

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

С.А. Воронов

voronov@rfbr.ru

Вэйдун Ма

314651368@qq.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты моделирования микрорезания отдельным абразивным зерном пирамидальной формы при заданных режимах с различными толщинами резания и углами наклона оси зерна (передними углами наклона режущего клина). Исследованы процессы упругопластического деформирования, стружкообразования, формирования впадин, наплывов и заусенцев при врезании, найдено соотношение площади врезания и силы резания. Для расчета напряженно-деформированного состояния использована модель материала Джонсона — Кука, учитывающая температуру, уровень и скорость деформации. Задача определения напряженно-деформированного состояния решена в связанной постановке совместно с задачей расчета температуры в материале заготовки. Найдены коэффициенты сил резания, исследовано влияние передних углов врезания зерен на коэффициенты сил резания

### Ключевые слова

*Микрорезание, абразивное зерно, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, температура, шлифование, силы резания*

Поступила в редакцию 13.03.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** Шлифование является одной из финишных операций обработки, которые используются для получения требуемой шероховатости поверхности и заданных прецизионных характеристик формы. Обработка проводится инструментом с абразивными зёрнами, в большом количестве распределёнными по внешней поверхности шлифовального круга [1, 2]. Процесс шлифования происходит при высоком давлении и температуре в зоне обработки с толщинами резания до 0,05 мм [3–5]. При этом каждое отдельное зерно осуществляет микрорезание обрабатываемой поверхности заготовки. Термомеханическое поведение обрабатываемого материала определяется его взаимодействием с инструментом при шлифовании.

В настоящее время взаимодействие зёрен при микрорезании исследовано недостаточно. Как правило, используются эмпирические зависимости для определения сил резания от задаваемых режимов, не связанные с физическим механизмом взаимодействия при микрорезании. Следовательно, механизм микроудаления материала отдельным зерном и процесс стружкообразования необходимо подробно исследовать, так как они определяются свойствами материала заготовки, толщиной и скоростью резания, геометрией режущей кромки и т. д.

В настоящей работе моделирование процесса резания отдельным зерном осуществляется с помощью ПО ABAQUS, которое позволяет исследовать НДС материала детали, анализировать процесс формирования стружки, оценить силы резания, качество поверхности и определить влияние эксплуатационных параметров на качество обрабатываемой поверхности, оптимизировать основные эксплуатационные параметры и геометрию инструмента [6].

**Описание модели резания отдельным зерном.** Реальные зерна, как правило, имеют форму пирамиды с плоскими гранями, которые врезаются в материал как режущий клин с отрицательным передним углом. Учитывая изнашивание зерна в процессе шлифования, форму вершины зерна считают сферической с заданным радиусом  $r_0 = 10$  мкм. Геометрическая схема зерна пирамидальной формы показана на рис. 1.

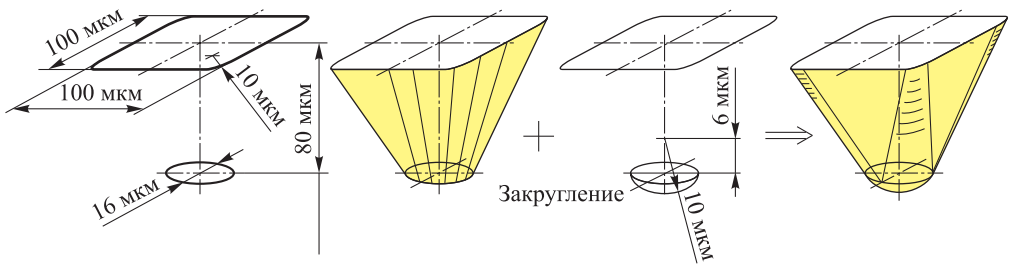


Рис. 1. Геометрическая схема зерна пирамидальной формы

На самом деле при шлифовании кругом каждое зерно, врезаясь в материал, движется по траектории, близкой к окружности. Для упрощения траектория движения зерна заменяется на путь (рис. 2), состоящий из трех прямолинейных отрезков. Такая расчетная схема резания зерном позволяет уменьшить объем вычислений и исследовать силы резания в процессе внедрения зерна. Будем считать, что процесс выхода зерна из материала на третьем этапе не сильно изменяет характер зависимости сил резания, тогда результаты моделирования в процессе выхода зерна из материала не приводятся. Таким образом, моделирование ограничивается двумя этапами, что позволяет существенно сократить время расчета.

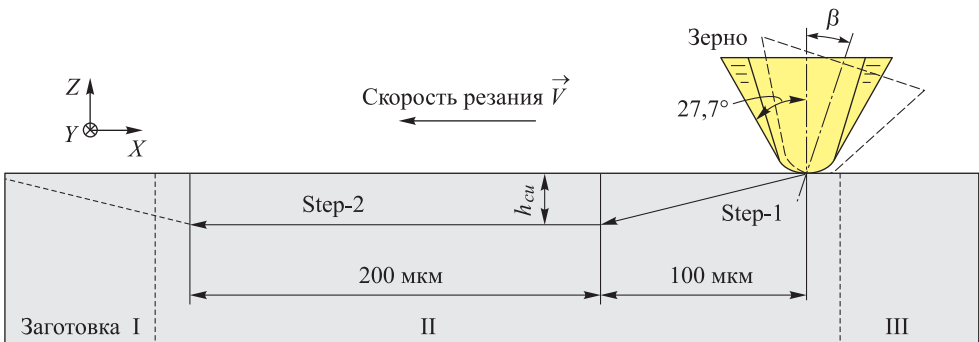


Рис. 2. Схема маршрута зерна с разными передними углами в процессе резания

Размеры на рис. 1 и 2 указаны в микрометрах. При моделировании задается геометрия зерна, угол при вершине, кроме того, зерно может иметь различный угол  $\beta$  наклона оси  $Y$  пирамиды. Таким образом, моделируется процесс микрорезания зерном с разными передними углами  $\gamma = -27,7^\circ + \beta$  (см. рис. 2).

Будем считать, что движение зерна задано кинематически и не зависит от взаимодействия инструмента и материала заготовки. Зерно внедряется в материал заготовки с постоянной скоростью резания  $V = 5$  м/с. Зерно на первом этапе внедряется в материал на глубину, изменяющуюся линейно от 0 до  $h_{cu}$ , и проходит путь в горизонтальном направлении 100 мкм. Далее на шаге 2 зерно движется с постоянной скоростью и глубиной  $h_{cu}$  и проходит расстояние 200 мкм. В целях определения коэффициентов сил резания повторяем моделирование при разных заданных толщинах резания  $h_{cu} = 10, 20, 30, 40$  мкм. Зона деформирования поверхности детали отдельно взятым зерном на несколько порядков меньше размеров детали. Поэтому реальная форма и размеры детали значения не имеют и в качестве обрабатываемой поверхности взята плоскость прямоугольника. В КЭ модели выбран тип элемента заготовки C3D8RT, который является 8-узловым линейным прямоугольным элементом в виде параллелепипеда, с учетом деформирования и температуры. Этот тип элемента дает возможность снизить время интегрирования и контролировать паразитные формы деформирования.

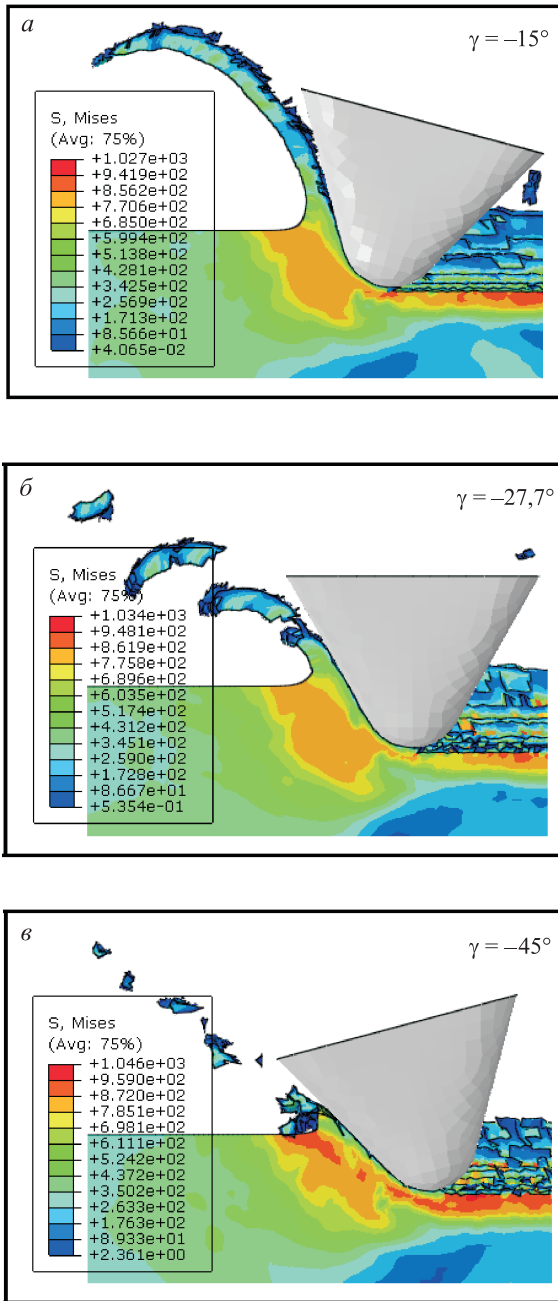
В процессе моделирования применяется подход ALE для сетки конечных элементов с помощью встроенных процедур ПО ABAQUS, чтобы получить нормальное образование стружки без искажения конечных элементов, что может сгенерировать потерю точности вычисления [7–8].

Поведение материала заготовки Ti6Al4V при деформировании за пределами упругости рассматривается с помощью изотермической термоупруго-пластической модели с использованием уравнения состояния Джонсона — Кука также, как это было в [7].

**Результаты моделирования отдельным зерном.** Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу достигает значения  $10^3$  МПа, и наибольшая температура возникает в зоне контакта зерна и материала в конце этапа 2. На рис. 3 показаны результаты моделирования стружкообразования при различных передних углах  $\gamma$ .

Видно, что значение переднего угла инструмента  $\gamma$  является одним из определяющих факторов формы срезаемой стружки. Материал легко удаляется из заготовки при резании зерном с маленьким передним углом, образуя сливную стружку. При увеличении  $\gamma$  стружка отделяется кусочками. Для резания зерном с большим передним углом объем сегментированной стружки уменьшается и напряжения в материале заготовки увеличиваются.

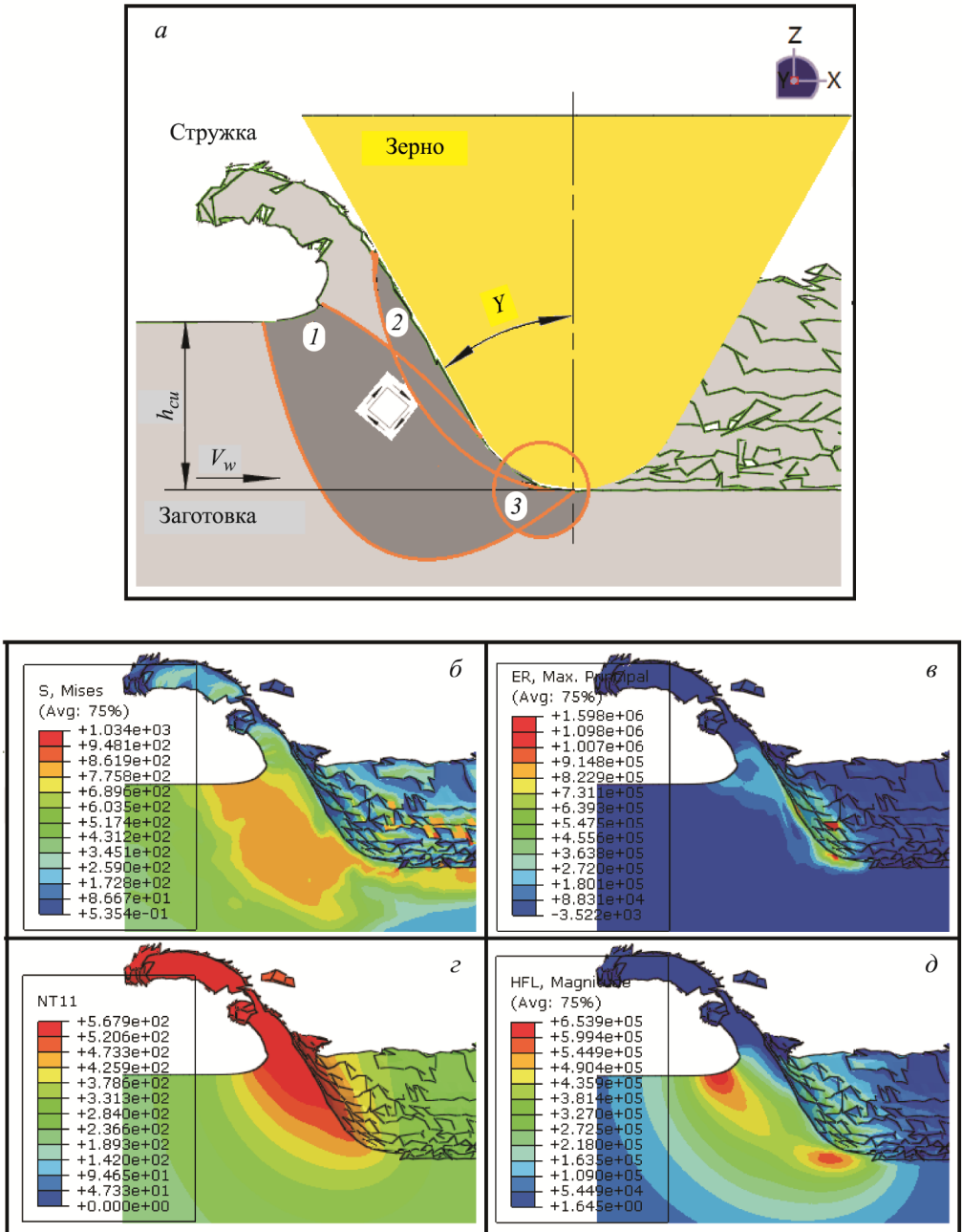
В отличие от обычного резания при микрорезании зерном со скругленной вершиной явной плоскости сдвига не наблюдается. При деформировании можно выделить три зоны с максимальными пластическими деформациями (рис. 4, а).



**Рис. 3.** Стружкообразование при разных передних углах  $\gamma$  ( $h_{cu} = 30$  мкм):

*a* — сливая стружка; *б* — элементная стружка; *в* — стружка надлома

Основная зона сдвига — это зона, где происходит максимальное пластическое деформирование материала, упругодеформированный материал над зоной сдвига смещается вдоль передней поверхности зерна, что приводит к формированию стружки.



**Рис. 4.** Схема зоны сдвига в процессе микрорезания, полученная отдельным зерном (а) и в результате моделирования (б–д) при  $\gamma = -27,7^\circ$ ,  $h_{cu} = 30$  мкм: б–д — распределения напряжения по Мизесу, скорости деформации, температуры и плотности теплового потока в материале зоны сдвига соответственно; зоны сдвига — основная (1), вторичная (2) и третичная (3)

Вторичная зона сдвига — это слой, где контактирующий с передней поверхностью зерна материал, преодолевая трение, выдаливается и проскальзывает вдоль передней поверхности зерна. В этой зоне происходит наибольшая передача теплоты на режущий инструмент.

Третичная зона — в месте контакта с вершиной режущей кромки небольшая часть металла из главной зоны сдвига выдавливается и со скольжением по сферической вершине зерна пластически деформируется. После прохождения зерна наблюдается упругое последствие. В этой зоне формируются остаточные напряжения на обработанной поверхности, которые влияют на эксплуатационные характеристики изделия.

Результаты МКЭ подтверждают существование таких зон сдвига (рис. 4, б–д) при прохождении зерна. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (см. рис. 4, б) явно показывает концентрацию напряжений в главной и третичной зонах сдвига. На рис. 4, в показано распределение скорости деформации — наибольшая скорость деформации ( $10^3 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$ ) наблюдается в зоне сдвига. Из рис. 4, г следует, что во вторичной зоне имеет место максимальная температура из-за трения между материалом и зерном. На рис. 4, д показана плотность теплового потока.

В процессе резания отдельным зерном материал под ним не только пластически деформируется с образованием стружки, но и движется в боковую сторону, при этом образуются заусенцы (рис. 5, а). Видно, что максимальная высота заусенцев уменьшается при увеличении  $\gamma$ . Таким образом, чтобы получить обрабатываемую поверхность лучшего качества после шлифования, предпочтительнее использовать зерна с большими передними углами.

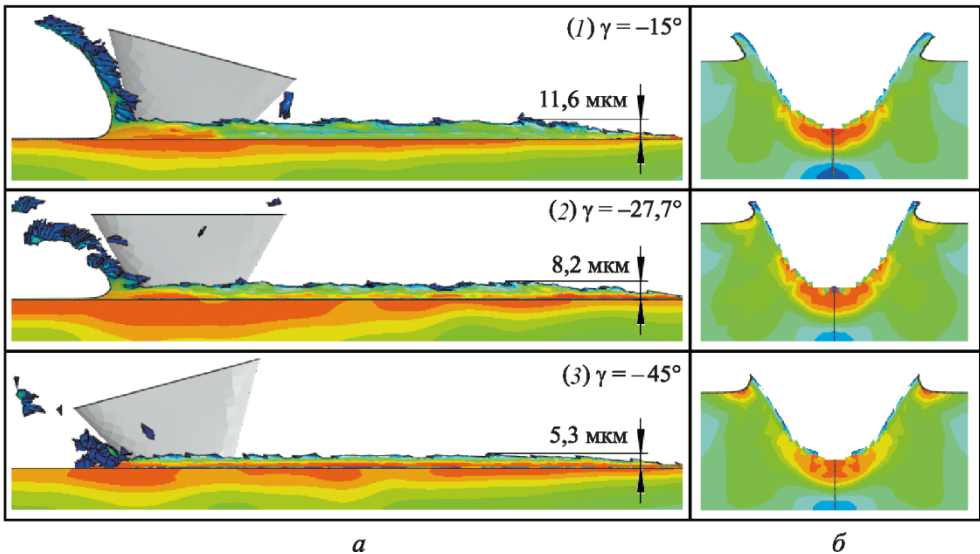
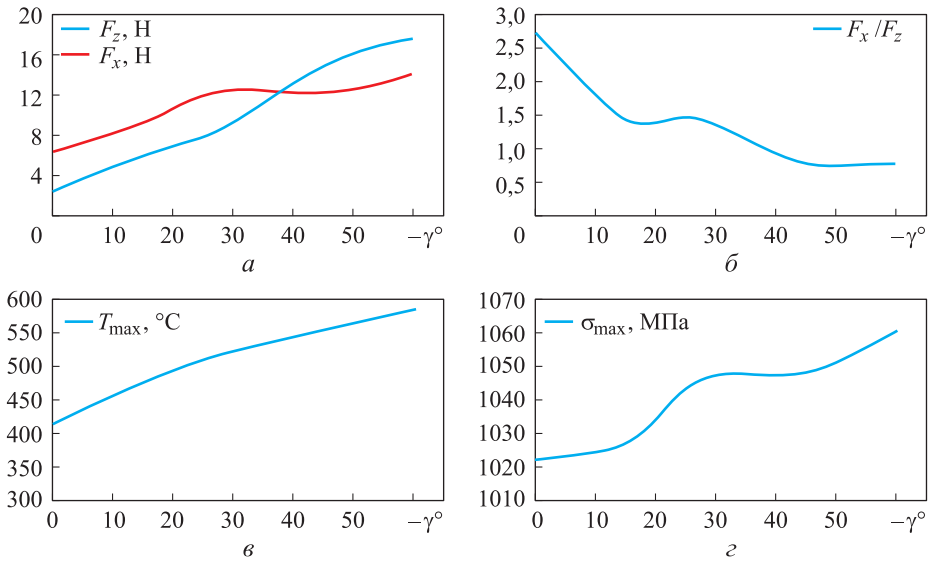


Рис. 5. Формы стружки и заусенцев (а), образованные в процессе резания отдельным зерном, и поперечные сечения впадины, наплыва и заусенцев (б) при  $h_{cu} = 30 \text{ мкм}$

На рис. 6, *а* показана зависимость сил резания от переднего угла зерна  $-\gamma$ . Из рис. 6, *б* следует, что при врезании зерном с отрицательным передним углом  $\gamma$  отношение составляющих сил резания  $F_x / F_z$  имеет значение как больше единицы, так и меньше. Это означает, что нормальная составляющая сил резания может быть меньше или больше касательной. Однако, как правило, при врезании режущей кромкой с положительным передним углом  $\gamma$  касательная составляющая сил резания обычно больше, чем нормальная. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работах [9, 10]. При увеличении переднего угла  $\gamma$  максимальная температура  $T_{\max}$  и максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  в материале также увеличиваются, но их зависимости имеют нелинейный характер (рис. 6, *в*, *г*).



**Рис. 6.** Силы резания  $F_x$  и  $F_z$  (*а*), отношение  $F_x / F_z$  (*б*), максимальная температура  $T_{\max}$  в материале (*в*), максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  по Мизесу в материале (*г*) в зависимости от переднего угла  $-\gamma$  ( $h_{cu} = 30$  мкм)

**Определение коэффициентов сил резания.** Проведем анализ результатов расчета сил резания МКЭ при толщинах резания  $h_{cu} = 10, 20, 30$  и  $40$  мкм. Поперечное сечение пятна контакта зерна и материала  $A_c$  имеет нерегулярную сложную конфигурацию (рис. 7, *б*) [7], т. е. его площадь трудно измерять. В динамической модели лучше определять зависимость сил резания от площади врезания  $A_h$ , которая связана с толщиной резания (рис. 7, *в*).

На рис. 7, *г* показана зависимость сил резания от площади врезания  $A_h$  при различных передних углах  $\gamma$ . Случай, когда  $h_{cu}$  меньше радиуса вершины зерна ( $r_0 = 10$  мкм), должен быть исследован отдельно из-за другого механизма резания (царапание) при внедрении зерном без стружкообразования. Полученные расчетные значения в точках интерполируются в виде степенной функции для гладкой зависимости. Кривые интерполяции можно представить в виде

$$F_x = \left[ C_{x,1} \left( \frac{A_h}{A_0} \right)^{C_{x,2}} + C_{x,3} \right] \sigma_T A_0;$$

$$F_z = \left[ C_{z,1} \left( \frac{A_h}{A_0} \right)^{C_{z,2}} + C_{z,3} \right] \sigma_T A_0,$$

где  $F_x, F_z$  — силы резания;  $C_x, C_z$  — коэффициенты сил резания;  $A_h$  — площадь врезания;  $A_0 = 86,7 \text{ мкм}^2$  — характерная площадь;  $\sigma_T$  — предел текучести материала (960...1180 МПа) [11], в настоящей работе  $\sigma_T = 1000 \text{ МПа}$ . Полученные коэффициенты сил резания приведены в таблице.

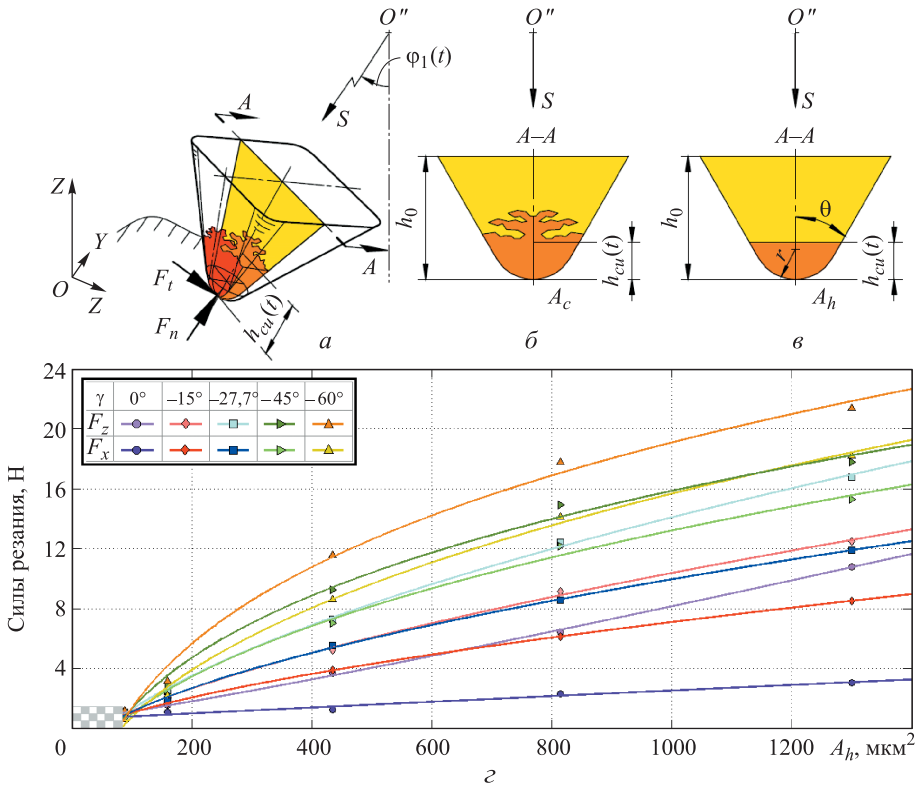


Рис. 7. Схема преобразования зерна в динамической модели (а); определение площади поперечного сечения контакта зерна и материала  $A_c$  (б), площади врезания  $A_h$  (в); зависимость сил резания от площади поперечного сечения  $A_h$  при  $h_{cut} \geq r_0 = 10 \text{ мкм}$  (з)

**Коэффициенты сил резания**

$\gamma$ , град	$C_{x1}$	$C_{x2}$	$C_{x3}$	$C_{z1}$	$C_{z2}$	$C_{z3}$
0	5,572	1,126	6,433	2,452	0,9585	-6,625
-15	27,97	0,6496	-17,45	19,59	0,6288	-9,438
-27,7	48,63	0,5797	-38,37	35,02	0,5664	-25,26
-45	76,13	0,4383	-70,11	165,8	0,2944	-158,0
-60	105,8	0,4041	-103,5	248,3	0,2539	-241,9



Из рис. 7,  $z$  и таблицы следует, что при значениях  $\gamma = 0$  показатели степени  $C_{x2}$ ,  $C_{z2}$  близки к единице и можно приближенно считать, что силы резания и площадь врезания  $A_h$  имеют пропорциональную зависимость. Кроме того, при увеличении переднего угла  $\gamma$  зависимость сил резания от площади врезания  $A_h$  является нелинейной, а показатель степени уменьшается, т. е. передний угол  $\gamma$  режущей кромки абразивного зерна является важным параметром для вычисления сил резания.

**Выводы.** Приведен анализ результатов моделирования врезания отдельным абразивным зерном пирамидальной формы с отрицательным передним углом  $\gamma$ . Исследовано НДС материала при микрорезании, определена температура, рассмотрены характер образующейся стружки, форма заусенцев и впадин при разных передних углах наклона режущего клина. В результате исследовано влияние передних углов зерна на силы резания, температуру, напряжения. Определены соотношения между силами резания и площадью врезания  $A_h$ , которые могут быть использованы при проектировании технологических процессов обработки и назначении режимов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Malkin S., Guo C. Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives. New York: Industrial Press Publ, 2008. 372 p.
2. Воронов С.А., Киселёв И.А., Ма Вэйдун, Ширшов А.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 5. С. 40–57. DOI: 10.7463/0515.0766577 URL: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/283>
3. Astakhov V.P., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 146. No. 2. P. 193–202. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.015 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603009981>
4. Zhang Y., Outeiro J.C., Mabrouki T. On the selection of Johnson–Cook constitutive model parameters for Ti–6Al–4V using three types of numerical models of orthogonal cutting // Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 112–117. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.052 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002504>
5. Wang S., Li C.H. Application and development of high-efficiency abrasive process // International Journal of Advanced Science and Technology. 2012. Vol. 47. P. 51–64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3113 URL: <https://www.scientific.net/AMR.189-193.3113>
6. Li X. Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis: PhD Thesis. Worcester, U.S., 2010. P. 4–12.
7. Voronov S.A., Ma W. Simulation of chip-formation by a single grain of pyramid shape // Vibro-engineering Procedia. 2016. Vol. 8. P. 39–44.
8. Kilicaslan C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method: MS Thesis. Izmir, 2009. P. 22–23.

9. Fang N. Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool // *Wear*. 2005. Vol. 258. No. 5-6. P. 890–897. DOI: 0.1016/j.wear.2004.09.047  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164804003333>
10. Ohbuchi Y., Obikawa T. Finite element modeling of chip formation in the domain of negative rake angle cutting // *J. Eng. Mater. Tech.* 2003. Vol. 125. No. 3. P. 324–332.  
DOI: 10.1115/1.1590999  
URL: <http://materialstechnology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1427019>
11. Zhrebtsov S., Salishchev G., Galeev R. Mechanical properties of Ti–6Al–4V titanium alloy with submicrocrystalline structure produced by severe plastic deformation // *Materials Transactions*. 2005. Vol. 46. No. 9. P. 2020–2025. DOI: 10.2320/matertrans.46.2020  
URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/46/9/46\\_9\\_2020/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/46/9/46_9_2020/_article)

**Воронов Сергей Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Ма Вэйдун** — аспирант кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Воронов С.А., Вэйдун Ма. Влияние геометрии абразивного зерна на силы резания при шлифовании // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 5. С. 52–63. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-52-63

**EFFECT OF ABRASIVE GRAIN GEOMETRY ON CUTTING FORCES  
IN GRINDING**

S.A. Voronov

voronov@rfbr.ru

Weidong Ma

314651368@qq.com

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The article supplies the results of modelling the micro-cutting process for a single pyramid-shaped abrasive grain in preset modes featuring various cutting thicknesses and grain axis inclination angles (the rake angle of the cutting wedge). We investigate the processes of elastoplastic deformation, chip formation, cratering, built-up edge formation and burr formation when the tool cuts into materials; we also determine the ratio of cutting area to cutting force. To compute the stress-strain state parameters, we used the Johnson–Cook material model that takes into account temperature along with strain rate and level. We solve the stress-strain state problem as stated together with the problem of temperature in the workpiece material. We determine cutting force coefficients and study the effect of rake angles in the grains on the cutting force coefficients

**Keywords**

*Micro-cutting, abrasive grain, finite element method, stress-strain state, temperature, grinding, cutting forces*

## REFERENCES

- [1] Malkin S., Guo C. *Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives*. New York, Industrial Press, 2008. 372 p.
- [2] Voronov S.A., Kiselev I.A., Ma V., Shirshov A.A. Numerical simulation of a grinding process model for the spatial work-pieces: development of modeling techniques. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2015, no. 5, pp. 40–57 (in Russ.). DOI: 10.7463/0515.0766577  
Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/283>
- [3] Astakhov V.P., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 146, pp. 193–202.  
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.015  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603009981>
- [4] Zhang Y., Outeiro J.C., Mabrouki T. On the selection of Johnson–Cook constitutive model parameters for Ti–6Al–4V using three types of numerical models of orthogonal cutting. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 112–117. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.052  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002504>
- [5] Wang S., Li C.H. Application and development of high-efficiency abrasive process // *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2012, vol. 47, pp. 51–64.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3113  
Available at: <http://www.scientific.net/AMR.189-193.3113>
- [6] Li X. Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis: PhD Thesis. Worcester, U.S., 2010. Pp. 4–12.
- [7] Voronov S.A., Ma W. Simulation of chip-formation by a single grain of pyramid shape. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, pp. 39–44.
- [8] Kilicaslan C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method: MS Thesis. İzmir, 2009. Pp. 22–23.
- [9] Fang N. Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool. *Wear*, 2005, vol. 258, no. 5-6, pp. 890–897. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.047  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164804003333>
- [10] Ohbuchi Y., Obikawa T. Finite element modeling of chip formation in the domain of negative rake angle cutting. *J. Eng. Mater. Tech.*, 2003, vol. 125, no. 3, pp. 324–332.  
DOI: 10.1115/1.1590999  
Available at: <http://materialstechnology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1427019>
- [11] Zherebtsov S., Salishchev G., Galejev R. Mechanical properties of Ti–6Al–4V titanium alloy with submicrocrystalline structure produced by severe plastic deformation. *Materials Transactions*, 2005, vol. 46, no. 9, pp. 2020–2025. DOI: 10.2320/matertrans.46.2020  
Available at: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/46/9/46\\_9\\_2020/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/46/9/46_9_2020/_article)

**Voronov S.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Applied Mathematics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Weidong Ma** — post-graduate student, Applied Mathematics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Voronov S.A., Weidong Ma. Effect of Abrasive Grain Geometry on Cutting Forces in Grinding. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 5, pp. 52–63.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-52-63



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие авторов  
**Л.И. Пономарева, В.А. Вечтомова,  
А.С. Милосердова**

**«Бортовые цифровые  
многолучевые антенные решетки  
для систем спутниковой связи»**

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приведены результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru