

---

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ

---

УДК 620.191.

**ИНТЕНСИВНОСТЬ ШАРЖИРОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА  
ПРОДУКТАМИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ  
ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

© 2025 г. В. А. Носенко<sup>1, \*</sup>, Н. Д. Сердюков<sup>1</sup>,  
С. П. Кузнецов<sup>1</sup>, В. О. Харламов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный технический университет», Волжский, Россия

<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия  
\*e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.05.2024 г.

После доработки 14.10.2024 г.

Принята к публикации 20.10.2024 г.

На основе обработки цифрового изображения шлифованной поверхности в обратно-рассеянных электронах и результатов рентгеноспектрального микроанализа разработана методика определения интенсивности шаржирования титанового сплава продуктами износа абразивного инструмента из карбида кремния. Определены численные значения показателей интенсивности шаржирования и законы их распределения. Установлено влияние радиальной подачи на интенсивность шаржирования.

*Ключевые слова:* обратно рассеянные электроны, рентгеноспектральный микроанализ, титановый сплав, карбид кремния, шлифование, показатели шаржирования

**DOI:** 10.31857/S0235711925010139, **EDN:** EPMIKC

В современном машиностроении титан и его сплавы применяют в наиболее наукоемких отраслях: авиа- и двигателестроение, ракетное, космическое, химическое машиностроения и др. Изделия работают при высоких температурах и в агрессивных средах, подвергаются воздействию знакопеременных нагрузок [1]. При изготовлении изделий из титановых сплавов на заключительных операциях абразивной обработки особое внимание уделяют качеству обработанной поверхности. Основной причиной плохой обрабатываемости титановых сплавов являются адгезионная активность к абразивному материалу и низкая теплопроводность металла, что обуславливает высокие силу и температуру резания, износ абразивного инструмента и низкую производительность процесса [2, 3].

Для повышения эффективности шлифования титана используют абразивные инструменты, специальные СОЖ и режимы обработки, снижающие интенсивность адгезионного взаимодействия. Наибольшее распространение при шлифовании титана получил инструмент из карбида кремния. Основными преимуществами инструмента являются относительно низкая адгезионная активность карбида кремния к титану и способность к самозатачиваемости, что ГОСТ 21445 определяет, как «свойство абразивного инструмента сохранять работоспособное состояние вследствие образования новых выступов и режущих кромок у абразивных зерен при абразивной обработке». Способность абразивного инструмента к самозатачиваемости оценивают

коэффициентом самозатачивания  $K = K_p/K_w$ , где  $K_p$  — коэффициент разрушения;  $K_w$  — коэффициент истирания [4]. Авторами разработана усовершенствованная аналитическая модель износа абразивного инструмента, что способствует более глубокому пониманию процесса.

Самозатачиваемость положительно сказывается на показателях шлифования: снижаются сила и температура резания, возрастает производительность обработки [5]. Тем не менее, самозатачиваемость имеет и отрицательную сторону. Сколовшиеся фрагменты абразивных зерен способны внедряться в обрабатываемую поверхность. В наибольшей степени внедрение абразивных зерен в обрабатываемую поверхность (шаржирование) исследовано на операциях ленточного шлифования, пневмо- и гидроабразивной обработки [6, 7]. Шаржирование обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструментов, в связи с высокой адгезионной активностью металла, наблюдается при шлифовании титановых сплавов [8].

Необходимо отметить, что шаржирование снижает усталостную прочность изделия и вносит непредсказуемость в показатели надежности. Например, приводит к снижению сопротивления усталостному разрушению под влиянием высоких температур [9]. Наличие шаржирующих абразивных частиц в парах трения в несколько раз снижает срок эксплуатации изделия [10].

Для удаления шаржированных в обработанную поверхность абразивных зерен вводят дополнительные финишные операции: галтовка, электрополировка, травление и анодирование [11–13]. При шлифовании необходимо учитывать особенности шаржирования, в частности, продукты износа абразивного инструмента можно полностью вдавить в обработанную поверхность. На последующих проходах в результате контакта вершин зерен шлифовального круга с шаржированными возможно их дробление и внедрение в обработанную поверхность измельченных кристаллов. Не всегда есть возможность использовать финишные операции для удаления шаржированных продуктов износа. В связи с этим управление интенсивностью шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании является актуальной задачей.

Перенос продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность, в том числе, в результате диффузии и химических реакций определяют методом рентгеноспектрального микроанализа. Количественную оценку интенсивности переноса дают по приросту на обработанной поверхности химических элементов, входящих в состав абразивного материала [8]. К сожалению, данным способом проблематично контролировать шаржирование продуктов износа абразивных инструментов из сверхтвердых материалов (алмаз, кубический нитрида бора), что обусловлено высоким процентом ошибки при измерении малых концентраций легких химических элементов (углерод, азот, бор).

Для определения интенсивности шаржирования при шлифовании инструментом из сверхтвердых материалов разработан способ, основанный на получении и обработке полутонового цифрового изображения шлифованной поверхности в обратно-рассеянных электронах [14]. С целью автоматизации расчета показателей интенсивности шаржирования, полутоновое изображение шлифованной поверхности, преобразуют в бинарное.

Научный и практический интерес представляет использование данного метода при шлифовании титана и его сплавов абразивными материалами из карбида кремния. Атомный номер титана более чем в два раза превосходит средний атомный номер химических элементов молекулы карбида кремния. Поэтому, следует ожидать существенного различия в уровнях яркости данных объектов, что повышает достоверность выделения продуктов износа абразивных инструментов из карбида кремния на поверхности титана.

**Цель статьи** — определение интенсивности шаржирования поверхности титанового сплава продуктами износа абразивного инструмента из карбида кремния при шлифовании на основе анализа изображений обработанной поверхности в обратно рассеянных электронах.

**Методика исследований.** Изображения шлифованной поверхности и данные об элементном составе получены на двухлучевом растровом электронном микроскопе Versa 3D LoVac. Рентгеноспектральные исследования проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток зонда 4 нА, диаметр сканирующего пучка электронов 50 нм. Погрешность химического состава в анализируемых точках обработанной поверхности определена на основании данных об ошибке, рассчитанных ПО микроскопа Versa 3D LoVac. Оценку интенсивности шаржирования осуществляли по фотографиям шлифованной поверхности в обратно рассеянных электронах [14] при базовом увеличении 500 крат. Площадь регистрируемого объекта шаржирования при таком увеличении должна быть не менее  $0.3 \text{ мкм}^2$ , что почти в 150 раз превышает площадь пучка электронов сканирования.

Показателями интенсивности шаржирования являются средние значения приведенных к единице обработанной поверхности площади  $Sr$  ( $\text{мкм}^2/\text{мм}^2$ ) и количества  $Nr$  ( $\text{мм}^{-2}$ ) шаржированных объектов. Третий параметр — средняя площадь объекта, шаржированного в обработанную поверхность  $Sg$  ( $\text{мкм}^2$ ), получен в результате деления средних значений относительных параметров  $Sr/Nr$ .

Шлифование выполняли на прецизионном профилешлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III [15]. В качестве абразивного инструмента использовали круг из карбида кремния 1A1350×20×127 54CF100G10V. С целью исключения влияния легирующих элементов, входящих в состав титановых сплавов на результаты микрорентгеноспектральных анализов образцы для проведения испытаний изготовлены из титанового сплава BT1–0, содержание титана 99.58–99.90% (ГОСТ 19807–91). Режим плоского врезного шлифования: скорость шлифования — 30 м/с, скорость продольной подачи стола станка — 12 м/мин, радиальная подача абразивного инструмента (подача на глубину шлифования) — 0.005 и 0.010 мм/х, припуск — 0.5 мм. Для охлаждения использовали смазочно-охлаждающую жидкость Castrol 9952.

**Результаты.** Морфология обработанной поверхности (рис. 1) свидетельствует об адгезионном взаимодействии титана с абразивным инструментом. Поверхность титана покрыта налипами, перенесенными с вершин абразивных зерен, и продуктами износа абразивного инструмента. В меньшей степени перенос продуктов износа абразивного инструмента наблюдается при шлифовании с радиальной подачей 0.005 мм/х (рис. 1а). Наиболее развитая морфология обработанной поверхности и заметно большее количество продуктов износа абразивного инструмента, шаржированных в поверхность металла, наблюдаются при шлифовании с подачей 0.010 мм/х (рис. 1б). Одним из факторов, влияющим на интенсивность шаржирования, является износ абразивного инструмента. При одинаковой наработке радиальный износ абразивного инструмента с подачей 0.010 мм/х в несколько раз больше, чем с подачей 0.005 мм/х.

Химический состав материала определяли в точках 1–3 (рис. 2а), базовое увеличение 8000 крат. Установлено, что в точке 1 содержится около 62% атомных долей кремния Si и 36% атомных долей углерода C (рис. 2б), в точке 2, соответственно, 57% и 42% (рис. 2в). В точке 3 атомные доли кремния и углерода, с учетом доверительного интервала на средние арифметические значения, практически одинаковы (рис. 3г).

Химическая формула карбида кремния SiC содержит равные атомные доли Si и C. Данному условию соответствуют концентрации Si и C в точке 3, (рис. 3г), что позволяет считать внедренный объект в области данной точки карбидом кремния. В точках 1 и 2 концентрация C, соответственно, в 1.7 и 1.3 раза больше концентрации кремния. Суммарная концентрация атомов углерода и кремния приближаются к 100%.

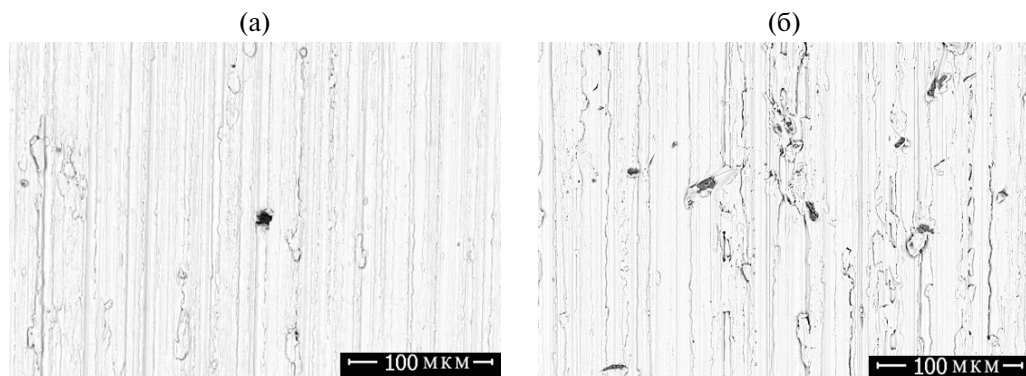


Рис. 1. Морфология обработанной поверхности при шлифовании на различных подачах: (а) — 0.005 мм/х; (б) — 0.010 мм/х.

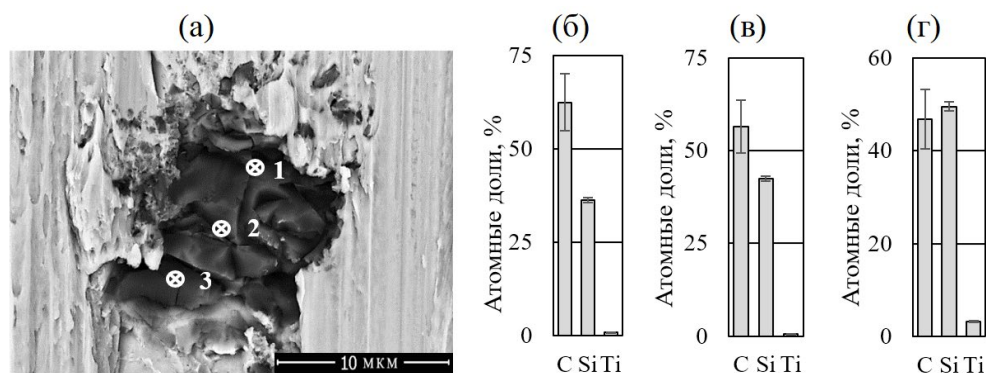


Рис. 2. Объект внедрения (а) и химический состав материала в области точек 1 (б), 2 (в) и 3 (г).

Возможные причины различия концентраций при элементном анализе кристаллов карбида кремния приведены в работе [16]. В связи с отсутствием строгой геометрии зерен интенсивность характеристического рентгеновского излучения атомами исследуемого материала может быть различной, что отражается на результатах рентгеноспектрального микроанализа. Во всех рассмотренных микрообъемах обнаружен титан, концентрация которого изменяется в интервале 1–3%. В процессе скалывания кристалла и шаржирования его в обработанную поверхность возможен перенос титана на поверхность абразивного материала. Наличие титана может быть обусловлено относительно небольшим размером кристалла и возможностью генерацией рентгеновского излучения титана на границе абразив–металл.

На рис. 3а показаны фрагменты продуктов износа при базовом увеличении 4000 крат. На поверхности металла, кроме нескольких относительно крупных продуктов износа абразивного инструмента, присутствует большое количество очень мелких объектов размером менее 0.5 мкм. Химический анализ материала определяли на поверхности наиболее крупных фрагментов продуктов износа абразивного инструмента, выделенных цифрами 4, 5 и 6. В отличие от ранее приведенных результатов в материале данных объектов концентрация Si в 1.3–2.2 раза превышала концентрацию кремния (рис. 3б, в). Содержание титана в атомных долях 1.0–2.5%. Отсутствие других химических элементов позволяет отнести оцениваемые объемы материала к карбиду кремния.

Химический состав материала объекта 6 (рис. 3г) существенно отличается от ранее рассмотренных. Основными химическими элементами являются O, Si, Al, K, суммарная атомная доля концентрации которых более 90%. Без учета титана химический состав в большей степени соответствует керамической связке. Например, в составе распространенной керамической связке марки К10 [17] содержание химических элементов O, Si, Al и K достигает 95%. Кроме перечисленных элементов в связке содержатся Na, B, Fe, Ca, Mg с суммарной концентрацией около 5%. Следы Ca и Na обнаружены в анализируемом материале. Несмотря на то, что в рассматриваемой области не обнаружено содержание B, Fe и Mg, по остальным химическим элементам исследуемый материал в области точки 6 с высокой вероятностью можно отнести к керамической связке.

Одним из факторов, влияющих на оценку количества и площади шаржирующих продуктов износа, является их уровень яркости, который должен значимо отличаться от уровня яркости обрабатываемого металла. Продуктами износа абразивного инструмента из карбида кремния, как и при шлифовании инструментом из кубического нитрида бора, являются абразивный материал (в данном случае — карбид кремния) и керамическая связка. В связи с этим, на электронных фотографиях шлифованной поверхности необходимо определить среднюю яркость обрабатываемого

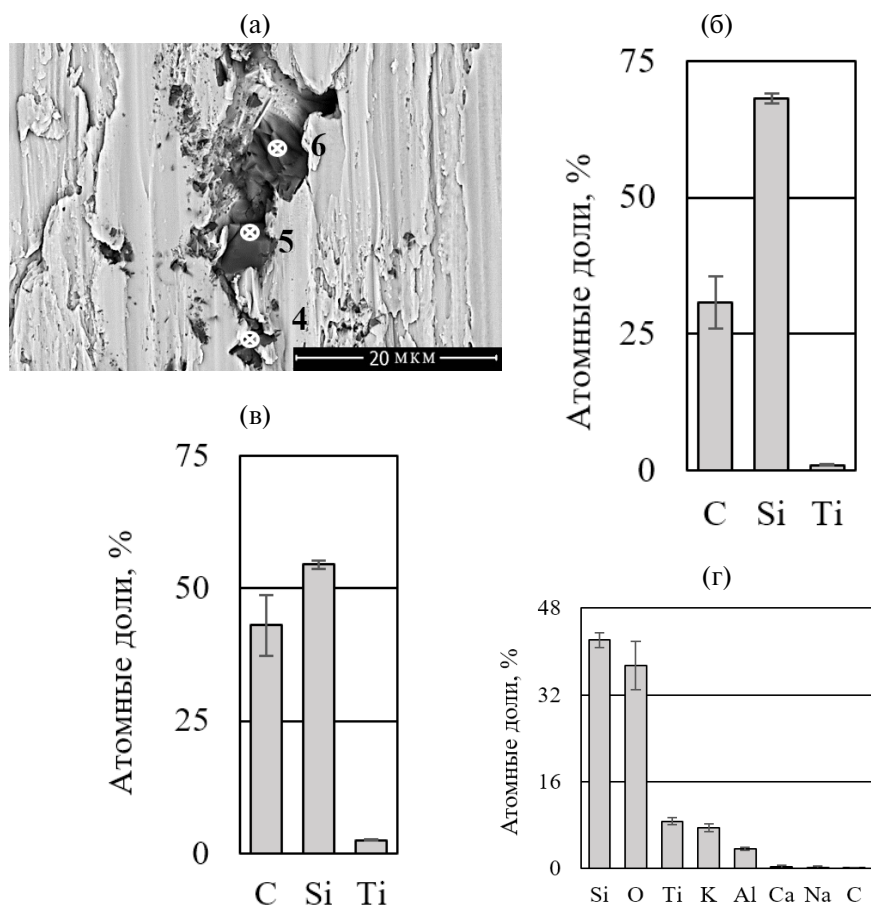


Рис. 3. Объекты внедрения (а) и химический состав материала в области точек 4 (б), 5 (в) и 6 (г).

металла, абразивных зерен и керамической связки. Установлено, что средний уровень яркости металла  $222 \pm 9$ , зерен карбида кремния  $51 \pm 17$ , связки  $62 \pm 13$  (рис. 4).

Средний уровень яркости продуктов износа абразивного инструмента из карбида кремния в 3.6–4.6 раза ниже среднего яркости металла. Средние значения уровней яркости зерна и связки, с учетом доверительных интервалов, значимого отличия не имеют. Исходя из этого, в качестве порогового значения яркости принята верхняя граница доверительного интервала среднего значения яркости связки. Дальнейшую обработку изображений посредством бинаризации проводили при пороговом значении уровня яркости 75.

В отдельных объектах, несмотря на то, что их первоначальная яркость превышала пороговое значение, рентгеноспектральный анализ не выявил в этой области продуктов износа абразивного инструмента. Один из таких примеров показан на рис. 5.

На основании результатов рентгеноспектрального анализа установлено, что объекты 1–5 следует считать внедренными кристаллам карбида кремния, где без учета Ti основными химическими элементами являются Si и C. В объекте 6 содержание Si и C не превышают 0.5%, относительная ошибка в данном примере достигает 50%. Встречаются объекты, где ошибка определения концентрации достигает 70–80%. Поэтому, несмотря на то что уровень яркости подобных объектов превышает пороговое значение, низкая концентрация химических элементов, определяющих принадлежность к карбиду кремния или связке, и большое значение относительной

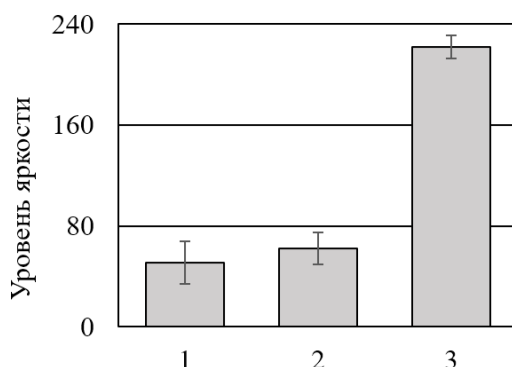


Рис. 4. Уровни яркости зерна (1), керамической связки (2) и титана (3).

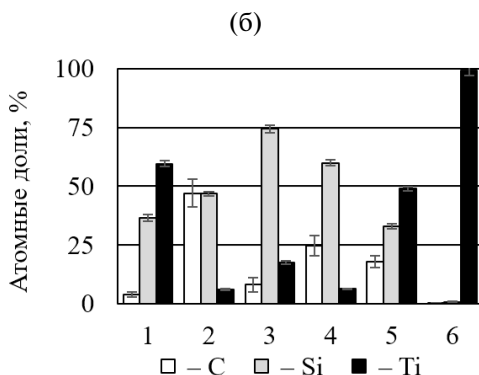
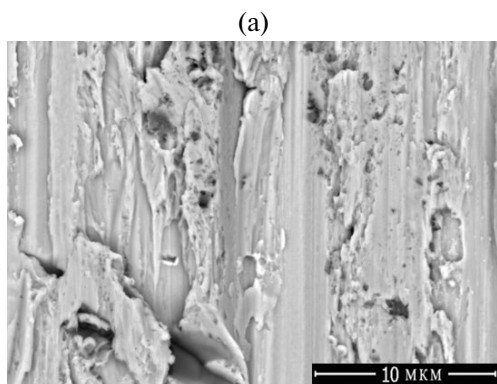


Рис. 5. Предполагаемые объекты внедрения (а) и химический состав материала в области точек 1–6 (б).

ошибки определения концентраций (40–90%) позволяют считать, что яркость анализируемого объекта обусловлена рельефом поверхности.

Установлено, что количество таких объектов не превышает 8% от общего количества регистрируемых. Площадь подобных объектов в большинстве случаев приближается к предельной минимальной величине, которую можно регистрировать при данном увеличении. Поэтому увеличенное число мелких объектов внедрения на площадь шаржирования оказывают меньшее влияние. Изменение относительной площади шаржирования не превышает 3%.

Для расчета показателей интенсивности шаржирования осуществляли бинаризацию полутоновых изображений обработанной поверхности титанового сплава в оттенках серого цвета с учетом принятого порога яркости. В результате получили черное изображение продуктов износа абразивного инструмента и белое изображение обработанной поверхности. После бинаризации изображений на каждой фотографии определяли выборочные относительные значения приведенной площади  $S_{ri}$  (мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) и приведенного количества  $N_{ri}$  (мм<sup>-2</sup>) объектов шаржирования. Фактическая площадь поверхности, изображенной на фотографии при увеличении 500 крат 0,41 мм<sup>2</sup>. Статистические параметры шаржирования (средние арифметические, стандартные отклонения и доверительные интервалы на средние арифметические) определяли с учетом закона распределения выборочных значений [18].

**Обсуждение.** В результате обработки данных, полученных при шлифовании в различных условиях, установлено, что распределение выборочных значений приведенной площади ( $S_{ri}$ , мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) и приведенного количества ( $N_{ri}$ , мм<sup>-2</sup>) шаржирующих частиц не подчиняются нормальному закону распределения. Расчетные значения критерия согласия Пирсона в данном случае превышали критические значения. Для проверки возможности распределения показателей интенсивности шаржирования по логарифмически нормальному закону все значения выборок были логарифмированы и обработаны (рис. 6).

Расчет средних, стандартного отклонения, верхнего и нижнего значений доверительных интервалов выполняли для логнормального закона распределения согласно рекомендациям [18]. Установлено, что с вероятностью 0.95 распределения  $S_{ri}$  и  $N_{ri}$  при различных значениях подач на глубину шлифования подчиняются логарифмически нормальному закону, в соответствии с которым определены средние значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы на средние значения. Оси абсцисс на представленных графиках градуированы для логарифмических значений.

Минимальные средние значения  $S_{ri}$  и  $N_{ri}$  и получены при шлифовании с подачей на глубину 0.005 мм/х (рис. 7а, б).

С увеличением подачи на глубину в 2 раза показатели интенсивности шаржирования возрастают:  $S_{ri}$  — в 5.4 раза,  $N_{ri}$  — в 1.8 раза. Среднюю площадь шаржированных продуктов износа определяли соотношением  $S_g = S_{ri}/N_{ri}$ , мкм<sup>2</sup>. С увеличением подачи на глубину  $S_g$  возрастает почти в 3 раза (рис. 7в). Износ инструмента с увеличением подачи на глубину увеличился в 4 раза (рис. 7г). Показатели шаржирования с увеличением глубины шлифования возрастают в разной степени. В большей степени возрастают средняя приведенная и средняя площадь шаржированных продуктов износа, что свидетельствует о смещении вида изнашивания абразивного инструмента от микро- к макроскалыванию.

**Выводы. 1.** В результате обработки поверхности титанового сплава полученной в обратно рассеянных электронах и рентгеноспектрального анализа продуктов износа определен пороговый уровень яркости, обеспечивающий разделение объектов на продукты износа абразивного инструмента (кристаллы карбида кремния, керамическая связка), шаржированных в обработанную поверхность, и титановый сплав. Относительная ошибка расчета приведенных значений площади  $S_{ri}$  и количества  $N_{ri}$  шаржированных объектов, обусловленная рельефом обработанной поверхности

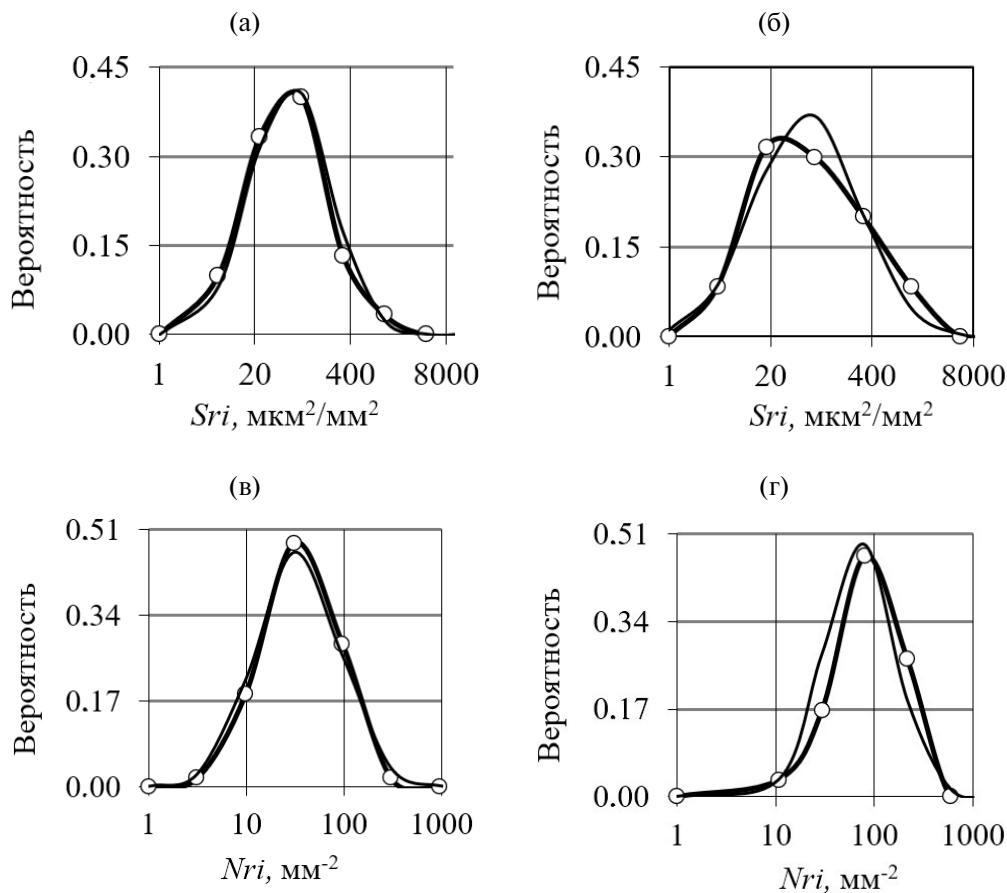


Рис. 6. Распределение  $Sr_i$  (а), (б) и  $Nr_i$  (в), (г) при шлифовании с подачей на глубину 0.005 мм/х (а), (в) и 0.010 мм/х (б), (г): — экспериментальное; — теоретическое.

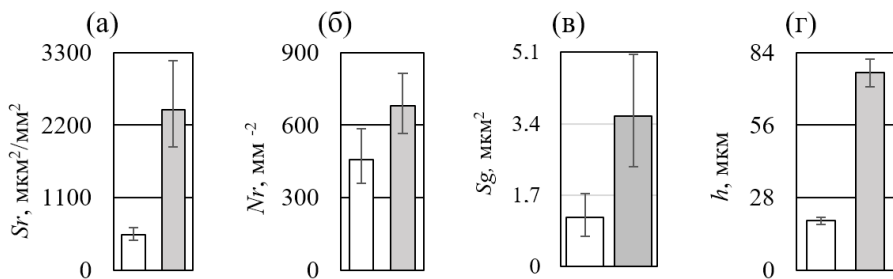


Рис. 7. Показатели интенсивности шаржирования  $Sr$  (а),  $Nr$  (б),  $Sg$  (в), износ абразивного инструмента  $h$  (г) при шлифовании на различных подачах: □ — 0.005 мм/х; ■ — 0.010 мм/х.



не превышает, соответственно, восьми и трех процентов от приведенных значений площади и количества анализируемых объектов, полученных без учета влияния элементов профиля обработанной поверхности. 2. Установлено, что распределение приведенных значений площади  $S_{ri}$  и количества  $N_{ri}$  шаржированных объектов подчиняются логнормальному закону распределения, с учетом которого рассчитаны средние значения и доверительные интервалы параметров интенсивности шаржирования. С увеличением радиальной подачи от 0.005 до 0.010 мм/х средние значения параметров интенсивности шаржирования возрастают:  $S_r$  — в 5.4,  $N_r$  — 1.8 раза,  $S_g$  — в 3 раза. Одним из факторов, определяющих рост показателей интенсивности шаржирования с увеличением подачи на глубину, является почти четырехкратное увеличение износа абразивного инструмента. 3. Параметры шаржирования поверхности титанового сплава продуктами износа абразивного инструмента из карбида кремния и методика их определения могут быть рекомендованы к использованию при планировании экспериментов и для разработки практических рекомендаций по снижению интенсивности шаржирования.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет средств бюджета ВолгГТУ и ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gialanella S., Malandrucolo A.* Aerospace Alloys. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Cham, Switzerland: Springer, 2020. 570 p.
2. *Суслов А. Г., Безъязычный В. Ф., Базров Б. М. и др.* Справочник технолога / Под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
3. *Junshuai Z., Biao Z., Wenfeng D. et al.* Grinding Characteristics of MoS<sub>2</sub>-Coated Brazed CBN Grinding Wheels in Dry Grinding of Titanium Alloy // Chinese J. of Mech. Engin. 2023. V. 23 (109). P. 36–49.  
<https://doi.org/10.1186/s10033-02300936-z>
4. *Салов П. М., Носов Н. В., Салова Д. П.* Контроль работоспособности шлифовального круга // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 4 (2). С. 238–241.
5. *Mao C., Li X., Zhang M. et al.* Wear behaviors of electroplated CBN grinding wheel with orderly-micro-grooves in grinding narrow-deep slot // The Int. J. of Adv. Manuf. Tech. 2023. P. 2857–2868.  
<https://doi.org/10.1007/c00170-023-12509-4>
6. *Безъязычный В. Ф., Голованов Д. С.* Повышение качества полировальной обработки лопаток ГТД из титановых сплавов за счёт применения абразивного инструмента на гибкой основе с запрограммированным механизмом износа // Вестник РГАТА. 2022. № 3 (62). С. 57–62.
7. *Boud F., Carpenter C., Folkers J. et al.* Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut // J. of Mater. Proces. Technol. 2010. V. 210 (15). P. 2197–2205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006>
8. *Носенко В. А., Сердюков Н. Д., Фетисов А. В.* Перенос материала абразивного инструмента на поверхность титанового сплава в различные периоды шлифования кругом из карбида кремния // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 1. С. 68–77.  
<https://doi.org/10.31857/S0235711922010072>
9. *Петровский В. А., Рубан А. Р., Хоменко Т. В., Мельников А. В.* Износостойкость и совместимость исследуемых материалов для шарнирного узла черпаковой цепи // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2023. № 3. С. 7–18.
10. *Dwyer-Joyce R. S.* The life Cycle of a Debris Particle // Tribology and Interface Engineering Series. 2005. V. 48. P. 681–690.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(05\)80070-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(05)80070-7)

11. *Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р.* Электролитно-плазменное полирование в технологии формировании поверхности лопаток ГТД // Климовские чтения. Перспективные направления развития авиадвигателестроения: Сборник статей научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ООО «Скифия-принт». 2022. С. 177–180.  
[https://doi.org/10.53454/9785986206257\\_177](https://doi.org/10.53454/9785986206257_177)
12. *Смоленцев В. П., Гончаров Е. В.* Расчет технологических режимов гидроабразивного разделения материалов с наложением электрического поля // Вестник ВГТУ. 2012. № 4. С. 130–133.
13. *Chen F. L., Siores E., Patel K., Momber A. W.* Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique // Int. J. of Machine Tools & Manufacture. 2002. V. 42. P. 1385–1390.  
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00081-0)
14. *Носенко В. А., Кузнецов С. П., Сердюков Н. Д.* РФ Патент 2768518. Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов, 2022.
15. *Носенко В. А., Белухин Р. А., Фетисов А. В., Морозова Л. К.* Испытательный комплекс на базе прецизионного профилишлифовального станка с ЧПУ Chevalier модели Smart-B1224 // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). С. 35–39.  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136116668>
16. *Пухов Д. Э., Лантева А. А.* Учет неровности поверхности при электронно-зондовом энергодисперсионном анализе материалов в виде порошков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 9. С. 28–38.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096020090149>
17. *Гаршин А. П., Федотова С. М.* Абразивные материалы и инструменты. Технология производства. СПб.: Политехнический университет, 2008. 385 с.
18. *Crow L. W., Shimizu K.* Lognormal Distributions: Theory and Applications. New York: CRC Press LLC, 2020. 387 p.
19. *Ивченко Г. И., Медведев Ю. И.* Математическая статистика. М.: Издательская группа URSS: 2023. 352 с.