

Ф.В.Новиков, докт.техн.наук, В.Г.Шкурупий, Харьков, Украина

## УСТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ И ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Results of theoretical and experimental researches of functional communications between parameters of roughness and optical characteristics of the processed surface are resulted*

На практике широко используются многофункциональные ответственные детали из тонкого листа и лент (особотонкостенные детали). Это элементы наружных оболочек, упругие выносные элементы в виде плоскосворачиваемых трубок из тонких пружинных лент (штанги систем гравитационной ориентации и стабилизации, антенны и др.), изготовленные из материалов с особыми свойствами упругости и теплового линейного расширения (хромоникелиевые, манно-бериллиевых сплавов и др.) и применяемые в конструкциях летательных аппаратов. К качеству изготовления таких деталей и надежности их работы предъявляются высокие требования, направленные, прежде всего, на снижение их неравномерного нагрева солнечными лучами и возникающих при этом температурных деформаций.

Известно, что работоспособность поверхностей тонких упругих лент изделий в условиях воздействия светового потока в значительной степени определяется их геометрическими и физико-химическими характеристиками. Уменьшить температуру деталей, работающих в условиях воздействия светового потока, можно за счет технологического обеспечения заданных геометрических и оптических характеристик поверхностей, применяя для этого эффективные методы механической и физико-технической обработки. Однако, в настоящее время отсутствуют практические рекомендации по технологическому обеспечению высокой светоотражательной и излучательной способностей поверхностей труднообрабатываемых особотонкостенных деталей. Не исследованы вопросы взаимосвязи шероховатости и оптических характеристик обработанных поверхностей, что не позволяет научно обоснованно подойти к выбору оптимальных методов и условий обработки.

Перспективными являются способы абразивной и электрохимической обработки, которые обеспечивают необходимые значения этих характеристик. Вместе с тем, данные процессы многофакторные, дают не стабильные результаты, особенно при обработке тонких упругих лент, и требуют дальнейшего изучения. Практическая реализация этих процессов недостаточно исследована для их серийного применения. Все это указывает на необходимость проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований по технологическому обеспечению геометрических и оптических характеристик поверхностей особотонкостенных деталей для повышения их эксплуатационных свойств. Поэтому целью работы является установление функциональных связей между параметрами шероховатости и оптическими характеристиками обработанной п

верхности.

В основу работы положены результаты теоретических исследований формирования поверхности при финишной обработке [1, 2], а также аналитическое решение, приведенное в работе [3], в котором шероховатость поверхности выражена через так называемый фактор шероховатости  $F = \frac{F_2}{F_{uu}}$ .

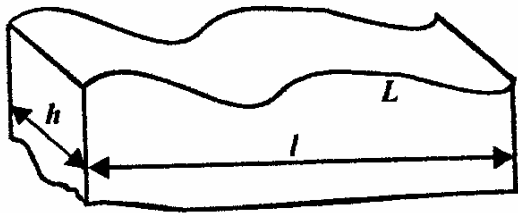


Рис. 1. Расчетная схема профиля шероховатости поверхности.

Параметр  $F_2$  определяет площадь гладкой поверхности, а параметр  $F_{uu}$  - площадь поверхности впадины (шероховатость), которую можно описать зависимостью:

$$F_{uu} = h \cdot L, \quad (1)$$

где  $h$  - ширина рассматриваемой поверхности (рис. 1), м;  $L$  - длина профиля, т.е. длина, получающаяся, если все выступы и впадины профиля, находящиеся в пределах базовой длины  $l$ , вытянуть в прямую линию ( $L$  - ГОСТовский параметр шероховатости поверхности).

Соответственно параметр  $F_2$  выразится:

$$F_2 = h \cdot l. \quad (2)$$

Тогда фактор шероховатости  $F$  опишется:

$$F = \frac{F_2}{F_{uu}} = \frac{l}{L}. \quad (3)$$

Рассмотрим профиль шероховатости поверхности, сформированный при

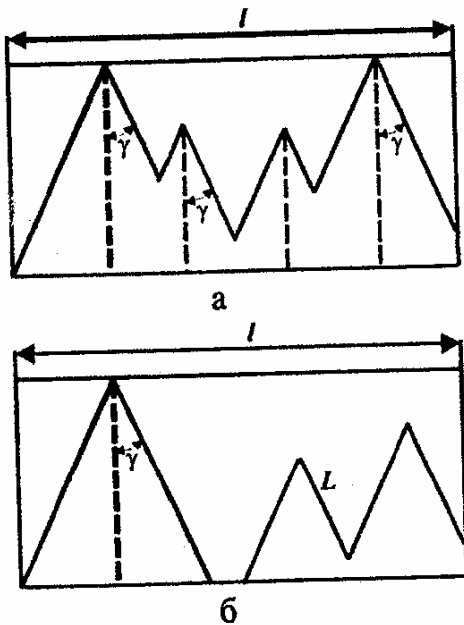


Рис. 2. Профили шероховатости поверхности, сформированные при абразивной обработке без учета (а) и с учетом износа зерен (б).

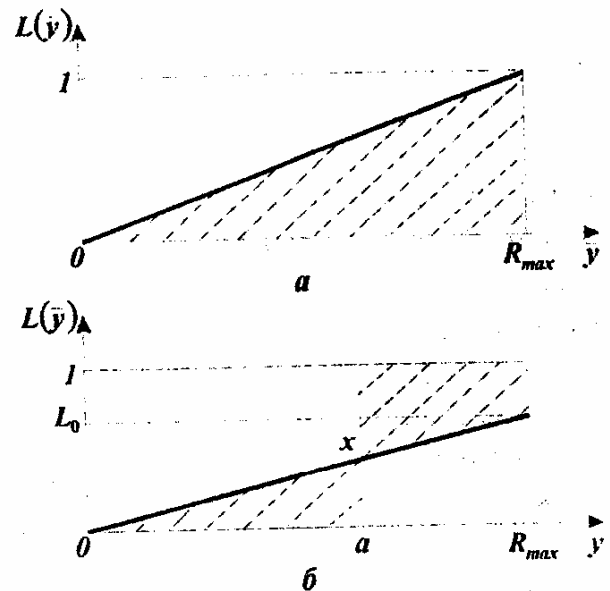


Рис. 3. Вид упрощенной функции  $L(\bar{y})$ .

абразивной обработке режущими зернами в форме конуса с углом при вершине

$2\gamma$ , рис. 2,а. Относительная опорная длина данного профиля  $L(\bar{y})$  графически показана на рис. 3,а [2].

Исходя из рис. 2,а, параметры  $l$  и  $L$  связаны между собой тригонометрическим соотношением:

$$\frac{l}{L} = \sin \gamma, \quad (4)$$

откуда

$$F = \sin \gamma. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены значения функции  $\sin \gamma$ .

Таблица 1

$\gamma$ , град	0	30	45	60	75	90
$\sin \gamma$	0	0,5	0,71	0,87	0,96	1,0

Практикой установлено, что угол при вершине режущего абразивного и алмазного зерна  $2\gamma$  может изменяться в пределах  $60 \dots 180^\circ$ . Тогда, исходя из табл. 1, для угла  $2\gamma = 60^\circ$  параметр  $L$  в два раза больше  $l$ . Для  $2\gamma > 90^\circ$  различие параметров  $l$  и  $L$  не существенно. Из этого вытекает, что фактор шероховатости  $F = \frac{l}{L} = \sin \gamma$  изменяется в пределах  $0,5 \dots 1,0$ .

Рассмотрим профиль шероховатости поверхности, сформированный при абразивной обработке режущими зернами, имеющими форму конуса и усеченного конуса (учитывающий износ зерен) с углом при вершине  $2\gamma$ , рис. 2,б. Относительная опорная длина данного профиля  $L(\bar{y})$  графически показана на рис. 3,б [2].

Фактор шероховатости  $F$  в этом случае определяется:

$$F = L_0 \cdot \sin \gamma + (1 - L_0) = 1 - L_0 \cdot (1 - \sin \gamma), \quad (6)$$

где  $L_0$  – безразмерная величина, принимающая значения в пределах  $0 \dots 1$ .

При  $L_0 = 1,0$  зависимость (6) принимает вид зависимости (5). При  $L_0 = 0$  фактор шероховатости  $F = 1$ , т.е. приходим к гладкой поверхности. Как следует из зависимости (6), чем больше параметр  $L_0$  и меньше угол  $\gamma$ , тем меньше фактор шероховатости  $F$ .

Определим значения фактора шероховатости  $F$  для двух случаев  $\sin \gamma = 0,5$  и  $\sin \gamma = 0,9$ . В первом случае фактор шероховатости  $F$  определяется по зависимости:  $F = 1 - 0,5 \cdot L_0$ , во втором случае – по зависимости  $F = 1 - 0,1 \cdot L_0$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Здесь же для анализа приведены расчетные значения соотношения параметров шероховатости поверхности  $R_{max} / R_a$ , взятые из нашей работы [2]. Как видно, с увеличением безразмерной величины  $L_0$  фактор шероховатости  $F$  уменьшается от 1 до значения  $\sin \gamma$ . Соответственно увеличивается соотношение  $R_a / R_{max}$ . Таким образом, аналитическим путем установлена связь между фактором шероховатости  $F$  и соот-

ношением  $R_a / R_{max}$ .

Таблица 2  
Расчетные значения фактора шероховатости  $F$  и соотношений  $R_{max} / R_a$  и

	$R_a / R_{max}$										
$L_0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F (\sin \gamma = 0,5)$	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
$F (\sin \gamma = 0,9)$	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
$R_{max} / R_a$	$\infty$	11,1	6,25	4,54	3,85	3,57	3,4	3,39	3,45	3,7	4,0
$R_a / R_{max}$	0	0,09	0,16	0,22	0,26	0,28	0,29	0,295	0,29	0,28	0,25

Получим аналитическую зависимость, увязывающую фактор шероховатости  $F$  и соотношение  $R_a / R_{max}$ . Для этого представим зависимость (6) в виде:

$$L_0 = \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)} \quad (7)$$

Подставим зависимость (7) в уравнение для определения соотношения  $R_a / R_{max}$ , приведенное в работе [2]:

$$R_a = R_{max} \cdot L_0 \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0)^2, \quad (8)$$

откуда получим:

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)} \cdot \left[ 1 - 0,5 \cdot \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)} \right]^2 \quad (9)$$

В результате пришли к трансцендентному уравнению, разрешить которое относительно фактора шероховатости  $F$  сложно. Поэтому при расчетах целесообразно задавать значение  $F$  и из уравнения (9) определять соотношение  $R_a / R_{max}$ . Необходимо отметить, что фактор шероховатости  $F$ , исходя из уравнения (9), определяется не высотными параметрами шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$ , а их соотношением  $R_a / R_{max}$ , т.е. фактор шероховатости  $F$  является функцией соотношения  $R_a / R_{max}$  или  $F = f(R_a / R_{max})$ . Это указывает на то, что оптические характеристики поверхности, в частности, коэффициент излучения поверхности  $\varepsilon_w$ , определяемый по формуле [3]

$$\varepsilon_w = \frac{\varepsilon_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)} \quad (10)$$

(где  $\varepsilon_2$ ,  $A_2$  - соответственно коэффициенты излучения и поглощения гладкой поверхности), зависит не от высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$ , а от формы микронеровностей профиля, обусловленных соотношением  $R_a / R_{max}$  и соответственно фактором шероховатости  $F$ .

Как следует из зависимости (10), для заданных значений  $\varepsilon_2$  и  $A_2$  с уменьшением фактора шероховатости  $F$  в пределах от 1 до  $\sin \gamma$ , коэффициент излучения поверхности  $\varepsilon_w$  увеличивается. Следовательно, коэффициент излучения поверхности  $\varepsilon_w$  увеличивается с увеличением соотношения параметров шероховатости  $R_a / R_{max}$  (вследствие увеличения безразмерной величины  $L_0$  в пре-

делах от 0 до 1). Примерно по такому же закону будет изменяться коэффициент поглощения поверхности  $A_{ш}$ , имея в виду, что для серого тела  $\epsilon \approx A$ . Тогда зависимость (10) выразится:

$$A_{ш} = \frac{A_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)} \quad (11)$$

Коэффициент отражения поверхности  $\rho_{ш}$  связан с коэффициентом поглощения поверхности  $A_{ш}$  противоположной зависимостью:

$$\rho_{ш} = 1 - A_{ш} = 1 - \frac{A_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)} \quad (12)$$

Из зависимости (12) следует, что с уменьшением фактора шероховатости  $F$  (от 1 до  $\sin \gamma$ ) и соответственно увеличением соотношения параметров шероховатости  $R_a / R_{max}$  коэффициент отражения поверхности  $\rho_{ш}$  будет уменьшаться. Следовательно, наибольшей отражательной способностью будет обладать гладкая поверхность, для которой  $F=1$  и  $R_a / R_{max}=0$ . В обобщенном виде характер изменения коэффициентов  $\epsilon_{ш}$ ,  $A_{ш}$ ,  $\rho_{ш}$  от фактора шероховатости  $F$

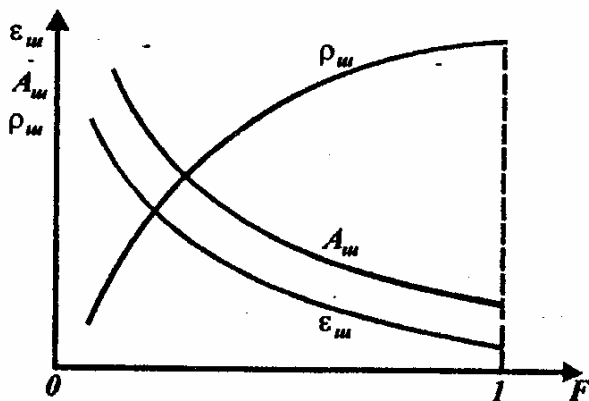


Рис. 4. Характер изменения коэффициентов  $\epsilon_{ш}$ ,  $A_{ш}$ ,  $\rho_{ш}$  от фактора шероховатости  $F$ .

показан на рис. 4.

Для проверки теоретических решений были выполнены экспериментальные исследования параметров шероховатости и оптических характеристик поверхностей эталонных образцов из стали 40X, обработанных различными методами резания, табл. 3. Установлено, что при фрезеровании, в зависимости от условий обработки, параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  изменяются в довольно больших пределах (в 15–20 раз). Вместе с тем, коэффициент отражения  $\rho_{ш}$  остается почти неизменным. Это указывает на то, что коэффициент отражения  $\rho_{ш}$  практически не зависит от высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ . Полученный результат хорошо согласуется с теоретическими выводами.

Как следует из табл. 3, переход от фрезерования к финишным методам обработки – шлифованию и полированию позволяет уменьшить параметры шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ . При этом увеличивается коэффициент отражения  $\rho_{ш}$ . Следовательно, применение абразивной обработки (в отличие от лезвийной) позволяет уменьшить шероховатость и повысить светоотражательную способность обработанных поверхностей.

На первый взгляд может показаться, что увеличение коэффициента отражения  $\rho_{ш}$  при переходе от лезвийной к абразивной обработке связано с уменьшением шероховатости поверхности.

На первый взгляд может показаться, что увеличение коэффициента отражения  $\rho_{ш}$  при переходе от лезвийной к абразивной обработке связано с уменьшением шероховатости поверхности.

шением высотных параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ . В действительности это не так. В этом несложно убедиться, анализируя результаты экспериментальных исследований, приведенные в табл. 4.

Таблица 3

Значения параметров шероховатости и коэффициента отражения поверхностей образцов из стали 40X после обработки резанием

Наименование операции	Параметры шероховатости поверхности		Коэффициент отражения, $\rho_{ш}$
	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	
Фрезерование	11,05...0,52	40...1,4	0,20...0,25
Шлифование предварительное	0,4...0,35	—	0,25...0,31
Шлифование окончательное	0,2...0,16	—	0,48...0,51
Полирование	—	0,4...0,16	0,72...0,74

Таблица 4

Значения соотношения  $R_a / R_{max}$ , фактора шероховатости  $F'$ , коэффициента отражения  $\rho_{ш}$  и коэффициента излучения  $\epsilon_{ш}$  после механической обработки листового проката и сплава АМгб

Метод обработки	$R_a / R_{max}$	$F'$	$\rho_{ш}$	$\epsilon_{ш}$
Тонкое точение алмазным инструментом	0,074–0,047	0,926–0,953	0,75–0,87	0,07
Выглаживание шаром (диаметром 6 мм из ШХ15)	0,05	0,95	0,98	0,05
Механическое полирование (окись хрома МЗ)	0,05–0,1	0,9–0,95	0,6–0,75	0,06–0,07
Точение	0,1	0,9	0,48–0,54	0,09–0,12
Фрезерование	0,11–0,12	0,88–0,89	0,47–0,61	0,15–0,18
Без обработки (прокат)	0,104	0,896	0,4–0,6	0,14–0,16
Гидроабразивная или обработка металлической дробью	0,11–0,16	0,84–0,89	0,35–0,4	0,3–0,32

Теоретически показано, что с увеличением фактора шероховатости  $F' \rightarrow 1$  коэффициент излучения  $\epsilon_{ш}$  уменьшается, а коэффициент отражения  $\rho_{ш}$  увеличивается. Данная закономерность также вытекает из табл. 4. Так, наименьшее значение  $\epsilon_{ш}=0,05$  и наибольшее значение  $\rho_{ш}=0,98$  достигаются для наибольшего значения фактора шероховатости  $F'=0,95$  (после выглаживания). Наибольшее значение  $\epsilon_{ш}=0,3–0,32$  и наименьшее значение  $\rho_{ш}=0,35–0,4$  достигаются для наименьшего значения фактора шероховатости  $F'=0,84–0,89$  (после гидроабразивной обработки или обработки металлической дробью).

Таким образом, из табл. 4 четко следует, что, чем больше фактор шероховатости  $F'$ , тем меньше коэффициент излучения  $\epsilon_{ш}$  и больше коэффициент отражения  $\rho_{ш}$ . В табл. 4 также приведены значения отношения параметров шероховатости поверхности  $R_a / R_{max}$ . Как видно, наибольшему значению фактора

шероховатости  $F'=0,95$  соответствует фактически наименьшее значение отношения  $R_a/R_{max}=0,05$ , а наименьшему значению  $F'=0,84-0,89$  соответствует наибольшее значение отношения  $R_a/R_{max}=0,16$  (после гидроабразивной обработки или обработки металлической дробью).

Из этого можно сделать вывод, что коэффициенты излучения и отражения обусловлены изменением фактора шероховатости  $F'$  и соответственно отношения  $R_a/R_{max}$ , а не высотных параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ . Следовательно, формирование оптических характеристик поверхности связано с формой микронеровностей поверхности, а не с высотой ее профиля, что хорошо согласуется с приведенными выше теоретическими результатами.

Список литературы: 1. Новиков Ф.В., Шкуруний В.Г. Исследование шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности. – Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків, НТУ „ХПІ”, 2004, № 44. – С. 140-149. 2. Новиков Ф.В., Шкуруний В.Г. Теоретические и экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности. – Физические и компьютерные технологии. Труды 9-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК „ФЭД”, 2004. – С. 11-15. 3. Агабабов С.Г. Влияние шероховатости поверхности твердого тела на его радиационные свойства и методы их экспериментального определения. – Теплофизика высоких температур, т. 6, № 1, 1968. – С. 78-88. 4. 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.

Поступила в редколлегию 01.06.