

- технологию создания конструкционных и функциональных стеклокристаллические материалов с особыми свойствами.

13. Сконцентрировать усилия ведущих научных школ в различных отраслях промышленности на базе ХНЭУ им. С. Кузнецца для разработки специальных технологий и устройств для предупреждения и ликвидации аварий с использованием импульсных источников энергии.

14. Обеспечить активное участие органов государственной власти и местного самоуправления, консалтинговых и рейтинговых агентств, общественных организаций и представителей бизнеса в разработке методических рекомендаций и инструктивных материалов по вопросам экологического аудита предприятий и их инновационного обновления.

15. Рекомендовать органам государственной власти в Украине принять в качестве основной цели государства – обеспечение эколого-экономической безопасности общества и каждого конкретного гражданина.

Список литературы: 1. Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції, 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – 510 с.

УДК 621.923

УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ОБРАБОТКИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф.

(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнецца, Харьков, Украина)

Теоретически показано влияние формы режущих зерен алмазного круга на условия уменьшения энергоемкости обработки и шероховатости поверхности при шлифовании

Ключевые слова: шлифование, энергоемкость, шероховатость поверхности

Теоретично показано вплив форми ріжучих зерен алмазного круга на умови зменшення енергоємності обробки та шорсткості поверхні при шліфуванні

Ключові слова: шліфування, енергоємність, шорсткість поверхні

The influence of the shape of the cutting grains of a diamond wheel on the conditions for reducing the energy intensity of processing and the surface roughness during grinding

Keywords: grinding, energy consumption, surface roughness

Метод шлифования является одним из производительных методов финишной абразивной обработки деталей машин. Поэтому с точки зрения снижения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и повышения производительности обработки с учетом требований по качеству обрабатываемых поверхностей важно знать физические и технологические закономерности формирования основных параметров обработки, в особенности энергоемкости и шероховатости обрабатываемой поверхности. В связи с этим в работе проведен теоретический анализ условий уменьшения энергоемкости обработки и шероховатости обрабатываемой поверхности при шлифовании с применением по-

лученных экспериментальных данных. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} при шлифовании, моделируя режущие зерна в форме усеченного конуса (рис. 1) [1]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta)^2}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 + \eta)}}, \quad (1)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен в круге; γ – половина угла при вершине зерна конусообразной формы; $V_{кр}$, $V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м; $\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерна (для острозаточенного зерна $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$); x – величина линейного износа зерна, м; H – максимальная условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

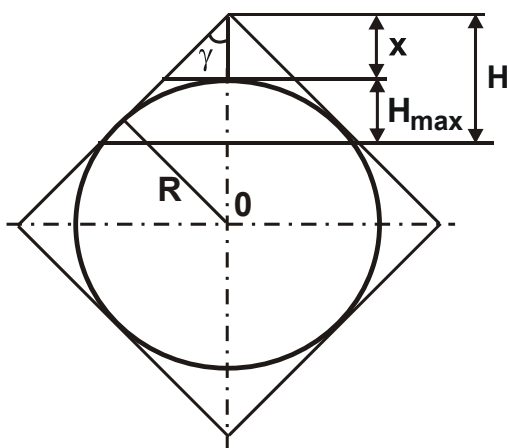


Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифования

Если рассматривать режущее зерно в форме сферы радиусом R , то следует в зависимости (1) безразмерный коэффициент η выразить через радиус R . Для этого из условия $R/(R+x) = \sin \gamma$ определяется величина

$x = (R / \sin \gamma) - R$, которая в данном случае равна расстоянию от вершины квадрата до вписанной окружности радиусом R . В случае $\gamma = 45^\circ$ имеем $x = 0,414 \cdot R$. Из условий $H = x / \eta$ и $H = x + H_{max}$ определяется $H_{max} = 0,414 \cdot R \cdot (1 / \eta - 1)$. Откуда $H_{max} / R = 0,414 \cdot R \cdot (1 / \eta - 1)$ или

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (2) значения η .

Таблица 1

Расчетные значения безразмерного коэффициента η

H_{max} / R	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
η	1	0,8	0,674	0,58	0,45	0,41

Как видно, с увеличением отношения H_{max} / R безразмерный коэффициент η уменьшается, принимая значения, меньше единицы. Согласно известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И.В. и Богомоллова Н.И., при условии $H_{max} / R < 0,2$ (соответственно, при $0,7 < \eta < 1$) имеет место процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без

образования стружки, а при условии $H_{max}/R > 0,2$ (соответственно, при $\eta < 0,7$) – процесс стружкообразования при резании.

С учетом зависимости (2) отношение $(1 - \eta)^2 / (1 + \eta)$, входящее в зависимость (1), принимает вид:

$$\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)} = \frac{5,83 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2}{\left(1 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right) \cdot \left(2 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \quad (3)$$

Поскольку отношение $H_{max}/R < 1$, то зависимость (3) можно упростить:

$$\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)} = 2,915 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2. \quad (4)$$

Подставляя зависимость (4) в (1), имеем:

$$H_{max} = \frac{1836,45 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^2}. \quad (5)$$

В итоге получена аналитическая зависимость для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} , которая по структуре отличается от аналогичной зависимости (1), полученной при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму. Входящие в зависимость (5) параметры в большей степени влияют на параметр H_{max} , чем в зависимости (1). Следовательно, моделируя режущие зерна в форме сферы, можно в более широких пределах изменять параметр H_{max} за счет изменения входящих в зависимость (5) параметров. При этом зависимость (5) принимает упрощенный вид, так как не содержит неопределенного безразмерного коэффициента η .

Исходя из зависимости (5), для исходных данных: $V_{кр} / V_{дет} = 60$; $m = 100$; $t = 20 \cdot 10^{-6}$ м; $\bar{X} / R = 2$; $R_{кр} = 0,4$ м; $R_{дет} = 0,05$ м отношение $H_{max} / R = 0,175$. В этом случае, согласно известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И. В. и Богомолова Н. И., имеет место процесс стружкообразования при резании. При меньших значениях H_{max} / R процесс стружкообразования переходит в процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования стружки и соответственно без осуществления съема материала. Поэтому с целью повышения эффективности процесса резания при шлифовании отношение H_{max} / R необходимо увеличивать. Это достигается в первую очередь за счет выполнения условия $\bar{X} < 2 \cdot R$ путем осуществления правки алмазного круга и обеспечения его высокой режущей способности. Исходя из зависимости (5), увеличить отношение H_{max} / R можно увеличением скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t . Например, при увеличении $V_{дет}$ и t в 2 раза отношение $H_{max} / R = 0,5$, что соответствует устойчивому процессу стружкообразования при резании. В работе [2] приведена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания σ при микрорезании единичным зерном радиусом R :

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}} \right)}, \quad (6)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; a – толщина среза, м; ψ – условный угол трения режущего зерна с материалом.

Зависимость (6) для определения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ при шлифовании с учетом зависимости (5) и условия $a = H_{max}$ принимает вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{918,25 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}} \right)}. \quad (7)$$

Уменьшить σ можно увеличением параметров V_{dem} , t и уменьшением m и $V_{кр}$, так как при шлифовании кругом с неизношенными режущими зернами выполняется условие $\bar{X} < 2 \cdot R$. Несомненно, в связи с износом зерен и увеличением радиуса их округления существенное влияние на характер изменения отношения H_{max} / R оказывает величина R .

При условии $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t = const$ зависимость (7) выразится:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{918,25 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3 \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}} \right)}. \quad (8)$$

В этом случае глубина шлифования t незначительно влияет на σ , а увеличение производительности обработки Q приводит к уменьшению σ . Однако с увеличением Q , очевидно, увеличивается и величина R , что приведет к лишь незначительному уменьшению σ . Как следует из зависимости (8), наибольшее влияние на условное напряжение резания σ оказывает радиус округления режущей кромки зерна R : чем он меньше, тем меньше условное напряжение резания, что согласуется с практическими данными.

В работе [3] приведена аналитическая зависимость для определения параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму (рис. 1):

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max}}{4 \cdot t}} = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{dem}^2 \cdot \rho}{\operatorname{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2}}. \quad (9)$$

Подставляя зависимость (5) в (9), получена зависимость для определения параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими форму сферы (рис. 1):

$$R_a = 1248,8 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^2} \right)^{1,2} \cdot \rho^{0,6} \cdot t^{0,4}. \quad (10)$$

В табл. 2 – табл. 4 приведены рассчитанные по зависимостям (1), (5) и (9), (10) значения параметров H_{max} и R_a для конусообразной (при $\eta = 0$) и сферической форм зерен, определяющих, по сути, их максимальные и минимальные значения. Исходные данные: $V_{дет} = 1; 3; 10$ м/мин; $t = (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$ м; $V_{кр} = 30$ м/мин; $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $m = 100$; $R = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $R_{кр} = 0,15$ м; $R_{дет} = 0,08$ м. Параметры режима резания соответствуют условиям круглого наружного глубинного шлифования.

Таблица 2

Значения параметров шлифования при $V_{дет} = 1$ м/мин

t , мкм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_{max} , мкм (сфера)	1,11	1,57	1,92	2,22	2,48
H_{max} , мкм (конус при $\eta = 0$)	13,92	15,6	16,75	17,59	18,22
R_a , мкм (сфера)	0,083	0,11	0,132	0,146	0,158
R_a , мкм (конус при $\eta = 0$)	1,43				
$R_{a.эксн}$, мкм (эксперимент)	0,95	1,18	1,3	1,42	1,44
H_{max1} , мкм	10,0	13,4	15,5	17,46	18,0
R_1 , мкм	33	34	35	36	36,5
R_1 / R	0,33	0,34	0,35	0,36	0,365
H_{max1} / R_1	0,3	0,394	0,44	0,485	0,493

Как видно, имеет место значительное отличие значений приведенных параметров для конусообразной (при $\eta = 0$) и сферической форм зерен. Следовательно, в пределах этих значений могут изменяться параметры H_{max} и R_a с изменением условий шлифования. Например, с течением времени шлифования в связи с износом зерен круга параметры H_{max} и R_a могут уменьшаться от максимального до минимального значения. Такая же закономерность наблюдается и с увеличением параметров m , $V_{кр}$ и уменьшением параметров \bar{X} , $V_{дет}$, t .

В табл. 2 – табл. 4 для сравнения приведены экспериментальные значения параметра шероховатости поверхности $R_{a.эксн}$, установленные при круглом наружном глубинном шлифовании алмазным кругом на металлической связке 1А1 300х25 АС6 200/160 4 М1-01 цилиндрической твердосплавной фрезы диаметром 160 мм (из твердого сплава ВК8) с режимом шлифования: $V_{дет} = 1; 3; 10$ м/мин; $t = (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$ м; $V_{кр} = 30$ м/мин [4]. С учетом значений $R_{a.эксн}$ рассчитаны на основе преобразованной зависимости (9) значения H_{max1} :

$$H_{max1} = \sqrt[6]{(5 \cdot R_{a.эксн})^5 \cdot 4 \cdot t}. \quad (11)$$

Также в табл. 2 – табл. 4 приведены значения радиуса округления режущей кромки зерна $R_1 < R$, рассчитанные на основе зависимости:

$$R_1 = R \cdot \sqrt{\frac{H_{max}}{H_{max1}}}, \quad (12)$$

и отношений R_1 / R и H_{max1} / R_1 . В зависимости (12) значения параметра H_{max} принимаются для зерен в форме сферы. Отсутствие в табл. 4 экспериментальных значений $R_{a.эксн}$ для $V_{дем} = 10$ м/мин и $t > 0,1 \cdot 10^{-3}$ м связано с тем, что в этих условиях процесс протекал неустойчиво, имело место засаливание алмазного круга на металлической связке и наблюдался его повышенный износ.

Таблица 3

Значения параметров шлифования при $V_{дем} = 3$ м/мин

t , мкм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_{max} , мкм (сфера)	3,33	4,71	5,76	6,66	7,44
H_{max} , мкм (конус при $\eta = 0$)	20,18	22,61	24,28	25,5	26,41
R_a , мкм (сфера)	0,256	0,338	0,41	0,45	0,486
$R_{a.эксн}$, мкм (конус при $\eta = 0$)	2,21				
R_a , мкм (эксперимент)	1,5	1,6	1,7	1,75	1,8
H_{max1} , мкм	14,6	17,3	19,4	20,8	22,1
R_1 , мкм	48	52	54	56	58
R_1 / R	0,48	0,52	0,54	0,56	0,58
H_{max1} / R_1	0,3	0,33	0,36	0,37	0,38

Таблица 4

Значения параметров шлифования при $V_{дем} = 10$ м/мин

t , мкм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_{max} , мкм (сфера)	11,1	15,7	19,2	22,2	24,8
H_{max} , мкм (конус при $\eta = 0$)	33	37	39,7	41,7	43,2
R_a , мкм (сфера)	1,11	1,465	1,76	1,94	2,11
R_a , мкм (конус при $\eta = 0$)	4,0				
$R_{a.эксн}$, мкм (эксперимент)	2,0	–	–	–	–
H_{max1} , мкм	18,4	–	–	–	–
R_1 , мкм	77,7	–	–	–	–
R_1 / R	0,777	–	–	–	–
H_{max1} / R_1	0,24	–	–	–	–

Как следует из табл. 2, с увеличением глубины шлифования t параметр шероховатости поверхности R_a увеличивается, вызывая увеличение параметра H_{max1} фактически при одном значении $R_1 < R$. При скорости детали $V_{дем} = 1$ м/мин (табл. 2) отношение R_1 / R меньше, чем при $V_{дем} = 10$ м/мин (табл. 4), что связано с меньшей величиной линейного износа зерен круга. Так, например, при $V_{дем} = 1$ м/мин при моделировании зерен в форме конуса (при $\eta = 0$), параметр H_{max1} приблизительно равен параметру H_{max} , тогда как при $V_{дем} = 10$ м/мин при моделировании зерен в форме сферы параметр H_{max1} при-

ближается к значению параметра H_{max} (при условии $R_1 = R$). Это свидетельствует о незначительном отличии значений R_1 и R при $V_{дет} = 10$ м/мин. Следовательно, с увеличением скорости детали $V_{дет}$ вследствие увеличения радиусов округления режущих кромок зерен $R_1 < R$, шлифование производится зернами, по форме приближающимися к форме сферы. Этим объясняется не столь интенсивное увеличение параметра шероховатости поверхности R_a с увеличением скорости детали $V_{дет}$, как это вытекает из зависимости (9), полученной для конусообразной формы зерен с $\eta = 0$.

Таким образом показано, что с увеличением скорости детали $V_{дет}$ происходит большее сглаживание режущего рельефа круга, радиусы округления режущих кромок зерен R_1 увеличиваются, что способствует не столь значительному увеличению параметра шероховатости поверхности R_a . В итоге экспериментально установленные значения $R_{a.эксн}$ при $V_{дет} = 1$ м/мин и $V_{дет} = 10$ м/мин отличаются незначительно, хотя при этом имеет место многократное увеличение производительности обработки (в 10 раз).

Как видно, во всех случаях параметр шероховатости поверхности $R_{a.эксн}$ принимает значения в пределах изменения расчетных значений R_a , полученных при моделировании режущих зерен в форме конуса (при $\eta = 0$) и сферы. Это свидетельствует о достоверности приведенных в работе аналитических зависимостей для определения параметра R_a , позволяющих расчетным путем установить истинные пределы изменения параметра R_a в зависимости от условий обработки. С физической точки зрения предельные значения параметра R_a для заданного режима шлифования определяют изменение (уменьшение) R_a в связи с износом зерен круга (увеличение безразмерного коэффициента η и радиусов округления режущих кромок зерен R_1 в форме сферы). Так, с течением времени обработки параметр шероховатости поверхности $R_{a.эксн}$, очевидно, будет уменьшаться до приведенных в табл. 2 – табл. 4 значений параметра R_a (для зерен в форме сферы). При шлифовании со скоростью детали $V_{дет} = 10$ м/мин время достижения параметром $R_{a.эксн}$ значения R_a будет меньше, чем при шлифовании со скоростью детали $V_{дет} = 1$ м/мин в связи с более интенсивным износом зерен от действия на них повышенных нагрузок.

Исходя из табл. 2, при шлифовании со скоростью детали $V_{дет} = 1$ м/мин значения $R_{a.эксн}$ превышают значения R_a (для зерен в форме сферы) более чем в 10 раз. Это указывает на существование значительных возможностей уменьшения шероховатости поверхности для данных условий обработки. При шлифовании со скоростью детали $V_{дет} = 3$ м/мин расхождение значений $R_{a.эксн}$ и R_a (для зерен в форме сферы) уменьшается до 5,8 ... 3,7 раз, а при шлифовании со скоростью детали $V_{дет} = 10$ м/мин – до 2 раз. Следовательно, и в этих условиях можно добиться значительного уменьшения шероховатости поверхности за счет обеспечения сглаживания режущего рельефа алмазного круга. Таким образом,

приведенные аналитические зависимости и полученные на их основе теоретические решения позволяют оценить предельные технологические возможности шлифования с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности, что открывает новые перспективы повышения качества и производительности обработки.

Список литературы: 1. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с. 2. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. О. Анділахай. – Одеса: ОНПУ, 2013. – 47 с. 3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 4. Сошников С. А. Модель рабочего рельефа алмазно-абразивного инструмента и качество обработанной поверхности при алмазном высокопроизводительном шлифовании / С. А. Сошников, Ф. В. Новиков // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием. – Тула, 1984. – С. 128–135.

УДК 621.923

НОВЫЙ ИЗНОСОСТОЙКИЙ СПЛАВ КОМПАНИИ TAEGUTEC ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЧУГУНОВ

Жовтобрюх В.А., канд. техн. наук
(Технический Центр "ВариУс", Днепр, Украина)

Приведены результаты промышленного применения новых инструментальных сплавов с износостойкими покрытиями при высокоскоростном фрезеровании чугунов

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, чугун, покрытие, износостойкость

Наведено результати промислового застосування нових інструментальних сплавів зі зносостійкими покриттями при високошвидкісному фрезеруванні чавунів

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, чавун, покриття, зносостійкість

The results of industrial application of new tool alloys with wear-resistant coatings for high-speed milling of cast irons are presented

Keywords: high-speed milling, cast iron, coating, wear resistance

Современные требования к эффективности металлообработки ставят производственные компании перед выбором: повышать производительность или уходить с рынка. Повышение производительности достигается исключительно повышением скоростных характеристик оборудования и применением соответствующего задаче инструмента. Это вынуждает инструментальные компании всего мира создавать все более совершенные сплавы, покрытия и формы режущих инструментов, особенно если речь идет об обработке сложных материалов.

В настоящее время качество и новые технологии производства чугунных заготовок позволяют изготавливать из чугуна изделия достаточно сложных форм, что накладывает определенные обязательства на производителей режу-