

Ю.Г. Гуцаленко, В.И. Полянский, В.В. Шаргуленко, Харьков, Украина

### ЗАКОНОМЕРНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Проведено теоретичний аналіз закономірностей формування силової напруженості процесу шліфування на мікрорівні та визначено умови підвищення продуктивності обробки на основі збільшення граничної товщини зрізу, що обумовлено геометричними і міцністними характеристиками робочої поверхні круга.*

*Проведен теоретический анализ закономерностей формирования силовой напряженности процесса шлифования на микроуровне и определены условия повышения производительности обработки на основе увеличения предельной толщины среза, обусловленной геометрическими и прочностными характеристиками рабочей поверхности круга.*

J.U.G. GUCALENKO, V.I. POLJANSKIJ, V.V. SHARGULENKO  
NATURAL TENDENCIES OF PARAMETERS FORMATION OF POWER INTENSITY AT ABRASIVE PROCESSING

*Theoretical analysis of regularities of forming of grinding action force tension at microlevel is done, and there are defined conditions of higher processing productivity on the base of increase of a top thickness of cut which is conditional on geometrical and strength characteristics of working surface of wheel.*

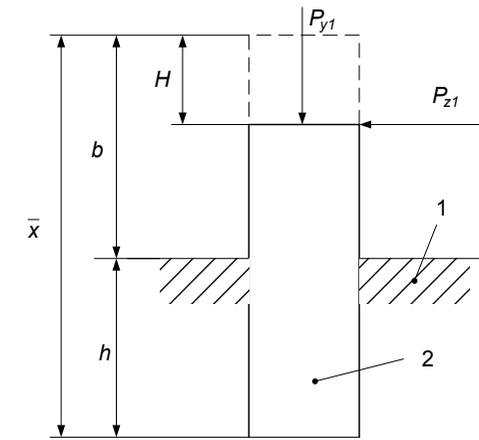
**Введение.** Традиционно окончательная обработка деталей машин производится с использованием абразивных инструментов, обеспечивающих снижение силовой и тепловой напряженности процесса повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей по сравнению с обработкой лезвийными инструментами [1]. Эффект достигается за счет дискретного характера резания большого количества абразивных зерен. При лезвийной обработке толщины срезов значительно больше, и это, как правило, не позволяет достичь высоких показателей качества и точности обрабатываемых поверхностей. Исключением является обработка лезвийными инструментами из синтетических сверхтвердых материалов, которые, благодаря высокой остроте режущих кромок, высокой твердости и теплопроводности, позволяют существенно снизить силы и температуру резания, а также энергоемкость обработки и обеспечить в ряде случаев показатели точности и качества, не уступающие абразивной обработке, причем при более высокой производительности [2]. В связи с возрастающей конкуренцией шлифования и точения в окончательной обработке деталей машин оценивание потенциальных возможностей абразивной и лезвийной обработки в плане снижения силовой напряженности процесса резания и повышения производительности обработки представляется важным и актуальным. Для этого необходимо учитывать закономерности

формирования параметров силовой напряженности процесса резания и в первую очередь процесса шлифования, как наиболее сложного и менее изученного. Цель работы – теоретическое обоснование условий уменьшения силовой напряженности процесса шлифования и повышения производительности абразивной обработки.

**Основное содержание работы.** Сила резания при шлифовании определяется как сумма элементарных сил резания, возникающих в результате взаимодействия отдельных зерен круга с обрабатываемым материалом. Поэтому для определения силы резания при шлифовании необходимо знать количество одновременно работающих зерен круга  $n$  и распределение сил резания единичными зернами. Тангенциальная  $P_{z1}$  и радиальная  $P_{y1}$  составляющие силы резания единичным зерном (рисунок) связаны с условным напряжением резания [3] зависимостями:  $P_{z1} = \sigma \cdot S$ ;  $P_{y1} = \sigma \cdot S / K_u$ , где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>;  $K_u = P_{z1} / P_{y1}$  – коэффициент шлифования. В общем случае формы режущей части зерна площадь поперечного среза можно определить как  $S = K_\phi \cdot a_z^2$ , где  $K_\phi$  – коэффициент формы режущей части зерна,  $a_z$  – толщина среза, м. Тогда

$$P_{z1} = K_\phi \cdot \sigma \cdot a_z^2, \quad (1)$$

$$P_{y1} = \frac{K_\phi \cdot \sigma \cdot a_z^2}{K_u}. \quad (2)$$



1 – связка круга, 2 – режущее зерно  
Рисунок – Расчетная схема

Предельное значение толщины среза  $a_z$  определяется прочностью режущего зерна на разрушение или прочностью его удержания в связке круга [4]. Как показывает практика шлифования, обычно прочность зерна выше прочности его удержания в связке, т.е. зерно в процессе шлифования не успевает в полной мере использовать свои прочностные свойства и преждевременно выпадает из связки круга. Увеличение твердости абразивного круга приводит к увеличению сопротивления вырыванию зерна из связки. В особой мере это проявляется в алмазных кругах на высокопрочных металлических связках, которые работают, как правило, в режиме затупления и за счет прочного удержания зерен в связке допускают их объемное разрушение. Оптимальным вариантом работы таких кругов является обеспечение условия равенства "трех сил" [5]: силы резания единичным зерном, силы, при достижении которой происходит объемное разрушение зерна, и силы, при которой зерно теряет устойчивость и выпадает из связки. При выполнении данного условия в максимальной степени используются потенциальные (прочностные) возможности алмазных зерен, что ведет к увеличению производительности шлифования. В связи с этим, проведем теоретический анализ возможностей реализации условия равенства "трех сил" и установим характер изменения толщины среза, определяющей силу резания и производительность обработки. Предположим, что разрушение режущего зерна и его выпадение из связки происходит в результате достижения предельного значения тангенциальной  $P_{z1}$  составляющей силы резания единичным зерном. Тогда можно полагать, что значение  $P_{z1}$  известно и в первом приближении равно предельной силе, при которой происходит разрушение зерна. Зная значения  $P_{z1}$ , а также условного напряжения резания  $\sigma$ , можно по зависимости (1) определить толщину среза, обусловленную прочностью зерна с известным значением  $K_\phi$ . Исходя далее для определенности из конусообразной формы режущей части зерна, когда  $K_\phi = \text{tg}\gamma$  (где  $\gamma$  – половина угла при вершине зерна) и площадь поперечного сечения среза не претерпевшим износ зерном равна  $S = \text{tg}\gamma \cdot a_z^2$ , в строгом рассмотрении указывая на  $H = 0$  (рисунок), имеем:

$$a_z = \sqrt{\frac{P_{z1}}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma}}. \quad (3)$$

В более общем случае рассмотрения наиболее над уровнем связки круга выступающего и потому наиболее нагруженного зерна, претерпевшего некоторый износ  $H$  к моменту наибольшего выступления над связкой, в отягченном  $H$  случае  $K_\phi = \text{tg}\gamma$  сталкиваемся с аналитической неопределенностью относительно  $a_z$  вида:

$$a_z = \sqrt{\frac{P_{z1} a_z}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma \cdot (a_z + 2H)}}. \quad (4)$$

Учитывая, что для относительно легко объемно разрушаемых зерен из обычных абразивов накопление линейного износа в процессе шлифования не является характерным, а зерна из сверхтвердых материалов отличаются повышенной износостойкостью, в интересах упрощения качественного анализа (анализа тенденций) полагаем  $(a_z + 2H) \approx a_z$ , т.е. исходим далее из безизносной схемы работы зерна, принимая ее и как приближенную в общем случае  $H \neq 0$ .

Как видно из (3), увеличить толщину среза  $a_z$  и тем самым повысить производительность обработки можно уменьшением угла  $\gamma$  и условного напряжения резания  $\sigma$ . С другой стороны, увеличение  $a_z$  требует обеспечения условия свободного размещения образующейся стружки в межзеренном пространстве круга, состоящего в том, чтобы толщина образующейся стружки была меньше высоты выступления зерна над уровнем связки круга  $B = b - H$ , где  $b$  – номинальная высота выступления зерна (без учета износа), м;  $H$  – износ зерна, м. Параметр  $B$  определим из условия устойчивости зерна в связке круга. Оценим равновесное состояние системы "зерно-связка", нагруженной со стороны обрабатываемого материала силой  $P_{z1}$ . Условием равновесия системы "зерно-связка" будет равенство моментов от силы  $P_{z1}$  и реакции заделки  $m = f(h)$ , рисунок. Представим момент от силы  $P_{z1}$  в виде  $M = P_{z1} \cdot B$ , а момент  $m = f(h)$  в виде  $m = a \cdot h$ , где  $h$  – глубина заделки зерна в связке круга, м;  $a$  – экспериментальная характеристика, определяющая прочностные свойства связки круга, Н [5]. Если физический смысл характеристики  $a$  в приведенном выше описании  $m = f(h)$  очевиден и в уравновешенной системе "зерно-связка" подчиняется зависимости  $a = M/h$ , то наша терпимость к использованию в также заимствованном здесь нами описании момента  $M = f(B)$  геометрически максимального плеча  $B = b - H$  (рисунок), требует пояснения. Приложение тангенциальной составляющей силы резания  $P_{z1}$  к вершине зерна практически безупречно при весьма тонких срезах, когда и толщина  $a_z$ , и площадь  $S$  поперечного сечения среза малы. В общем же случае нельзя не считаться с тем, что реакция на динамическую интервенцию зерна со стороны обрабатываемого материала является распределенной, на что, как нами уже приведено выше с использованием обращения

к условному напряжению резания  $\sigma$ , указывают классические источники – труды Е.Н. Маслова. Исходя из известного [3] описания составляющей силы резания  $P_{z1} = \sigma \cdot S$ , процесс производства единичного среза при абразивном микрорезании подобен смятию с напряжением  $\sigma$ , осуществляемому режущим зерном в отношении обрабатываемого материала в направлении движения (по линии действия силы  $P_{z1}$ ), и притом избирательно (в пределах площади  $S$  поперечного сечения части зерна, контактирующей с обрабатываемым материалом). Следовательно, реакция обрабатываемого материала на зерно также является распределенной на него нагрузкой с приложением результирующей  $P_{z1}$  ниже вершины, и притом тем ниже при одной и той же величине  $a_z$  (наибольшего плеча действия распределенной нагрузки), чем большим является расширение поперечного сечения зерна в его рассмотрении от вершины (в соответствии с большей крутизной кривой эпюры момента в рассмотрении от вершины зерна и при постоянстве  $\sigma$  по линии такого рассмотрения). Нюансами такого рода вместе с автором [5] полагаем возможным пренебречь в рассмотрении задач выполняемого здесь качественного анализа в связи с выявлением тенденций формирования параметров силовой напряженности при абразивной обработке. Поскольку в общем случае теории и практики шлифования  $a_z \leq B$ , то на схеме по рисунку специальное (и неизбежно суживающее область существования) указание на  $a_z$  не приводится, тем более необязательное в контексте приводимых здесь суждений. В рассмотрении же финишных операций с весьма малыми  $a_z$ , много меньшими величины  $B = b - H$ , т.е. при работе кругами с принудительно хорошо развитым режущим рельефом, в особенности в обработке сверхтвердых объектов, когда внедрение в обрабатываемый материал практически отсутствует [6], расчетная схема с ориентированным по рисунку на вершину зерна приложением  $P_{z1}$  применима и для иллюстрации количественных оценок.

Выразим далее величину  $h$  зависимостью  $h = \bar{X} - b$  (рисунок), где  $\bar{X}$  – размер зерна (зернистость круга), м. Тогда, оперируя в рамках принятых выше допущений и приближений, из условия равенства моментов  $M$  и  $m$ , получим

$$P_{z1} = a \cdot \left( \frac{\bar{X} - H}{B} - 1 \right). \quad (5)$$

Пренебрежем в (5) очевидной малостью  $H$  по отношению к  $\bar{X}$  и, с учетом этого, подставим зависимость (5) в (3), откуда

$$a_z = \sqrt{\frac{a}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma} \cdot \left( \frac{\bar{X}}{B} - 1 \right)}. \quad (6)$$

Максимальная толщина среза  $a_z$  увеличивается с увеличением параметров  $a$ ,  $\bar{X}$  и уменьшением  $\sigma$  и  $B$ . Как следует из зависимости (6), между параметрами  $a_z$  и  $B$  существует вполне однозначная связь: чем больше заданное значение  $B$ , тем меньше  $a_z$ . Это связано с изменением (уменьшением)  $h$  и, соответственно, прочности заделки зерна с увеличением  $B$  в использовании зерен данной зернистости  $\bar{X}$ .

Рассмотрим далее предельный случай продуктивности единичного среза, когда  $a_z = B$ . После соответствующего преобразования зависимости (6) в вид

$$\frac{\text{tg}\gamma \cdot a_z^2 \cdot \sigma}{a} = \frac{\bar{X}}{a_z} - 1 \quad (7)$$

получаем трансцендентное относительно  $a_z$  уравнение

$$a_z^3 + \frac{a}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma} \cdot a_z - \frac{a}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma} \cdot \bar{X} = 0, \quad (8)$$

разрешаемое лишь численным методом.

Приближенное аналитическое выражение для предельного значения  $a_z$  из условия  $a_z = B$  получим на основе равенства (7) после пренебрежения слагаемым  $(-1)$  в правой его части. Тогда имеем:

$$a_z = \sqrt[3]{\frac{a \cdot \bar{X}}{\text{tg}\gamma \cdot \sigma}}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), увеличить толщину среза  $a_z$  можно увеличением параметров  $a$ ,  $\bar{X}$  и уменьшением  $\sigma$ . Заметим, что все три указанные параметры входят в зависимость (9) с одинаковой степенью, хотя степень влияния параметра  $\bar{X}$  с упрощением равенства (7) при этом и несколько преувеличена.

Рассмотрим теперь условие устойчивости зерна в связке круга до момента его выпадения от действия радиальной составляющей силы резания единичным зерном  $P_{y1}$ . Условием равновесия системы “зерно-связка” в этом рассмотрении будет равенство радиальной составляющей силы резания единичным зерном

$P_{y_1}$  и реакции заделки зерна в связке. Следуя формальной аналогии [5] с рассмотренным выше описанием момента  $m = f(h)$ , полагаем и эту реакцию пропорциональной глубине  $h$  заделки зерна в связке круга, но уже со своим коэффициентом пропорциональности  $a_1$  в описании этой реакции произведем  $a_1 \cdot h$ , где  $a_1$  – соответствующая экспериментальная характеристика прочности зерноудержания связкой круга. С учетом  $h = \bar{X} - b$  имеем:

$$P_{y_1} = a_1 \cdot (\bar{X} - b). \quad (10)$$

Из зависимости (10) вытекает, что критическое значение радиальной составляющей силы резания единичным зерном  $P_{y_1}$  из условия устойчивости зерна в связке круга под ее действием тем больше, чем меньше номинальная высота выступания зерна данной зернистости  $\bar{X}$  над уровнем связки круга  $b$  и больше параметр  $a_1$ , т.е. чем прочнее зерноудержание связкой круга. Сравнивая значения  $P_{y_1}$ , определяемые зависимостями (2) и (10), с учетом известной зависимости [4] для определения условного напряжения резания  $\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} / K_{ш}$  (где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>), установим предельное значение толщины среза

$$a_z = K_{ш} \cdot \sqrt{\frac{a_1 \cdot (\bar{X} - b)}{2 \cdot K_{\phi} \cdot \sigma_{сж}}}. \quad (11)$$

Таким образом, из условия устойчивости зерна в связке круга от действия на него радиальной составляющей силы резания  $P_{y_1}$ , установлена предельная толщина среза  $a_z$ , которая определяет производительность обработки при шлифовании. Из зависимости (11) следует существенное влияние на  $a_z$  коэффициента шлифования  $K_{ш}$ : с его увеличением  $a_z$  пропорционально увеличивается. Увеличение коэффициента шлифования  $K_{ш}$  обусловлено повышением режущей способности круга. Следовательно, чем выше режущая способность круга, тем больше предельное значение толщины среза  $a_z$  и, соответственно, производительность обработки. Увеличению  $a_z$  способствуют также использование в кругах шлифпорошков большей зернистости  $\bar{X}$ ; уменьшение высоты выступания зерна над уровнем связки  $b$  (с учетом соблюдения геометрического ограничения  $a_z \leq B$ , что по рисунку соответствует полуинтервальному множеству  $a_z \in (0, b-H]$ ); про-

ведение превентивных или параллельных шлифованию мероприятий по снижению предела прочности обрабатываемого материала на сжатие  $\sigma_{сж}$ ; применение зерен с более низкими  $K_{\phi}$ , т.е. более острых или с рабочей ориентацией более острыми кромками (дополнительный эффект при этом обеспечивается с увеличением  $a_z$  благодаря понижению порога начала стружкообразования при внедрении абразивного зерна в обрабатываемый материал, происходящему вследствие уменьшения радиуса округления режущей кромки зерна, сопутствующего, как правило, повышению ее остроты [3]); эксплуатация шлифовальных кругов на связках с повышенной прочностью зерноудержания, находящей отражение в более высоких значениях параметра  $a_1$ .

**Выводы.** Проведен теоретический анализ закономерностей формирования параметров силовой напряженности процесса шлифования на микроуровне и определены условия повышения производительности обработки на основе увеличения предельной толщины среза, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга. Приведены условия обеспечения равенства "трех сил": силы резания единичным зерном, силы объемного разрушения зерна и силы, при которой зерно теряет устойчивость и выпадает из связки. Это позволяет в максимальной степени использовать прочностные свойства рабочей поверхности круга.

**Список использованных источников:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За ред. А.І. Грабченка. – Х.: ХДПУ, 1999. – 436 с. 3. Маслов Е.Н. Основные закономерности высокопроизводительного шлифования // Высокопроизводительное шлифование – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 3-17. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов". – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Одесса, 1995. – 36 с. 6. Грабченко А.И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: дис. в форме науч. докл. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Харьков, 1995. – 59 с.

Поступила в редколлегию 04.07.2011

**Bibliography (transliterated):** 1. Maslov E.N. Teorija shlifovanija metallov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s. 2. Robochi procesi visokih tehnologij v mashinobuduvanni: navch. posibnik / Za red. A.I. Grabchenka. – H.: HDPY, 1999. – 436 s. 3. Maslov E.N. Osnovnye zakonomenosti vysokoproizvoditel'nogo shlifovanija // Vysokoproizvoditel'noe shlifovanie – M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. – S. 3-17. 4. Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija / Pod obw. red. F.V. Novikova i A.V. Jakimova. V desjati tomah. – T. 1. "Mehanika rezanija materialov". – Odessa: ONPU, 2002. – 580 s. 5. Novikov F.V. Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditel'nogo almaznogo shlifovanija: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01 – Processy mehanicheskoj obrabotki, stanki i instrumenty. – Odessa, 1995. – 36 s. 6. Grabchenko A.I. Nauchnye osnovy almaznogo shlifovanija sverhtverdyh polikristallicheskih materialov: dis. v forme nauch. dokl. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01 – Processy mehanicheskoj obrabotki, stanki i instrumenty. – Har'kov, 1995. – 59 s.