

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.923

© Новиков Ф.В.¹, Шкурупий В.Г.², Анділахай В.А.³

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Разработана математическая модель определения шероховатости поверхности при абразивном полировании и установлены условия ее уменьшения. Они состоят в реализации предельного значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна, при котором процесс резания (стружкообразования) переходит в процесс пластического деформирования материала без отделения стружки. Установлено, что предельные значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна определяются коэффициентом трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом.

Ключевые слова: абразивное полирование, зернистость абразива, процесс резания, шероховатость поверхности, толщина среза, коэффициент трения.

Новіков Ф.В., Шкурупій В.Г., Анділахай В.О. Аналітичне визначення умов зменшення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні. Розроблено математичну модель визначення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні й установлені умови її зменшення. Вони полягають в реалізації граничного значення відношення товщини зрізу до радіуса округлення ріжучої кромки абразивного зерна, при якому процес різання (стружкоутворення) переходить у процес пластичного деформування матеріалу без відділення стружки. Установлено, що граничні значення відношення товщини зрізу до радіуса округлення ріжучої кромки абразивного зерна визначаються коефіцієнтом тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом.

Ключові слова: абразивне полірування, зернистість абразиву, процес різання, шорсткість поверхні, товщина зрізу, коефіцієнт тертя.

F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy, V.O. Andilakhay. Analytical determination of conditions of reduction of surface roughness at abrasive polishing. A mathematical model for determining the surface roughness in abrasive polishing conditions is established with the aim of lowering it. It consists in the realization of ultimate shear value of the ratio of thickness to radius of rounding the cutting edge of the abrasive grains, whereby the cutting process (chip formation), the process proceeds to the plastic deformation of the material without separating chips. It was found that the limiting value of the slice thickness to the radius of the rounding of the cutting edge of the abrasive grain were determined friction abrasive grain with the material being processed.

Keywords: abrasive polishing abrasive grain, a process of cutting, surface roughness, thickness of slice, the coefficient of friction.

Постановка проблеми. При обработке ответственных деталей машин и систем постоянно возникает проблема обеспечения высоких показателей шероховатости поверхности в связи с необходимостью обеспечения заданных эксплуатационных характеристик деталей (износо-

¹ д-р техн. наук, проф., Харьковський національний економічний університет г. Харків

² канд. техн. наук, доц., Харьковський національний економічний університет г. Харків

³ канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет» г. Маріуполь, (andil.man@mail.ru)

стойкости и т. д.), в особенности при изготовлении прецизионных деталей. Шероховатость обрабатываемых поверхностей данных деталей формируется на финишных операциях, которые осуществляются, как правило, с использованием различных абразивных инструментов (шлифовальных кругов, хонинговальных головок, притиров и т. д.) [1]. Как показывает практика, наилучшие результаты достигаются на финишных операциях доводки свободным абразивом (алмазной пастой и алмазным мелкозернистым порошком) и полирования. В настоящее время накоплен большой опыт эффективного применения процессов абразивного полирования. Вместе с тем, все возрастающие требования к показателям шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке деталей из труднообрабатываемых материалов предопределяют необходимость поиска новых технологических решений по повышению эффективности абразивного полирования. В связи с этим представляется важным и актуальным проведение теоретических и экспериментальных исследований для обоснования условий уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности при абразивном полировании.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке в настоящее время в научно-технической литературе уделяется чрезвычайно большое внимание. Усилиями многих ученых разработаны математические модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке [2-4]. Однако, они применимы в основном к процессам шлифования. Достаточно строгой математической модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании нет, что предопределяет использование для выбора оптимальных условий обработки лишь экспериментальных данных шероховатости поверхности, справедливых для частных условий полирования. В связи с этим, важно установить аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании, что позволит с общих позиций проанализировать технологические возможности уменьшения шероховатости поверхности и обоснованно подойти к выбору оптимальных условий абразивного полирования.

Цель работы – теоретический анализ путей повышения качества обрабатываемых поверхностей деталей машин при абразивном полировании на основе выбора рациональных условий обработки.

Изложение основного материала. Как известно, наиболее эффективной схемой абразивной обработки (шлифования), обеспечивающей наименьшие значения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} , является схема выхаживания, осуществляемая без поперечной подачи под действием лишь упруго-восстанавливающей силы. Скорость съема металла в этом случае с течением времени обработки непрерывно уменьшается, также как и уменьшаются параметры R_a и R_{max} .

Процесс абразивного полирования предназначен для уменьшения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} путем съема металла в пределах высоты микронеровностей исходной обрабатываемой поверхности. Эффект обработки достигается за счет перехода от жесткой схемы абразивной обработки (с фиксированной поперечной подачей) к упругой схеме (с фиксированным радиальным усилием), поскольку в связи с уменьшающейся по высоте микронеровностей фактической площади контакта абразивных зерен с обрабатываемым металлом происходит уменьшение удельного давления P во времени (рис. 1), а это приводит к уменьшению скорости съема металла и соответственно шероховатости поверхности. В результате фактически реализуется схема выхаживания, обеспечивающая существенное уменьшение шероховатости поверхности.

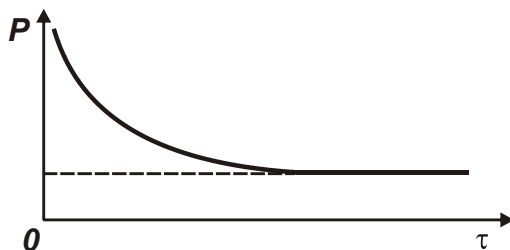


Рис. 1 – Зависимость удельного давления P от времени обработки τ

После съема микронеровностей на поверхности происходит обработка сплошного слоя металла с постоянным удельным давлением. В этом случае скорость съема металла и шероховатость поверхности остаются постоянными во времени. Добиться существенного уменьшения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} в этих условиях весьма сложно. Как из-

вестно, чем больше зерен участвует в процессе формирования шероховатости поверхности, тем меньше параметры R_a и R_{max} , что связано с уменьшением толщин срезов отдельными абразивными зернами. Однако, процесс резания (стружкообразования) может осуществляться при значениях толщин срезов, превышающих предельные значения. В противном случае имеет место лишь процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла без образования стружки. Данный процесс нежелателен с точки зрения повышения интенсивности съема металла, однако он эффективен в условиях сглаживания микронеровностей исходной поверхности с целью уменьшения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} . Поэтому в начальный момент обработки при абразивном полировании, когда необходимо удалить основную часть микронеровностей с поверхности, следует обеспечить процесс резания (стружкообразования – на рис. 1 он условно показан пунктирной линией.), а на заключительном этапе обработки – процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла. Очевидно, для этого необходимо правильно выбрать радиальное усилие в зоне обработки, чтобы на конечном этапе удаления микронеровностей исходной поверхности был реализован процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла.

Рассматривая процесс полирования с позиции резания и стружкообразования, уменьшить параметр R_{max} можно лишь до определенного значения, определяемого предельной толщиной среза, при которой процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования материала без образования стружки. В результате обрабатываемый материал не будет удаляться, а будет лишь перераспределяться в пределах зоны обработки, что не приведет к снижению параметра шероховатости поверхности R_{max} . Таким образом, можно полагать, что существует предельное значение параметра R_{max} , обусловленное существованием предельной толщины среза [5]. В теории абразивной обработки сложилось достаточно однозначное представление о закономерности изменения предельной толщины среза a_z при микрорезании единственным зерном. Установлено, что a_z зависит главным образом от радиуса округления режущей кромки зерна ρ . Так, по экспериментальным данным проф. Богомолова Н.И. предельное значение отношения a_z / ρ изменяется в диапазоне 0,04 – 0,08, а по данным проф. Крагельского И.В. – в диапазоне 0,14 – 0,17.

Рассматривая в первом приближении $a_z \approx R_{max}$, можно полагать, что значения параметра шероховатости поверхности R_{max} будут изменяться в пределах $(0,04 - 0,17) \cdot \rho$. Если принять, что величина ρ равна радиусу режущего зерна R , то наибольшие значения R_{max} будут определяться по зависимости $R_{max} = 0,17 \cdot R$ или

$$R_{max} = 0,085 \cdot D, \tag{1}$$

где D – диаметр абразивного зерна, мкм.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (1) значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0,25 \cdot R_{max}$.

Таблица 1

Расчетные значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0,25 \cdot R_{max}$

D , мкм	10	5	1	0,5	0,2	0,1
R_{max} , мкм	0,85	0,425	0,085	0,043	0,017	0,0085
R_a , мкм	0,21	0,1	0,021	0,01	0,004	0,002

Для сравнения в табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости

$$R_{max} = 0,04 \cdot R = 0,02 \cdot D \tag{2}$$

значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0,25 \cdot R_{max}$, которые определяют наименьшую (минимально возможную) шероховатость поверхности.

Таблица 2

Расчетные значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0,25 \cdot R_{max}$

D , мкм	10	5	1	0,5	0,2	0,1
R_{max} , мкм	0,2	0,1	0,02	0,01	0,004	0,002
R_a , мкм	0,05	0,025	0,005	0,0025	0,001	0,0005

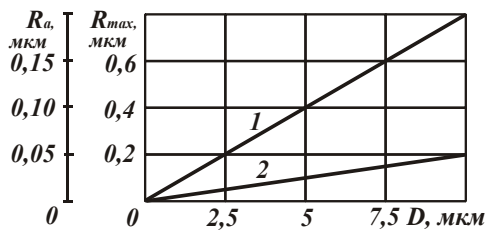


Рис. 2 – Зависимость R_{max} от D : 1 – расчет по зависимости (1); 2 – расчет по зависимости (2)

Как видно, отличие значений параметров шероховатости поверхности, приведенных в табл. 1, 2 и на рис. 2, составляет приблизительно 4 раза, что является достаточно большим для выработки научно обоснованных практических рекомендаций. В связи с этим возникает необходимость теоретического анализа отношения a_z / R , положенного в основу расчета параметров шероховатости поверхности. Для этого воспользуемся известной зависимостью проф. Зворыкина К.А. [6] для определения условного угла сдвига материала при резании (рис. 3):

$$\beta = 45^\circ + \frac{\gamma - \psi}{2}, \quad (3)$$

где γ – передний угол режущего инструмента (резца); ψ – условный угол трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента ($\text{tg} \psi = f$ – коэффициент трения).

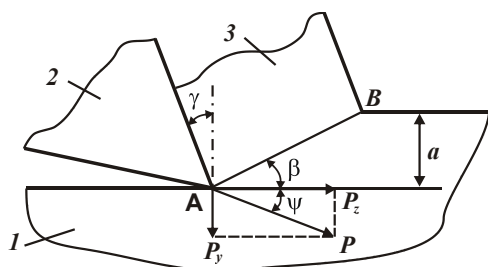


Рис. 3 – Расчетная схема процесса резания: 1 – обрабатываемый материал; 2 – резец; 3 – стружка

С физической точки зрения процесс резания (стружкообразования) осуществим при положительном угле $\beta > 0$. При условии $\beta = 0$ процесс резания (стружкообразования) неосуществим, т. к. отсутствует сдвиг обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига АВ (рис. 3). В этом случае имеет место лишь процесс упругого и пластического деформирования материала без образования стружки. Следовательно, исходя из зависимости (3), условием осуществления процесса резания является выполнение неравенства

$$\psi - \gamma > 90^\circ. \quad (4)$$

При резании лезвийным инструментом угол γ относительно небольшой (положительный или отрицательный) и, как правило, меньше угла ψ . Поэтому в данном случае в широких диапазонах изменения углов γ и ψ осуществим процесс резания, т. к. разность углов $(\psi - \gamma)$ является, во-первых, положительной величиной, а во-вторых, относительно небольшой величиной, значительно меньшей 90° .

При абразивной обработке условный передний угол режущего зерна является отрицательным (рис. 4), в результате чего зависимость (4) принимает вид:

$$\psi + \gamma > 90^\circ. \quad (5)$$

Угол γ может принимать значения, близкие к 90° . В этом случае сумма углов $(\psi + \gamma)$, очевидно,

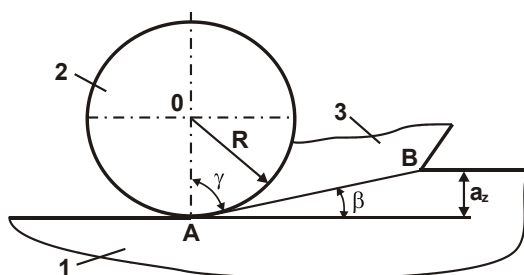


Рис. 4 – Расчетная схема микрорезания единичным зерном: 1 – обрабатываемый материал; 2 – зерно; 3 – стружка

но, будет больше 90° и процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Следовательно, для нормального протекания процесса резания необходимо уменьшить углы γ и ψ за счет исключения значительного износа и затупления режущих зерен, а также уменьшения интенсивности трения в зоне обработки путем применения абразивных материалов, характеризующихся относительно низким коэффициентом трения (алмаз, кубический нитрид бора и другие синтетические сверхтвердые материалы).

Предельное значение угла γ , при котором процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования материала, определяется из условия $\psi + \gamma = 90^\circ$, что соответствует условию

$$\operatorname{tg}(\psi + \gamma) \rightarrow \infty. \quad (6)$$

С учетом известного тригонометрического соотношения $\operatorname{tg}(\psi + \gamma) = \frac{\operatorname{tg}\psi + \operatorname{tg}\gamma}{1 - \operatorname{tg}\psi \cdot \operatorname{tg}\gamma}$, условие (6) примет вид

$$\operatorname{tg}(\psi + \gamma) = \frac{\operatorname{tg}\psi + \operatorname{tg}\gamma}{1 - \operatorname{tg}\psi \cdot \operatorname{tg}\gamma}. \quad (7)$$

Данное условие выполняется в случае, если знаменатель равен нулю, т. е.

$$(1 - \operatorname{tg}\psi \cdot \operatorname{tg}\gamma) = 0. \quad (8)$$

Выразим угол γ (при микрорезании единичным абразивным зерном) через отношение a_z / R . Для этого рассмотрим расчетную схему (рис. 5а), в которой режущее зерно представлено в форме сферы радиусом R . Предположим, что угол γ определяется длиной дуги контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом АВ. Тогда из $\triangle ABC$ следует:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{BC}{AC} = \frac{\sqrt{R^2 - (R - a_z)^2}}{a_z} \approx \sqrt{\frac{2R}{a_z}}. \quad (9)$$

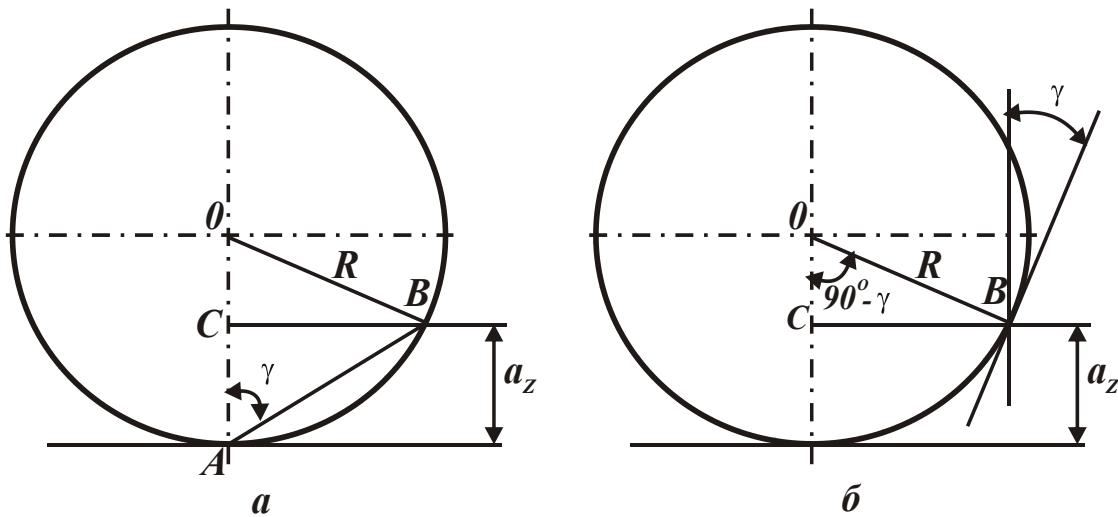


Рис. 5 – Расчетные схемы угла γ

Подставляя зависимость (9) в уравнение (8) с учетом $\operatorname{tg}\psi = f$, получено

$$\frac{a_z}{R} = 2 \cdot f^2. \quad (10)$$

Таким образом установлено, что отношение a_z / R вполне однозначно определяется коэффициентом трения f абразивного зерна с обрабатываемым материалом: чем больше f , тем больше отношение a_z / R . В табл. 3 приведены рассчитанные по зависимости (10) значения отношения a_z / R .

Как видно, при изменении коэффициента трения f в пределах 0,15 – 0,3 отношение a_z / R принимает значения 0,045 – 0,18, что приблизительно соответствует граничным значениям a_z / R , рассмотренным выше на основе экспериментальных данных профессоров Богомолова Н. И. и Крагельского И. В. Учитывая то, что коэффициент трения f абразивных зерен с обрабатываемыми материалами (сталями) изменяется, как правило, в диапазоне 0,15 – 0,3, это свидетельствует о достоверности предложенной расчетной схемы. Следовательно, разброс значений $a_z / R = 0,04 – 0,17$ обусловлен изменением коэффициента трения f в пределах 0,15 – 0,3, что вполне допустимо при проведении экспериментальных исследований.

Таблица 3

Расчетные значения отношения a_z / R

f	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
a_z / R	0,02	0,045	0,08	0,18	0,32

Необходимо отметить, что возможна и другая расчетная схема определения угла γ (рис. 5б). Здесь угол γ представляет собой угол, заключенный между вертикальной осью и линией, проведенной по касательной к окружности зерна в точке В. Исходя из ΔBOC получено:

$$ctg(90^\circ - \gamma) = \frac{R - a_z}{\sqrt{R^2 - (R - a_z)^2}} \approx \sqrt{\frac{R}{2a_z}}. \quad (11)$$

Поскольку $ctg(90^\circ - \gamma) = tg\gamma$, имеем

$$tg\gamma = \sqrt{\frac{R}{2a_z}}. \quad (12)$$

Подставляя зависимость (12) в уравнение (8) с учетом соотношения $tg\psi = f$, получено

$$\frac{a_z}{R} = 0,5 \cdot f^2. \quad (13)$$

В результате пришли к зависимости, аналогичной зависимости (10), однако с меньшим числовым множителем, равным 0,5. Следовательно, значения a_z / R , полученные на основе зависимости (13) и приведенные в табл. 1, в 4 раза меньше значений, рассчитанных по зависимости (10) и приведенных в табл. 3.

Как следует из табл. 4, значения $a_z / R = 0,045 – 0,18$ достигаются при изменении коэффициента трения f в пределах 0,3 – 0,6. Эти значения f также вполне реализуемы при микрорезании сталей абразивным зерном. Поэтому и аналитическая зависимость (13) может быть использовано для анализа закономерностей процесса микрорезания единичным зерном. Однако окончательно принять решение о том, какая из двух приведенных зависимостей – зависимость (38) или (41) наиболее объективно отражает физическую суть процесса микрорезания единичным зерном, можно лишь на основе проведения экспериментальных исследований.

Таблица 4

Расчетные значения отношения a_z / R

f	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
a_z / R	0,02	0,045	0,08	0,125	0,18

На рис. 6 приведены рассчитанные по зависимостям (10) и (13) значения a_z / R , которые дают наглядное графическое представление о характере изменения отношения a_z / R от коэффициента трения f для двух рассмотренных выше расчетных схем угла γ (рис. 5).

Таким образом, в работе теоретически обоснованы основные условия уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании.

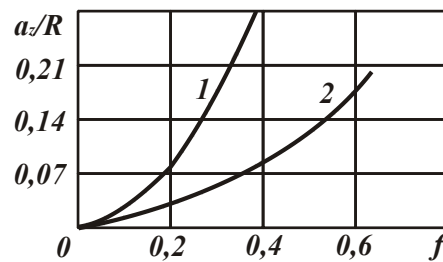


Рис. 6 – Зависимость отношения a_z/R от f : 1 – расчет по зависимости (10); 2 – расчет по зависимости (13)

Выводы

Разработана математическая модель определения шероховатости поверхности при абразивном полировании и установлены условия ее уменьшения. Они состоят в реализации предельного значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна, при котором процесс резания (стружкообразования) переходит в процесс пластического деформирования материала без отделения стружки. Установлено, что предельные значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна определяются коэффициентом трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Поэтому уменьшить шероховатость поверхности можно уменьшением коэффициентом трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Расчетами определены предельные значения параметров шероховатости поверхности, которые могут быть достигнуты при условии перехода от процесса резания к процессу пластического деформирования материала. Показано, что основное влияние на шероховатость поверхности оказывает зернистость абразива.

Список использованных источников:

1. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наукова думка, 1979. – 244 с.
2. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Хусу А.Н. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.Н. Хусу [и др.]. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ф.В. Новиков. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
6. Новиков Ф.В. Энергетический подход к оценке шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.П. Ткаченко // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2002. – № 19. – С. 142-145.

Bibliography:

1. Surface quality in diamond abrasive machining / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Chepovetskiy. – Kiev: Naukova dumka, 1979. – 244 p. (Rus.)
2. Korolev A.V. The study of the formation of the tool and workpiece surfaces with abrasive machining / A.A. Korolev. – Saratov: Publishing Saratov univesity, 1975. – 212 p. (Rus.)
3. Khusu A.N. Surface roughness (theoretical probabilistic approach) / A.N. Khusu [and others]. – Moskow: Nauka, 1975. – 344 p. (Rus.)
4. Novikov F.V. Physical and kinematic basis high diamond grinding: Author. dis. for scientific Doctoral degree. tehn. sciences: special. 05.03.01 “Machining processes, machines and tools” / F.V. Novikov. – Odessa: OSPU, 1995. – 36 p. (Rus.)
5. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting / V.F. Bobrov. – Moskow:

Mashinostroenie, 1975. – 343 p. (Rus.)

6. Novikov F.V. Energy approach to the estimation of surface roughness in diamond abrasive machining / F.V. Novikov, V.P. Tkachenko // Bulletin NTU «KPI». Collected papers. Thematic Issue: Engineering Technologies. – Kharkiv: NTU «KPI», 2002. – № 19. – P. 142-145. (Ukr.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.04.2014

УДК 621.791.052.620.18

© Самотугин С.С.¹, Гагарин В.А.²

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕННЫМ СЛОЕМ ПОСЛЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Представлены результаты исследований изменения шероховатости поверхности после плазменного упрочнения и последующего изнашивания. Проверялось влияние размещения упрочненных зон на поверхности по отношению к направлению взаимного скольжения деталей на изменение шероховатости после изнашивания.

Ключевые слова: плазменное упрочнение, дискретная обработка, микрорельеф, износостойкость.

Самотугін С.С., Гагарін В.О. Дослідження мікрорельєфу поверхні деталей з поверхневим зміцненим шаром після абразивного зношування. Представлені результати досліджень зміни шорсткості поверхні після плазмового зміцнення і подальшого зношування. Перевірявся вплив розміщення зміцнених зон на поверхні по відношенню до напрямку взаємного ковзання деталей на зміну шорсткості після зношування.

Ключові слова: плазмове зміцнення, дискретна обробка, мікрорельєф, зносостійкість.

S.S. Samotugin, V.O. Gagarin. Research of details surface micro-relief with the superficial work-hardened layer after an abrasive wear. The results of researches of surface roughness changes are presented after the plasma work-hardening and subsequent wear. Influence of placing of the work-hardened zones was checked up on surfaces in relation to direction of the mutual skidding of details on the change of roughness after a wear.

Keywords: plasma work-hardening, discrete treatment, micro-relief, wear resistance.

Постановка проблемы. Одним из наиболее перспективных направлений развития упрочняющих технологий в машиностроении является поверхностное упрочнение сталей и сплавов высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН) – лазерным лучом, электронным лучом, плазменной струей. Благодаря локальному и сверхскоростному тепловому воздействию создаются возможности получения более высоких значений твердости, прочности, вязкости разрушения в сравнении с объемной обработкой или традиционными способами поверхностного упрочнения. Это обусловлено прежде всего образованием в поверхностном слое высокодисперсной мартенситной структуры с намного более высокой плотностью дислокаций. Из способов упрочнения ВКИН более экономичным, производительным и доступным является плазменное упрочнение [1].

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gagarin_v_a@ukr.net