

УДК 621.9.01.001.572

Голобородько Л. В., Криворучко Д. В., Некрасов С. С.

**О КРИТЕРИИ НАЧАЛА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ МИКРОРЕЗАНИЯ**

Необходимость создания точных приборов, компьютерной техники, роботов и других точных устройств требует изготовления деталей с высокой точностью. С развитием станкостроения становится возможным замена процессов шлифования на процессы резания лезвийным инструментом, что позволяет повысить производительность обработки, сформировать благоприятные остаточные напряжения в обработанной поверхности, получить детали с такой конфигурации, которую шлифованием выполнить не возможно. Толщины среза могут достигать десятых долей микрометра, что существенно меньше толщин среза в традиционных процессах резания. В этой связи исследования механики микрорезания лезвийным инструментом становится актуальным.

Вопросами резания с малыми толщинами среза посвящены работы D. Dornfeld, S. Min и Y. Takeuchi [1], F. Klocke [2], N. Moronuki и Y. Furukawa [3], Д. В. Криворучко [4], С. С. Некрасов [5], С. А. Клименко и А. С. Манохин [6], И. П. Никифоров [7], X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Karoog [8], И. С. Праведников [9] и др.

Y. Furukawa и N. Moronuki [3] провели эксперименты по микрообработке различных материалов и доказали, что механизмы резания различны для поликристаллических, монокристаллических, аморфных материалов и для хрупких или пластичных материалов. Из-за малости толщины среза на процесс микрорезания также оказывает большое влияние неоднородности обрабатываемого материала, такие как границы зерен, дефекты кристаллов и примеси, при этом прочность материала на сдвиг приближается к теоретической. Несмотря на это, в большинстве опубликованных исследований обрабатываемые материалы рассматриваются гомогенными и изотропными в обработке, не зависимо от толщины среза, и это допущение вносит погрешности в прогнозы с помощью разработанных моделей. Вместе с тем некоторые исследователи изучали изменения различных параметров процесса резания, таких как сила резания, формирование стружки и шероховатости поверхности, при исследовании нескольких фаз или нескольких зерен в процессе микрообработки [10]. Впервые экспериментальные исследования процесса микрорезания провели T. Morigaki и K. Okuda в конце 1980-х гг. Они исследовали фундаментальные аспекты процесса микрообработки, в том числе процесс стружкообразования, ориентацию кристаллов и расположение и структуру зерен, находящихся на кромках инструмента, режущую кромку инструмента, силу резания, и провели ультраточную (прецизионную) обработку медной заготовки алмазным инструментом с глубиной резания от 3 мкм до 2,5 нм.

Процессы микрорезания связаны с удалением с поверхности заготовки обрабатываемого материала толщиной в несколько атомов или атомных слоев. Как правило, при микрорезании заострение режущей кромки очень малы, а глубина резания таким инструментом находится в субмикронном диапазоне. В упомянутых исследованиях показано, что на характер стружкообразования при микрорезании наряду с традиционными факторами существенно влияют отношение толщины среза  $a$  к радиусу округления режущей кромки  $\rho$  и характерный размер процесса резания, например, толщина среза  $a$ . Современные исследования показывают, что уменьшение толщины среза приводит к увеличению удельной силы резания при прочих равных условиях [4], [5], [11]. Известно, что при резании со значениями  $a/\rho$  меньше критического стружка перестает формироваться и происходит деформация срезаемого слоя, а не его отделение от заготовки. Критическое значение  $a/\rho$  для различных условий различно. По данным различных исследований величина этого отношения может колебаться от 0,003 до 0,2 (табл. 1). Анализ табл. 1 показывает, что при определении критического значения  $a/\rho$  не учитывался масштабный фактор, что во многом и является источником такого большого разброса критической величины  $a/\rho$ .

Таблица 1

## Характеристика способов обработки с малой толщиной среза [4]

Авторы	Инструментальный металл	Обрабатываемый металл	Скорость резания, м/мин	$a_{\min}/\rho_0$
Abdelmoneim M. E., Scrutton R. F., 1976, [12]	Быстрорежущая сталь	Латунь	–	0,03
Рубенштейн К., 1972, [13]	–	Отожженная сталь SAE113	до 27	0,06
Виноградов А. А., 1991, [14]	Твердый сплав	Сталь 20	более 36	0,12
Маргулис Д. К., 1976 [15]	Быстрорежущая сталь	38ХСА	до 15	0,12
Цвирко Г. Л., 1969 [16]	У12А	Свинец	–	0,003
Алейниченко Г.Ф., 1976, [15]	Быстрорежущая сталь	38ХМЮА	–	0,06
Филоненко С. Н., 1977 [17]	P18	1X18H9T	0,06	0,2
Маслов Е. Н., 1974 [18]	абразивное зерно	сталь 45, закалка	повышенные скорости	0,29
Грановский Г. И., 1975, [19, стр. 214]	ВК8	сталь 45		0,057

Целью настоящей работы является изучение влияния масштабного фактора на критическую величину  $a/\rho$ .

При резании с толщинами среза менее двух радиусов округления режущей кромки инструмента фактическая геометрия режущего клина определяется не параметрами заточки, а режимом резания. При этом передний угол зависит от величины подачи и скорости резания, а глубина резания определяет фактический угол в плане и т. д. Это обуславливает большинство существенных особенностей процесса микрорезания, при этом искажается линейный закон влияния толщины среза на удельную силу резания. При указанном соотношении толщины среза к радиусу округления режущей кромки радиальная составляющая силы резания может превышать тангенциальную в 3–7 раз, причем в этом случае на результирующую силу в большей степени оказывает влияние не глубина, а подача. Экспериментально доказано, что устойчивое стружкообразование, (непрерывное образование стружки на протяженном участке режущей кромки) [4] возможно лишь при толщине среза, большей некоторого минимального значения  $a_{\min}$ . При этом выгодными будем считать условия, когда удельная сила и усадка стружки отличаются не более чем в два раза от своих значений при  $\rho_0 \rightarrow 0$ , т. е. для снятия припуска не расходуется лишняя энергия и рационально изнашивается лезвие.

Установившееся стружкообразование наступает при любом  $a/\rho$ , однако при малых  $a/\rho$  усадка стремится к  $\infty$ , и скорость стружки будет настолько малой (в 10 и более раз меньше скорости резания), что она не будет выглядеть стружкой в привычном понимании этого слова. Стружку привычного вида можно наблюдать лишь при толщине среза, обеспечивающей стружкообразование по всей длине контролируемого участка РК с примерно равной усадкой. Этим объясняются сложности регистрации стружки при очень малой толщине среза [4]. Для достижения поставленной цели авторами были выполнены виртуальные эксперименты с помощью 2D КЭ модели процесса резания, реализованной в программном продукте Third Wave AdvantEdge. Рассматривался случай резания прямоугольного свободного резания стали 45 (твёрдость 200 НВ) с шириной среза  $b = 1$  мм в абсолютно жесткой технологической системе абсолютно твердым лезвием с передним углом  $\gamma = 5^\circ$  и задним углом  $\alpha = 10^\circ$ , радиус округления режущей кромки изменялся в диапазоне от 0,005 мм до 1 мм. Напряженно-деформированное состояние рассчитывалось по теории плоской деформации с учетом тепловых эффектов. На границе контакта принята модель кулоновского трения с коэффициентом 0,5. Модель материала принята в виде [20]:

$$\sigma(\varepsilon^p, J_1, \dot{\varepsilon}, T) = g(\varepsilon^p) \cdot \Gamma(\dot{\varepsilon}) \cdot \Theta(T),$$

где  $g(\varepsilon^p)$  – функция, учитывающая деформационное упрочнение;

$\Gamma(\dot{\varepsilon})$  – функция, учитывающая скорость деформации;

$\Theta(T)$  – функция, учитывающая температурное разупрочнение.

$$g(\varepsilon^p) = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p} \right)^{1/n},$$

где  $\sigma_0$  – начальное напряжение;

$\varepsilon^p$  – пластическая деформация;

$\varepsilon_0^p$  – расчетная пластическая деформация;

$1/n$  – степень деформационного упрочнения.

$$\Gamma(\dot{\varepsilon}) = \left( 1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1/m},$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;

$\dot{\varepsilon}_0$  – расчетная скорость деформации;

$m_1$  – коэффициент степени чувствительности скорости деформации.

$$\Theta(T) = \Theta(T_{cut}) \left( 1 - \frac{T - T_{cut}}{T_{melt} - T_{cut}} \right),$$

где  $T$  – температура;

$T_{cut}$  – температура резания;

$T_{melt}$  – температура плавления.

Константы этих уравнений заданы программой. Тепловые свойства обрабатываемого материала: коэффициент температурного расширения (при 20 °С) 11 мм/(м·°С); удельная теплоемкость  $C_p$  составляет 462,0 Дж/кг/°С; теплопроводность  $\lambda$  40,2 Вт/(м·°С).

Длина и соотношения сторон заготовки выбирались методом проб и ошибок из условия минимизации количества деформированных элементов.

Граничные условия заданы жестким закреплением основания заготовки. Инструменту задавалось перемещение со скоростью резания вдоль оси  $Z$  и ограничивалось его перемещение и вращение вдоль других осей (рис. 1). Скорость резания была выбрана равной 200 м/мин, толщина среза  $a$  изменялась от 0,005 мм до 0,1 мм, температура окружающей среды  $T = 20$  °С. Рассматривалось резание без СОЖ. Параметры вычислительной системы: ЭВМ Intel® Core™2 Duo Processor E6600 с оперативной памятью 4 ГБ, операционная система: Microsoft Windows Server 2003 Enterprise x64 Edition Service Pack 2.

В ходе исследования были выполнены 12 опытов в соответствии с планом, представленном в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанный радиус округления из условия постоянства толщины среза и отношения  $a/\rho$

$a/\rho$	Толщина среза $a$ , мм		
	0,1	0,05	0,005
0,1	1	0,5	0,005
0,2	0,5	0,25	0,0025
0,5	0,2	0,1	0,001
1	0,1	0,05	0,005

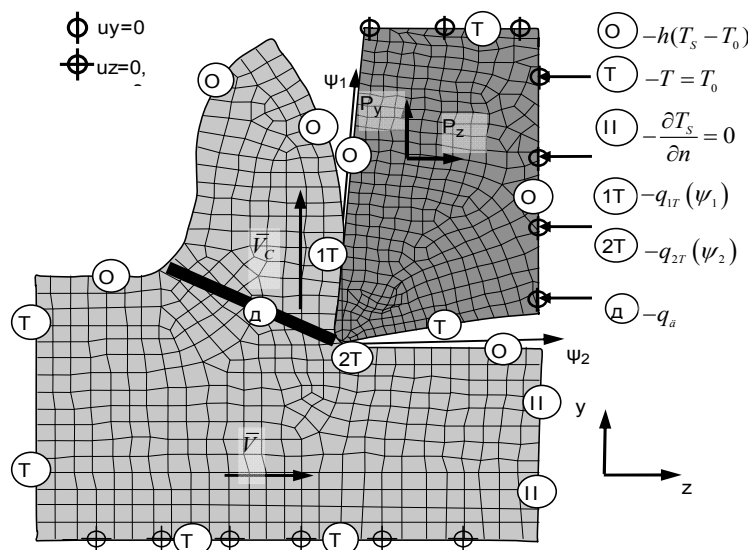


Рис. 1. Схема граничных условий

Для выявления влияние масштабного фактора при различных соотношениях толщины среза к радиусу округления режущей кромки  $a/\rho$  варьировали толщиной среза в диапазоне от 0,005 до 0,1 мм при постоянном отношении  $a/\rho$  в диапазоне от 0,1 до 1,0.

Результаты расчет подтверждают возможность формирования стружки даже при очень малых отношениях  $a/\rho$  (рис. 2, 3). При этом радиальная сила резания значительно превосходит тангенциальную. При увеличении толщины среза и уменьшении соотношения  $a/\rho$  для всех исследуемых  $\rho$  наблюдается рост температуры.

Следует отметить, что при уменьшении отношения  $a/\rho$  в 10 раз с 1,0 до 0,1 при толщине среза  $a = 0,1$  мм главная проекция удельной силы резания  $P_z$  возрастает в 2,5 раз, радиальная проекция удельной силы резания  $P_y$  – в 6 раза, а температура резания  $T$  – в 1,5 раза. В тоже время при толщине среза  $a = 0,005$  мм  $P_z$  возрастает в 2,7 раза,  $P_y$  – в 6,6 раза, а  $T$  – тоже в 1,5 раза (рис. 4). При этом главная проекция удельной силы резания  $P_z$  возрастает с уменьшением толщины среза  $a$ , а радиальная проекция удельной силы резания  $P_y$  – практически не изменяется. Такая ситуация связана с уменьшением температуры резания с уменьшением толщины среза  $a$  (рис. 3).

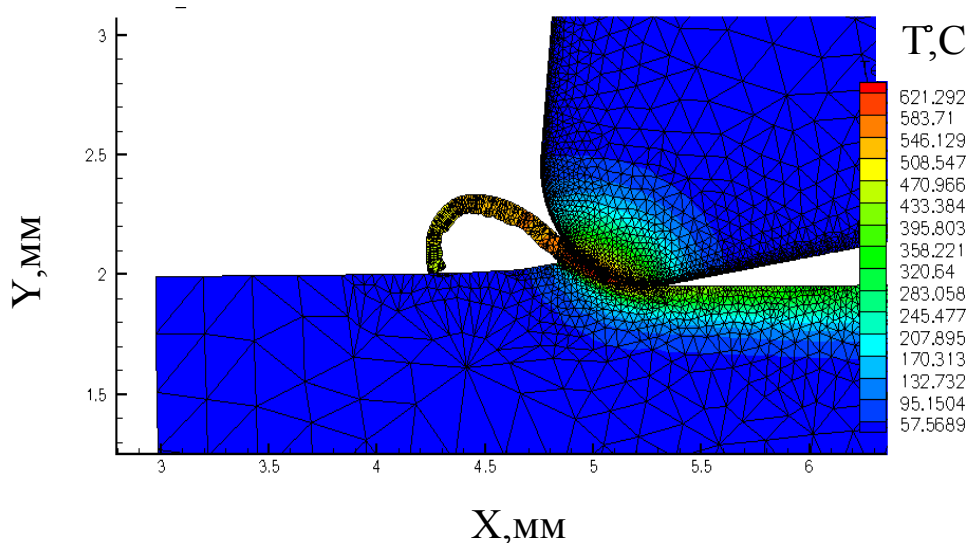


Рис. 2. Распределение температуры в момент времени  $t$ : сталь 45-Т15К6;  $a = 0,05$  мм;  $b = 1$  мм;  $V = 200$  м/мин;  $\rho = 0,5$  мм

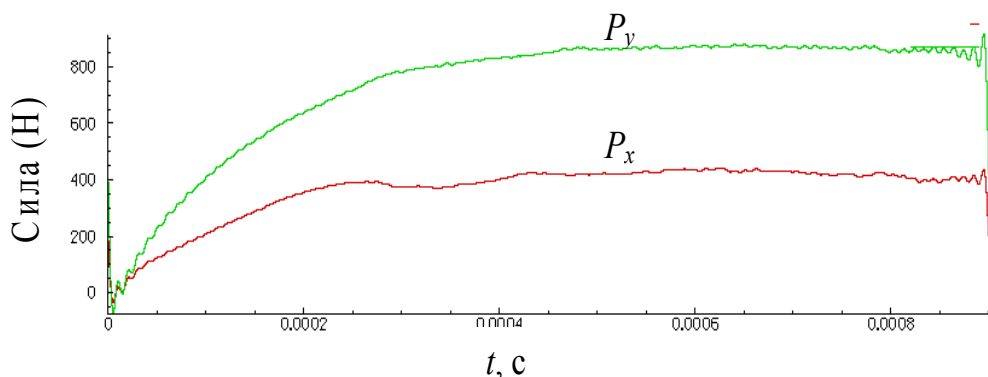


Рис. 3. Изменение силы резания:  
 сталь 45-Т15К6;  $a = 0,05$  мм;  $b = 1$  мм;  $V = 200$  м/мин;  $\rho = 0,5$  мм

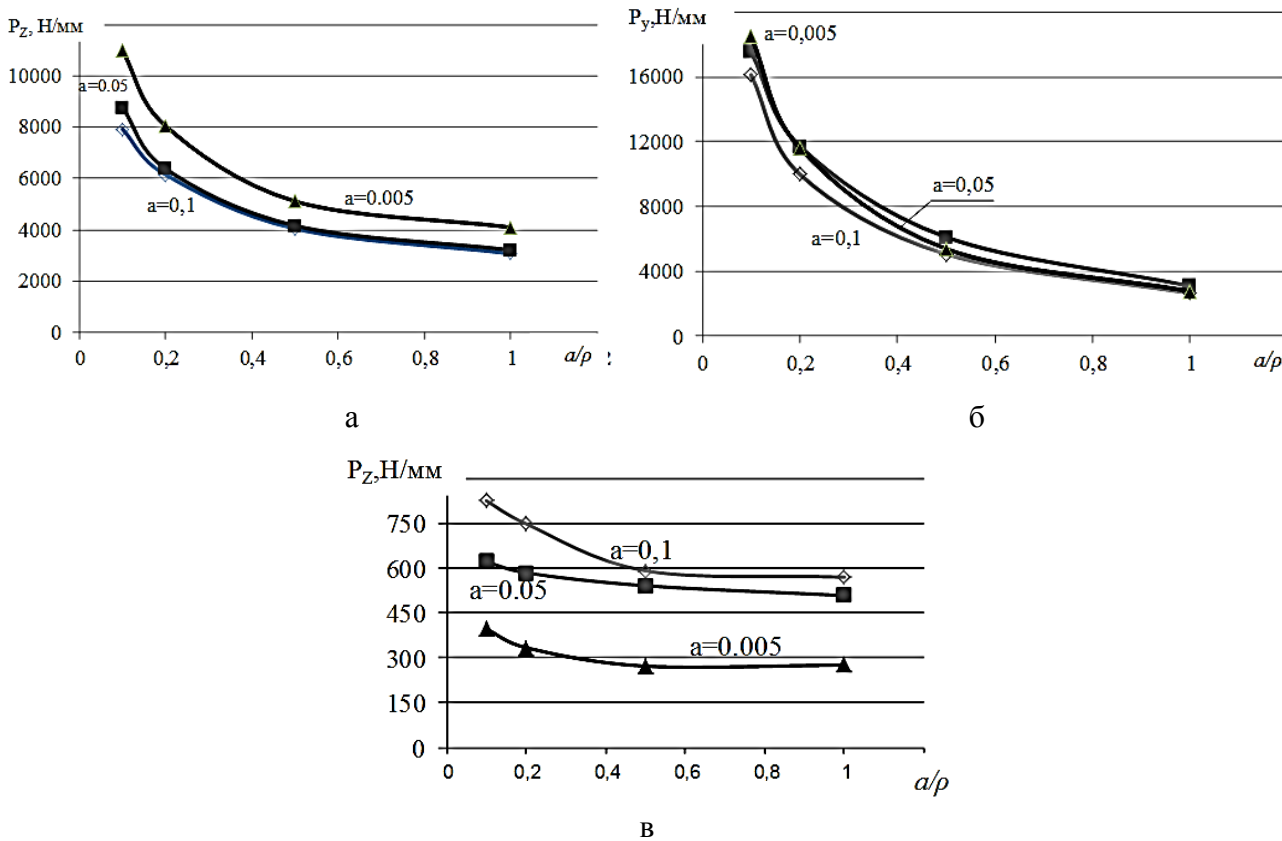


Рис. 4. Влияние  $a/\rho$  и толщины среза  $a$  на тангенциальную  $P_z$  (а) и радиальную силу резания  $P_y$  (б), а также температуру резания  $T$  (в)

Таким образом, при принятой модели материала модельные эксперименты показали, что с уменьшением соотношения  $a/\rho$  и уменьшением толщины среза удельная сила резания увеличивается. Однако масштабный фактор (толщина среза) мало изменяет эту зависимость. Интенсивность возрастания удельной силы резания увеличивается с уменьшением масштаба (толщины среза) при прочих равных условиях всего на 10 %, что связано с уменьшением объема материала, подверженного деформации и температурному разупрочнению в процессе резания. Интересно то, что интенсивность роста температуры с уменьшением  $a/\rho$  также практически не зависит от толщины среза, однако ее абсолютная величина существенно уменьшается с уменьшением толщины среза.

## ВЫВОДЫ

С помощью КЭ модели процесса прямоугольного резания в программе Third Wave AdvantEdge удалось исследовать влияние соотношения  $a/\rho$  на силу и температуру резания в диапазоне толщин среза от 0,005 до 0,1 мм, что невозможно выполнить с помощью натурального эксперимента из-за конечной жесткости реальной технологической системы. Принятая модель материала предполагает изотропность и однородность свойств обрабатываемого материала по всему объему в не зависимости от масштаба деформируемого элемента.

Установлено, что масштабный фактор – толщина среза – оказывает малое влияние на интенсивность возрастания удельной силы резания с уменьшением соотношения  $a/\rho$ , а проявляется больше во влиянии на абсолютную величину температуры резания. Отсутствие влияния масштабного фактора на удельную силу резания указывает на ограниченность области применения принятой в расчете модели обрабатываемого материала и требует дальнейших исследований в этой области.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The influence of cutting edge sharpness on surface finish in facing with round nosed cutting tools / Childs T. H., Dornfeld D., Lee E. H., Min S. // Cirp. – Elsevier, 2008. – С. 70–75.*
2. *Scaling Effects of the Cutting Edge Rounding on the Minimum Uncut Chip Thickness and 3D FE Modeling in Drilling / Klocke F., Lung D., Gerschwiler K., Abouridouane M. // Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2007. – С. 197–208.*
3. *Moronuki N. Experiments on the effect of material properties on microcutting processes / N. Moronuki, Y. Furukawa, Y. Liang // Precision Engineering. – Elsevier, 1994. – С. 124–131.*
4. *Криворучко Д. В. Підвищення ефективності процесів чіткової обробки на основі аналітичного моделювання силової взаємодії леза з заготовкою : автореф. дис. ... канд. техн. наук:05.03.01 / ICM ім. В. М. Бакуля НАН України. – К., 2002. – 20 с.*
5. *Некрасов С. С. Повышение ресурса твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С. С. Некрасов. – К., 2012. – 167 с.*
6. *Клименко С. А. Твердое «бреющее» точение / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Сверхтвердые материалы. – К., 2009. – № 1. – С. 58–74.*
7. *Никифоров И. П. Условия стружкообразования при шлифовании / И. П. Никифоров // Инструмент и технологии. – СПб, 2006. – Вып. 1. – № 23. – С. 122–128.*
8. *Liu X. An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining / X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2006. – № 128. – С. 474–481.*
9. *Праведников И. С. Исследование механики образования циклической стружки [Электронный ресурс] / И. С. Праведников // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2011. – № 3. – С. 283–296. – Режим доступа : [http://www.ogbus.ru/authors/Pravednikov/Pravednikov\\_7.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Pravednikov/Pravednikov_7.pdf).*
10. *Dornfeld D. Recent Advances in Mechanical Micromachining / D. Dornfeld, S. Min, Y. Takeuchi // Annals of the CIRP. – Kobe, 2006. – Т. 2, № 55. – С. 745–768.*
11. *Хаев Г. Л. Прочность режущего инструмента / Г. Л. Хаев. – М. : Машиностроение, 1975. – 168 с.*
12. *Abdelmoneim M. E. Tool edge roundness and stable buildup formation in finish machining / M. E. Abdelmoneim, R. F. Scrutton // Trans. ASME. – 1976. – № 4. – С. 1258–1267.*
13. *Rubenstein C. The influence of strain rate in orthogonal cutting / C. Rubenstein // Int. J. Mach. Tool Des. and Res. – 1972. – Т. 12, № 2. – С. 105–120.*
14. *Виноградов А. А. Стружкообразование при точении пластичных металлов инструментом с округленной режущей кромкой / А. А. Виноградов // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 1. – С. 65–70.*
15. *Алейниченко Г. Ф. О соотношении радиуса округления режущей кромки и толщины срезаемого слоя / Г. Ф. Алейниченко // Резание и инструмент в технологических системах : междунауч. техн. сборник. – Х. : ХГТУ, 1976. – Вып. 15. – С. 39–40.*
16. *Цвирко Г. Л. Процесс образования стружки и динамика износа инструмента в условиях тонких срезов / Г. Л. Цвирко // Труды Уральского юбилейной научной сессии по итогам научно-исследовательских работ в области машиностроения. – Курган, 1969. – С. 65–68.*
17. *Филоненко С. Н. Особенности стружкообразования при резании с малыми толщинами среза / С. Н. Филоненко, А. Г. Деревянченко // Резание и инструмент в технологических системах : междунауч. техн. сборник. – Х. : Высшая школа, 1977. – Вып. 18. – С. 73–77.*
18. *Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.*
19. *Грановский Г. И. Фасонные резцы / Г. И. Грановский, К. П. Панченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 309 с.*
20. *AdvantEdge FEM 5.9 User's Manual. – Third Wave Systems, Inc., 2012. – 776 с.*

Статья поступила в редакцию 12.09.2012 г.