

УДК 621.923

**Ф. В. НОВИКОВ, О. С. КЛЕНОВ****ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЗЦА**

Запропоновано новий теоретичний підхід до визначення сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця, з позиції окремого урахування процесів різання і тертя. Це дозволило виконати їх розрахунок на основі експериментально встановлених значень тангенціальної та радіальної складових сили різання і науково обгрунтовано підійти до визначення умов зменшення частки енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання. Наведено приклад розрахунку сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця при точінні, і показано, що частка енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання на задній поверхні різця при передньому куті різця  $\gamma = 20^\circ$  порівнянна, а при  $\gamma = -10^\circ$  значно більше частки енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання на передній поверхні різця. Отримані результати підтверджують достовірність запропонованого теоретичного підходу до визначення сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця.

**Ключові слова:** сила різання, різець, точіння, знос різця, задня поверхня різця, передній кут різця, тертя, енергетичний баланс.

Предложен новый теоретический подход к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца, с позиции раздельного учета процессов резания и трения. Это позволило произвести их расчет на основе экспериментально установленных значений тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и научно обоснованно подойти к определению условий уменьшения доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания. Приведен пример расчета сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца при точении, и показано, что доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности резца при переднем угле резца  $\gamma = 20^\circ$  сопоставима, а при  $\gamma = -10^\circ$  значительно больше доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца. Полученные результаты подтверждают достоверность предложенного теоретического подхода к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца.

**Ключевые слова:** сила резания, резец, точение, износ резца, задняя поверхность резца, передний угол резца, трение, энергетический баланс.

A new theoretical approach to the determination of the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter, with the cutting position of the separate accounting processes and friction. This allowed them to settle on the basis of experimentally determined values of the tangential and radial components of the cutting forces and scientifically approach to determining the conditions of friction reduction of the share of energy in the overall energy balance of the cutting process. An example of calculating the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the tool during turning, and it is shown that the proportion of the friction energy in the total energy balance of the process of cutting the rear surface of the cutter rake angle in cutter comparable  $\gamma = 20^\circ$  and  $\gamma = -10^\circ$  significantly greater proportion of energy friction in the overall energy balance cutting process on the front surface of the tool. These results confirm the accuracy of the proposed theoretical approach to the determination of the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter.

**Keywords:** cutting force, tool, turning, tool wear, the back surface of the tool, the tool rake angle, the friction energy balance.

**Постановка проблеми.** Процес точення являється одним из основных методов формообразования поверхностей деталей машин резанием благодаря относительно низкой энергоёмкости обработки. Это позволяет производить высокопроизводительную обработку в широких диапазонах изменения параметров режима резания, включая высокоскоростное резание. Использование современных сборных твердосплавных резцов с износостойкими покрытиями открыло новые возможности интенсификации процесса обработки и достижения высоких показателей качества обрабатываемых поверхностей. Одним из ограничивающих факторов при этом является увеличение силовой и тепловой напряженности процесса резания в связи с износом инструмента и образования на нем площадок износа. Поэтому важно количественно оценить силы резания, возникающие на передней и задней поверхностях резца при резании, в зависимости от степени его износа и обосновать условия их уменьшения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследованию сил резания, возникающих в процессе точения, в научно-технической литературе уделено чрезвычайно большое внимание [1–3]. Экспериментально установлены взаимосвязи составляющих силы резания с основными технологическими пара-

метрами обработки для различных обрабатываемых и инструментальных материалов с учетом геометрических параметров резца. На их основе получены эмпирические зависимости. Однако, в научно-технической литературе отсутствуют аналитические зависимости, раздельно описывающие силы резания, возникающие на передней и задней поверхностях резца, с учетом величины площадки износа, образующейся на задней поверхности резца. Отсутствие этих зависимостей не позволяет в полной мере оценить роль длины площадки износа в формировании силовой и тепловой напряженности процесса резания и определить условия, при которых возможен процесс резания без ухудшения качества обрабатываемых поверхностей. Поэтому важно установить эти зависимости.

**Цель работы** – разработка теоретического подхода к определению сил резания, возникающих на передней и задней поверхностях резца, с учетом величины площадки износа, образующейся на задней поверхности резца.

**Изложение основного материала.** Тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания при точении, обусловленные процессами резания и точения, в общем виде могут быть описаны следующими зависимостями [4–6]:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{мп}} ; \tag{1}$$

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{мп}} , \tag{2}$$

где  $P_{z_{рез}} ; P_{y_{рез}}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на передней поверхности резца, Н;

$P_{z_{мп}} ; P_{y_{мп}}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на задней поверхности резца, вследствие трения обрабатываемого материала с площадкой износа, образующейся на задней поверхности резца, Н.

Как установлено в работе [6], отношение  $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg(\psi - \gamma)$ , где  $\psi$  – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью резца ( $tg \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  – положительный передний угол резца.

При условии  $\gamma = 0$  отношение  $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg \psi = 1 / f$ . С определенным приближением можно принять, что  $P_{z_{мп}} / P_{y_{мп}} = f$ . Тогда зависимости (1) и (2) выразятся:

$$P_z = P_{z_{рез}} \cdot \left( 1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right) ; \tag{3}$$

$$P_y = f \cdot P_{z_{рез}} + \frac{P_{z_{мп}}}{f} = P_{z_{рез}} \cdot \left( f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right) . \tag{4}$$

В результате удалось выразить составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  через отношение  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ . С его увеличением составляющие силы резания увеличиваются, что согласуется с практикой резания.

Поскольку коэффициент трения  $f < 1$ , и соответственно отношение  $1 / f$ , стоящее во втором слагаемом зависимости (4), всегда больше коэффициента трения  $f$ , стоящего в первом слагаемом, то по мере увеличения отношения  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$  второе слагаемое будет существенно увеличиваться до значения первого слагаемого и более. Этим показано, что наличие отношения  $1 / f$ , стоящего во втором слагаемом зависимости (4), предопределяет значительный рост ради-

альной составляющей силы резания  $P_y$  и, соответственно, повышение силовой и тепловой напряженности процесса резания, снижение качества и точности обрабатываемых поверхностей с течением времени обработки, т.е. по мере износа резца по задней поверхности.

Очевидно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$ , описываемая зависимостью (3), в значительно меньшей степени зависит от увеличения отношения  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ , чем радиальная составляющая силы резания  $P_y$ , описываемая зависимостью (4). Для оценки интенсивности изменения отношения  $P_z / P_y$  необходимо проанализировать зависимость:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\left( 1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)}{\left( f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)} . \tag{5}$$

В табл. 1 приведены расчетные значения отношения  $P_z / P_y$  в зависимости от отношения  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$  для различных значений коэффициента трения  $f$ . Как видно, с увеличением отношения  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$  отношение  $P_z / P_y$  непрерывно уменьшается от значения  $1 / f$  (при  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0$ ) до значений, меньших единицы. Следовательно, в начальный момент обработки, когда  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0$ , отношение  $P_z / P_y = 1 / f$  принимает значения, большие единицы, т.е.  $P_z > P_y$ . При значении  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0,5$  отношение  $P_z / P_y$  меньше единицы, т.е.  $P_z < P_y$ , а с уменьшением коэффициента трения  $f$  до значения 0,1 отношение  $P_z / P_y$  становится меньше единицы даже при меньшем значении  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ .

Чтобы определить значение отношения  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ , при котором отношение  $P_z / P_y$  становится равным единице, необходимо решить уравнение, полученное на основе зависимости (5):

Таблица 1

Расчетные значения отношения  $P_z / P_y$

$P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$	0	0,125	0,25	0,5	0,75	1	2	10
$P_z / P_y$ для $f = 0,3$	3,33	1,57	1,1	0,763	0,625	0,55	0,43	0,32
$P_z / P_y$ для $f = 0,1$	10	0,83	0,48	0,294	0,23	0,198	0,1	0,099

$$\frac{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)}{\left(f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)} = 1. \quad (6)$$

В результате решения уравнения получено:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zpez}} = f. \quad (7)$$

Следовательно, отношение  $P_z/P_y$  принимает значение, равное единице при условии  $P_{zmp}/P_{zpez} = f$ , т.е. чем больше коэффициент трения  $f$ , тем больше значение  $P_{zmp}/P_{zpez}$ . Этим объясняются результаты расчетов, приведенные в табл. 1. Так, с увеличением коэффициента трения  $f$  (с 0,1 до 0,3) отношение  $P_{zmp}/P_{zpez}$ , при котором выполняется условие  $P_z/P_y=1$ , увеличивается, а отношение  $P_z/P_y$  также принимает большие значения.

Полученное решение справедливо для нулевого переднего угла резца. В случае положительного переднего угла резца  $\gamma$  имеем [6]:

$$\frac{P_{zpez}}{P_{ypez}} = ctg(\psi - \gamma) = \frac{(1 + f \cdot tg\gamma)}{(f - tg\gamma)}. \quad (8)$$

Тогда зависимость (2) примет вид:

$$P_y = P_{zpez} \cdot \left( \frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}} \right). \quad (9)$$

С увеличением переднего угла резца  $\gamma$  первое слагаемое в зависимости (9) уменьшается, что усиливает второе слагаемое в случае образования на задней поверхности резца площадки износа.

Отношение  $P_z/P_y$  с учетом зависимостей (1) и (9) опишется:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)}{\left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)}. \quad (10)$$

Используя экспериментальные значения отношения  $P_z/P_y$ , можно рассчитать значения отношения  $P_{zmp}/P_{zpez}$ . Это открывает новые возможности анализа закономерностей изменения составляющих силы резания, обусловленных процессами резания и трения.

При условии  $P_z/P_y=1$  зависимость (10) принимает вид уравнения относительно неизвестной величины  $P_{zmp}/P_{zpez}$ :

$$\frac{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)}{\left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}}\right)} = 1. \quad (11)$$

Его решение:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zpez}} = \frac{\left(1 - \frac{f \cdot tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma}\right) \cdot f}{(1 - f)}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения отношения  $P_{zmp}/P_{zpez}$  в зависимости от переднего угла резца  $\gamma$  для  $f=0,3$ . Как видно, с увеличением  $\gamma$  отношение  $P_{zmp}/P_{zpez}$  увеличивается. Это указывает на то, что условие  $P_z/P_y=1$  выполняется при большем значении  $P_{zmp}$  по отношению к значению  $P_{zpez}$ . Следовательно, в этом случае величина площадки износа, образующаяся на задней поверхности резца, меньше влияет на отношение  $P_z/P_y$ , т.е. в большем диапазоне изменения  $P_{zmp}/P_{zpez}$  справедливо условие  $P_z > P_y$  и с меньшей силовой напряженностью осуществляется процесс резания.

Таблица 2 – Расчетные значения отношения  $P_{zmp}/P_{zpez}$

$\gamma$ , градус	0	10	20	30
$P_{zmp}/P_{zpez}$	0,3	0,378	0,453	0,53

Для оценки достоверности полученного теоретического решения произведен анализ изменения отношения  $P_{zmp}/P_{zpez}$  на основе экспериментальных значений составляющих силы резания при точении (рис. 1 [2]). В данном случае имеет место несвободное резание, поэтому в качестве величины  $P_y$  следует рассматривать величину  $\sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ .

Приведенные в табл. 3 экспериментально установленные значения отношения  $P_z/P_y$  показывают, что с уменьшением переднего угла резца  $\gamma$  (т.е. с переходом от положительных к отрицательным значениям  $\gamma$ ) они уменьшаются. Следовательно, чем больше положительный передний угол резца  $\gamma$ , тем больше отношение  $P_z/P_y$  и выше эффективность

процесса резания, т.к. меньше интенсивность трения резца с обрабатываемым материалом.

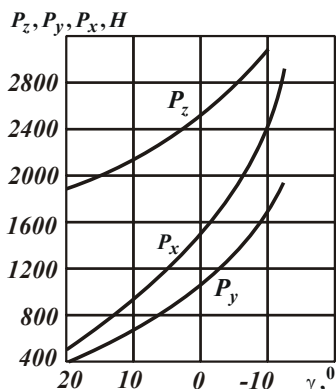


Рис. 1 – Влияние переднего угла на силы  $P_z, P_y, P_x$  при точении: сталь 40;  $\phi = 60^\circ$ ;  $t = 4$  мм;  $S = 0,285$  мм/об.;  $V = 40$  м/мин [2]

Таблица 3 – Экспериментальные значения  $P_z, P_y$  и  $P_z/P_y$

$\gamma$ , градус	20	10	0	-10
$P_z$ , Н	1850	2150	2550	3100
$P_y$ , Н	600	1060	1740	2970
$P_z/P_y$	3,083	2,028	1,465	1,043

Как следует из табл. 3, при переднем угле резца  $\gamma = -10^\circ$  отношение  $P_z/P_y$  практически равно единице. В общем случае установить зависимость между отношениями  $P_{zmp}/P_{zрез}$  и  $P_z/P_y$  можно на основе уравнения (10), представляя его в виде:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} = \frac{\left[ \left( \frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} \right) \frac{P_y}{P_z} \right]}{\left( \frac{P_y}{P_z} - \frac{1}{f} \right)} \quad (13)$$

В табл. 4 приведены рассчитанные на основе зависимости (13) значения отношения  $P_{zmp}/P_{zрез}$  для  $f = 0,4$  с учетом экспериментальных значений  $P_z/P_y$ , полученных по данным табл. 3. Как видно, с уменьшением переднего угла резца  $\gamma$  они увеличиваются.

Таблица 4 – Расчетные значения  $P_{zmp}/P_{zрез}$

$\gamma$ , градус	20	10	0	-10
$P_z/P_y$	3,083	2,028	1,465	1,043
$P_{zmp}/P_{zрез}$	0,1346	0,1415	0,155	0,22

Сравнивая полученное значение  $P_{zmp}/P_{zрез} = 0,155$  (для  $\gamma = 0$ ) с аналогичными значениями, приведенными в табл. 1, видно, что оно получено при относительно небольшом износе резца по задней поверхности, т.к. в противном случае оно принимало бы весьма большие значения ( $P_{zmp}/P_{zрез} = 0,5 \dots 10$ ). Это указывает на то, что производились непродолжительные экспериментальные исследования, в результате чего резец изнашивался незначительно и поэтому отношение  $P_{zmp}/P_{zрез}$  принимает небольшое значение.

Для определения значений составляющих силы резания  $P_{zрез}$  и  $P_{zmp}$  необходимо воспользоваться зависимостью (3), представляя ее в виде:

$$P_{zрез} = \frac{P_z}{\left( 1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)} \quad (14)$$

Используя значения  $P_{zmp}$ , приведенные в табл. 4, в табл. 5 приведены рассчитанные на основе зависимостей (14) и  $P_{zmp} = P_z - P_{zрез}$  значения  $P_{zрез}$  и  $P_{zmp}$ .

Таблица 5 – Расчетные значения  $P_{zрез}, P_{zmp}$  и  $P_{zmp}/P_z$

$\gamma$ , градус	20	10	0	-10
$P_{zрез}$ , Н	1630,5	1883,5	2207,8	2541
$P_{zmp}$ , Н	219,5	266,5	342,2	559
$P_{zmp}/P_z$	0,119	0,124	0,134	0,18

Как следует из табл. 5, с уменьшением переднего угла резца  $\gamma$  значения  $P_{zрез}$  и  $P_{zmp}$  увеличиваются. Это связано с увеличением интенсивности трения в зоне резания. Однако  $P_{zрез} > P_{zmp}$ , т.к. производились непродолжительные экспериментальные исследования, резец изнашивался незначительно, и отношение  $P_{zmp}/P_{zрез}$  принимало небольшие значения.

Отношение  $P_{zmp}/(P_{zрез} + P_{zmp}) = P_{zmp}/P_z$ , по физической сути определяет долю энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца. Исходя из табл. 5, оно изменяется в небольших пределах 0,119...0,18, т.е. доля энергии трения составляет 11,9...18%. Очевидно,

но, уменьшить долю энергии трения можно увеличением переднего угла резца  $\gamma$ .

Составляющие силы резания  $P_{y_{рез}}$  и  $P_{y_{мп}}$ , исходя из зависимости (9), определяются:

$$P_{y_{рез}} = \left( \frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} \right) \cdot P_{z_{рез}}; \quad (15)$$

$$P_{y_{мп}} = \frac{1}{f} \cdot P_{z_{мп}}. \quad (16)$$

В табл. 6 приведены расчетные значения  $P_{y_{рез}}$  и  $P_{y_{мп}}$  с учетом значений  $P_{z_{рез}}$  и  $P_{z_{мп}}$  из табл. 5.

Таблица 6 – Расчетные значения  $P_{y_{рез}}$ ,  $P_{y_{мп}}$ ,  $P_{y_{мп}} / P_{y_{рез}}$  и  $P_{y_{рез}} / P_y$

$\gamma$ , градус	20	10	0	-10
$P_{y_{рез}}$ , Н	51,2	393,8	884,5	1572,5
$P_{y_{мп}}$ , Н	548,8	663,3	855,5	1397,5
$P_y$ , Н	600	1057,1	1740	2970
$P_{y_{мп}} / P_{y_{рез}}$	10,72	1,69	0,97	0,89
$P_{y_{рез}} / P_y$	0,085	0,373	0,508	0,53

Как следует из табл. 6, с уменьшением переднего угла резца  $\gamma$  значения  $P_{y_{рез}}$  и  $P_{y_{мп}}$  увеличиваются. При этом в диапазоне  $\gamma=20\dots 0^0$  выполняется условие  $P_{y_{мп}} > P_{y_{рез}}$ , а при условии  $\gamma < -10^0$ , наоборот,  $P_{y_{мп}} < P_{y_{рез}}$ , что связано с ухудшением условий стружкообразования при резании.

Отношение  $P_{y_{мп}} / P_{y_{рез}}$  с уменьшением переднего угла резца  $\gamma$  уменьшается, особенно интенсивно в диапазоне  $\gamma=20\dots 0^0$ .

С целью проверки правильности выполненных расчетов в табл. 6 приведены расчетные значения радиальной составляющей силы резания  $P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{мп}}$ . Как видно, они фактически совпадают с экспериментально установленными значениями (табл. 3). Это свидетельствует о достоверности выполненных расчетов и предложенного теоретического подхода к определению сил резания, возникающих на передней и задней поверхностях резца при точении, с учетом величины площадки износа, образующейся на задней поверхности резца.

Отношение  $P_{y_{рез}} / (P_{y_{рез}} + P_{y_{мп}}) = P_{y_{рез}} / P_y$ , по физической сути определяет долю энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности резца. Исходя из табл. 6, оно изменяется в широких пределах (0,085...0,53), т.е. доля энергии трения составляет 8,5...53 %. Уменьшить до-

лю энергии трения можно увеличением переднего угла резца  $\gamma$ . Как видно, доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности резца при переднем угле резца  $\gamma=20^0$  сопоставима, а при  $\gamma=-10^0$  значительно больше доли энергии трения в энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца.

**Выводы.** В работе получены аналитические зависимости для определения сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца, с позиции раздельного учета процессов резания и трения. Это позволило произвести их расчет на основе экспериментально установленных значений тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и научно обоснованно подойти к определению условий уменьшения доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания. Приведен пример расчета сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца при точении, и показано, что доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности резца при переднем угле резца  $\gamma=20^0$  сопоставима, а при  $\gamma=-10^0$  значительно больше доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца. Полученные результаты подтверждают достоверность предложенного теоретического подхода к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца.

#### Список литературы

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. Резание металлов / С.Н. Филоненко. – К.: Вища школа, 1969. – 260 с.
4. Алмазная обработка: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – К.: ИЗМН, 1996. – 168 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.

#### References (transliterated)

1. Granovskiy G.I. Rezanie metallov: uthebnik / G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy – M.: Vyschaya shkola, 1985. – 304 s.
2. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s.
3. Rezanie metallov / S.N. Filonenko. – Kiev: Vysha shkola, 1969. – 260 s.
4. Almaznaya obrabotka: utheb. posobie / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov, A.A. Yakimov. – Kiev: IZMN, 1996. – 168 s.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". – 580 s.
6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – T. 4. "Teoriya abrazivnoy s almazno-abrazivnoy obrabotki materialov". – 802 s.

Поступила (received) 03.03.2016

