д.Ф. Инвестиционная деятельность при модернизации машиностроительных предприятий / Д.Ф. Новиков // Труды 19-й Международной научно-практической конференции “Физические и компьютерные технологии”. – Харьков: ГП ХМЗ “ФЭД”, 2014. – С. 153-156. 3. Кленов О.С. Условия эффективного применения современных режущих инструментов на машиностроительных предприятиях / О.С. Кленов, Д.Ф. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 188-192. 4. Имаи Масааки. Гемба кайдзен: Путь к снижению затрат и повышению качества / Масааки Имаи; пер. с англ. – М.: «Альпина Бизнес Букс», 2005. – 346 с.

## ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

**Оспищева А.К.** (Фирма “ДиМерус Инженеринг” ООО, Харьков)

**Новиков Д.Ф.** (Научный Центр НТК “Эльбор”, г. Харьков)

*The technique of determining cost-effective machining conditions, taking into account changes in exchange rates*

В результате политических событий в начале 90-х годов прошлого столетия отечественные разработки металлорежущего инструмента остановились. В течение 10-летнего застоя в промышленности отечественное станкостроение и производство инструментов в значительной степени отстало от развитых стран. Зарубежные производители инструментов смогли осуществить мощный рывок в исследованиях и разработках за счет уменьшения конкуренции на мировом рынке, а так же из-за притока в эти страны специалистов из бывшего СССР. В последнее десятилетие отечественная промышленность начала восстанавливаться, опираясь на имеющийся огромный советский опыт и производственные мощности. Для возможности выйти на мировой уровень производительности и качества предприятия массово проводят модернизацию мощностей. Одно из необходимых условий модернизации – применение современных металлорежущих инструментов. В связи со слабо развитым отечественным рынком производства инструментов многие предприятия приобретают инструмент зарубежного производства.

Зарубежный инструмент показал свою эффективность по сравнению с отечественным инструментом. Благодаря его использованию в значительной степени удалось уменьшить трудоемкость обработки деталей (вспомогательное и подготовительно-заключительное время) и затраты на приобретение инструмента. Вместе с тем, недостаточные знания технологических возможностей зарубежных инструментов ограничивает его широкое применение. Так, многие технологи на предприятиях при определении режимов резания и других параметров обработки опираются на опыт применения советского инструмента и используют справочники, разработанные для этих инструментов. Поэтому, применяя рекомендуемые условия металлообработки для отечественного инструмента, предприятия получают экономический эффект, который является лишь небольшой частью от максимально возможного [1].

Основными критериями при расчете режимов резания являются: максимальная точность, качество обработки, минимальное время обработки. Применение этих критериев было целесообразно при планово-административной экономике, когда необходимо было выполнить как можно быстрее установленный план, не обращая внимания на затраты предприятия при этом. В современной рыночной экономике главным фактором производства выступает себестоимость изготовления продукции и поэтому рассмотрение экономических факто-

ров при расчете режимов резания является необходимым. Однако вследствие того, что на предприятиях технологи, мастера, наладчики и рабочие рассматривают экономические вопросы не во взаимосвязи с производственными вопросами, себестоимость выпускаемой продукции потенциально завышена.

С приходом на украинский и российский рынки зарубежного режущего инструмента некоторые инжиниринговые предприятия совместно с учеными начали исследовать влияние условий применения нового инструмента на экономические результаты промышленных предприятий. В итоге разработана методика определения стойкости инструмента с учетом минимальной себестоимости обработки отдельной операции. На основании определения стойкости инструмента определяются режимы резания и другие параметры обработки.

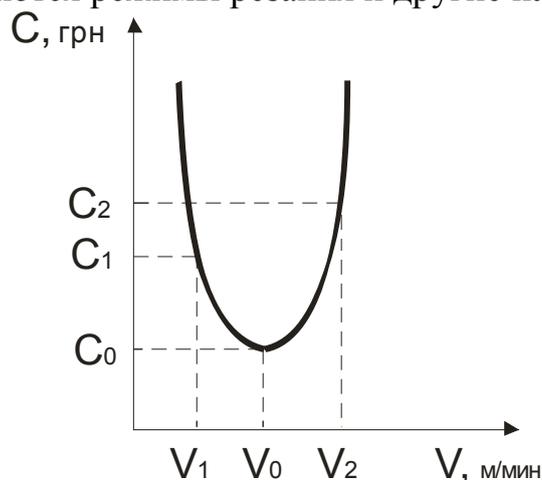


Рис. 1. Характер изменения себестоимости обработки

В процессе исследований было выявлено, что себестоимость обработки при изменении скорости резания представляет собой кривую в виде параболы (рис. 1), причем для каждого инструмента характер изменения себестоимости обработки разный [2]. В условиях резкого скачка курса валют себестоимость продукции увеличивается за счет увеличения затрат на импортный инструмент и импортное сырье. Уровень роста себестоимости зависит от величины импорта в структуре товара.

Увеличение затрат на инструменты влияет на технологическую себестоимость продукции (затраты на заработную плату основных рабочих и социальные отчисления, затраты на инструменты и электроэнергию для технологических нужд). Затраты на электроэнергию ниже других статей затрат, поэтому ими при расчетах технологической себестоимости можно пренебречь.

В табл. 1 приведены основные затраты, составляющие технологическую себестоимость 100 нормо-часов производства одного вида деталей при одинаковых режимах резания, но разных курсах валют. В расчетах используется: часовая заработная ставка рабочего – 20,0 грн., социальные отчисления – 38% от размера заработной платы, стоимость 1 режущей кромки сменной металлорежущей пластины (СМП) – 2,7 доллара США, стоимость державки – 247 долларов США (стойкость – 400 кромок СМП). Стойкость 1 режущей кромки СМП – 2,5 часа.

Таблица 1

Технологическая себестоимость 100 нормо-часов обработки деталей, грн.

Курс доллара США	Затраты на заработную плату основных рабочих	Затраты на социальные отчисления основных рабочих	Затраты на державку	Затраты на СМП	Всего
8,1	2000,00	760,00	200,07	874,80	3834,87
24,0	2000,00	760,00	592,80	2592,00	5944,80

Из расчетов, приведенных в табл. 1, видно, что при увеличении курса валют на 196 %, технологическая себестоимость 100 нормо-часов увеличилась на 55 %. На рынке с высокой конкуренцией повышение себестоимости изготовления детали на 17,6 % приводит к тому, что выпускаемая продукция неконкурентоспособна. В результате предприятие-производитель несет убытки.

Решением данной проблемы может стать использование методики, описанной выше. Методику предоставляет предприятие “НТК “Эльбор”, которое уже более 25 лет занимается внедрением новых технологий на промышленных предприятиях. Используя эту методику, можно рассчитать режимы резания и другие условия обработки с учетом изменения курса валют без уменьшения производительности.

В табл. 2 приведены результаты расчетов технологической себестоимости 100 нормо-часов обработки деталей с учетом применения предложенной методики для тех же исходных данных, которые приведены в табл. 1. Стойкость сменной металлорежущей пластины (СМП) с применением новых режимов резания составляет 4,5 часа.

Таблица 2

Технологическая себестоимость 100 нормо-часов обработки деталей, грн.

Курс доллара США	Стойкость, час	Затраты на заработную плату основных рабочих	Затраты на социальные отчисления основных рабочих	Затраты на державку	Затраты на СМП	Всего
8,10	2,5	2000,00	760,00	200,07	874,80	3834,87
24,00	4,5	2000,00	760,00	329,33	1438,56	4527,89

Из табл. 2 видно, что за счет применения новой методики расчета режимов резания с учетом изменения курса валют, технологическую себестоимость не удалось вывести на прежний уровень, но удалось значительно уменьшить ее рост с 55 % до 18 %, при этом производительности обработки осталась неизменной.

**Список литературы:** 1. Новиков Д.Ф. Инвестиционная деятельность при модернизации машиностроительных предприятий / Д.Ф. Новиков // Физические и компьютерные технологии: Труды 19-й Международной научно-практической конференции. – Харьков: ГП ХМЗ “ФЭД”, 2014. – С. 153–156. 2. Новиков Д.Ф. Уменьшение себестоимости производства изделий путем применения новых технологий металлообработки / Д.Ф. Новиков, А.К. Оспишева // Современная наука: проблемы, инновации, решения: материалы междунар. научн.-практ. конф. (Курск, 27-28 февраля 2014 года), Курский институт социального образования (филиал) РГСУ, Инженерно-технический факультет. – Курск: ООО “Учитель”, 2014. – С. 52–55.

## ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ПРИГОТУВАННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ

**Кібець М.М.**, студентка 1 року магістратури  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця)

*The work provides preparation of concrete mix*

З кожним роком збільшується різноманітність бетонів, які використовуються у сучасному будівництві. Бетон як будівельний матеріал був відомий людству давно. З бетону будували конструкції різного призначення: склепіння, куполи, мости тощо.

Цементуючу роль в бетоні на ранній стадії його застосування виконували глина, гіпс, вапно, асфальт, а пізніше – гідравлічне вапно і роман-цемент. Спочатку глину застосовували без обпалювання, а пізніше почали з'являтися в'язучі речовини, обпалені у середовищі невеликих температур: 120–200 °С. Однією з перших таких речовин був гіпс, потім вапно [1].

Значний внесок у теорію бетону зробили такі вчені, як Є. Челієв, Дж. Аспдін, І. Г. Малюга. Їх праці «Трактат об искусстве изготовлять хорошие строительные растворы», «Склад і спосіб приготування цементного розчину (бетону) для одержання найбільшої міцності» дозволили вивчити властивості та технологію виготовлення бетону. Приготування бетонної суміші відбувається у бетонозмішувальних вузлах (БЗВ), бетонозмішувальних цехах або бетонозмішувальних відділеннях. До складу БЗВ входять: склади заповнювачів, в'язучих, добавок, пристроїв для їх підготовки, надбункерне, бункерне, дозаторське, змішувальне відділення, відділення видачі готової суміші, система автоматики і необхідні транспортні засоби [3].

Бетоном називають штучний камінь, що утворюється внаслідок затвердження суміші в'язучої речовини, води, заповнювачів і, в разі потреби, добавок, взятих у певному співвідношенні. Суміш, до того, як затвердіє, називають бетонною. Цементи і вода після змішування в результаті хімічної реакції переходять з пластичного стану у твердий, утворюючи при цьому міцний цементний камінь. Заповнювачі в цій реакції, як правило, участі не беруть, але вони утворюють скелет бетонного каменю. Цементний камінь твердне і набуває міцності в природних умовах при додатніх температурах, а також у воді. Цементний розчин відіграє роль клеючої речовини, в якій відбуваються складні хімічні реакції з подальшим формуванням необхідної міцності бетону. Для одержання потрібної міцності бетону дуже важливо правильно вибрати марку цементу.

В'язучими матеріалами для бетонів служать різні види цементів. Як сировина для цементу застосовують вапняки, що мають у своєму складі глину в різній кількості. При відсутності глини інколи застосовують діатоміт, трепел, доменні шлаки, попіл та інші матеріали, близькі за хімічним складом до глини [2]. При виготовленні цементу спочатку подрібнюють вапняк та глину, а потім їх змішують. Після цього суміш подають у піч для спікання і одержують клін-

кер, який охолоджують та мелють, добавляючи до нього гіпс та гідравлічні добавки і отримують цемент. Після змішування цементу з водою одержують пластичне тісто, яке з часом загусає, поступово перетворюючись на цементний камінь. Це складний фізико-хімічний процес, наслідком якого є поява нових з'єднань.

При приготуванні бетонної суміші також застосовують заповнювачі, які необхідні: для підвищення міцності, зменшення стирання, регулювання маси тощо. Заповнювачі для бетону бувають природні та штучні. Як крупний заповнювач для важких бетонів застосовують щебінь, гравій і щебінь із гравію, як дрібний – крупні, середні і дрібні піски природні, природні подрібнені і подрібнені з відсівів та інше.

Для приготуванням бетонної суміші із легких бетонів використовують пористі неорганічні заповнювачі (керамзит, аглопорит, шлакова пемза, гранульований шлак, сполучені перліт і вермикуліт), а також заповнювачі із ніздрюватих гірських [1].

Декоративні заповнювачі бетону теж мають вагоме місце при виготовленні бетонної суміші (граніт, кольоровий і білий мармур). Їх використовують для зовнішнього і внутрішнього оздоблення поверхонь бетонних елементів будинків. Під час підбору заповнювача враховують його зерновий склад, щільність, міцність, морозостійкість, модулю крупності, вмісту пиловидних та глинистих часток, петрографічного складу тощо.

При приготуванні бетонної суміші не можна обійтися без додавання різних добавок у бетон (пластифікатори, повітровбирні та пороутворюючі, пластифікуючо-повітровбирні). Добавки для бетону застосовують для покращення властивостей бетонної суміші і бетону, зниження витрат цементу, трудових і енергетичних витрат. Добавки в бетон вводять лише після попередніх випробувань. Поряд із усіма заповнювачами та добавками не меншу роль при приготуванні бетонної суміші відіграє вода. Вода для приготування бетонної суміші, змочування тужавіючого бетону та промивання заповнювачів повинна задовольняти вимоги діючих стандартів [2].

Бетонну суміш слід якісно перемішувати у бетонозмішувачах, щоб вона не розшарувувалась під час транспортування, перевантаження, укладання; легко укладалась (ущільнювалась та не деформувалась при розпалубленні. Однорідна бетонна суміш повинна відрізнятися рівномірним розподілом всіх компонентів по всьому об'єму. Досягнення однорідності в процесі перемішування залежить від сил внутрішнього тертя, сил зчеплення між частинками, сили тяжіння, крупності заповнювача тощо. Крупнозерниста суміш перемішуються легше, ніж дрібнозерниста [3]. У зв'язку з цим існують різні способи перемішування матеріалів при приготуванні бетонної суміші: перемішування при вільному падінні матеріалів в барабанних (гравітаційних) змішувачах (рис. 1) та перемішування примусової дії (віброперемішування) (рис. 2).

Перемішування при вільному падінні матеріалів здійснюється в повільно обертових змішувальних барабанах з горизонтальною або похилою до горизонту віссю обертання. На внутрішніх стінках барабана насаджені по гвинтовій лі-

ні коритоподібні короткі лопаті, які захоплюючи при обертанні барабана окремі порції суміші, піднімають їх і при переході через крайні верхні положення скидають вниз. При цьому в результаті багаторазового підйому і падіння матеріалу відбувається його перемішування [1].

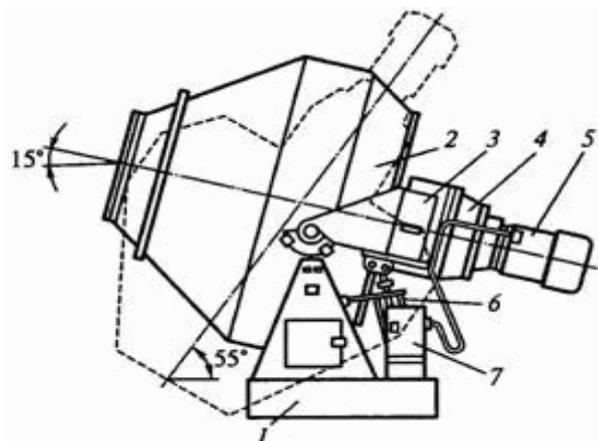


Рис. 1. Схема гравітаційного бетонозмішувача

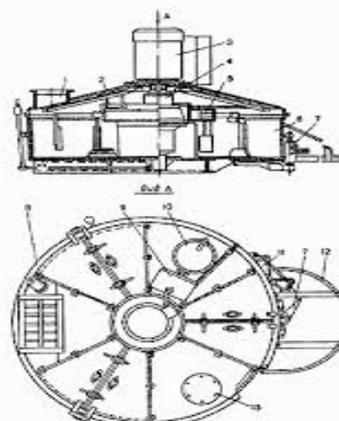


Рис. 2. Схема роботи віброзмішувача примусової дії

Віброперемішування полягає у впливі на суміш вібраційних імпульсів, що порушують сили тертя і зчеплення між частинками. При інтенсивних коливаннях корпусу у віброзмішувачі відбувається циркуляційне переміщення компонентів і значно підвищується однорідність сумішей.

Віброперемішування призводить до підвищення експлуатаційних властивостей як бетонної суміші, так і бетону. В якості віброзмішувачів застосовуються замкнуті барабани, які вчиняють кругові і еліпсоподібні коливання з амплітудою 4–5 мм.

Віброзмішувач працює значно продуктивніше за короткий час, ніж бетонозмішувач вільного падіння [2]. Отож, більш ефективно віброперемішування, оскільки воно зменшує тривалість технологічного циклу приготування бетону та підвищує якість змішування бетонних сумішей (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1

Тривалість змішування бетонних сумішей на пористих заповнювачах у стаціонарних бетонозмішувачах

Місткість змішувача по завантаженню, л	Тривалість змішування, с		
	В гравітаційних змішувачах для сумішей марок по легкоуладалності		
	Ж1, П1	П2	П3-П5
750 і менше	90	75	60
750 до 1500	120	105	90
Вище 1500	135	135	120

З даних таблиць видно, що при використанні віброзмішувача примусової дії тривалість змішування бетонних сумішей середньої щільності на пористих заповнювачах знижується та відбувається значно ефективніше.

**Тривалість змішування бетонних сумішей на пористих заповнювачах у  
віброзмішувачах примусової дії**

Місткість змішувача по завантаженню, л	Тривалість змішування (с) при середній щільності бетонної суміші, кг/м <sup>3</sup>				У змішувачах примусової дії для сумішей всіх марок по легкоукладальності
	1600 і більше	1400- 1600	1000- 1400	1000 і менше	
750 і менше	1050	120	150	180	50
750 до 1500	120	150	180	210	50
Вище 1500	135	180	210	240	50

Таким чином, на сьогоднішній день бетон є одним із найважливіших будівельних матеріалів та має найширше впровадження серед них, майже жодна споруда не зводиться без його застосування. Отож, для правильного застосування бетону особливе значення має технологія приготування бетонної суміші. А це – довгий та складний процес.

*Науковий керівник канд. техн. наук, проф. Крюк А.Г.*

**Список літератури:** 1. Шихненко І. В. Технологія бетонних робіт: навч. посіб. / І. В. Шихненко. – К.: Техніка, 2001. – 192 с. 2. Баженов Ю. М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций: підручник / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, У. Х. Магдеев. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 256 с. 3. Шишкин А. А. Технология монолитных бетонных и железобетонных конструкций: Монография / А. А. Шишкин, А. А. Шишкина. – Кривой Рог: Издательский центр ГВУЗ «КНУ», 2013. – 347 с.

УДК 625

**ТЕХНОЛОГІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА БУДІВЕЛЬ  
ІЗ ЗОВНІШНІМИ БАГАТОШАРОВИМИ  
ТЕПЛОЕФЕКТИВНИМИ СТІНАМИ**

**Шаповалова В.Д.**, студентка 1 року магістратури  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця)

*The work provides building construction*

Введення нових нормативів по теплозахисту огорожувальних конструкцій житлово-цивільних будинків та об'єктів іншого призначення зумовило перехід від зведення зовнішніх моношарових стін на основі штучних стінових матеріалів до зовнішніх теплоефективності багатошаровим конструкціям, який формується з несучого, теплоізолюючого і облицювального шарів. Залежно від поверховості будівлі, що зводиться і кліматичного поясу товщина такої багатошарової конструкції варіюється від 450 до 650 мм, що відповідає товщині і питомій витраті матеріалу в традиційних моношарових стінах, поступливих, однак, новим стін по теплозахисту в 3–4 рази.

Аналіз існуючих стінових матеріалів і технологій зведення багатошарових стін. Бетонні блоки виготовляються суцільними і порожнистими. Пустотілі камені можуть мати наскрізні порожнечі і порожнечі, перекриті зверху діафрагмою. Товщина зовнішніх стінок порожнистих каменів повинна бути не менше 20 мм. Товщина горизонтальної діафрагми в найбільш тонкій частині повинна бути не менше 10 мм.

Застосовувана в даний час технологія зведення багатошарових стін, характерна для зарубіжної практики будівництва, виконується, як правило, в два послідовних етапи - зведення несучого шару на всю висоту будівлі з установкою гнучких зв'язків і паралельним зведенням внутрішніх несучих 8 стін, перегородок, монтажем плит перекриття; на другому етапі з інвентарних лісів, що встановлюються на всю висоту будівлі, проводиться пристрій двох інших верств стіни, що об'єктивно збільшує тривалість циклу кам'яних робіт і суттєво обмежує поверховість зведених будинків. Все це зумовило вибір і обґрунтування іншої схеми формування захисної конструкції, здійснюваної за принципом послідовного нарощування всіх верств стіни з одного і того ж фронту робіт від «периферії» (методом «на себе»), починаючи з облицювального шару і закінчуючи внутрішнім шаром кладки, без використання лісів, тобто робота ведеться з перекриттів послідовної кладкою з пустотілих бессеровських блоків, утепленням стіни, пристроєм вертикальних армованих, а потім і горизонтальних, монолітних обв'язувальних поясів під спирання плит перекриття.

Дана технологія представлена наступними основними технологічними процесами:

- кладка облицювальна кулі, виконується поярусна висота 600 мм;
- кладка несучих кулі – другий робочий процес Формування стіни, також поярусна висота 600 мм;
- пристрій теплоізоляції із застосування плитного утеплювача - третій за послідовності процес, що виконується в зазор між облицювальна и несучих кулями, з одночасним Утворення повітряного прошарку;
- поздовжньому–поперечне армування гнучкий в'язевих каркасами для забезпечення та комунальної роботи облицювальна и несучих шарів в горизонтальній площині;
- бетонування вертикального армованого поясу, передбачається в два етапи при зведенні поверху – на позначці 1,8 и 2,4 м;
- пристрій «опорного столика», здійснюване в останньому ярусі кладки стіни за рахунок защемлення опорного куточки в шов кладки;
- пристрій горизонтального монолітного поясу в лоткові бетонних блоках або в знімній опалубці.

Наведена послідовність запропонованої технології містить нетрадиційні для багатошарових стін процеси, які мають не якісних, ні кількісних характеристик, смороду представлені на рис. 2 на прикладі стін з вібропресованих бетонних блоків. Представлені робочі процеси Використовують в подалі дослідженнях при проведенні хронометражних спостережень безпосередньо на об'єкті и при порівнянні їх з існуючими нормативами.

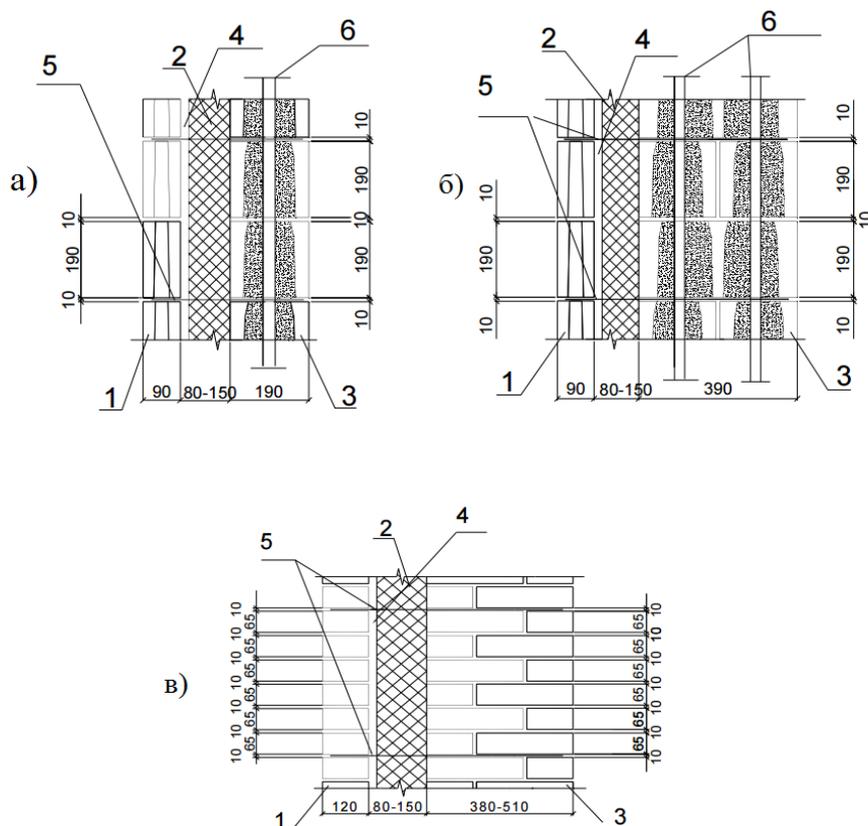


Рис. 1. Конструктивні схеми тришарових стін на основі штучних стінових матеріалів (керамічної або силікатної цегли, бессеровських блоків) з елементами внутрішнього каркаса: 1 – облицювальний шар; 2 – теплоізоляційний шар; 3 –внутрішній несучий (самонесучий) шар; 4 – повітряний прошарок; 5 – горизонтальні гнучкі зв'язки, встановлюються через 450–600 мм по висоті; 6 – вертикальний каркас

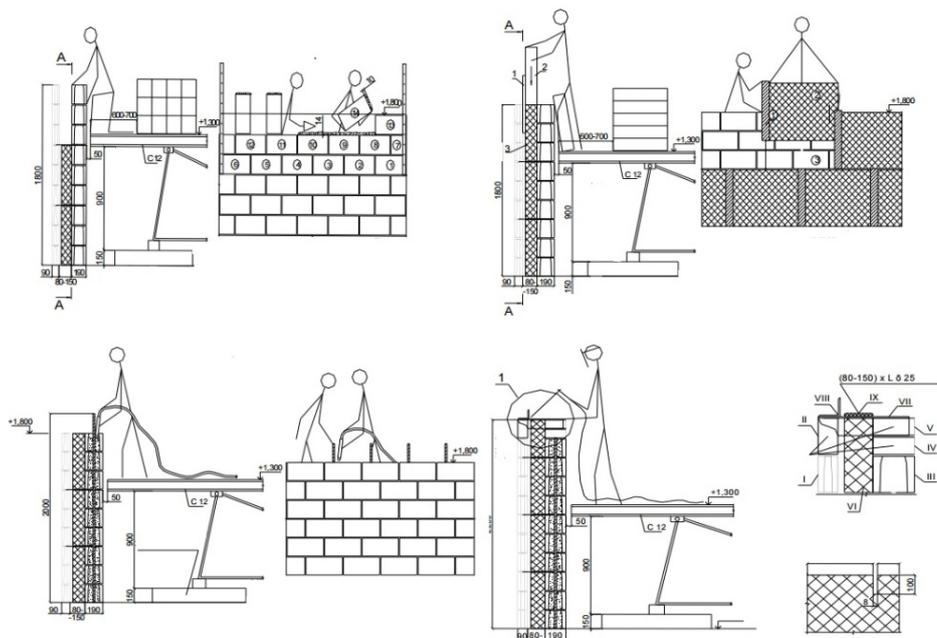


Рис. 2. Приклади основних технологічних процесів запропонованої технології: 1 – укладка несучого шару; 2 – пристрій теплоізоляції плитним утеплювачем; 3 – пристрій «опорного столика»; 4 – бетонування вертикального каркаса

Таким чином, було розглянуто технологія і організація зведення багатошарових теплоефективних стін житлово-цивільних будівель на основі штучних стінових матеріалів (традиційний цегла і вібропресовані бетонні блоки, що випускаються на обладнанні фірми «Бессер») без використання трубчастих лісів здійснюваної по найбільш раціональній схемою формування тришарової стіни з використанням інвентарних засобів підмашування.

*Науковий керівник канд. техн. наук, проф. Крюк А.Г.*

**Список літератури: 1.** Питання технології зведення будівель із зовнішніми теплоефективними тришаровими стінами на основі дрібноштучних стінових матеріалів / І.В. Федорцев, В.В. Бабков, А.М. Гайсин, Е.А. Султанова // Сучасні інвестиційні процеси і технології будівництва: праці секції «Будівництво» РІА. – М., 2002. – С. 146–153.

УДК 665.652

## **ВИСОКОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ МАСТИЛ**

**Лацугіна О. В.**, студентка 2 го курсу магістратури  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця)

*The article deals with the issues of improving the technological activity of "XADO" for the production of motor oils. A number of measures to improve the efficiency of the technological system LLC*

Компанія ТОВ «ХАДО» виробляє близько 250 найменувань гелів і мастил для автомобільного та залізничного транспорту, високотемпературних та спеціальних мастил. Моторні масла застосовуються для змащування поршневих і роторних двигунів внутрішнього згоряння та складаються з основи (масла) і присадок.

Основні схеми виробництва масел [1, 4]:

1) селективне очищення → депарафінізація → гідровідчистка → компаундування → базове масло → товарне масло;

2) адсорбційне очищення → депарафінізація → гідровідчистка → товарне масло;

3) Гідро облагороджування → селективна очистка → депарафінізація → вакуумна перегонка → товарне масло;

4) сірчаноокисле очищення → адсорбент → товарне масло.

У ТОВ «ХАДО» технологія виготовлення моторного масла має такий вигляд: адсорбційне очищення → гідрокрекінг → базове масло → введення присадок → товарне масло (рис. 1).

Стадія адсорбційного очищення, де проходить видалення води та очищення від асфальтенів та смол, є обов'язковою для регенерації усіх видів моторних олив, для чого використовують установку Р-1000 М. Масла, попередньо зневоднені на додатково підключеному до установки обладнанні, регенерують. Це ускладнює процес регенерації і призводить до збільшення собівартості від-

новленого масла. Є можливість заміни даної установки вакуумно-адсорбційною установкою РТМ-200, в якій усунуті ці недоліки і збільшена продуктивність. Обслуговує установку одна людина. Використання адсорбційного очищення пропонується для збільшення виходу високоякісної оливи, а з точки зору екології – чистоти процесу.



Рис. 1. Загальна схема виготовлення моторного масла ТОВ «ХАДО»

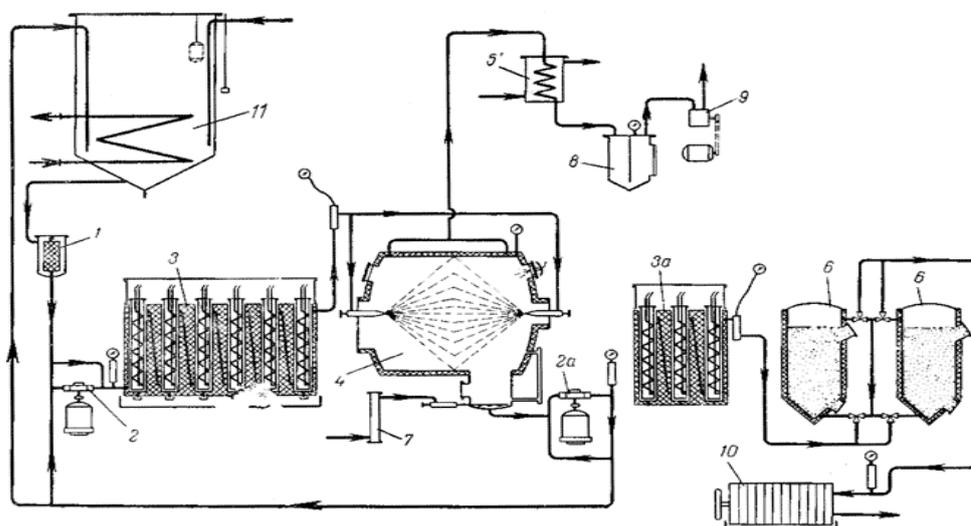


Рис. 2. Технологічна схема установки РТМ-200: 1 – фільтр грубого очищення; 2, 2а – шестерні насоси; 3, 3,а – електронагрівальні печі; 4 – відгінний куб; 5 – холодильник; 6 – адсорбери; 7 – повітряний фільтр; 8 – збірка води; 9 – вакуум-насос; 10 – фільтрпрес; 11 – приймальна ємність.

З метою поліпшення якості масла, керуючись рекомендаціями літературних джерел, можна замінити каталізатор ГР-24М (дозволяє отримувати масла з індексом в'язкості 87 та вмістом сірки 8) на каталізатор РК-438 (W). Даний каталізатор гідроочищення має такі переваги: він вітчизняний - відсутність витрат на транспортування, відносно недорогий, застосування даного каталізатора для гідроочищення призведе до поліпшення якості масла, а саме збільшення індексу в'язкості який складе 95 і зменшення вмісту в ньому сірковмісних органічних сполук до 5. Каталізатор працює при параметрах, що збігаються з параметрами процесу гідроочищення на виробництві, тому немає необхідності заміни системи автоматизації на запропонованій установці гідроочищення масел [5].

Гідрокрекінг здійснюється у два етапи. У першій стадії зі складу видаляються всі небажані полярні сполуки, а ароматичні вуглеводні перетворюються в

насичені. Після сепарації необхідних марок в'язкості в процесі вакуумної дистиляції, парафіністі масла проходять депарафінізацію при дуже низькій температурі. Далі, для підвищення вмісту насичених вуглеводнів, масляні фракції направляються на другу установку гідроочищення під високим тиском. Ця завершальна стадія максимально збільшує стабільність базового масла, видаляючи з нього залишки ароматичних і полярних молекул.

Третя стадія – поточне змішування – безперервне компаундування. Це є єдиний економічно виправданий спосіб компаундування великих обсягів товарних масел. У цьому процесі всі компоненти, базові масла й присадки, дозують в основний потік, в так звану лінію змішування. В системі застосовують два або більше синхронно працюючих дозувальних насосів, об'ємну продуктивність яких можна з високою точністю регулювати автономно [4].

Для безперебійної роботи потрібен вільний доступ компонентів змішування до дозувальних насосів.

Запропоновано замінити існуючу установку для компаундування УСБ-60/3 на більш ефективну: УСБ-60/5.

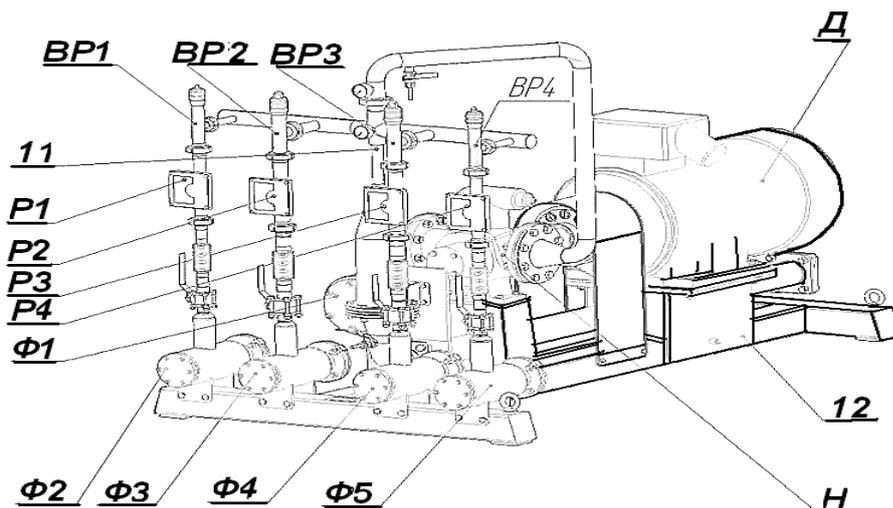


Рис. 3 Загальний вигляд установки УСБ-60/5: 1.1 – змішувач; P1; P2; P3; P4 – ротаметри; Ф1; Ф2; Ф3; Ф4; Ф5 – вхідні фільтри; VP1, VP2, VP3, VP4 – вентилі, що регулюють; 1.2 – рама; Н – насос; Д – електродвигун

Установка змішуюча швидкодіюча типу УСБ-60/5 призначена для змішування від двох до п'яти окремих складових частин (рис. 3). Складається з змішувача 1.1, до якого через колектор монтуються чотири ротаметра P1; P2; P3; P4 візуального контролю витрати рідини, трубопровід основний рідини. До кожного ротаметру підключений вхідний фільтр Ф2, Ф3, Ф4, Ф5 з краном К1, К2, К3, К4 і вентиль регулюючий VP1; VP2; VP3; VP4. На вході і виході змішувача вмонтовані манометри для контролю параметрів тиску. Установка зібрана на рамі 1.2 і кріпиться до фундаменту на анкерних болтах.

Таким чином заміна обладнання надасть можливість збільшити кількість одночасно присадок, що змішуються, зменшить витрати компонентів і скоротить час виробництва партії мастил. Установка потребує лише 1 чоловіка об-

слуговуючого персоналу. Єдиним недоліком є більш висока встановлена потужність, що може збільшити витрати на електроенергію.

Загалом заміна обладнання на етапі абсорбційного очищення дозволить збільшити продуктивність у 1,8 разів, зменшити тривалість циклу виробництва на 19,44 %. Проте збільшуються енерговитрати у 2,3 рази.

Заміна обладнання на стадії компаундування дозволить зменшити витрати на присадки на 12,28 %, зменшить цикл виробництва продукції на 12 % за рахунок можливості введення всіх компонентів за 1 цикл. Слід зазначити, що дане обладнання також є більш енерго витратним, що призводить до збільшення витрат на електроенергію на 38,9 %. Проте при раціональному використанні виробничих потужностей ці витрати можуть складати 15 %.

Загальне підвищення продуктивності виробництва складає 92 %, зменшення витрат на сировину 32,28 %, збільшення витрат на електроенергію у 2,45 разів.

**Список літератури:** 1. Шашкин П.И. Регенерация отработанных нефтяных масел / П.И. Шашкин, И.В. Брай. – М., 1970. – 303 с. 2. Технологія нафти і газу. Ч.3: Методичні вказівки для студентів-заочників хіміко-технологічної спеціальності. – М., 1967. – 16 с. 3. Товарні нафтопродукти, їх властивості і вживання: довідник / під редакцією Н.Р. Пучкова. – М., 1971. 4. Производство масел <https://sites.google.com/site/techqualoil/proizvodstvo-masel> 5. Колесников И.В. Совершенствование процесса гидроочистки масел / И.В. Колесников, С.М. Леденев // Успехи современного естествознания. – М., 2010. – № 6. – 94 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. НАУЧНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

<b>Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г.</b> Влияние формы режущих зерен при абразивной обработке на параметры шероховатости поверхности .....	3
<b>Новиков Ф.В., Новиков Г.В.</b> Опыт разработки и внедрения эффективных технологий алмазно-абразивной обработки .....	13
<b>Жовтобрюх В.А., Doouyoung Jeong.</b> Пятиосевой порталный обрабатывающий центр DOOSAN VM 2740U – лучшее решение для высокоскоростной обработки крупногабаритных авиационных деталей .....	19
<b>Жовтобрюх В.А.</b> Эффективное применение режущих инструментов в условиях высокоскоростной обработки .....	22
<b>Гуцаленко Ю.Г., Аракелян А.А.</b> Специфические особенности и возможности алмазно-искрового шлифования в микрогеометрической инженерии поверхности .....	25
<b>Гуцаленко Ю.Г., Янку К.</b> Современные подходы к организации и реализации технических систем и технологий алмазно-искрового шлифования..	29
<b>Лищенко Н.В., Ковальчук А.Н., Ларшин В.П.</b> Настройка станков при зубошлифовании по методу копирования .....	39
<b>Лищенко Н. В., Нежебовский В.В., Ларшин В.П.</b> Анализ распределения припуска по профилю впадины при зубошлифовании .....	45
<b>Лавріненко В.І., Скрябін В.О., Скрябін В.В., Лещук І.В., Дєвицький О.А.</b> Розробка та застосування спеціальних великогабаритних шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів .....	49
<b>Дерев'янченко О.Г., Волков С.К., Татаренко П., Усик А.</b> Розробка підходу до контролю зовнішніх дефектів зварних швів та розпізнавання їх класів з використанням СТЗ .....	52
<b>Якимова О.А., Якимов П.А, Кузьмина В.И., Иванищева И.Н.</b> Расчет температур при прерывистом ленточном шлифовании .....	56
<b>Сизий Ю.А., Ушаков О.М., Новіков Д.Ф.</b> Методи розрахунку моменту інерції шліфувальної бабки верстата моделі 3M151 .....	61
<b>Тищенко Л.Н., Коломиец В.В., Любичева К.М., Vijay Kumar</b> Определение коэффициентов трения при резании неоднородных наплавленных материалов резцами из ПСТМ .....	64
<b>Степанов М.С., Клочко А.А., Кравцов А.Н.</b> Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей .....	68
<b>Андилахай А.А.</b> Повышение качества поверхностного слоя детали при абразивной обработке затопленными струями .....	77
<b>Стрельчук Р.М.</b> Исследование параметров стружки при плоском алмазном шлифовании .....	84
<b>Стрельчук Р.М.</b> Расчетный метод определения размерного износа круга при шлифовании твердых сплавов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама .....	88

<b>Кленов О.С.</b> Численный и аналитический расчеты параметров теплового процесса при механической обработке деталей машин .....	92
<b>Рябенков И.А.</b> Определение минимально возможной температуры резания при прерывистом шлифовании .....	100
<b>Шелковой А.Н., Ключко А.А., Анциферова О.А. Палашек С.Ю.</b> Технологические условия формирования параметров поверхностного слоя зубчатых колес и их влияние на эксплуатационные свойства .....	107
<b>Шкурупий В. Г.</b> Технологическое обеспечение параметров качества обработки на финишных операциях .....	120
<b>Гуцаленко Ю.Г.</b> Работоспособность нитридных сверхтвердых композитов по стандартному регламенту стойкостных испытаний .....	123
<b>Умінський С.М.</b> Дослідження впливу параметрів верстатного зачеплення спряжених поверхонь заготовки та інструменту при фінішній обробці методами вільного обкату .....	125
<b>Дитиненко С.А., Новиков Г.В.</b> Повышение эффективности процесса выхаживания при шлифовании .....	131
<b>Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Луговская Е.А.</b> Обобщенные зависимости мощности и температуры резания абразивным зерном .....	136
<b>Лищенко Н.В., Ларшин В.П.</b> Выравнивание припуска по профилю при зубошлифовании методом копирования .....	144
<b>Лищенко Н.В.</b> Теория выравнивания припуска по профилю при зубошлифовании профильным кругом .....	150
<b>Онищенко А.В.</b> Исследование режущей способности шлифовальных кругов при круглом наружном врезном шлифовании с использованием информации по низкочастотному акустическому сигналу .....	152
<b>Сорокин А.В.</b> Обеспечение равномерности съема материала при тонком шлифовании крупногабаритных изделий торцовым инструментом .....	156

## **2. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

<b>Тришевский О.И., Туев А.В., Петрук Р.Ю.</b> Повышение прочностных свойств гнутых профилей для сельскохозяйственных прицепов как фактор снижения металлоемкости продукции .....	159
<b>Свиргун О.А., Коломиец В.В., Свиргун В.П.</b> Материалы подшипников скольжения, смазываемых водой .....	166
<b>Савченко Н.Ф., Галстян В.В.</b> Выбор методов беспрессовой штамповки в условиях мелкосерийного производства .....	174
<b>Савченко Н.Ф., Третьяк В.В.</b> Изготовление крупногабаритных конструкций с использованием метода локальной штамповки .....	177
<b>Савченко Н.Ф., Воронько В.В.</b> К разработке методов аварийного спасения легких самолетов и транспортных средств малой авиации .....	182
<b>Калюжный А.Б., Платков В.Я.</b> Высокопористые фторопласты в условиях радиационного облучения .....	187

<b>Клещев Г.М.</b> Адаптивная математическая модель с использованием пространственных матриц, стандартизации и унификации в производстве штампов холодной листовой штамповки .....	190
<b>Моргун Б.А., Клещев М.Г., Клещев Г.М., Грабовский О.В., Кулиш Н.В.</b> Концепция адаптивной модели управления при автоматизированном создании штампов холодной листовой штамповки .....	194
<b>Саввова О.В., Брагіна Л. Л., Бабіч О.В. Гривцова А.О.</b> Використання склокристалічних матеріалів як елементів індивідуального броні захисту.	196
<b>Цапко Н.С.</b> Разработка специальных огнеупорных и радиационностойких цементов на основе системы $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$ .....	200
<b>Тіщенко Л.Н., Ольшанський В.П., Ольшанский С.В.</b> Квадратично-нелінійна модель руху зернової суміші на плоскому віброрешеті .....	204
<b>Автухов А.К.</b> Качество и эксплуатационная стойкость рифленых валков .	209
<b>Гоков А.М.</b> Исследование возможности генерации низкочастотных вистлеров инфразвуком в нижней ионосфере в периоды прохождения мощного атмосферного фронта .....	214
<b>Гоков А.М.</b> Экспериментальные исследования отклика среднеширотной D-области на прохождение солнечного терминатора .....	218
<b>Воинов А. П., Воинова С. А.</b> О топливе для энергетических парогазовых установок .....	221
<b>Воинов А. П.</b> Проблематика развития технологии котельно-топочного низкотемпературного пузырькового кипящего слоя .....	224
<b>Умінський С.М.</b> Універсальне гідродинамічне обладнання для виготовлення біопалива .....	227
<b>Воїнова С.О.</b> Можливості управління ефективністю технічних об'єктів ...	231
<b>Воїнова С. О.</b> Деякі особливості задачі управління екологічною ефективністю технічних об'єктів .....	234
<b>Литовченко П.И., Нечипоренко В.Н., Сало В.А., Иванова Л.П.</b> Новый подход к автоматизированному расчету и выбору рациональных посадок с натягом .....	237
<b>Богданович О.А.</b> Оптимальная отраслевая структура – основной фактор повышения эффективности производства в сельском хозяйстве .....	245
<b>Плеханова Т.Є.</b> Аналіз ефективності використання теплових лічильників води ЛВ-4Т .....	247

### 3. ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

<b>Петков А.А.</b> Тесты с восстанавливаемыми фрагментами как инструмент диагностики остаточных знаний .....	250
<b>Новиков Д.Ф.</b> Механическая обработка – “узкое место” в планировании себестоимости проектирования детали .....	254
<b>Оспищева А.К., Новиков Д.Ф.</b> Обоснование условий управления технологической себестоимостью промышленной продукции .....	258
<b>Кібець М.М.</b> Технологічні схеми приготування бетонної суміші .....	261

<b>Шаповалова В.Д.</b> Технологія організації будівництва будівель із зовнішніми багат шаровими теплоефективними стінами .....	264
<b>Лацугіна О.В.</b> Високо ефективна технологія виготовлення автомобільних мастил .....	267

Наукове видання

# **ФІЗИЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Труди 21-ї міжнародної науково-практичної конференції  
24–25 грудня 2015 р.**

Укладач: Новіков Федір Васильович

Відповідальний за випуск:  
Жовтобрюх В.О.

Оформлення оригінал-макету:  
Новіков Д. Ф.

Підп. до друку 15.12.2015 р.  
Формат 60x84 1/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 31,85.  
Наклад 300 пр. Зам. №408

Видавництво і друкарня «Ліра»  
49000, м. Дніпропетровськ, вул. Наукова, 5  
Свідоцтво про внесення до Держреєстру  
ДК №188 від 19.09.2000.