

НАРОСТЫ НА ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

С. В. Швеи*, канд. техн. наук, доцент;

В. П. Астахов**, д-р техн. наук, профессор,

* Сумский государственный университет,

ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, г. Сумы, Украина;

E-mail: shvets46@yandex.ru

**Michigan State University,

2453 Engineering Building East Lansing, MI 48824-1226, USA;

E-mail: astakhov@msu.edu

В статье представлены исследования формы и размеров части нароста на корне стружки. Аналитически определены основные размеры нароста. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений параметров нароста, что указывает на адекватность математической модели.

Ключевые слова: застойная зона, нарост, модель, шероховатость, точение, процесс резания.

ВВЕДЕНИЕ

При резании материалов, обладающих в той или иной мере пластическими свойствами, у вершины лезвия образуется область повышенной пластичности. В процессе резания, из-за его цикличности, эта область периодически распределяется между стружкой (сглаживая ее прирезцовую поверхность), лезвием (в виде застойной зоны на передней поверхности) и обработанной поверхностью (увеличивая высоту остаточного гребешка). После останковки процесса она наблюдается в виде наростов на лезвии и на микропрофиле обработанной поверхности. Условия образования застойной зоны (нароста), ее форма и размеры изучались и продолжают изучаться [1-4] в связи с тем, что это образование влияет на работу стружкообразования [5, 6], на точность и качество обработанной поверхности [7, 8].

Установлено, что размеры и устойчивость нароста коррелируется со стойкостью инструмента [1, 9].

Радиус кривизны его передней поверхности влияет на радиус спирали стружки [10, 11], что связано с условием ее дробления [12].

Для расчета геометрически формируемой высоты остаточного гребешка, в зависимости от обстоятельств, используются формулы А. И. Исаева [13]. Исходными данными для них служат: S – подача, r – радиус при вершине, φ – главный угол в плане, φ^1 – вспомогательный угол в плане.

Сложность заключалась в выборе формулы. Но даже когда для автоматического выбора одной из них был разработан специальный алгоритм [14], это не позволило приравнять значение высоты остаточного гребешка к параметру шероховатости поверхности Rz . Распределение пластической области у вершины лезвия между элементами системы резания способствовало увеличению высоты неровностей обработанной поверхности. Во-первых, как было сказано выше, это образование нароста на остаточном гребешке. Во-вторых, доказано [6, 8], что кривизна линии скольжения, по которой застойная зона разграничивает стружку и поверхность детали отличается от радиуса при вершине лезвия. Расчет реальной высоты профиля поверхности должен выполняться с использованием реального радиуса, то есть радиуса кривизны линии скольжения.

Таким образом, расчет параметров застойной зоны необходим для прогнозирования параметров точности и качества обработанной поверхности, вскрытия условий завивания и дробления стружки, углубления представления о процессе резания – о его энергетических и временных характеристиках.

Для моделирование застойной зоны необходимы простые и надежные методы расчета.

Цель статьи – получить формулы для приемлемой точности расчетов геометрических параметров застойной зоны при минимальных затратах временных и машинных ресурсов.

1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАСТОЙНОЙ ЗОНЫ

В процессе резания пластичных металлов и сплавов на вершине лезвия формируется застойная зона. После прекращения процесса она проявляется в виде нароста. В связи со стохастичностью и цикличностью процесса, размеры и положение нароста не всегда совпадают с аналогичными параметрами застойной зоны. Очевидно, что застойную зону можно ограничить линиями скольжения, как траекториями действий касательных напряжений, по которым разделяются движущиеся и неподвижные массы металла. Пластически деформированная застойная зона на вершине лезвия находится в состоянии равновесия. При этом один из экстремальных принципов гласит, что «действительная форма равновесия пластически деформируемого тела отличается от всех других мыслимых форм тем, что сообщает полной энергии минимальное значение» [15]. Если механическая работа на поверхностях застойной зоны определяется длиной траектории, по которой действуют уравнивающие силы, то кратчайшим криволинейным путем является

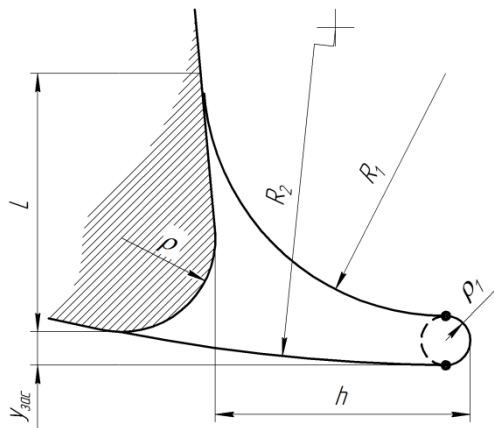


Рисунок 1 – Ограничение линиями скольжения застойной зоны

дуга окружности. Поэтому, учитывая принцип минимальности энергии, ограничим поверхности застойной зоны дугами окружностей (рис. 1), что соответствует широко применяемому и математически исследованному полю линий скольжения, образованного дугами окружностей.

Радиус округления застойной зоны ρ_1 зависит от пластических свойств обрабатываемого материала при резании. Образование застойной зоны происходит в условиях сверхпластичности обрабатываемого материала. Сверхпластичность характерна для поликристаллических мелкозернистых (с размером зерна менее 10 мкм) материалов и наблюдается в материалах с некоторым

оптимальным размером зерна G_{opt} . При исследовании магниевого сплава AZ31 с размером зерен $G = (3 - 6,5)$ мкм установлено [16], что при температуре 423K $G_{opt} = 3,8$ мкм. Алюминиевый сплав 1421 с размером зерен $G = (0,3 - 2)$ мкм показывает $G_{opt} = 0,4$ мкм.

Зерна металлов – это отдельные кристаллы поликристаллического конгломерата, разделенные между собой смежными поверхностями, называемыми границами зерен [17]. Величина зерна – средняя величина случайных сечений зерен в плоскости металлографического шлифа (например, средний условный диаметр). Средний условный диаметр зерен для сталей и сплавов в состоянии поставки по стандарту для мелких и очень мелких зерен (номера 10–14) находится в пределах $G_{cp} = (0,011 - 0,0027)$ мм.

Согласно [4] после преобразований радиус передней поверхности R_1 , задней поверхности R_2 , высота h застойной зоны и отклонение ее от задней поверхности лезвия u_{zac} определяются по формулам:

$$R_1 = \frac{L \cos(\gamma) - 2\rho_1 - \left(L \cos(\gamma) + \frac{\sin\left(\frac{\pi - \gamma + \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} \right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tan(\gamma)}{\cos(\gamma) \left(\tan\left(\frac{\pi - \gamma}{4 - \frac{\gamma}{2}}\right) - \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right)} +$$

$$+ \frac{\rho \frac{\sin\left(\frac{\pi - \gamma + \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{\rho \cos(\alpha) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} + \rho \sin\left(\frac{\alpha}{\tan\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)}\right) - \rho}{\cos(\gamma) \left(\tan\left(\frac{\pi - \gamma}{4 - \frac{\gamma}{2}}\right) - \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right)}, \quad (1)$$

$$R_2 = R_1 \frac{\cos \gamma}{\sin \alpha} - 2L \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} + \frac{\rho}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right) \tan \alpha}, \quad (2)$$

$$y_{\text{çàñ}} = \left(R_1 \cos \gamma - \left(L \cos \gamma - \rho + \rho \frac{\sin\left(\frac{\pi - \gamma + \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} \right) \tan \gamma + \frac{\rho \cos \alpha}{\tan\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} \right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) -$$

$$- \rho + \rho \frac{\sin\left(\frac{\pi - \gamma + \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} + \rho \sin\left(\frac{\alpha}{\tan\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)}\right), \quad (3)$$

$$h = R_1 \cos \gamma - \left(L \cos \gamma + \rho \frac{\sin\left(\frac{\pi - \gamma + \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} - \rho \right) \tan \gamma + \rho_1 - \rho + \rho \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \gamma - \alpha}{4 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (4)$$

Исходя из выше сказанного, можно предположить, что сверхпластичности металла в области застойной зоны способствует мелкозернистая структура, сформированная в условиях высоких температур и давлений. Радиус округления застойной зоны равен среднему радиусу зерна, а значит для металлов с номерами зерен 10–14

$$\rho_1 = G_{\text{cp}}/2 \approx (0,0055 - 0,00135) \text{ мм.}$$

Расчеты по формулам (1) – (4) показывают, что изменение ρ_1 в этих пределах при $L = 1$ мм изменяет расчетные параметры не более чем на 0,8 %. При длине пластического контакта 10 мм эти изменения не выходят за сотые доли процента.

Поэтому для дальнейших исследований вполне можно принимать радиус округления застойной зоны равным среднему радиусу зерна, $\rho_1 = 5$ мкм.

Радиус округления лезвия зависит от свойств инструментального материала (вязкость, структура) и технологии его создания или заточки. Обычно у лезвий из быстрорежущей стали $\rho = 12 - 15$ мкм, из твердого сплава $\rho = 18 - 26$ мкм [18]. Острота лезвия, ρ , оказывает существенное влияние на высоту застойной зоны и на радиус линии, ограничивающей ее заднюю поверхность. При изменении ρ в пределах от 10 до 30 мкм h изменяется на 10,5 %, а R_2 на 2,7 %.

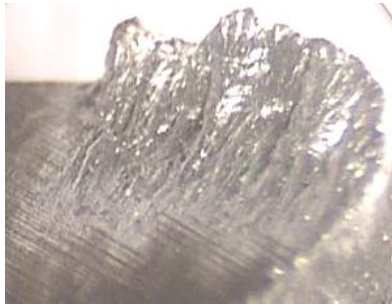


Рисунок 2 – Нарост на режущей пластинке TNGN160408 из T15K6 при точении стали 45:
 $v=49$ м/мин; $s=0,38$ мм/об;
 $t=0,3$ мм; $\varphi=93^\circ$; $\varphi'=27^\circ$

Длину основания нароста L можно приравнять к длине пластического контакта, что вполне согласуется с практическими результатами (рис. 2). Площадь пластического контакта равна $F = Lb = Pz/\rho$, где b – ширина пластического контакта (ширина стружки); $\rho = \eta\sigma_s$ – удельное усилие деформирования.

Удельное усилие деформирования зависит от величины напряжения текучести ρ_s , от вида осуществляемого процесса, контактного трения, скорости и величины деформации, что выражается значением обобщающего коэффициента η .

Условия деформирования при резании, очевидно, занимают промежуточное положение между осадкой полосы и внедрением пуансона в полупространство: две стороны деформируемого объема свободны, как у полосы, а две другие

стороны сопряжены с массой металла, как при внедрении пуансона. Предположим, что и численное значение η занимает промежуточное значение между этими процессами. По [15] при осадке полосы $\eta = 1$, а при внедрении пуансона в полупространство $\eta = 4$. Тогда $\eta = (1+4)/2 = 2,5$.

Учитывая, что $b = t/\sin \varphi$, находим длину основания нароста:

$$L = \frac{P_z \sin \varphi}{t \sigma_s \eta}$$

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчетные и экспериментальные радиусы передней поверхности нароста на лезвии при точении различных материалов резцом из T15K6 (табл.1) имеют достаточно близкие значения. При этом полное их совпадение исключено. Это связано с нестабильностью процесса формирования нароста на передней поверхности. Более точные результаты можно получить при исследовании остатков наростов на корнях стружек.

Таблица 1—Экспериментальные и расчетные параметры наростов
при $S = 0,26$ мм/об, $t = 0,5$ мм, $\varphi = 90^\circ$, $\varphi' = 30^\circ$, $r = 0,8$ мм

Сталь X18H10T							
v , м/мин	1,18	2,36	3,77	9,42	18,84	37,68	59,35
$L_{\text{экс}}$, мм	1,38	1,18	1,3	0,75	1,54	0,93	0,99
$R_{1\text{экс}}$, мм	1,6	1,87	1,55	0,98	1,86	1,55	1,22
$R_{1\text{расч}}$, мм	1,47	1,25	1,38	0,79	1,64	0,99	1,05
Алюминий							
v , м/мин	2,10	4,20	6,72	16,80	32,97	64,68	97,92
$L_{\text{экс}}$, мм	1,6	1,61	1,93	1,73	1,85	1,86	1,51
$R_{1\text{экс}}$, мм	1,98	2,05	1,74	2,26	2,15	2,06	2,11
$R_{1\text{расч}}$, мм	1,7	1,71	2,05	1,84	1,97	1,98	1,6

Сравнение расчетных значений размерных параметров застойной зоны при длине пластического контакта $L=0,28$ мм и принятых исходных параметрах ($\rho_1=0,003$ мм, $\rho=0,02$ мм, $\alpha=7^\circ$, $\gamma=0^\circ$) с полученными параметрами нароста на корне стружки (рис.3) показывает значительно лучшее совпадение: $R_{1\text{расч}} = 0,299$ мм, $R_{1\text{экс}} = 0,298$ мм; $R_{2\text{расч}} = 2,64$ мм, $R_{2\text{экс}} = 2,67$ мм.

Линия скольжения, по которой застойная зона отделяется от поверхности детали –

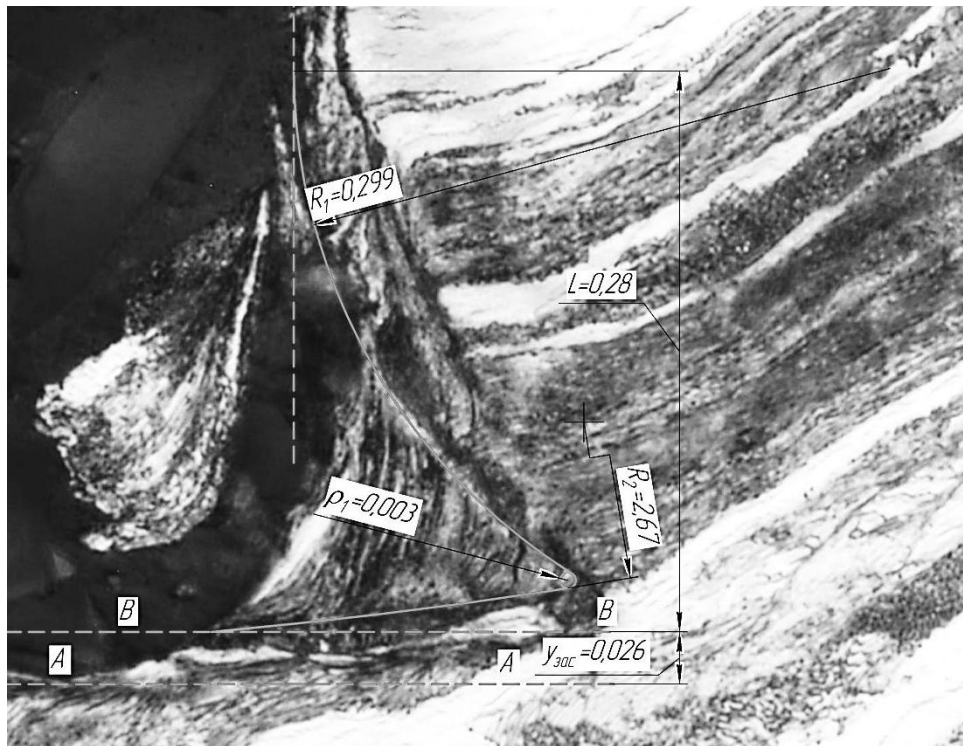


Рисунок 3 – Остаток нароста на корне стружки:
обрабатываемый материал – ANSI 1045 steel, HB 140; режущая пластина M160312
(Kennametal), инструментальный материал – KC850;
 $v = 170$ м/мин; $S = 0,10$ мм/об; $t = 1,2$ мм

это дуга радиуса R_2 . Эта линия сопрягается с окружностью радиуса округления вершины застойной зоны ρ_1 и сопрягается с задней поверхностью. Теоретическая граница задней поверхности застойной зоны совпадает, за исключением некоторой выпуклости посередине, с задней поверхностью нароста.

Может показаться, что расположение нароста на корне стружки не соответствует известным и доказанным выводам теории резания. Очевидно, что при приложении нагрузки к лезвию зарождающееся в металле поле напряжений у вершины лезвия соответствует классическому распределению при внедрении пуансона в полупространство (рис. 4). Следовательно, пластические деформации распространяются не только в срезаемом слое, а и в заготовке ниже обработанной поверхности. Об этом свидетельствует и факт образования наклепа. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла в зоне резания (рис.5) также подтверждает выход застойной зоны за заднюю поверхность лезвия.

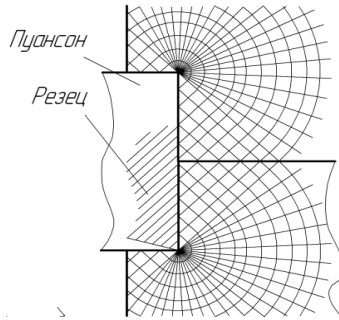


Рисунок 4 – Поля напряжений при резании и внедрении пуансона

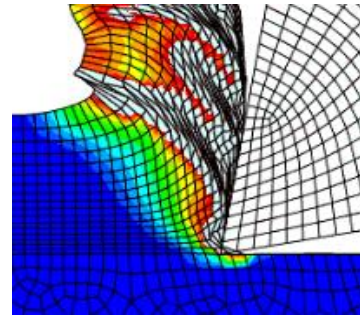


Рисунок 5 – Моделирование напряженного состояния в зоне резания с помощью МКЭ

Однако из рисунка 3 следует, что в данный момент вершина нароста не только не выходит за заднюю поверхность лезвия, а, наоборот, расположена выше линии $A-A$, обозначающей предшествующее положение обработанной поверхности.

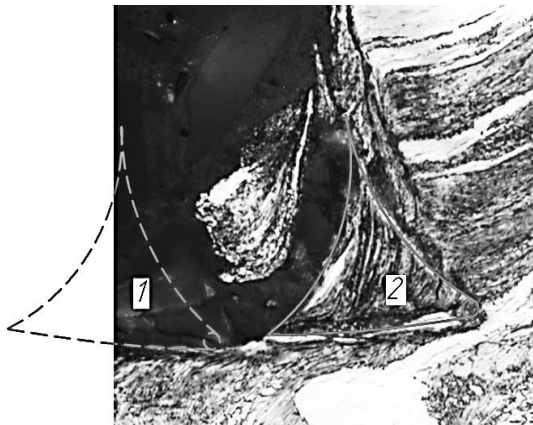


Рисунок 6 – Движение части нароста со стружкой после его разрушения

Такое кажущееся несоответствие объясняется нестабильностью нароста. Подъем обработанной поверхности в положение $B-B$ произошел вследствие его срыва – нарост из положения 1 (рис. 6) сдвинулся вместе со стружкой в положение 2. При этом линия $B-B$ обозначает траекторию движения крайней точки лезвия без нароста. Тогда расстояние между линиями

$A-A$ и $B-B$ соответствует максимальному выходу застойной зоны за заднюю поверхность лезвия. Расчет

по формуле (3) полностью это подтверждает: $u_{зас_расч} = 0,025$ мм, $u_{зас_эсп} = 0,026$ мм. Согласно формуле

(4) максимальная высота застойной зоны $h = 0,3$ мм.

ВЫВОДЫ

1. Рассчитанные по предложенным зависимостям параметры застойной зоны хорошо согласуются с экспериментальными результатами, что подтверждает правильность использованной методики создания математической модели.

2. При наличии застойной зоны ее вершина всегда выходит за заднюю поверхность лезвия, что следует учитывать при прогнозировании точности обработанной поверхности.

3. Образование застойной зоны увеличивает шероховатость обработанной поверхности, поэтому в дальнейших исследованиях необходимо установить связь радиуса кривизны линии скольжения, разграничивающей стружку и поверхность детали, с высотой и величиной выхода за заднюю поверхность застойной зоны.

OUTGROWTHS ON ELEMENTS OF SYSTEM OF CUTTING

S. V. Shvets*, V. P. Astakhov**,

*Sumy state university,

2 Rimskogo-Korsakova Str., 40007 Sumy, Ukraine;

E-mail: shvets46@yandex.ru

**Michigan State University,

2453 Engineering Building East Lansing, MI 48824-1226, USA;

E-mail: astakhov@msu.edu

The paper deals with the shape and dimensions of the built-up edge left on the chip root. The dimensions of the built-up edge are determined analytically and then the obtained results were verified experimentally. A good agreement the analytical results with those obtained experimentally proved the adequacy of the proposed analytical model.

Key words: stagnant zone, built-up edge, model, roughness, turning, cutting process.

НАРОСТИ НА ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ РИЗАННЯ

С. В. Швець*, В. П. Астахов**,

*Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, м. Суми, Україна;

E-mail: shvets46@yandex.ru

**Michigan State University,

2453 Engineering Building East Lansing, MI 48824-1226, USA;

E-mail: astakhov@msu.edu

У статті наведені дослідження форми і розмірів частини наросту на корені стружки. Аналітично визначені основні розміри наросту. Розрахункові та експериментальні значення параметрів наросту добре збігаються, що вказує на адекватність математичної моделі.

Ключові слова: застійна зона, нарост, модель, шорсткість, точіння, процес різання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аваков А. А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов / А. А. Аваков. – М. : Машгиз, 1960. – 306 с.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Швець С. В. Наростообразование и процесс резания / С. В. Швець // Проблемы трибологии. – 1998. – №2. – С.17–20.
4. Швець С. В. Расчет параметров застойной зоны на вершине лезвия / С. В. Швець // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 112– 117.
5. Astakhov V. P. A System Concept in Metal Cutting/ V. P. Astakhov, S. V. Shvets // Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 79/1–3. – P. 189– 199.
6. Швець С. В. Системный анализ теории резания / С. В. Швець. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2009. –212 с.
7. Куфарев Г. Л. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании / Г. Л. Куфарев, К. Б. Окенов, В. А. Говорухин. – Фрунзе : Мектеп, 1970. – 168 с.
8. Швець С. В. Расчет шероховатости обработанной поверхности при точении / С. В. Швець // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4(18). –С. 27– 32.
9. Лоладзе Т. Н. Стружкообразование при резании металлов/ Т. Н. Лоладзе. – М. : Машгиз, 1952. – 199 с.
10. Куфарев Г. Л. Причины и механизм формирования стружки пластичных металлов в спирали различных типов /Г. Л. Куфарев // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. – Томск : ТПУ, 1997.– С. 34– 40.
11. Emelyanov S. G. Chip Curlingin Metal Cutting/ S. G. Emelyanov, E. I. Yatsun, A. I. Remnev, S. V. Shvets // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, No 7. – P. 679– 684.
12. Филоненко С. Н. Электроискровое дробление стружки/ С. Н. Филоненко, В. С. Глушенко // Вестник машиностроения. – 1975. – № 1.– С. 24– 26.

13. Исаев А. И. Влияние материала режущей части инструмента на чистоту обработанной поверхности /А. И. Исаев // Чистовая обработка конструкционных металлов. – М. : Машгиз, 1951. – С. 66– 69.
14. Швец С. В. Основы формообразования поверхностей резанием / С. В. Швец. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2011. –127 с.
15. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов.– М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
16. Влияние размера зерна и структурного состояния границ зерен на параметры низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности нано- и микрокристаллических сплавов/В. Н. Чувильдеев, А. В. Щавлева, А. В. Нохрин, О. Э. Пирожникова, М. Ю. Грязнов, Ю. Г. Лопатин, А. Н. Сысоев, Н. В. Мелехин, Н. В. Сахаров, В. И. Копылов, М. М. Мышляев //Физика твердого тела. –2010. – Т. 52, Вып. 5. – С. 1026 –1033.
17. ГОСТ 5639–82:2010. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
18. Филоненко С. Н. Резание металлов / С. Н. Филоненко. – К. : Техника, 1975. – 156 с.

Поступила в редакцию 12 апреля 2013 г.