

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923: 621.922

В. И. Лавриненко^{1,*}, В. Ф. Молчанов^{2,}, В. Ю. Солод²,
Л. А. Проц³**

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина

²Днепропетровский государственный технический университет,
г. Каменское, Украина

³Институт электронной физики НАН Украины, г. Ужгород,
Украина

**lavrinenko@ism.kiev.ua*

***v_molchanov@ukr.net*

Влияние твердых частиц шлама на показатели шероховатости обработанной поверхности при шлифовании и оценка вероятности возникновения царапин на ней

Рассмотрены вопросы влияния твердых частиц шлама, возникающих при шлифовании, на формирование шероховатости обработанной поверхности, что отражается на показателе R_{max} . Выявлена особенность изменения соотношения параметров шероховатости R_{max}/R_a в зависимости от затратности процесса шлифования. Проведена теоретическая оценка вероятности возникновения царапин при шлифовании.

Ключевые слова: *частицы шлама, шлифование, шероховатость, царапины на поверхности при шлифовании, вероятность возникновения царапин.*

В современном машиностроении постоянно совершенствуются технологии механической обработки деталей машин с целью повышения качества и снижения себестоимости продукции. В связи с повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя обрабатываемых деталей на финишных операциях широко применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Однако в процессе эксплуатации технологические жидкости непрерывно и интенсивно загрязняются твердыми частицами металлообработки. Попадая в зону обработки вместе с СОЖ, твердые частицы шлама, обладающие абразивным действием, влияют как на процесс формирования микропрофиля обработанной поверхности деталей [1], так и на износ связующего абразивного круга [2].

© В. И. ЛАВРИНЕНКО, В. Ф. МОЛЧАНОВ, В. Ю. СОЛОД, Л. А. ПРОЦ, 2019

Наиболее распространенным и употребляемым в научной и технической литературе показателем шероховатости поверхности является показатель Ra . Однако опыт промышленной эксплуатации изделий свидетельствует о том, что для различных условий их использования необходимо контролировать не один, а несколько параметров. В данной работе рассмотрена связь между двумя основными высотными параметрами – Ra и R_{max} , и особенности формирования последнего при абразивной обработке. В [3] показано, что эта связь сводится к ряду следующих простых соотношений. Например, для поверхности спеченных и необработанных деталей она близка к виду $R_{max} \approx 4Ra$. При лезвийной обработке деталей зависимость больше отвечает виду $R_{max} \approx 6Ra$, при абразивной обработке кругами из сверхтвердых материалов (СТМ) наиболее характерной будет зависимость близкая к виду $R_{max} \approx 8Ra$. При чисто абразивной обработке, например, кругами из электрокорунда $R_{max} \approx (6-8)Ra$. Причем бóльшие значения будут характерны для чистовых методов абразивной обработки, например, при доводке керамики эта зависимость близка к виду $R_{max} \approx 10Ra$. Приведенное выше, позволило автору [3] сформулировать следующее положение: чем более грубой является поверхность, тем меньшим будет соотношение между R_{max} и Ra , а чем более совершенна поверхность после доводки, полирования или других финишных методов обработки, тем это соотношение больше. То есть, чем больше затрат идет на процесс обработки поверхности изделия, тем больше (с 4 до 10) возрастает соотношение между R_{max} и Ra .

Между тем, ряд дальнейших исследований показал, что такой вывод является неполным, поскольку отражает только первую часть указанной тенденции. Оказывается, что если необходимо получить еще более совершенную поверхность после шлифования, например, полированием с доведением значений шероховатости до 5–10 нм (т. е. затраты на процесс обработки поверхности возрастают), то коэффициент в соотношении $R_{max} = xRa$ начинает уменьшаться и возникает ситуация, когда указанная выше зависимость становится близкой к виду $R_{max} \approx 4Ra$. Продемонстрируем это на примере формирования обработанной шлифованием и полированием поверхности монокристалла тетрабората лития, нового перспективного материала для функциональной электроники, обработка которого является исключительно затратной, поскольку требует получения конечной шероховатости по параметру $Ra \approx 1$ нм [4]. После разрезания монокристалла его шлифование проводили свободным абразивом с понижением зернистости абразива, и, исходя из выше изложенного, логично предположить, что соотношение R_{max}/Ra , будет равно ~ 6 (реально – от 5,25 до 6,25). Дальнейшее полирование монокристаллов тетрабората лития проводили на смоляных полировальниках с использованием двух алмазных микропорошков АСМ зернистостью 2/1 и 1/0. Это позволяет значительно снизить показатели шероховатости поверхности монокристаллов – после использования микропорошка АСМ 1/0 Ra находится в пределах от 3,5 до 6,5 нм. Последующее использование оксида хрома при полировании позволяет снизить показатели шероховатости до требуемых значений. Анализ полированной поверхности методом атомно-силовой микроскопии показал, что у монокристалла тетрабората лития по плоскости (100) микрорельеф имеет показатели R_{max} , Rz и Ra равные 5,26, 4,82 и 1,24 нм соответственно, а соотношение R_{max}/Ra составляет 4,25. Это как раз и подтверждает то, что чем более затратным является процесс получения высококачественной поверхности, тем больше снижается соотношение R_{max}/Ra – до значения равного 4. Таким образом, имеем своеобразную “дугу шероховато-

сти” по соотношению R_{max}/Ra , когда вначале для обычной грубой исходной поверхности $R_{max}/Ra \approx 4$, далее абразивная и алмазная обработка поверхности увеличивают это соотношение до значения 6 и даже 10, а далее финишные процессы возвращают его к значению 4. В данной работе авторов больше интересовал именно процесс увеличения соотношения R_{max}/Ra с точки зрения поиска причин этого процесса.

Выше было обращено внимание на то, что при эксплуатации СОЖ на операциях шлифования в жидкости постепенно накапливаются твердые частицы, которые могут иметь существенное влияние на формирование неровностей профиля поверхности, царапая поверхность (рис. 1) и, соответственно, увеличивая параметр R_{max} .

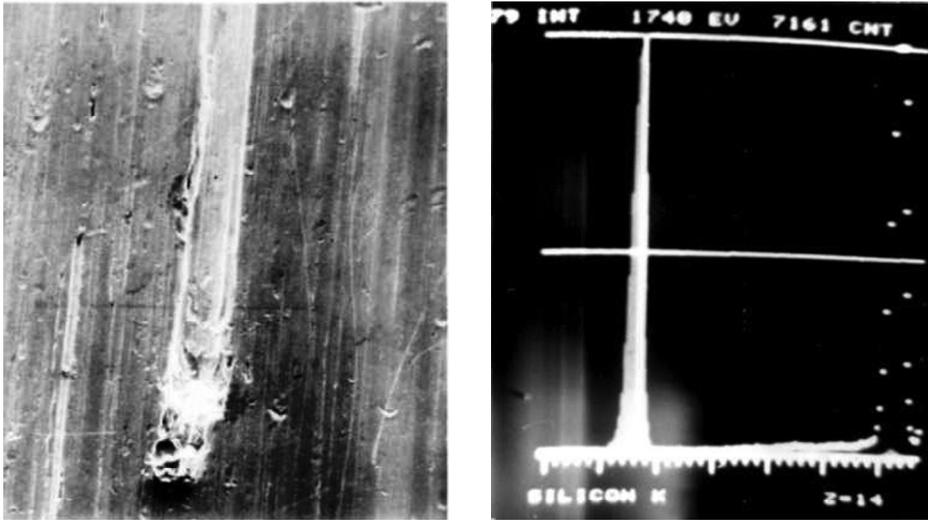


Рис. 1. Поверхность, обработанная кругами из карбида кремния, с твердой частицей шлама, оставляющей царапину.

Твердые абразивные частицы, содержащиеся в СОЖ, попадая в зону обработки детали (рис. 2), вызывают дополнительные царапины на поверхности, искажая закон распределения ординат микронеровностей поверхности. Поэтому имеет место суперпозиция двух законов распределения: закона распределения ординат микронеровностей поверхности при отсутствии твердых частиц в СОЖ и закона распределения дополнительных царапин, оставляемых абразивными твердыми частицами, содержащимися в СОЖ. Согласно теории вероятности [5] плотность распределения $f(x)$ суперпозиции двух распределений определяется интегралом

$$f(x) = \int_0^x f_1(x) f_2(x-y) dx,$$

где f_1 и f_2 – плотности распределения каждого из слагаемых случайной суперпозиционной величины.

Сложность задачи заключается в выборе законов и параметров распределения данных слагаемых для получения закона распределения ординат микронеровностей поверхностей шлифования. Для независимых случайных величин справедливы следующие равенства [5]:

$$M(x+y) = M(x) + M(y);$$

$$D(x+y) = D(x) + D(y),$$

где M – математическое ожидание случайной величины; D – дисперсия случайной величины.

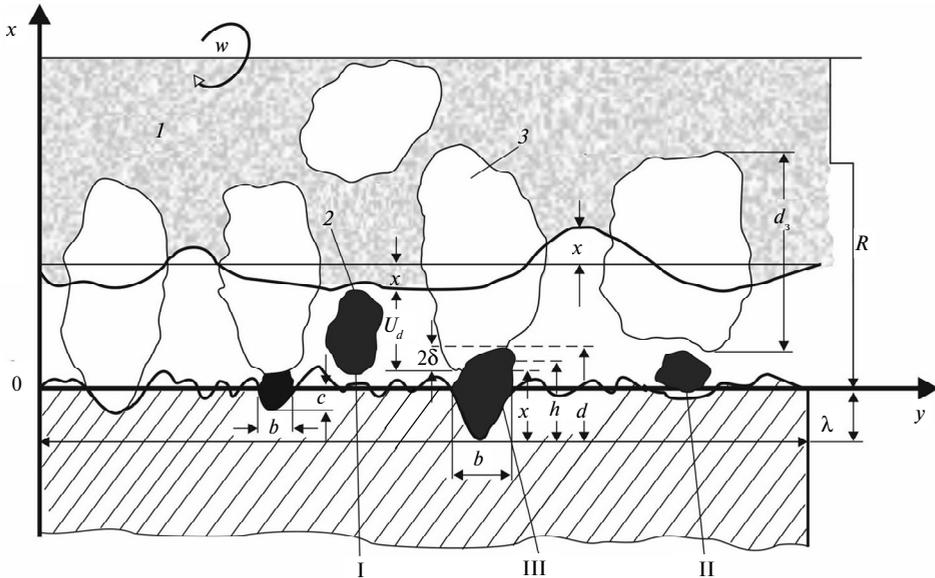


Рис. 2. Схема механизма воздействия твердых частиц различного (I, II, III) размера на поверхностный слой: 1 – связка; 2 – твердая частица; 3 – абразивное зерно.

При шлифовании деталей с очищенной СОЖ формируются микронеровности поверхностного слоя со своими числовыми характеристиками. Если жидкость загрязнена твердыми частицами, то при шлифовании на поверхностном слое появляются дополнительные царапины от заклинившихся абразивных частиц. Для определения значений вероятности заклинивания твердых частиц P_3 в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали воспользуемся методами теории вероятности. Для определения вероятности события, когда частица, попавшая вместе с жидкостью в зону контакта, оставляет след-царапину на поверхностном слое, следует принять во внимание, что возможны три взаимные расположения твердой частицы в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали (см. рис. 2):

I. Размеры частицы достаточно большие, однако, существенно меньше расстояния между поверхностью связки и поверхностью детали; потоком СОЖ такая частица по каналам между абразивными зернами выносится из зоны контакта. При этом не исключается вероятность в последующем заклинивания частицы при контакте шлифовального круга и поверхности детали.

II. Размеры твердой частицы меньше расстояния между выступающими на поверхности шлифовального круга абразивными зернами и поверхностью детали: частица не оставляет следа воздействия на поверхностном слое детали.

III. Размеры твердой частицы равны или несколько превышают расстояние от поверхности детали до выступов на поверхности шлифовального круга. В этом случае частицу заклинивает между поверхностью шлифовального

круга и деталью и она оставляет след на поверхностном слое детали и на связке.

Оценим вероятность заклинивания частицы при шлифовании с применением СОЖ, содержащей твердые частицы.

Вероятность такого события выражается интегралом [5]

$$P_3 = \int_0^{d_{\max}} P_h dh,$$

где P_h – вероятность заклинивания частицы размером h ; d_{\max} – максимальный размер частицы.

Интеграл берется по всем возможным размерам частиц, находящихся в СОЖ, т. е. от 0 до d_{\max} .

Чтобы произошло событие – заклинивание частицы размером h , должны одновременно произойти два случайных явления:

– диаметр частицы должен быть близок к h , приближаясь сверху $h < d < h + \delta$;

– расстояние между выступающими вершинами абразивных зерен шлифовального круга и поверхностью детали также должно быть близким к h , приближаясь к нему снизу $h - \delta < x < h$.

Вероятность попадания твердой частицы размером d в интервал $h < d < h + \delta$, при контакте шлифовального круга с поверхностью детали, оценивается интегралом [5]:

$$P_1(h, h + \delta) = \int_h^{h+\delta} f(d) dd,$$

где $f(d)$ – вероятность распределения размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ.

Вероятность того, что случайный размер твердой частицы примет значение x в интервале $h - \delta < x < h$, оценивается интегралом

$$P_2(h - \delta, h) = \int_{h-\delta}^h f(x) dx,$$

где $f(x)$ – вероятность распределения положений вершин абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Тогда вероятность заклинивания частицы размером h оценивается произведением вероятностей P_1 и P_2 :

$$P_h = P_1(h, h + \delta) P_2(h - \delta, h) = \int_h^{h+\delta} f(d) dd \int_{h-\delta}^h f(x) dx.$$

Плотность вероятности распределения положений вершин абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга описывается следующей зависимостью [6]:

$$f(x) = \int_{d_3 \min}^{d_3 \max} f(U_d) f(d_3) dd_3 \int_{-(d_3-x)}^x f(x_c) dx_c, \quad (1)$$

где d_3 – текущий размер абразивного зерна, причем над связкой круга выступают зерна размером от $d_3 \min$ до $d_3 \max$; $f(d_3)$ – плотность распределения диа-

метральных размеров абразивных зерен; U_d – выступание зерна размером d_3 над связкой; $f(U_d)$ – плотность вероятности U_d ; $f(x_c)$ – плотность вероятности распределения ординат неровностей связки относительно ее среднего уровня.

Плотность вероятности распределения диаметральных размеров проекций абразивных зерен подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием d_0 и средним квадратичным отклонением σ_d [7]:

$$f(d_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(d_3 - d_0)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (2)$$

Так как каждое абразивное зерно, независимо от другого, может выступать над связкой на различную величину U_d на отрезке $[\varepsilon d_{3\max}, d_{3\max}]$ с равной вероятностью, то плотность распределения случайной величины $f(U_d)$ на этом отрезке постоянна, а вне отрезка равна нулю:

$$f(U_d) = \begin{cases} 0, & \text{при } U_d < \varepsilon d_{3\max}; \\ \frac{1}{d_{3\max}(1-\varepsilon)}, & \text{при } \varepsilon d_{3\max} \leq U_d \leq d_{3\max}; \\ 0, & \text{при } U_d > d_{3\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где ε – относительная величина критической заделки зерна в связке круга, равная 0,5–0,7. Распределение ординат неровностей связки инструмента согласно центральной предельной теореме теории вероятностей должно также приближаться к нормальному [5]:

$$f(x_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{x_c^2}{2\sigma_c^2}\right], \quad (4)$$

где x_c – среднее расстояние от поверхности связки; σ_c – среднее квадратичное отклонение ординат неровностей связки.

Подставляя выражения (2), (3) и (4) в (1) получим

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_d} \int_{d_{3\min}}^{d_{3\max}} \frac{1}{d_{3\max}(1-\varepsilon)} \exp\left[-\frac{(d_3 - d_0)^2}{2\sigma_d^2}\right] dd_3 \int_{-(d_3-x)}^x \exp\left[-\frac{x_c^2}{2\sigma_c^2}\right] dx_c.$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\sigma_c} = U, & \quad \text{откуда следует} \quad x_c = \sigma_c U; \quad dx_c = \sigma_c dU; \\ \frac{d_3 - d_0}{\sigma_d} = t, & \quad \text{откуда следует} \quad d_3 = \sigma_d t + d_0; \quad dd_3 = \sigma_d dt. \end{aligned} \quad (5)$$

После соответствующих подстановок и преобразований, с учетом введенных обозначений (5), получим

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_d} \int_{\frac{d_3}{\sigma_d} t + \frac{d_0}{\sigma_d}}^{\infty} \frac{e^{-\frac{t^2}{2}}}{\sigma_d} dt \int_{\frac{\sigma_c}{d_0}(1+\frac{\sigma_d}{d_0}-\frac{x}{d_0})}^{\frac{x}{\sigma_c}} e^{-\frac{U^2}{2}} dU. \quad (6)$$

Плотность вероятности распределения размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ при шлифовании, удовлетворяет логарифмически нормальному распределению:

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - m)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где d – максимальный размер сечения твердой частицы; m и σ – параметры логарифмически нормального распределения.

Подставляя выражение для вероятности заклинивания частицы размером h в формулу (6), получим вероятность заклинивания твердых частиц в зоне контакта шлифовального круга и детали:

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{8\pi^3}\sigma\sigma_d} \int_0^{d_{\max}} \left\{ \int_h^{h+\sigma} \frac{1}{d} \exp\left[-\frac{(\ln d - m)^2}{2\sigma^2}\right] dd \times \right. \\ \left. \times \int_{h-d}^h \left[\int_{\frac{d_3}{\sigma_d}t + \frac{d_0}{\sigma_d}}^{\infty} \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \int_{\frac{\sigma_c}{d_0}\left(1 + \frac{\sigma_d}{d_0} - \frac{x}{d_0}\right)}^{\frac{x}{\sigma_c}} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU \right] dx \right\} dh, \quad (7)$$

где 2σ – длина интервала размеров твердых частиц, на котором происходит заклинивание.

Расчеты по формуле (7) естественно сталкиваются с трудностями реального наличия данных для расчетов, например, реальных размеров h частиц, максимального размера d сечения твердой частицы, вероятности распределения размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ ($f(d)$), и указанного выше значения 2σ . Это требует отдельного исследования, а в данной статье авторы сделали попытку получить такие данные только для условий обработки керамик, шлам которых имеет достаточную абразивную способность.

Керамика широко применяется в промышленности как в виде конструкционных материалов, так и инструментальных, что делает актуальным изучение вопросов их эффективной обработки. В связи с высокой твердостью такая керамика обрабатывается исключительно алмазными кругами. Инструментальные керамические материалы разделяются на четыре основные группы: оксидную (марки ВО13, ВО16) – содержит более 90 % оксида алюминия и для повышения прочности легируется оксидами циркония и магния; оксидно-карбидную (марки ВОК60, ВОК71) – содержит наравне с оксидом алюминия до 20–40 % карбида титана; нитридную (на основе Si_3N_4), например, керамика марки Силинит; карбидную (на основе карбидов бора, кремния и т. п.).

В данной работе рассмотрены особенности алмазного шлифования указанных выше керамик, причем основное внимание уделялось особенностям шлама, возникающего при их шлифовании, его форме и размерам, а также компактированию, т. е. аспекту возможного абразивного воздействия шлама как на связку алмазного круга (в том числе пакетированию шлама на ней), так и на обработанную поверхность. Такому воздействию шлама исследователями в последнее время уделяется много внимания, особенно в условиях высокопроизводительной обработки [2].

Образцы керамик размерами 6×12 мм и 8×12 мм шлифовали на модернизированном универсально-заточном станке мод. ЗВ642. Для экспериментов использовали указанные выше керамики, а также для сравнения безвольфрамовый (КНТ16) и вольфрамокобальтовый (ВКЗМ) твердые сплавы. Образцы обрабатывали кругом 12А2-45° 150×10×3×32 АС4 160/125 В1-13 100 при скорости вращения круга 15 м/с, продольной подаче 0,5 м/мин и поперечной подаче 0,25 мм/дв. ход. В качестве охлаждающей жидкости использовали водный раствор солей азотнокислого (1,0 % (по массе)) и азотистокислого (0,2 % (по массе)) натрия. Силы резания измеряли с помощью универсального динамометра УДМ 100. Определяли составляющие силы резания P_z и P_y , коэффициент абразивного резания $fa = P_z/P_y$ и удельную работу шлифования $A_{уд}$, равную отношению мощности шлифования к производительности обработки. Шлам, образовавшийся при шлифовании, высушивали и далее анализировали на гранулометре СІLAS мод. 715 Е482 (Франция).

В процессе шлифования керамик возникает шлам, частички которого представлены для разных керамик на рис. 3. Исследованиями с помощью гранулометра “СІLAS” было установлено, что размеры частичек шлама распределяются следующим образом (табл. 1): основная масса шлама состоит из мелких (от 1 до 3 мкм) частиц (см. рис. 3, в) и из более крупных частиц, размеры которых изменяются для разных исходных материалов от 32–48 до 96–128 мкм (см. табл. 1). Это говорит о том, что мелкий шлам, образующийся при шлифовании, проходя путь от образования до повторного поступления в зону шлифования вместе с охлаждающей жидкостью, преобразовывается и часть его может компактироваться в значительно более крупные частицы (см. рис. 3, а, б, г).

Таблица 1. Геометрические размеры частиц шлама, использующегося как основа для различных абразивов

Материал частиц шлама	Доля, %, частиц шлама в размерных диапазонах, мкм*						
	до 1,0	1–1,5	1,5–2,0	2–3	32–48	64–96	96–128
Шлам не компактируется							
Si ₃ N ₄ +B ₄ C	58,2	19,3	3,1	16,6	–	2,3	–
Шлам компактируется в меньших диапазонах размеров частиц							
Al ₂ O ₃ +TiC (ВОК60)	15,8	3,2	8,0	–	26,9	29,2	16,1
Al ₂ O ₃ +TiC (ВОК71)	5,1	1,3	3,7	2,3	39,8	30,5	16,9
Шлам компактируется в больших диапазонах размеров частиц							
Si ₃ N ₄ (силинит)	5,0	0,9	1,8	3,4	15,9	14,6	57,3
WC–Co (ВКЗМ)	3,7	1,1	2,5	2,1	13,0	13,0	64,1
Al ₂ O ₃ (ВО13)	3,1	0,5	0,8	1,2	13,1	8,6	71,9
TiC–Ni (КНТ16)	1,3	0,4	1,0	1,2	13,0	10,0	72,4

*Доля частичек шлама в диапазоне размеров частиц 3–32 мкм находилась для всех материалов в малом количестве (0,4–1,1 %), поэтому в таблице эти диапазоны не представлены.

Анализ данных табл. 1 по распределению частиц шлама по размерам показывает, что шлам состоит из частиц разной зернистости. Причем встречаются достаточно крупные частички шлама, которые являются как продуктом сколов, так и следствием компактирования. При обработке твердых сплавов, чисто нитридных или оксидных керамик, образуются преимущественно час-

тицы шлама от 32 до 128 мкм, причем со смещением в сторону большего диапазона – 96–128 мкм. Для смешанных оксидно-карбидных керамик размер частиц шлама также преимущественно находится в этом же диапазоне, но пик зернистости компактов смещается в сторону меньших диапазонов. Интерес представляет шлам смешанных нитридно-карбидных керамик ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$), который фактически не компактируется. Таким образом, из табл. 1 следует, что шлам разных керамик существенно различается и можно определить реальные и максимальные размеры частиц шлама, их распределение по размерам и интервалам размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ.

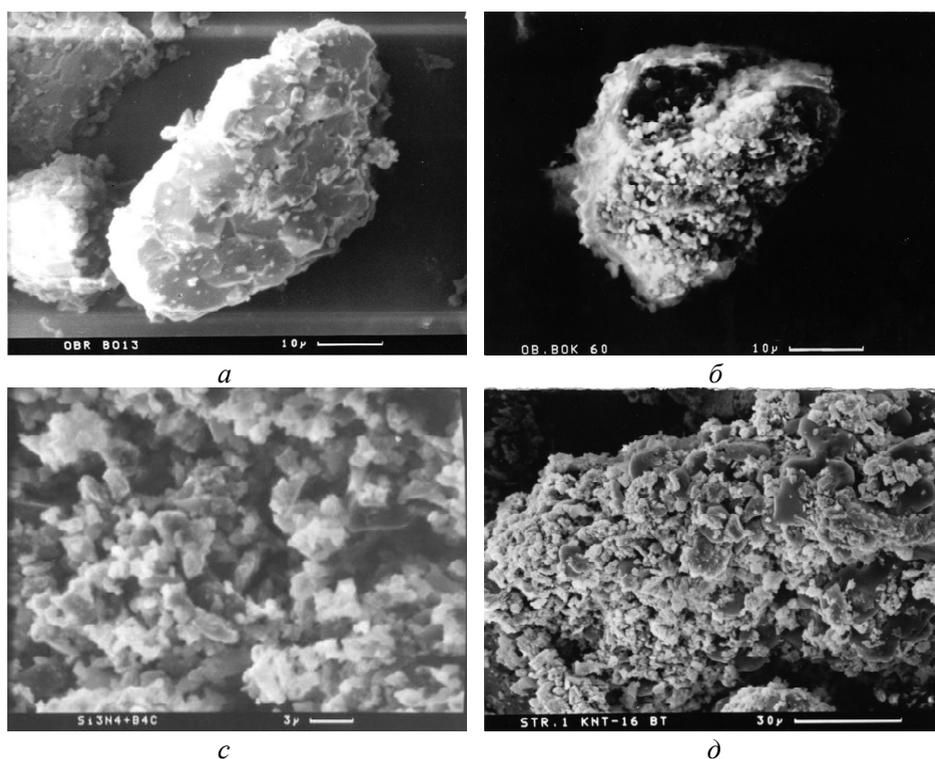


Рис. 3. Частички шлама, образующегося при шлифовании: компактированные, керамика В013 (а) и ВОК60 (б); дисперсные, керамика $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$ (в); компактированные, твердый сплав КНТ16 (г).

Известно [8], что износ алмазных кругов при шлифовании керамик преимущественно определяется абразивным воздействием шлама на связку круга. Возможное поступление в зону обработки достаточно больших частиц компактированного шлама, доставляемого СОЖ, активизирует абразивное воздействие на связку, а это увеличивает ее износ и повышает выступание зерен. Как следствие, это должно привести к увеличению коэффициента абразивного резания [9] и удельной работы шлифования. Для подтверждения этого авторами были исследованы силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик (табл. 2). Сравнивали нитридную керамику на основе Si_3N_4 и смешанную керамику $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$. Эти керамики кардинально отличаются преобладающими диапазонами частиц шлама (см. табл. 1).

Из сравнения данных табл. 2 следует, что в процессе алмазного шлифования керамики на основе карбида бора развиваются значительно большие уси-

лия резания, причем превалирует нормальная составляющая усилия резания. А это означает, что выступание зерен здесь меньше, коэффициент абразивного резания мал. По мнению авторов, не в последнюю очередь здесь играет роль именно размер шлама, попадающего в зону резания.

Таблица 2. Силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик

Керамика	Превалирующий диапазон частиц шлама (см. табл. 1), мкм	Силовые показатели процесса шлифования			
		P_z , Н	P_y , Н	$A_{уд}$, Вт/мм ³	fa
Силинит Si_3N_4	96–128 (компактированные)	17,6	88	0,67	0,20
$Si_3N_4 + B_4C$	до 1,0	9	234	0,25	0,04

В связи с изложенным выше, были изучены геометрические особенности компактированных частиц шлама – углы заострения и радиусы закругления (табл. 3). Анализ всей совокупности данных показывает, что значение измеренных величин для керамики $Si_3N_4 + B_4C$ больше, чем для других материалов. Можно предположить, что именно из-за этого шлам смешанной керамики $Si_3N_4 + B_4C$ плохо компактируется, поэтому у шлама такой керамики и наблюдается сниженное абразивное воздействие на связку круга, на что было указано при анализе табл. 2.

Таблица 3. Геометрические особенности частиц шлама для различной основы исследованных обрабатываемых материалов

Материал частиц шлама	Угол заострения зерна, град	Радиус закругления зерна, мкм	Зернистость исследованных компактированных зерен
Шлам керамик			
Al_2O_3 (ВО13)	125,4±5,1	6,2±0,30	32–64
$Al_2O_3 + TiC$ (ВОК60)	117,8±8,1	5,1±0,29	32–48
$Al_2O_3 + TiC$ (ВОК71)	105,3±4,7	6,3±0,40	48–64
Si_3N_4 (Силинит)	104,7±4,4	6,8±0,34	64–96
$Si_3N_4 + B_4C$	129,2±9,2	35,6±4,8	64–96
Шлам твердых сплавов			
TiC (КНТ16)	115±8,7	10,3±0,52	96–128
WC (ВКЗМ)	103±4,1	7,7±0,40	64–96

Компактированный шлам, попадая в зону обработки, может быть причиной образования царапин на обработанной поверхности. У керамик $Si_3N_4 + B_4C$ вероятность возникновения таких царапин, в силу изложенного выше, должна быть наименьшей, т. е. при их обработке соотношение параметров шероховатости R_{max}/Ra будет меньшим, чем у других керамик.

Покажем это на примере формирования показателей шероховатости при обработке изделий типа “шар”, полученных из различных керамик (рис. 4) [10]. Для керамик B_4C , которые были изучены авторами, соотношение $R_{max}/Ra = 7$. Для других керамик, представленных на рис. 4, как это и было

ожидаемо из высказанного выше предположения, это отношение выше: для ZrO_2 – 11, для B_4C (производства ФРГ) – 10, для SiC – 8. А это означает, что при обработке изделий типа “шар” из таких керамик нужно будет при их окончательной доводке затратить значительно больше времени на то, чтобы достичь необходимого для получения качественного изделия соотношения $R_{max}/Ra = 4$, когда вероятность царапин на обработанной поверхности будет сведена к минимуму.

ВЫВОДЫ

Для того чтобы избежать повреждений поверхности царапинами при обработке следует учитывать особенности формирования частиц шлама и, в первую очередь, диапазоны зернистостей компактированных частиц шлама. Опосредованно об увеличенном компактообразовании можно судить по повышенному значению отношения R_{max}/Ra . В свою очередь компактированные частицы шлама более активно воздействуют на связку шлифовального круга и значения коэффициента абразивного резания возрастают. Поэтому малые значения коэффициента абразивного резания свидетельствует о том, что шлам остается мелкодисперсным и его компактирования не наблюдается, а значит и вероятность получения царапин на обработанной поверхности минимальна.

Розглянуто питання впливу твердих частинок шламу, які виникають при шліфуванні, на формування шорсткості обробленої поверхні, що позначається на показнику шорсткості R_{max} . Показано особливості змінення відношення параметрів шорсткості R_{max}/Ra в залежності від витратності процесу шліфування. Проведено теоретичну оцінку ймовірності виникнення подряпин при шліфуванні.

Ключові слова: частинки шламу, шліфування, шорсткість, подряпини на поверхні при шліфуванні, ймовірність виникнення подряпин.

The question of the influence of the solid particles of the sludge arising during grinding on the formation of the roughness of the treated surface are considered, which is reflected in the R_{max} index. A feature of the change in the ratio of roughness parameters R_{max}/Ra is shown depending on the cost of the grinding process. A theoretical estimate was made of the probability of scratching during grinding.

Keywords: sludge particles, polishing, roughness, scratches on the surface during grinding, chance of scratching.

1. Степанов М., Шумакова Н. Влияние механических примесей, содержащихся в СОЖ, на структуру и микротвердость поверхностного слоя шлифованных деталей. *Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессе абразивной обработки*. Ульяновск, 1988. С. 78–84.
2. Грызлов А.С. Механизм проникновения шлама в пространство между зернами и в поры круга. *Научные исследования в области технических наук: Сб. науч. тр. по итогам Межд. науч.-практ. конф.* Саратов, 2018. № 3. С. 68–72.

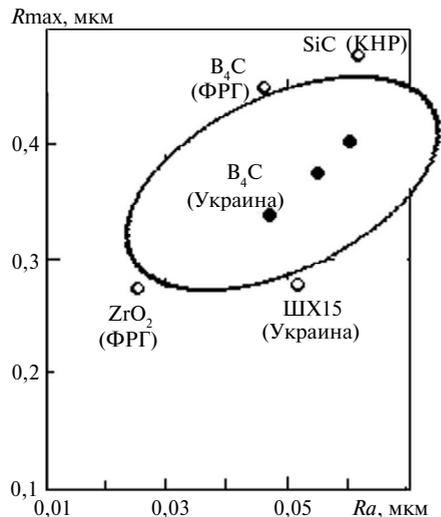


Рис. 4. Показатели шероховатости поверхности изделия типа “шар” из различных керамик.

3. Лавриненко В.И. Шероховатость обработанной поверхности: закономерности формирования и взаимосвязь ее параметров при обработке инструментом из СТМ. *Сверхтв. материалы*. 2003. № 2. С. 58–67.
4. Лавріненко В.І., Проц Л.А. Вплив кристалографічної орієнтації монокристалів парателуриту та тетраборату літію, отриманих методом витягування з розплаву, на мікрорельєф поверхонь при механічній обробці. *Сверхтв. материалы*. 2005. № 2. С. 52–59.
5. Румишский Л.З. Элементы теории вероятностей. Москва: Наука, 1976. 240 с.
6. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов, 1987. 160 с.
7. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов, 1975. 191 с.
8. Лавриненко В.И., Солод В.Ю. Процес абразивної обробки як фрикційна взаємодія різнородних матеріалів. *Сверхтв. материалы*. 2018. № 2. С. 82–88.
9. Лавриненко В.И. Коэффициент абразивного резания как характеристика, отражающая эксплуатационные показатели процесса шлифования кругами из сверхтвердых материалов. *Сверхтв. материалы*. 2016. № 1. С. 52–60.
10. Шепелев А.А., Пасичный О.О., Лавриненко В.И. Прецизионная алмазная обработка керамических шаров: показатели качества. *Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Матер. Межд. науч.-техн. конф. 4–6 июля 2001 г.* Киев: ИСМ НАН Украины, 2001. С. 178–179.

Поступила в редакцию 26.04.18

После доработки 11.06.18

Принята к публикации 12.06.18