

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

*На правах рукописи*



Кузнецов Семен Павлович

**ШАРЖИРОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ  
ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА**

05.02.07 – «Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Носенко Владимир Андреевич

Волгоград, 2022

## Оглавление

Введение	4
1. Анализ состояния вопроса.....	9
1.1. Влияние внедренных абразивных частиц на качество поверхности	9
1.2. Морфология поверхности при шлифовании.....	13
1.3. Шаржирование при струйно-абразивной обработке.....	15
1.4. Шаржирование при доводке и полировке.....	18
1.5. Шаржирование при шлифовании.....	20
1.6. Применения инструмента из КНБ.....	27
1.7. Износ кристаллов КНБ при шлифовании.....	30
1.8. Выводы.....	37
2. Методика проведения экспериментальных исследования.....	40
2.1. Выбор материалов для исследования шаржирования.....	40
2.2. Экспериментальная установка.....	42
2.3. Методы исследования.....	45
3. Исследования морфологии и шаржирования поверхности.....	48
3.1. Влияние условий обработки на показатели процесса шлифования..	48
3.2. Исследование морфология поверхности металлов после шлифования.....	54
3.2.1. Морфология поверхности титана после шлифования кругом характеристики <i>B251K</i> .....	54
3.2.2. Морфология поверхности титана после шлифования кругом характеристики <i>B126M</i> .....	57
3.2.3. Морфология поверхности железа после шлифования кругом характеристики <i>B126M</i> .....	61
3.2.4. Морфология поверхности кобальта после шлифования кругом характеристики <i>B126M</i> .....	65
3.2.5. Морфология поверхности никеля после шлифования кругом характеристики <i>B126M</i> .....	67

3.3. Морфология элементов рельефа, содержащих внедренные продукты износа АИ.....	71
3.4. Исследование поперечных сечений участков поверхности, содержащих внедренные продукты износа АИ.....	73
3.5. Выводы.....	77
4. Разработка метода измерения параметров шаржирования.....	80
4.1. Оценка химического состава шлифовального круга.....	80
4.2. Факторы, влияющие на точность количественной оценки химического состава методом ЭДС.....	82
4.3 . Оценка интенсивности шаржирования поверхности при шлифовании кругом из КНБ методом ЭДС.....	83
4.4. Картирование химических элементов на поверхности металлов.....	87
4.5 Уровни градационной яркости полутоновых изображений.....	93
4.6 . Обработка полутоновых изображений методом коррекции цветовых кривых.....	97
4.7 Идентификация продуктов износа по изображениям, полученным в режиме обратно-рассеянных электронов.....	99
4.8 . Исследование влияния увеличения на погрешность определения шаржирования.....	103
4.9. Выводы.....	107
5. Закономерности процесса шаржирования.....	109
5.1. Параметры шаржирования при шлифовании металлов.....	109
5.2. Влияние условий шлифования на параметры шаржирования.....	112
5.3. Выводы.....	113
Заключение.....	117
Список литературы.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт внедрения в учебный процесс.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Титульный лист патента.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Грант.....	136

## Введение

### **Актуальность темы исследования.**

Необходимость исследования процесса шаржирования при абразивной обработке обусловлена возрастающими требованиями к качеству поверхности деталей машин. Продукты износа абразивного инструмента (АИ), шаржированные в обработанную поверхность, являются концентраторами напряжений, снижающими надежность изделий, особенно, работающих в экстремальных условиях эксплуатации при знакопеременных нагрузках.

Известные методы определения параметров шаржирования при шлифовании носят преимущественно качественный характер, что обусловлено недостаточной изученностью особенностей шаржирования обработанной поверхности продуктами износа АИ.

Использование современных методов контроля качества, основанных на растровой электронной микроскопии (РЭМ), показало высокий уровень научных результатов исследований качества обработанной поверхности, в том числе, на операциях абразивной обработки. Применение этих методов к изучению контактного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом существенно расширяет представление о происходящих процессах, в частности, процесса шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструмента при шлифовании.

Как показал анализ последних научных достижений в этой области, в наименьшей степени исследовано шаржирование обработанной поверхности продуктами износа АИ из кубического нитрида бора (КНБ), являющегося перспективным абразивным материалом.

### **Степень разработанности.**

Исследованием шаржирования на различных операциях абразивной обработки занимались Артамонов А.Я., Горбунов Б.И., Гришин Я.В., Кремень З.И., Маслов Е.Н., Назаров Ю.Ф., Носенко В.А., Островский В.И., Саютин Г.И.,

Смоленцев В.П., Степанов Ю.С., *Liu Q. Y., Malkin S., Shipway P.H., Takanaka H., Turley D. M.*

Наиболее подробно шаржирование исследовано при обработке свободным абразивом. Получены распределения относительного количества абразивных частиц на поверхностях притиров. Определены факторы, влияющие на шаржирование, к наиболее значимым из которых относятся материал заготовки, режимы и длительность обработки. В меньшей степени изучен перенос при обработке связанным абразивом.

Шаржирование происходит при шлифовании сталей, сплавов титана, кобальта и никеля кругами из корунда, карбида кремния и алмаза.

Известны различные способы измерения интенсивности шаржирования (ИШ) при шлифовании. Для этого изготавливают специальный абразивный инструмент, содержащий радионуклиды или люминесцентные зёрна. Возможна оценка переноса материала на обрабатываемую поверхность по изменению её электрической ёмкости, методами акустико-эмиссионного контроля, при помощи углеродных реплик. Подобные способы исследования трудоемки и имеют очевидные недостатки.

Широкое распространение в исследованиях качества обработанной поверхности и абразивного материала получили методы, основанные на применении РЭМ. Например, при шлифовании кругами из карбида кремния шаржирование оценивали по приросту концентрации кремния на обработанной поверхности рентгеноспектральным микроанализом.

**Цель работы.** Изучение особенностей и закономерностей процесса шаржирования при шлифовании металлов абразивными инструментами из КНБ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Экспериментально доказать факт шаржирования обработанной поверхности продуктами износа АИ из КНБ при шлифовании различных металлов.
2. Определить законы распределения площади и количества шаржирующих продуктов износа на обработанной поверхности при шлифовании.

3. Разработать способ и методику измерения параметров процесса шаржирования при шлифовании инструментом из кубического нитрида бора.

4. Установить влияние условий шлифования на параметры процесса шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента из КНБ.

**Объект исследования:** процесс шлифования металлов кругами из КНБ.

**Предмет исследования:** шаржирование обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании кругами из КНБ.

**Научная новизна.**

Доказано, что при шлифовании кругом из КНБ происходит шаржирование обрабатываемых поверхностей металлов продуктами износа АИ: кристаллами КНБ, наполнителя, в качестве которого в выбранных кругах используется корунд, и фрагментами керамической связки.

Разработан способ определения площади и относительной площади шаржирования шлифованной поверхности при обработке инструментом из КНБ, заключающийся в получении и цифровой обработке электронных фотографий шлифованной поверхности в обратно-рассеянных электронах, включающий преобразование полутонового изображения в бинарное с выделением и подсчётом площади связных областей (патент №2768518).

Установлено, что относительная площадь шаржирования и относительное количество шаржирующих продуктов износа при шлифовании кругами из КНБ подчиняются логнормальному закону распределения. При сравнении нескольких показателей процесса шаржирования доказано, что среднее значение относительной площади шаржирования, предложенное в качестве критерия ИШ при шлифовании кругами из КНБ, в наибольшей степени отражает влияние условий шлифования на ИШ.

**Практическая значимость.**

Разработана методика определения параметров процесса шаржирования при шлифовании АИ из кубического нитрида бора.

Результаты работы могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, использующих абразивную обработку на ответственных операциях шлифования.

### **Внедрение результатов работы.**

Материалы диссертационной работы использованы при выполнении гранта РФФИ «Аспиранты» № 19-38-90322/19 «Исследование контактных поверхностей d-переходных металлов четвертого периода при взаимодействии с абразивными материалами в экстремальных условиях».

Результаты работы внедрены в учебный процесс по направлению 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства» при преподавании дисциплин «Прогрессивные технологии абразивной обработки» в Волжском политехническом институте (филиале) ВолгГТУ.

### **Методы исследований.**

Теоретические основы работы базируются на теории шлифования, математической статистике, растровой электронной микроскопии, энергодисперсионном анализе, цифровой обработке сигнала. Экспериментальные данные получены с использованием современного оборудования и измерительной техники.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

результаты исследований морфологии и химического состава обработанной поверхности металлов при шлифовании кругами из КНБ;

закон распределения относительных величин площади и количества шаржирующих продуктов износа АИ на обработанной поверхности при шлифовании кругами из КНБ;

критерий интенсивности шаржирования и методика определения показателей шаржирования при шлифовании кругами из КНБ;

влияние правки, характеристики абразивного инструмента и обрабатываемого металла на параметры шаржирования;

глубина шаржирования и влияние шаржирования на структуру обработанной поверхности;

**Достоверность результатов** обеспечена корректным использованием теоретических положений обработки материалов резанием и шлифованием, математической статистики, растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа и цифровой обработки сигналов, согласованностью выводов диссертации с результатами известных работ, опубликованных ранее другими авторами, использованием современного высокоточного оборудования, разработанных и известных методик измерения показателей процессов шаржирования и шлифования, полнотой теоретических и экспериментальных исследований, их положительной оценкой на научных конференциях различного уровня.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на Междунар. науч.-технич. конференциях: «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь-2020, 2021 г.), «Пром-Инжиниринг» (дистанционно, 2020 г.); «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2020); XVIII, XIX, XX научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (Волжский-2020, 2021, 2022 г.); 24, 25, 26 Межвузовских научно-практических конференциях студентов и молодых ученых г. Волжского (2019, 2020, 2021 г.); объединённом научном семинаре кафедр «Технологии и оборудования машиностроительных производств», «Механика», «Прикладная физика и математика» ВПИ (филиал) ВолгГТУ (09.2020 г.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работ, из них в журналах, рекомендованных ВАК – 3, индексированных базами Web of Science и Scopus – 2, патент РФ на изобретение.



## 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

### 1.1. Влияние внедренных абразивных частиц на качество поверхности

Согласно определению Большой советской энциклопедии, шаржирование – это поверхностное насыщение (втиранием) притиров частицами абразивного материала (порошка или пасты). Интенсивность или степень шаржируемости – свойство твердых составляющих абразивно-доводочной и абразивно-полировальной смесей проникать в поры обрабатываемого материала и инструмента - притира. Общее число твердых составляющих смеси, засевших в материале (притире), отнесенное к единице площади, называется интенсивностью шаржируемости. Глубина проникновения в материал этих составляющих характеризует степень шаржируемости [1]. На доводочных операциях абразивный материал может внедряться, то есть шаржировать, не только поверхность притиров, но и заготовку, особенно, при обработке мягких сплавов. Во многих работах это явление наблюдалось при различных видах абразивных операций, в том числе, при использовании связанного абразива [2].

Отмечено, что при доводке происходят те же процессы, что и при абразивном износе деталей машин в процессе их эксплуатации [3]. При ударно-, газо-, гидроабразивном изнашивании поверхностей наблюдается внедрение твердых инородных частиц в поверхности деталей, называемое шаржированием [4-6].

В зарубежной литературе отсутствует единый термин, описывающий внедрение твердых частиц в поверхности, поэтому, в зависимости от области исследования, используют словосочетания *embedding grit* («внедрение зернистости, вкрапления песка, вкрапление зернистости, зернистость вкраплений» при обработке свободным абразивом), *embedding debris* («внедрение продуктов износа» в исследованиях износа), *embedding grain* («внедрение зерна» при шлифовании).

Влияние шаржирования на эксплуатационные свойства связано с двумя основными факторами: внедренные в поверхность инородные объекты являются концентраторами напряжений, которые могут снижать усталостную прочность, особенно для изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок [7]; наличие на поверхности твердых частиц, закономерно приводит к интенсивному абразивному изнашиванию. Происходящее в результате разрушение поверхностного слоя классифицировано на следующие четыре вида: хрупкое, вязкое, полидеформационное и усталостное [8]. В качестве примеров изделий, для которых шаржирование является причиной критического износа, можно отметить гильзы гидроцилиндров и ДВС [9, 10], подшипники [11, 12] (рисунок 1.1а). Наличие внедренных абразивных частиц может быть недопустимо на участках поверхностей, подготовленных к нанесению покрытий или сварке (рисунок 1.1б) [13, 14]. Поэтому снижение или устранение шаржирования способствует улучшению качества обработанной поверхности изделия.

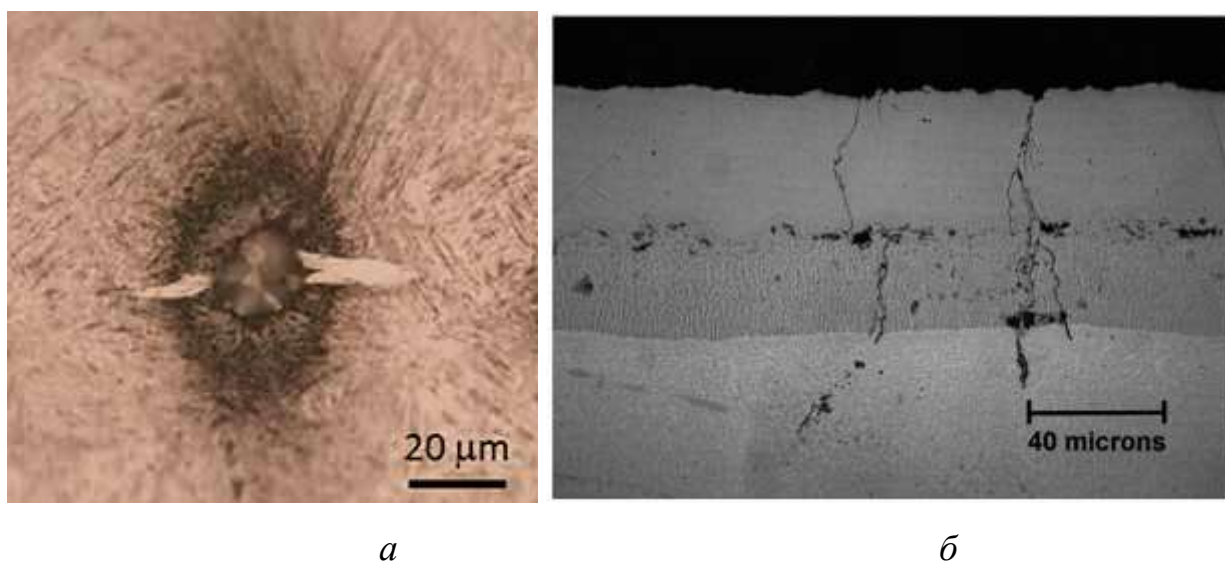


Рисунок 1.1 – (а) Усталостное повреждение, вызванное неметаллическим включением на поверхности дорожки качения подшипника [12]; (б) трещины в никелевом покрытии алюминиевого сплава, вызванные наличием внедренных при пескоструйной обработке частиц [13].

В работах отечественных авторов шаржирование рассматривается как негативное свойство абразивной обработки. Для устранения этого явления, в некоторых работах рекомендуется замена абразивной операции, например, лезвийной обработкой или ППД [15, 16]. В некоторых отечественных [17] и зарубежных [18] исследованиях шаржирование рассматривается при изучении морфологии поверхности, как один из факторов, влияющих на качество поверхности (рисунок 1.2) (используется понятие *surface integrity* – «целостность поверхности», которое описывает особенности морфологии).

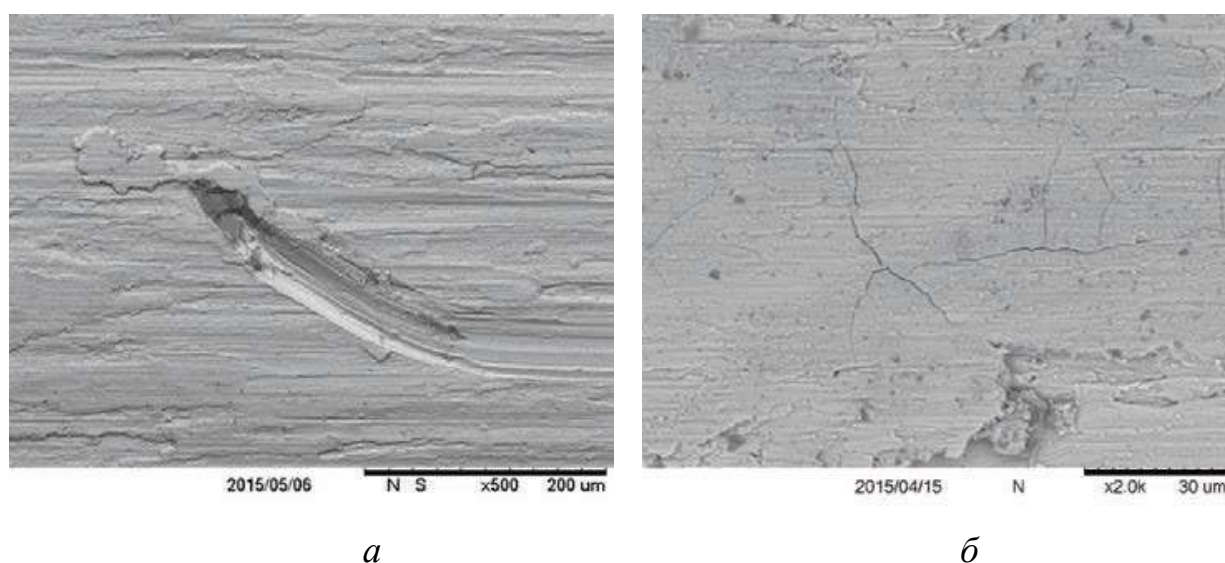


Рисунок 1.2 – Исследование морфологии поверхности сплава Ti-6Al-4V, полученного после шлифования кругом из карбида кремния с охлаждением MQL: (а) внедренный абразив, (б) микротрещины [18].

Требования к качеству поверхности обрабатываемой детали напрямую влияют на технологию ее изготовления и эксплуатационные свойства. Эти свойства могут быть классифицированы как [19]:

- характеристики трения и износа на контактных поверхностях детали;
- эффективность сохранения смазки во время обработки и при эксплуатации;
- внешний вид и роль поверхности в последующих операциях изготовления изделия (очистка, нанесение покрытия, сварка, и т.д.);

- механические свойства, структура поверхностного слоя, остаточные напряжения;
- физические свойства поверхности.

Поверхность металлов включает загрязненный тонкий слой (1-10 нм), слой окисления (10-100 нм), за которым следует упрочненный слой, толщина которого зависит от условий обработки и окружающей среды [20]. В микроскопическом масштабе поверхностный слой изготовленной детали может иметь различные дефекты: микротрещины, поры, навалы, включения, налипы, оксидный слой, металлургические превращения.

Качество поверхности детали имеет главенствующее значение в процессах механической обработки. Для большинства изделий предпочтительной является максимально гладкая поверхность, особенно когда важна усталостная прочность обработанной детали [21]. Однако в некоторых случаях предпочтительнее иметь более шероховатую поверхность, например, для биомедицинской области [22].

Процессы механической обработки влияют на различные параметры качества поверхности готовых деталей [23]:

- параметры шероховатости (шаговые и высотные параметры микронеровностей),
- механические свойства, например, остаточные напряжения и твердость,
- металлургические свойства: микроструктура, фазовые превращения, размер и форма зерен, включения и т.д. [23].

Существует множество исследований, посвященных качеству поверхностей обрабатываемых деталей, и обширный обзор таких исследований был проведен в работах [24-26].

В настоящее время наиболее распространенной операцией, обеспечивающей высокую производительность и качество обрабатываемых поверхностей является шлифование. Обработка шлифованием занимает 25% от всех операций по механической обработки в мире, при этом 70% операций по получению высокоточных поверхностей ведется на шлифовальном оборудовании [27].

При шлифовании формирование поверхности происходит в результате взаимодействия материала заготовки с шлифовальным кругом, состоящим из твердых абразивных зёрен и связки. Шлифование является финишной операцией и во многом определяет качество изделия и его эксплуатационные показатели.

## **1.2. Морфология поверхности при шлифовании**

Образование поверхности при шлифовании обусловлено стохастическими показателями, характеризующими процесс: формой абразивных зерен, их распределением на рабочей поверхности круга, механическими, химическими, адгезионными явлениями в зоне резания.

Доля абразивных зёрен, осуществляющих резание, изменяется от 10 до 20% [2, 28-30]. Остальные зёрна, при этом, могут деформировать материал. В совокупности с отрицательным значением переднего угла режущих кромок зёрен, это приводит к высокой доле трения в работе, затрачиваемой на удаление материала. Адгезионная активность обрабатываемого материала так же является фактором, влияющим на морфологию. При шлифовании титановых сплавов характерной особенностью является развитая морфология: большое количество налипов, навалов, фрагментов стружки, шаржированных частиц [18, 31, 32].

Для некоторых труднообрабатываемых материалов высокая температура обработки повышает пластичность и адгезионную активность, что приводит к дальнейшему росту температуры, разрушению абразивных зёрен, ухудшению качества поверхности и повышенному износу инструмента [18]. На поверхности, при этом, могут образовываться выглаженные области, налипы, шаржированные частицы, микротрещины (рисунок 1.2). Проведено множество исследований, посвященных сравнению обрабатываемости различных материалов. Обилие данных [33-42] позволяет сделать вывод, что наиболее значимыми факторами, влияющими на морфологию поверхности, являются свойства обрабатываемого материала [31-38]. Число подобных исследований растет с каждым годом, а

получение новых результатов обеспечивается благодаря развитию прогрессивных методов исследования, таких как растровая электронная микроскопия [21-25, 31-46].

В исследовании влияния выбора охлаждающих жидкостей на качество поверхности при профильном круглом наружном шлифовании колец подшипников проведена оценка связи дефектов с параметрами обработки. Согласно результатам [45], можно выделить следующие дефекты поверхности: 1—фрагменты зерен, внедренные в поверхность; 2—навалы; 3—налипы; 4—микропоры; 5—частицы стружки; 6—борозды; 7—раковины; 8—микротрещины; 9—эрозия. При определении факторов, влияющих на образование дефектов, были выделены: 1) скорость вращения заготовки, м/мин; 2) скорость черновой поперечной подачи, мм/мин; 3) скорость чистовой поперечной подачи, мм/мин; 4) длительность выхаживания, с; 5) поперечная подача при правке, мм/дв хода; 6) марка охлаждающей жидкости; 7) чистота охлаждающей жидкости. В частности, установлено, что на шаржирование в большей степени влияют факторы 1, 2, 5, 7 [45]. Подобная классификация дефектов, возникающих при обработке титановых и никелевых сплавов приведена в работе [26], авторы которой освещают проведенные исследования качества поверхности труднообрабатываемых материалов.

Необходимость идентификации и устранения дефектов в реальных производствах привела к созданию систем, автоматически идентифицирующих дефекты поверхностей на основании их изображений. Такие системы распознают следующие виды дефектов: неметаллические включения, микропоры, глубокие, относительно микропрофиля, царапины, микротрещины, эрозию, коррозию (рисунок 1.3) [46].

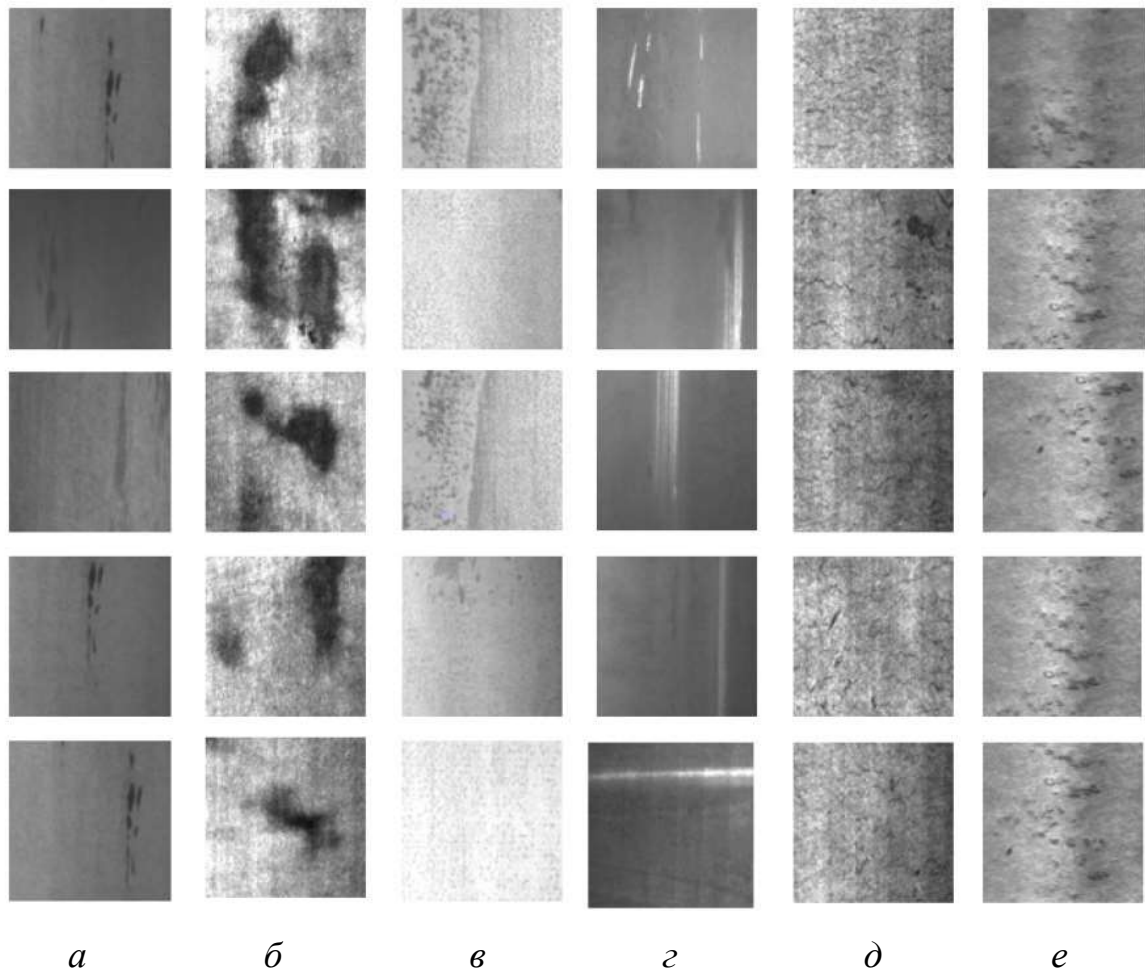


Рисунок 1.3 – Виды поверхностных дефектов: (а) включения, (б) поры, (в) коррозия, (г) борозды, (д) микротрещины, (е) эрозия.

### 1.3. Шаржирование при струйно-абразивной обработке

В наибольшей степени шаржирование исследовано при доводке и обработке свободным абразивом – песко-, дробеструйная обработка, гидроабразивная обработка.

Известно, что шаржирование может приводить к эрозии поверхности, снижению усталостной прочности [47, 48], возникновению микротрещин, ухудшению условий дальнейшей обработки (механическая обработка, сварка, нанесение покрытий) [49]. С целью снижения шаржирования при обработке свободным абразивом было проведено множество исследований, посвященных

влиянию параметров обработки на интенсивность переноса абразивного материала. Для идентификации и подсчёта внедренных в поверхность частиц большинство авторов используют сочетание обратно-рассеянных электронов и энергодисперсионную спектрометрию (ЭДС). В отличие от других методов обработки, шаржирование заметно в наибольшей степени при гидроабразивной обработке. (рисунок 1.4).

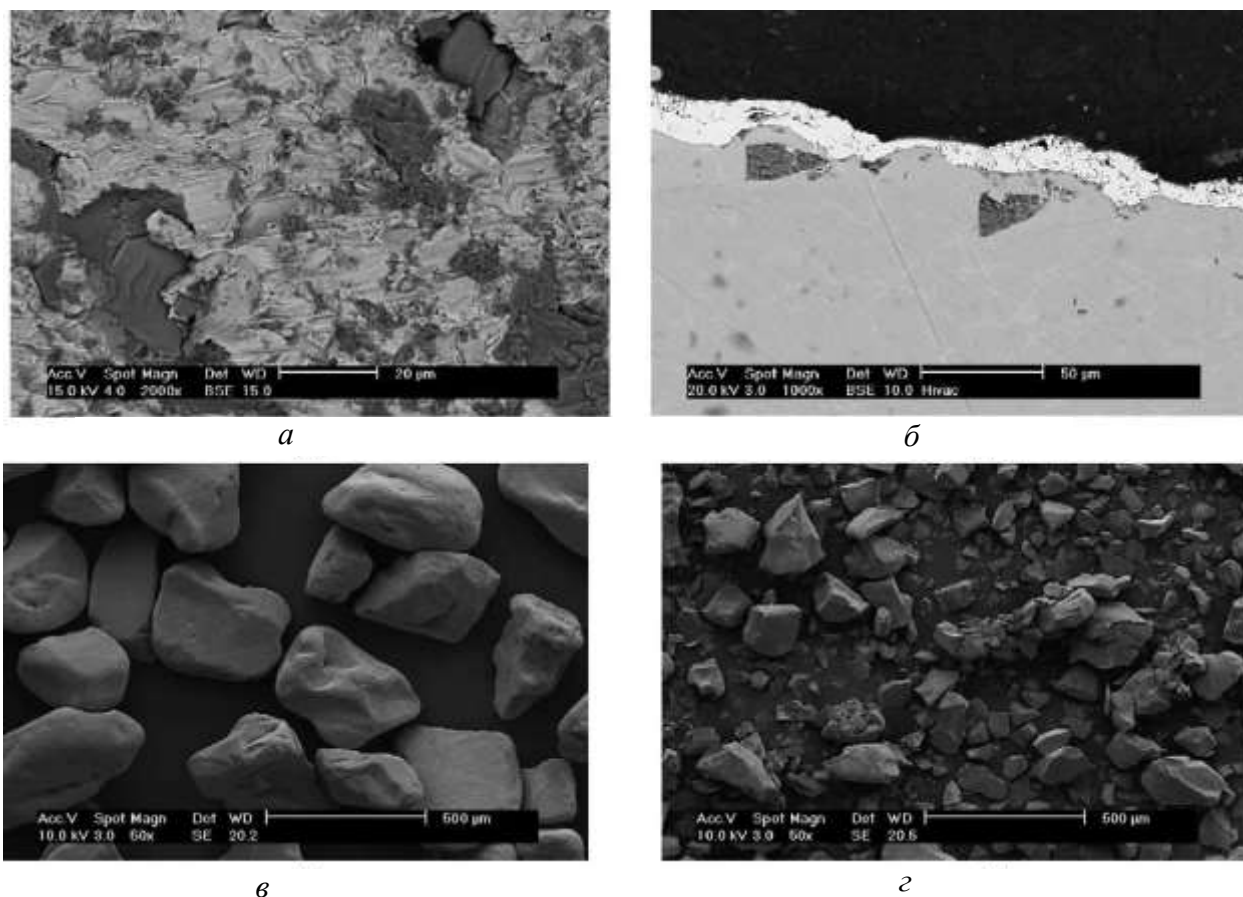


Рисунок 1.4 – Электронное изображение частиц, внедренных в Ti6Al4V после гидроабразивной обработки [48]: *a* – вид сверху; *б* – поперечное сечение поверхности; *в* – изображение исходного абразивного материала и *г* – после гидроабразивной обработки.

Шаржированными частицами являются продукты износа исходных абразивных зёрен, которые под давлением струи внедряются в поверхность. При низких углах падения струи на поверхность ( $<30^\circ$ ), перед абразивными зёрнами формируется слой деформированного металла, который может замазать



внедренную частицу. При угле соударения  $90^\circ$  большое количество зёрен внедряются в поверхность, при меньших углах доля таких частиц меньше. Например, при уменьшении угла с  $90^\circ$  до  $75^\circ$  количество внедренных зёрен уменьшается на 13% [48].

При сравнении частиц до и после взаимодействия с металлом обнаружено, что после гидроабразивной обработки размер зёрен уменьшается, при этом образуются более острые грани. При угле соударения между струёй и заготовкой  $15^\circ$  от 10% до 15% площади обработанной поверхности покрыто шаржированными частицами. При увеличении угла до  $90^\circ$  покрыто 40% площади. Существует линейная зависимость площади, занимаемой шаржированными частицами, от угла падения. Зернистость влияет на площадь шаржирования незначительно для всех исследованных экспериментальных условий. Логично предположить, что интенсивность шаржирования (ИШ), то есть количество перенесенного абразивного материала, зависит как от количества частиц, обрабатывающих единицу площади, так и от склонности к внедрению отдельного абразивного зерна. ИШ увеличивается не линейно с ростом числа частиц, обрабатывающих единицу площади. Это вызвано тем, что по мере увеличения количества зёрен, некоторые внедренные частицы могут удаляться следующими. Подтверждающие эксперименты были проведены при гидроабразивной обработке с высокой скоростью струи. При том же расходе абразивной массы количество частиц, воздействующих на поверхность, будет больше для зернистости меньшего размера. При этом, существенной разницы в шаржировании зёрнами размером 75 мкм и 180 мкм разницы не обнаружено.

Хотя исследования влияния формы абразивных зёрен на склонность к внедрению в поверхность не проведены, можно предположить, что частицы, которые проникают глубже в заготовку, имеют более высокую склонность к внедрению. При этом размер абразивного зерна не влияет на форму, а глубина внедрения будет зависеть от импульса частицы. Так как абразивные зерна склонны к разрушению при взаимодействии с поверхностью и другими

частицами, предложено использовать параметр массы взаимодействующего с поверхностью абразива. [48].

При пескоструйной и дробеструйной обработке [50] степень шаржирования оценивается методом ЭДС и волно-дисперсионной спектроскопией. Предлагаемая авторами методика по количественной оценке степени шаржирования заключается в подсчёте количества внедренных частиц. Были проведены исследования по травлению шаржированной поверхности с выяснением глубины внедрения и массы шаржированных частиц. Этот метод необходим, так как шаржированные зерна могут находиться под слоем металла. Глубина внедрения зёрен менялась от 10 до 50 мкм для зернистости 550 мкм и от 40 до 50 мкм для зернистости 1106 мкм. Масса шаржированных частиц на поверхности изменялось от 7 до 17 г/м<sup>2</sup>. Авторы пришли к выводу, что с увеличением зернистости увеличивается масса внедренных частиц и глубина их внедрения, которая составляла от 5 до 9% от среднего диаметра частиц. По мнению авторов, увеличение массы и глубины вызвано увеличением импульса частиц, взаимодействующих с поверхностью.

Представленные выше данные о шаржировании при гидроабразивной и пескоструйной обработке хорошо согласуются с имеющимися представлениями об износостойкости материалов при трении в потоке абразивных частиц. В работе [51] так же отмечается, что наиболее значимыми факторами, определяющими скорость изнашивания поверхностей является её твердость, импульс и угол атаки частиц.

#### **1.4. Шаржирование при доводке и полировке**

На доводочных операциях абразив, входящий в состав паст и суспензий так же находится в свободном состоянии и под действием нормальных сил может шаржировать поверхности. Помимо серого чугуна, из которого изготавливают

принудительно шаржированные притиры, шаржирование происходит при обработке дюралюминия, латуни, бронзы, меди, стали.

Доводочные операции обеспечивают высокую точность и наименьшую шероховатость поверхности, а одним из факторов, определяющих качество и производительность обработки, является состояние рабочей поверхности притира. Для исследования поверхностей притиров в работе [52] предложены следующие качественные методы: микроскопическое исследование в поляризованном свете, микроинтерференционное исследование, спектральный анализ. Авторы отмечают, что наиболее достоверным является третий метод, при помощи которого получено распределение абразива на поверхности притира. Так, при шаржировании притира из серого чугуна твердостью *HB* 180 кг/мм<sup>2</sup> микропорошком ЭБ М2 плотность расположения зерен на 1 мм<sup>2</sup> колеблется в значительных пределах: от 100 до 220 зёрен.

В работе [53], авторы которой определяли ИШ обработанной поверхности методом спектрального анализа путем сравнения полученных спектров с эталонными образцами [52], определены технологические параметры, влияющие на ИШ. Наибольшее значение ИШ наблюдается на начальном этапе обработки выбранных материалов, после чего количество абразива на поверхности увеличивается существенно медленнее (дюралюминий, латунь) или уменьшается (сталь). Минимальное значение ИШ при доводке закаленной стали наблюдается после 5-7 минут обработки. Снижение ИШ в процессе обработки происходит тем быстрее, чем выше твердость обрабатываемого материала. Зависимость ИШ от давления на притир имеет схожий вид для различных материалов: с увеличением давления ИШ растёт, а после достижения некоторого предельного значения изменяется не значительно. Для латуни значения предельного давления составили 0,3-0,4 кгс/см<sup>2</sup>, для стали 0,6-0,7 кгс/см<sup>2</sup> [53]. Аналогичные данные были получены в работе [54], при алмазной доводке с увеличением времени обработки от 1 до 10 минут количество внедренного абразива уменьшилось в 2-10 раз в зависимости от твердости обрабатываемого материала.

Шаржированные абразивные частицы обнаружены в поверхности металлических зеркал на глубине до 50 мкм [55-57]. В работе [55] проведено исследование поверхностей полированной меди М06, шаржированной различными абразивными материалами: алмазом, кубическим нитридом бора, корундом, оксидом хрома. В результате исследования получены функции распределения размеров видимых шаржированных частиц на разных глубинах. Исследование проведено методами сканирующей электронной микроскопии при увеличении 10000× при травлении поверхностного слоя на глубину до 1 мкм. Установлено, что с увеличением глубины травления число видимых частиц в начале увеличивается (при травлении от 0 до 0,2 мкм), а после – уменьшается. Это объясняется тем, что при травлении на небольшую глубину на поверхности появляются частицы, которые были покрыты тонким слоем металла. Увеличение глубины травления приводит к удалению частиц, расположенных на поверхности. Минимальный размер шаржированных частиц составил 0,1 мкм, максимальный размер соответствовал размеру зернистости исходного абразива (3 мкм). В распределении размеров шаржированных зёрен максимальная частота свойственна частицами минимального размера (около 0,1 мкм). С увеличением размеров зёрен их число существенно уменьшается в диапазоне до 1 мкм. Как отмечают авторы, встречались более крупные частицы, но их число не достаточно для определения частоты и в распределениях такие зерна не учитывали.

### **1.5. Шаржирование при шлифовании**

Влияние тех или иных факторов на процесс шаржирования при шлифовании в литературе рассмотрен ограниченно.

О возможности внедрения продуктов износа абразивного инструмента известно примерно с конца 1950-х. В ранних работах, посвященных исследованию шлифованных поверхностей методом оптической микроскопии

были обнаружены внедренные частицы, которыми, вероятно, являлись изношенные абразивные зёрна [58,59].

В исследовании шаржирования поверхности стали при бесцентровом шлифовании было выдвинуто предположение, что причиной шаржирования является дисбаланс круга, следствием которого является износ абразивных зёрен и внедрение сколовшихся частиц в обрабатываемую поверхность [60].

Подобные исследования носили исключительно качественный характер, например, при исследовании возможности шаржирования пористой металлокерамики, производили травление поверхностного слоя после абразивной обработки (полирования и шлифования) и визуально оценивали поверхностный слой на наличие/отсутствие инородных частиц [61].

В дальнейшем использовались различные методы оценки шаржирования поверхности абразивными частицами, например:

1) оценка равномерности и степени шаржирования по перенесенному на шаржированную поверхность пластичному мягкому металлу, который перемещался по шаржированной поверхности под нагрузкой [62],

2) визуальная оценка равномерности и степени шаржирования поверхности, шлифованной кругом, содержащим люминесцентные зерна, при помощи оптического микроскопа [63],

3) оценка степени шаржирования по интенсивности излучения радионуклидов, возникающих вследствие взаимодействия шаржированных зёрен с потоком ускоренных заряженных частиц [64],

4) оценка степени шаржирования по отношению активностей сигнала акустической эмиссии до, и после шаржирования и оценка распределения и размеров частиц по амплитуде сигналов акустической эмиссии [65],

5) оценка степени шаржирования по изменению электрического сопротивления, емкости и индуктивности шаржированной поверхности по сравнению с эталоном, обладающим той же шероховатостью [66],

б) оценка процента площади, занимаемой шаржированными частицами по отношению ёмкости поверхности, содержащей абразивные диэлектрические частицы, и эталонной поверхности [67].

В статье [68] авторы приводят следующие данные (перевод, с. 155-156): «В настоящее время имеются убедительные доказательства того, что во время шлифования, полировки или доводки частицы абразива могут внедряться в поверхность. При доводке и полировке это явление в основном связано с мягкими металлами, в то время как при шлифовании внедрение абразива может легко происходить с твердыми материалами, такими как закаленная и отпущенная низколегированная сталь твердостью 500 HV и даже инструментальная сталь с твердостью около 1000 HV. Абразив, внедренный в поверхность, может быть трудно обнаружить с помощью оптической микроскопии, но его легко обнаружить с помощью электронно-зондового микроанализа и сканирующей электронной микроскопии, особенно в последнем случае, если поверхность подвергается легкому травлению перед исследованием. Исследования износа показали [16], что при истирании отожденного алюминия на карбидкремниевых бумагах, покрытых тонким слоем воска, поверхности были практически свободны от внедренного абразива, в то время как на поверхностях, истертых на абразивных бумагах без покрытия, было обнаружено большое количество внедренного абразива. Установлено, что обычно используемые смазочно-охлаждающие жидкости, такие как керосин, спирты и масла под высоким давлением, превосходят по уменьшению количества внедренного абразива воду, что, в свою очередь, улучшает поверхность. Четыреххлористый углерод, подходит для низкоскоростной резки алюминия, уменьшает склонность к шаржированию до более низких уровней, однако ни одна из жидких смазок не ограничивала склонность к шаржированию до уровней, достигнутых с помощью мыла и воска для мягких твердых покрытий. Сообщается, что твердые смазочные материалы являются наиболее эффективными, поскольку в первую очередь, они механически ограничивают движение свободных абразивных частиц по поверхности обрабатываемой детали. При шлифовании [17] большая часть шаржирования

абразива происходила, когда круг был после правки. При правке образуется множество поврежденных и слабо закрепленных зёрен на поверхности круга, и эта абразивная масса очень легко внедряется в поверхность заготовки во время шлифования, даже если заготовка очень твердая. Что касается истирания, то пропитка круга воском или мылом практически исключала внедрение абразива при шлифовании.»

Стоит отметить, что эти исследования велись с применением традиционных абразивных материалов, таких как кварцевый песок, гранат, карбид кремния, корунд. Известно, что алмаз так же подвержен переносу на обрабатываемую поверхность как мягких материалов [3], так и твердых сплавов системы WC-Co [69], что было подтверждено, в том числе, энергодисперсионным анализом (Рисунок 5а).

При шлифовании никелевых сплавов кругами из карбида кремния происходит интенсивное химическое взаимодействие абразивного материала с поверхностью, что приводит к диффузии углерода в обрабатываемую поверхность, которая сопровождается интенсивным окислением и шаржированием (рисунок 5б) [70].

При обработке стали различными видами корундовых кругов авторы делают вывод, что абразивные частицы скалываются и внедряются в поверхность заготовки, как правило, на дне царапины (рисунок 5в). Стоит так же отметить, что на дне этих царапин обнаружены цвета побежалостей, свидетельствующие о прижоге в этой области. Таким образом, авторы связывают шаржирование с высокими термомеханическими нагрузками на зерно [44].

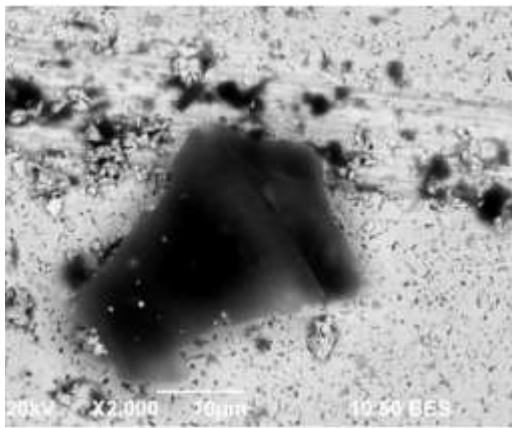
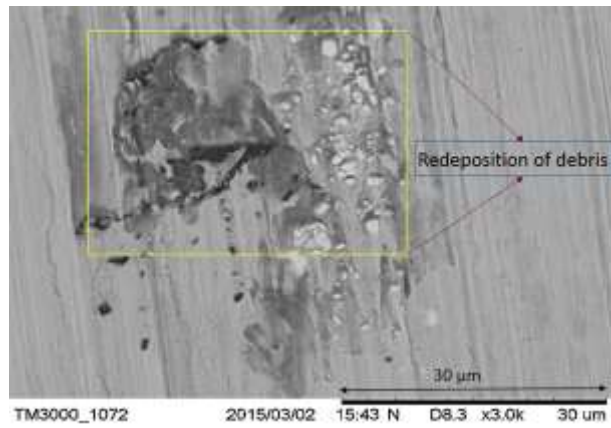
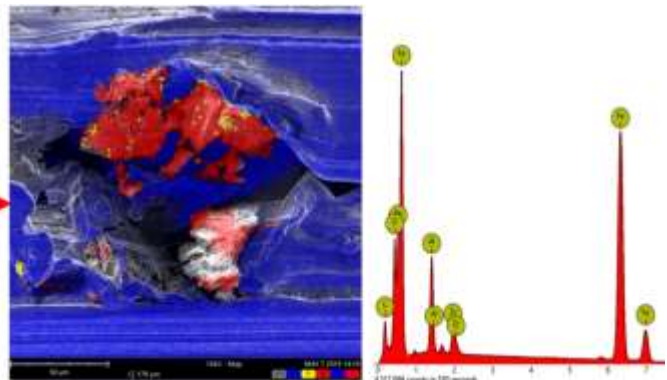
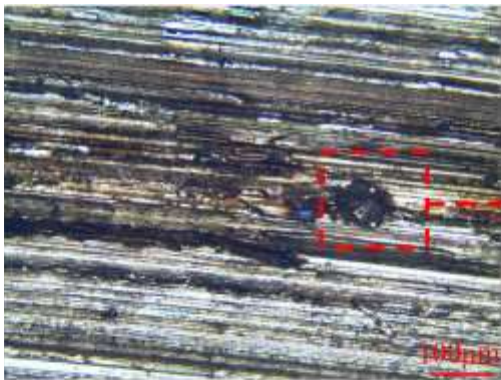
*a**б**в*

Рисунок 1.5 – Шаржированные в поверхность продукты износа (*a*) алмаза [69], (*б*) карбида кремния [70], (*в*) корунда [44].

В работах [71-76] установлен перенос кремния, входящего в состав абразивного инструмента из карбида кремния, на поверхность титанового сплава (рисунок 1.6).

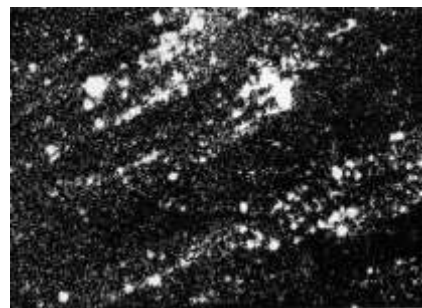
*a**б*

Рисунок 1.6 – Фотографии поверхности сплава ВТ22 в рентгеновском излучении: (*a*) исходный материал; (*б*) после шлифования [72]



Перенос является следствием взаимодействия пары абразив-металл. В результате физико-химического взаимодействия и образования адгезионных связей происходит адгезионный перенос абразивного материала; возможен диффузионный перенос атомов и молекул абразивного материала на обработанную поверхность; в результате механического взаимодействия происходит вдавливание в металл дисперсных продуктов износа абразивного материала. Увеличение на обработанной поверхности концентрации химических элементов, в данном случае кремния, в результате переноса из абразивного инструмента, было принято в качестве количественного критерия интенсивности механико-химического взаимодействия пары абразив-металл при шлифовании.

По данному критерию дана оценка механико-химического взаимодействия пары абразива и 12-ти d-переходных металлов Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni. Оценивали, как перенос металла на площадку износа абразивного материала, так и перенос абразивного материала. Наибольший перенос металла и карбида кремния происходит при микроцарапании и шлифовании титана, как металла, обладающего высокой адгезионной активностью к карбиду кремния. Для адгезионно активных металлов интенсивность контактного взаимодействия пары абразив-металл при шлифовании является определяющим фактором в износе абразивного инструмента.

Высокая адгезионная активность титана и его сплавов оказывает существенное влияние на состояние обработанной поверхности. При черновом шлифовании титанового сплава кругом из карбида кремния характеристики 63CF60K7V без применения СОТС в результате адгезионно-когезионных процессов на обработанной поверхности образуются налипы металла, толщина которых достигает 2 и более мкм, происходит существенное изменение химического состава поверхностного слоя титанового сплава. В отдельных участках обработанной поверхности формируется многослойная структура, состоящая из 2–3 слоев. Толщина многослойной структуры без учета налива составляет 2–4 мкм. В слое налива толщиной около 0,6 мкм установлено повышенное содержание атомов кремния, что объясняется их переносом из

абразивного материала при шлифовании. В наибольшей степени от 20 до 100 раз возрастает массовая концентрация атомов кислорода, углерода и азота.

Так как во всех перечисленных направлениях исследований (износ материалов, струйная обработка, обработка свободным абразивом) предметом исследования являются внедренные абразивные частицы на металлической поверхности, полученные закономерности могут согласовываться с закономерностями шаржирования при шлифовании. Основным инструментом исследования шаржирования является растровая электронная микроскопия. Во всех перечисленных областях используется описание морфологии, основанное на изображениях исследуемой поверхности, полученных в режиме вторичных электронов. Этот метод позволяет наиболее точно оценить расположение микрообъектов и их линейные размеры благодаря высокой разрешающей способности. Съемка поверхности в режиме обратно-рассеянных (отраженных) электронов, позволяющая визуализировать разницу в среднем атомном номере участков поверхности обладает меньшей точностью, однако получила не меньшее распространение, чем вторичные электроны. В ряде исследований авторы подтверждают факт переноса материала на основании изображения в отраженных электронах [48, 49, 69]. Изображения так же позволяют оценить количество перенесенных частиц [48], что является важным параметром во многих исследованиях гидроабразивной обработки. Существует так же альтернативный метод количественной оценки шаржирования – травление поверхностного слоя, сбор абразивных частиц и оценка их массы, формы, количества. Этот метод существенно более трудоемкий и не получил столь же широкого распространения, как оценка по обратно-рассеянными электронам.

В качестве методики по оценке адгезионной, диффузионной, химической активности в области контакта абразив-металл используют, в основном, электронно-зондовый микроанализ (энерго-дисперсионную спектрометрию (ЭДС) или волно-дисперсионную спектрометрию (ВДС)).

Применительно к исследованию процесса шлифования, множество работ посвящено изучению поверхности абразивного круга этими же методами.

Дополнительную информацию о состоянии рабочей поверхности круга в разные моменты времени получают так же при помощи профилометрии и образцов-свидетелей [43].

Как показано выше, интенсивное шаржирование происходит при обработке свободным абразивом. При шлифовании с использованием кругов из традиционных абразивных материалов и алмаза шаржирование происходит. Причиной этому могут быть высокие нагрузки на зерно, низкая твердость круга (то есть низкая прочность удержания зерна), высокая адгезионная активность обрабатываемого материала (при шлифовании титана) или физико-химическое взаимодействие абразива с металлом (использование алмаза при обработке сталей или карбида кремния при шлифовании никеля). В наименьшей степени исследована возможность переноса абразивного материала из кубического нитрида бора (КНБ), который получил широкое распространение благодаря высокой твердости, химической и термической стойкости. Использование такого инструмента позволяет достичь высокого качества поверхностей сталей и труднообрабатываемых материалов [31- 33].

### **1.6. Применения инструмента из КНБ**

Кубическая модификация нитрида бора со структурой цинковой обманки и периодом решетки 0,3615 нм при температуре 25 С была синтезирована Робертом Венторфом в 1957 году в лаборатории «Дженерал Электрик», той же фирмы, которая в 1954 синтезировала алмаз. КНБ был получен из смесей, содержащих бор и азот, путем нагревания в металлической капсуле при температурах 1350-1800 С и давлении более 6 ГПа. Во время первых опытов Венторфом предпринимались попытки снизить значения термодинамических параметров и облегчить аллотропное превращение гексагональной структуры в кубическую используя d-переходные металлы (железо, кобальт, никель) в качестве

катализаторов, так как они оказались эффективными при изменении структуры углерода из гексагональной в кубическую.

Венторфу удалось достичь прямого фазного превращения гексагонального нитрида бора в две плотные формы: кубический сфалеритоподобный нитрид бора (образуется при минимальном давлении 11 ГПа и температуре 1700 С), который устойчив в области высоких температур (до 3700 С), и гексагональный вюрцитоподобный нитрид бора, образующийся при давлении свыше 12,5 ГПа и устойчивый при температуре ниже 20 С [77].

Над практическим получением кубического нитрида бора и определении областей давления и температур позднее работали Кудака, Л.И. Фельдгун, В.Н. Крылов.

На данный момент способы промышленного получения КНБ можно классифицировать по двум признакам:

Для синтеза могут использоваться разные исходные вещества:

1. Получение кубического нитрида бора только из гексагонального (графитоподобного) нитрида бора. Вариант «чистого»  $\alpha$ -BN.

2. Получение кубического нитрида бора из графитоподобного нитрида бора с добавкой кубического (сфалеритного) нитрида бора. Вариант  $\alpha$ -BN +  $\beta$ -BN.

3. Получение кубического нитрида бора из графитоподобного нитрида бора с добавкой гексагонального (вюрцитного) нитрида бора. Вариант  $\alpha$ -BN +  $\gamma$ -BN.

4. Получение кубического нитрида бора только из вюрцитного нитрида бора. Вариант «чистого»  $\gamma$ -BN.

5. Получение кубического нитрида бора из сочетания вюрцитного и сфалеритного нитрида бора. Вариант  $\gamma$ -BN +  $\beta$ -BN.

6. Получение кубического нитрида бора только из сфалеритного нитрида бора. Вариант «чистого»  $\beta$ -BN.

7. Получение кубического нитрида бора из сфалеритного нитрида бора с добавлением керамических связей из тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов металлов. Вариант  $\beta$ -BN + керамика [78].

Так же можно классифицировать технологии синтеза с физико-химической точки зрения:

1) Способы, при которых под действием высокого статического или ударно-волнового давления происходит спонтанный переход гексагонального нитрида бора в кубическую и вюртцитную структуру. Данными способами занимались Г.А. Ададуров, Г.З. Алиев, Л.Ф. Верещагин, Л.Н. Буракова, Ф.П. Банди, Р.Г. Венторф.

2) Способы химического получения кубического нитрида бора при давлениях, близких к нормальным, не получившие широкого распространения, которыми занимался Фрушер Р.Г.

3) Способы, в основе которых лежит определенная химическая реакция, происходящая при сверхвысоких давлениях. Один из данных способов был запатентован Р. Венторфом.

4) Способы, основанные на аллотропном переходе гексагонального нитрида бора в кубический при высоких давлениях и температуре в присутствии инициатора. Над данными способами работали во ВНИИ Абразивов и получили патенты более чем в 40 странах мира (№1316045 (Англия), №1316045 (Франция)).

Инструмент из КНБ получил широкое распространение в абразивной обработке. Шлифовальные круги, изготовленные из этого материала отличаются следующими особенностями:

- наилучшая износостойкость при обработке сложнолегированных сталей и сплавов, чугуна и других металлических материалов
- высокая теплостойкость и теплопроводность
- химическая стойкость

При обработке металлических изделий распространено применение инструмента на керамической связке. Высокая твердость и наличие пор обеспечивает эффективную обработку, а хрупкость связки позволяет осуществлять правку инструмента для поддержания режущей способности и создания необходимого микропрофиля рабочей поверхности круга [79]. Возможность правки кругов на керамической связке является важным

преимуществом над металлическими связками, так как поддержание их режущей способности в случае затупления затруднительно [80].

В наилучшей степени износостойкость КНБ характеризует тот факт, что коэффициент шлифования для такого инструмента выше, чем для кругов из корунда и карбида кремния, в зависимости от среды, в 10-100 раз [81].

Благодаря своим свойствам, КНБ широко применяется при обработке особо ответственных деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе никеля и титана, в наиболее требовательных отраслях промышленности, например, в авиации [82-84].

### **1.7. Износ кристаллов КНБ при шлифовании**

Установлено превосходство кругов из КНБ на керамической связке по сравнению с кругами на органических связках и кругами из электрокорунда при шлифовании стали [82]. Сообщается, что при шлифовании титановых сплавов и композитов применение инструмента из КНБ позволяет снизить силу резания и контактную температуру в 2 раза [85].

В работе, посвященной исследованию влияния метода охлаждения на процесс шлифования низкоуглеродистой стали, установлено, что при съеме припуска в 0,2 мм износ зёрен КНБ отсутствует [86].

При шлифовании быстрорежущей стали кругами из кубического нитрида бора существует область начального износа и установившегося износа. В области установившегося износа происходит снижение плотности распределения режущих кромок с увеличением снятого припуска. Изменение распределения режущих кромок тесно связано с изменением сил резания, температурой обработки и шероховатостью обработанной поверхности: снижение количества режущих кромок ведет к снижению сил резания и увеличению значения шероховатости [83].

Были испытаны круги из кубического нитрида бора на керамической связке при шлифовании быстрорежущей стали и никелевого сплава. Абразивные зерна КНБ, входящие в состав круга, были получены разными методами, однако физико-механические и химические свойства кристаллов не отличались (зернистость 120/140 мкм). При использовании этих кругов была установлена существенная разница в износе и удельной энергии шлифования. Исходя из этого, процесс резания и износа кристаллов во время операции шлифования зависит от сложного набора свойств, которые включают параметры разрушения зерна и связи КНБ с керамической связкой при выбранных параметрах шлифования [84].

В работе [87] было рассмотрено влияние метода получения и, соответственно, микроструктуры кристаллов КНБ на их свойства, в том числе, механизм износа.

С целью количественной оценки явления самозатачивания в работе [88] была разработана методика, позволяющая с помощью последовательного наблюдения с *3D-SEM* оценить разрушение абразивных зёрен, образование новых режущих кромок и изменение их параметров на основе фрактального анализа.

При шлифовании никелевого сплава кругом из КНБ зернистостью 70/80 мкм при скорости 120 м/с наблюдались три вида износа абразивных зёрен: микро-износ (истирание), макро-износ (скалывание) и адгезионный износ (налипание). Истирающий износ зерна вызван трением о заготовку, что приводило к притуплению вершин зёрен и возникновению площадок износа. Увеличение площади плоской поверхности приводит к росту трения между абразивными зёрнами и поверхностью заготовки, вследствие чего происходит повышение силы резания, чрезмерное выделение тепла и низкое качество обработки. Когда нагрузка, приходящаяся на абразивное зерно, превысит его предел прочности, происходит скалывание. С одной стороны, разрушение зёрен, связанное с этим типом износа, приводит к потере абразивного материала, что оказывает значительное влияние на микропрофиль круга. С другой стороны, этот тип износа зёрен полезен, поскольку уменьшает изношенную плоскую область и позволяет образовывать новые режущие кромки. В области со следами скалывания

абразивных зерен наблюдалось лишь незначительное налипание обрабатываемого материала на поверхность круга.

Проведены исследования по сравнению износа единичного зерна из кубического нитрида бора с износом круга из КНБ на керамической связке. Установлено, что величина износа единичного зерна коррелирует с радиальным износом круга. Таким образом, износ можно разделить на следующие стадии: микроизнос вершины, связанный с истиранием, самозатачивание зерна с образованием новых режущих кромок, их затупление и разрушение зерна с вырыванием зерна из связки. Стоит отметить, что скалывание зерна приводит к снижению сил и улучшению условий резания [89].

Таким образом было установлено, что одним из факторов, обеспечивающих эффективность применения инструмента из КНБ является механизм износа его кристаллов: в благоприятных условиях резания происходит самозатачивание абразивных зёрен, которое увеличивает срок работы инструмента, снижает силы резания, температуру, износ. При шлифовании труднообрабатываемых материалов может происходить преждевременное разрушение абразивных зёрен с вырыванием частиц из связки и повышением значения износа. Это объясняет повышенное внимание исследователей к изучению износа зёрен из КНБ, ведущемуся в последнее время.

Описанный выше износ характерен для монокристаллических зерен КНБ. С целью снижения износа инструмента из кубического нитрида бора были разработаны поликристаллические зерна (пКНБ). Их интенсивное самозатачивание позволяет снизить силы резания, температуру и износ, а также увеличить длительность стабильного износа, происходящего до разрушения зерна [90, 91].

Зерна пКНБ обладают лучшей износостойкостью и эффективностью шлифования благодаря своей структуре с несколькими режущими кромками, возникающими вследствие износа, снижающими силы шлифования, износ и шероховатость поверхности [92].



Установлено, что увеличение скорости резания уменьшает область износа зерна, приводя к уменьшению частиц, которые откалываются вследствие самозатачивания (рисунок 1.7). Рассчитан оптимальный диапазон глубин резания никелевого сплава абразивным зерном, который составляет 0,2–0,4 мкм. При этих значениях разрушение КНБ может быть сведено к минимуму для повышения перспективной способности к самозатачиванию абразивных зёрен. Большие значения глубины резания могут привести к образованию макро-износа и разрушению зерен пКНБ [93].

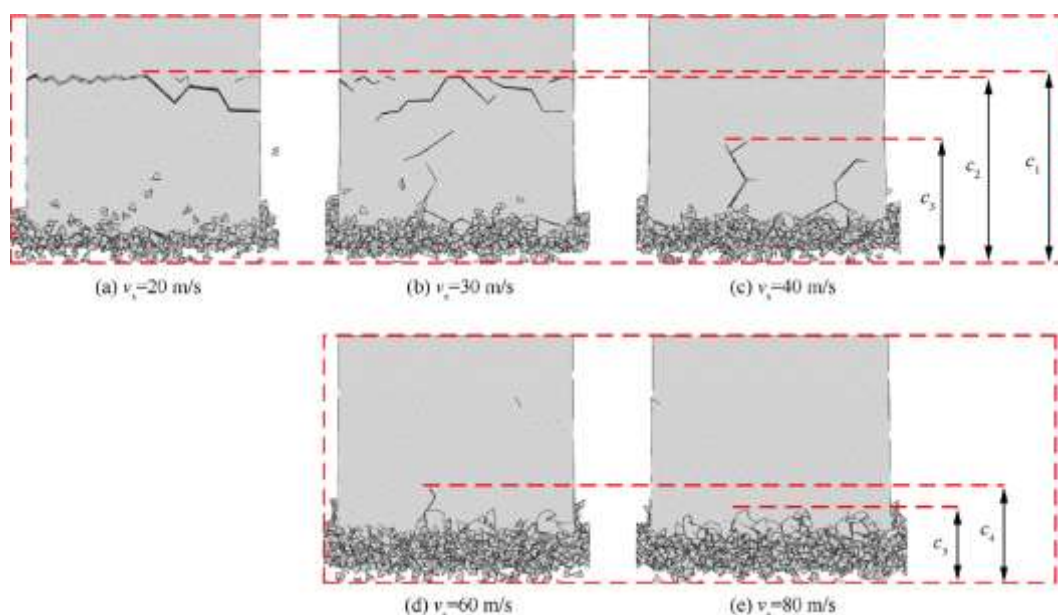


Рисунок 1.7 – Величина зоны разрушения зерна КНБ при различных скоростях резания

Проведены исследования влияния формы абразивных зёрен на процесс шлифования КНБ. Установлено, что удельная энергия шлифования зависит от формы порошков КНБ, а износ круга пропорционален соотношению коэффициента формы зёрен КНБ и общей опорной поверхности контактной зоны круг-заготовка [94].

Разработана двумерная конечно-элементная модель, позволившая исследовать внутренние напряжения, возникающие в зёрнах пКНБ при шлифовании. В статье детально рассматриваются закономерности возникновения остаточных напряжений в зерне КНБ, влияние этих напряжений на разрушение зерна,

локализацию напряжений, износа и т.д. На основе результатов численного моделирования очевидная концентрация напряжений возникает в области сопряжения зерна со связкой и области вершины зерна. Кроме того, пиковые значения распределения напряжений в зернах пКНБ тесно связаны с поведением износа/разрушения при шлифовании. Экспериментальная проверка показывает, что поведение износа зерна пКНБ, соответствующее микроразрушению, в основном происходит вокруг области вершины зерна, в то время как поведение разрушения, связанное с макроразрушением, в основном происходит вокруг границы связи зерна со связкой, которая противоположна направлению подачи.

Толщина стружки, снимаемой единичным зерном оказывает значительное влияние на напряжения и износ/разрушение зерна пКНБ во время шлифования. Для снижения вероятности возникновения макроразрушений, связанных с вырыванием зерна, рекомендуется снижать толщину стружки, снимаемой единичным зерном до 1 мкм при шлифовании никелевых сплавов (инконель и ФГХ96) [95, 96].

В качестве метода снижения адгезионной активности между обрабатываемым материалом (титановыми композитами) и абразивными кругами, исследованы технологии применения сверхтвердых инструментов в ультразвуковом шлифовании, которое позволяет снизить толщину стружки, снимаемой единичным зерном, силы резания, шероховатость поверхности. Этот метод так же способствует увеличению длительности стабильного износа за счёт стабилизации процесса самозатачивания как КНБ так и микрокристаллического корунда [97].

Наиболее распространенным методом снижения теплосиловой нагрузки в зоне резания является использование СОТС. Благодаря высокой теплопроводности зёрен КНБ, использование сверхтвердого абразивного инструмента позволяет повысить эффективность применения смазки минимальным количеством жидкости (MQL). В работе [98] приводятся данные, свидетельствующие о том, что комбинация смазки минимальным количеством жидкости с очисткой поверхности круга воздушной струей позволяет достичь тех же показателей шлифования, что и с использованием традиционного метода

охлаждения. Сообщается, что сочетание смазки методом MQL с высокой теплопроводностью шлифовального круга из КНБ способствовало адекватному отводу тепла, позволило избежать тепловых повреждений заготовок при различных режимах подачи жидкости.

Другим актуальным направлением совершенствования процесса обработки является высокоскоростное шлифование. Использование инструмента из КНБ на скоростях резания выше 80 м/с позволяет увеличить стойкость инструмента и производительность, снизить шероховатость заготовки [99, 100]. Например, при шлифовании никелевого сплава была определена оптимальная скорость шлифования (по критериям: потребляемая мощность, температуры, силы, шероховатость), которая составила 120 м/с, при которой наблюдались минимальные значения шероховатости (0,4 мкм) и отсутствовали структурные изменения в поверхностном слое [101].

В результате проведенного анализа установлено, что использование сверхтвердых абразивных материалов, в частности, кубического нитрида бора, положительно влияет на качество обрабатываемых поверхностей. Высокая твердость инструмента обеспечивает низкий износ инструмента, что повышает точность и производительность обработки. Высокая теплопроводность и теплостойкость позволяет использовать КНБ при шлифовании труднообрабатываемых материалов, таких как титановые, никелевые, твердые сплавы и сложнолегированные стали.

Свойства нитрида бора позволяют эффективно использовать технологии, повышающие качество, производительность и экономичность операций шлифования, например, высокоскоростное шлифование, применение УЗК, MQL. Совершенствование технологий обработки за счёт применения КНБ является одним из актуальных направлений.

В большинстве приведенных работ важнейшими показателями, определяющими эффективность применения инструмента из КНБ или технологии, предусматривающей его использование, являются качество обработанной поверхности и стойкость инструмента. Во многих работах

рассматривается связь этих показателей. Подробным образом рассмотрены механизмы разрушения зёрен КНБ, в результате чего установлено, что самозатачивание с отделением микроскопических частиц является фактором, позитивно влияющим на процесс шлифования: образование новых режущих кромок снижает тепловыделение в зоне резания, предотвращает интенсивное адгезионное взаимодействие пары абразив-металл, повышает эффективность удаления материала. В совокупности эти факторы приводят к улучшению качества поверхности: устраняются прижоги, снижается шероховатость, количество налипов и глубина структурных изменений в поверхностном слое. Позитивное влияние самозатачивания на качество поверхности привело к повышенному вниманию исследователей к инструменту с повышенной, в том числе контролируемой самозатачиваемостью, одним из примеров которой является поликристаллический кубический нитрид бора.

Не смотря на многочисленные исследования износа и его связи с качеством поверхности, в приведенных работах не рассматривается возможность переноса сколовшихся частиц на обрабатываемую поверхность. Изображения обработанных поверхностей, приведенные во множестве работ, не свидетельствуют о возможности шаржирования при шлифовании с использованием КНБ. При этом большая часть рисунков направлена на подтверждение успеха примененных авторами технологических решений и могут не отражать некоторых особенностей реальной поверхности (рисунок 1.8).

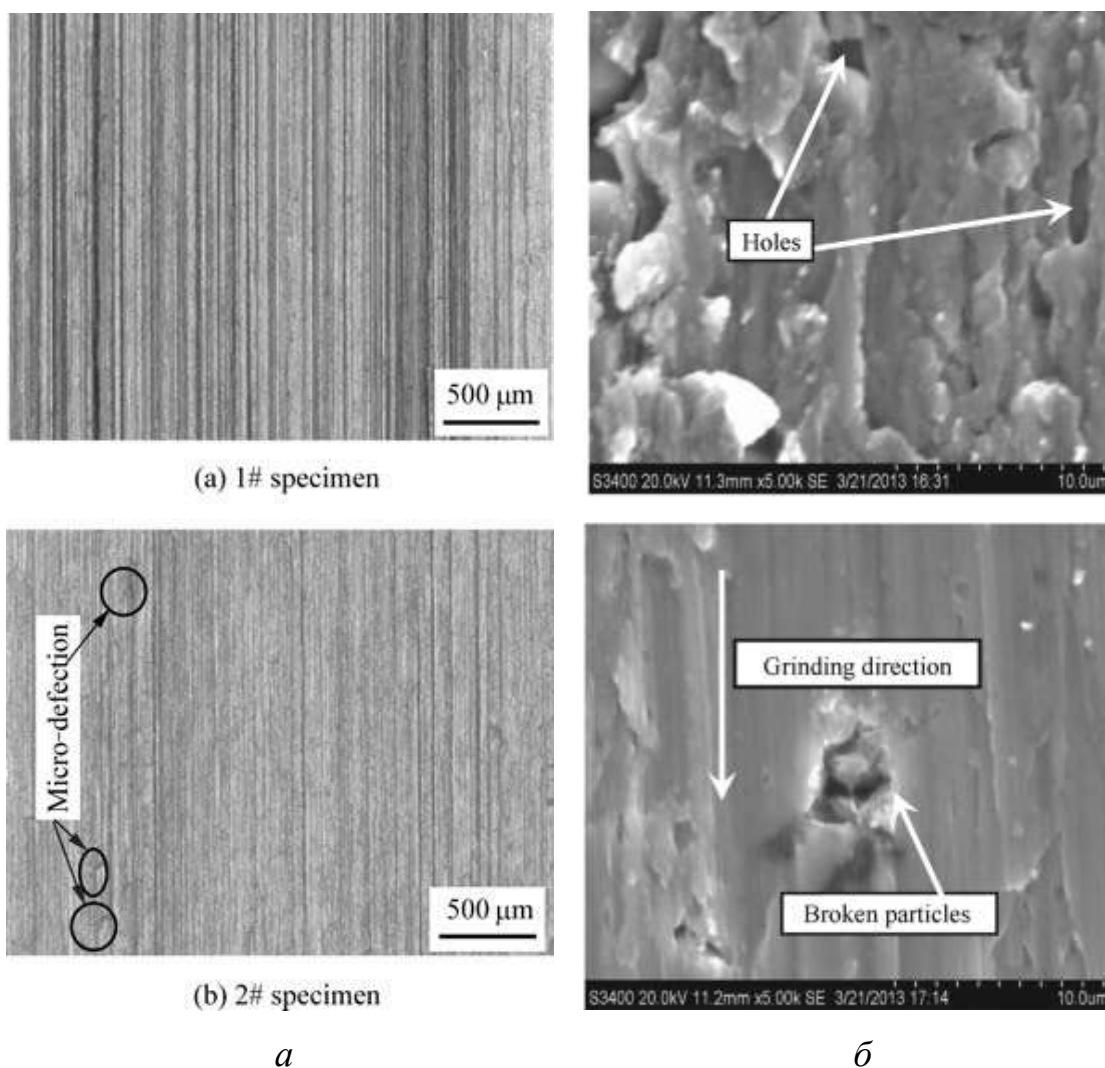


Рисунок 1.8 – Морфология поверхности титанового сплава приведенная в работе: (а) [102], (б) [103].

## 1.8. Выводы

Обобщая данные, полученные в результате литературного анализа был сделан вывод о том, что одним из значимых дефектов поверхности является наличие шаржирующих абразивных зёрен в обрабатываемую поверхность. Исследования, проведенные ранее, демонстрируют возможность внедрения в обрабатываемую поверхность различных абразивных материалов, таких как карбид кремния, корунд, кварцевый песок, гранат, алмаз. Большая часть таких работ проведена для

операций обработки свободным абразивом или доводке, однако известно, что явление шаржирования происходит и при шлифовании.

Известно, что шаржированию могут быть подвержены как относительно мягкие пластичные адгезионно-активные материалы, такие как титановые и никелевые сплавы, так и твердые инструментальные материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы. Очевидно, что при шлифовании шаржирование происходит вследствие износа абразивного инструмента – вырывания зёрен из связки и скалывания микрообъемов абразивного материала с режущих зёрен. После вырывания/скалывания абразивная частица перестаёт быть частью шлифовального круга, следовательно, для неё справедливы рассуждения, представленные в работах, посвященных обработке свободным абразивом (гидроабразивная резка и песко- и дробеструйная обработка), заключающиеся в том, что склонность к внедрению частицы зависит от множества факторов, таких как свойства обрабатываемого материала, количества частиц, поражающих единицу площади и склонности этих частиц к внедрению, их форма и импульс.

Вырывание зерна из связки является крайне нежелательным видом износа. Вследствие такого износа ухудшается точность обработки, шероховатость поверхности. С другой стороны, скалывание микрообъема абразивного материала рассматривается исследователями как процесс, положительно влияющий на обработку шлифованием. Вследствие образования новых режущих кромок, улучшается режущая способность зерна, снижаются теплосиловые нагрузки в зоне резания, что предотвращает возникновение дефектов. Таким образом возникает противоречие: известно, что скалывание абразивных зёрен позитивно сказывается на процессе шлифования и качестве поверхности, с другой стороны, это может привести к шаржированию, которое является значительным дефектом для ряда изделий и нежелательным явлением для большинства.

Актуальными вопросами, связанными с шаржированием при шлифовании инструментом из КНБ являются:

- 1) Инструмент из КНБ широко применяется на операциях чистового шлифования, способствуя повышению качества обработки, в том числе, за счёт

самозатачивания. Возможность шаржирования сколовшихся абразивных частиц, а также остальных компонентов шлифовального круга не рассмотрена;

- 2) Влияние внедренных частиц на структуру поверхностного слоя;
- 3) Возможность оценки интенсивности шаржирования продуктами износа АИ из КНБ существующими методами;
- 4) Распределение шаржированных зёрен на поверхности;
- 5) Закономерности процесса и его связь с показателями обработки и свойствами материалов.

На основании анализа литературных источников определены цель и задачи исследования.

## **2. Методика проведения экспериментальных исследования**

### **2.1. Выбор материалов для исследования шаржирования**

В результате литературного обзора установлено, что шаржирование является весьма значимым дефектом абразивной обработки. Предположительно, ИШ зависит склонности абразивного инструмента к самозатачиванию, в связи с чем происходит отделение микро- и макро объемов абразивного материала с рабочей поверхности шлифовального круга. Внедрение шаржированных частиц является закономерным при работе инструмента в режиме самозатачивания. Возможность правки и обновления режущих кромок за счёт скалывания микрообъема материала (самозатачивания) является одним из преимуществ шлифовальных кругов на керамической связке. Исходя из этого, логично рассматривать влияние шлифования таким инструментом на морфологию и химический состав поверхностей, так как их применение обеспечивает повышение качества обработки.

Подавляющее большинство исследований качества поверхности последних лет направлены на изучение морфологии и свойств поверхностей труднообрабатываемых сплавов. Наиболее частыми представителями таких материалов являются титановые, никелевые, кобальтовые сплавы и стали, широко представленные в литературе. Известно, что свойства различных марок материалов может значительно отличаться, в зависимости от легирующих элементов, способа получения и структуры. С другой стороны, основным фактором, влияющими на морфологию и химический состав поверхности, является основной элемент, входящий в состав сплава [104]. Например, для большинства титановых сплавов характерна высокая адгезионная активность, приводящая к образованию развитой морфологии, включающей налипы, навалы царапин и т. д [75]. Исходя из этого в качестве обрабатываемых материалов предложены металлы титан, железо, кобальт и никель. Состав этих металлов



подбирали таким образом, чтобы обеспечить максимальную достоверность исследования поверхностей методами РЭМ и ЭДС. Для этого содержание примесей должно быть минимально. В таблице 1 приведены марки металлов, использованные в работе.

Таблица 2.1. Обрабатываемые материалы.

Марка металла	BT1-00	Сталь 10895	K0	H1
Основной элемент	Ti	Fe	Co	Ni
Содержание элемента, % масс.	<99,6	<99,8	<99,9	<99,9

В качестве абразивного инструмента выбраны круги на керамической связке 1A1 350×16×127×5 *CBN30B126M100%V*, *CBN30B126O100%V*, *CBN30B251K100%V* производства АО НПК «Абразивы и шлифование».

Использованы следующие методы правки: точением (осуществляли алмазным карандашом 3908-0061) и обкаткой (релитовым диском). Режимы правки: припуск 0,1 мм; радиальная подача 0,01 мм/ход; скорость круга при правке точением 35 м/с, при обкатке 5 м/с.

Обработка выбранных металлов проведена с использованием рекомендованных [105] чистовых режимов обработки. Скорость резания 35 м/с, скорость продольной подачи стола станка 12 м/мин; радиальная подача 0,005 мм/ход. Для исследования шаржирования металлов КНБ на начальном этапе применялась методика, предложенная в работе [30]. Её суть заключалась в изготовлении образцов-свидетелей, с площадью поверхности 8×12 мм. Перед началом опыта круг делал 4 хода по образцу свидетелю, копирую собственный микропрофиль на поверхность металла.

## 2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальная часть по плоскому маятниковому шлифованию металлов кругами из кубического нитрида бора проведена на прецизионном профилешлифовальном станке *CHEVALIER* с числовым программным управлением модели *Smart-B1224III* (Рисунок 2.1). Данный станок позволяет бесступенчатую регулировку скорости вращения шпинделя, что позволяет сохранять заданную скорость шлифования при уменьшении диаметра круга. Дискретность перемещений по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  позволяет обеспечить высокую точность позиционирования и равномерность съема материала при шлифовании. Станок оснащён магнитной плитой, системой подачи СОЖ, расход которой составляет 14 л/мин.



Рисунок 2.1. Внешний вид станка CHEVALIER Smart-B1224III

После шлифования образцы очищали обдувочным пневмопистолетом (давление воздуха 6 МПа) и погружали в ультразвуковую ванну *Dibea DADI DA-968* (рисунок 2.2а) в среде этилового спирта. Очистка вели при мощности 50 Вт с частотой 40 кГц на протяжении 15 минут. Извлеченные из спирта образцы герметично упаковывали.

Измерение износа рабочей поверхности периферии круга проводили в 8 радиальных сечениях, в каждом из которых износ замерялся в 6 осевых сечениях на базовой поверхности и 6 сечениях на рабочей поверхности. Измерения проводили с помощью микрометрической измерительной головки МИГ-1 ГОСТ 9696-82, представленной на рисунке 2.2б. Основные технические характеристики:

цена деления 1 мкм, предел измерения 0-1 мм, допускаемая погрешность 2 мкм/оборот (2,5 мкм/мм), измерительное усилие 2 Н, диаметр наконечника щупа 2 мм. Головку, закрепленную в оправке, устанавливали на магнитную плиту стола станка, подвели к шлифовальному кругу так, чтобы щуп был перпендикулярен нормали круга. Измерения осуществляли после приработки наконечника щупа к кругу.



Рисунок 2.2 – а) *Dibeа DADI DA-968*, б) – МИГ-1

Измерение шероховатости поверхности производится профилографом Surftest SJ-410 (рисунок 2.3), позволяющим измерять шероховатость поверхности в соответствии с национальными и международными стандартами. Основные технические характеристики: диапазон измерений до 800 мкм, погрешность до 3% от измеренной величины, радиус закругления алмазного измерительного наконечника 5 мкм, измерительное усилие 4 мН. Данный прибор подключался к ноутбуку со специальным программным обеспечением Surftest SJ-Communication-Tool. При помощи этой программы результаты измерения экспортировались на ПК и обрабатывались. Каждый образец был измерен в 10 сечениях. Оценка параметров шероховатости проводилась по стандарту ISO 1997. Оцениваемые параметры:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{km}$ ,  $R_c$ ,  $RP_c$ ,  $RS_m$ ,  $RD_q$ ,  $R_{mer}$ ,  $R_{mr(c)1}$ ,  $R_{mr(c)2}$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_t$ ,  $R_{z1max}$ ,  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ . Длина базовой поверхности согласно ГОСТ 2789-73 0,8 мм, количество базовых длин 5.



Рисунок 2.3 – Профилометр SurfTest SJ-410

Регистрация составляющих силы резания осуществлена шестикомпонентным силоизмерительным комплексом *AMTI MC36-1000*. Запись осуществлялась при помощи усилителя, аналого-цифрового преобразователя *L-CARD E-14-140* и компьютера с программным обеспечением *PowerGraph Professional*. Регистрация сил резания ведется с частотой 20 кГц, которая задается АЦП, однако собственная резонансная частота динамометра составляет 1000 Гц в продольном и 1400 Гц в вертикальном направлении.

Обработка составляющих силы резания ведется в той же программе, что и регистрация – *PowerGraph Professional*. Данная программа предназначено для регистрации, редактирования и математической обработки данных, полученных с помощью АЦП. С её помощью были получены средние и максимальные значения продольной и вертикальной составляющих силы резания за ход стола станка.

Исследования морфологии и элементного состава поверхностей *d*-переходных металлов после шлифования кругами из КНБ и алмаза было осуществлено на растровом двухлучевом электронном микроскопе *Versa 3D FEI*. Большой диапазон разгоняющего напряжения от 50 В до 30 кВ в режиме электронов и 500 В – 30 кВ в режиме ионов позволяет получать разрешение изображения до 0,8 нм.

## 2.3 Методы исследования

Профилограммы, полученные при измерении шероховатости поверхности, были использованы для расчёта количества зёрен, оставивших след на обработанной поверхности. Из набора координат точек, описывающих микропрофиль обработанной поверхности, после фильтрации, были выделены все впадины. Из координат впадин было составлено распределение, описывающее высоту зёрен, оставивших след на обработанной поверхности. Сопоставление распределений, полученных на разных металлах в различных условиях шлифования позволяет оценить изменение профиля рабочей поверхности шлифовального круга, происходящее вследствие взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Расчет температурных кривых, описывающих тепловые поля, возникающие в заготовке при взаимодействии с абразивным материалом из КНБ, произведен по известной методике [106].

Теоретические основы использованных методов растровой электронной микроскопии для исследования поверхности изложены в работах А.В. Смирновой [107], Д.Н. Гоулдстейна [108, 109], Г. Шиммеля [110], Д. Синдо, Т. Оикава [111].

Получение изображений морфологии поверхностей осуществлялось путём регистрации вторичных электронов. Этот метод позволяет наиболее точно оценить линейные размеры микро объектов. Получены изображения в обратно-рассеянных (отраженных) электронах. Отраженные электроны позволяют оценить разницу в среднем атомном номере материала (элементы с высоким значением атомного номера имеют более высокий градационный уровень яркости). Разработан способ, позволяющий измерить параметры шаржирования по изображениям поверхности в обратно-рассеянных электронах [112].

Для оценки элементного состава точки, участка поверхности или изменения элементного состава по мере удаления от объекта был использован метод энергодисперсионного микроанализа, суть которого заключается в том, что в результате неупругого взаимодействия между электронами и материалом образца

генерируется характеристическое рентгеновское излучение, которое, регистрируется энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС). Результатом регистрации является построение спектра на основании измеренной энергии характеристического рентгеновского излучения и сравнении их с интенсивностями соответствующих линий образцов.

На рисунке 2.4 приведены пример оценки элементного состава одной точки (7а), линии (7б), участка поверхности (7в) и пример спектра (7г).

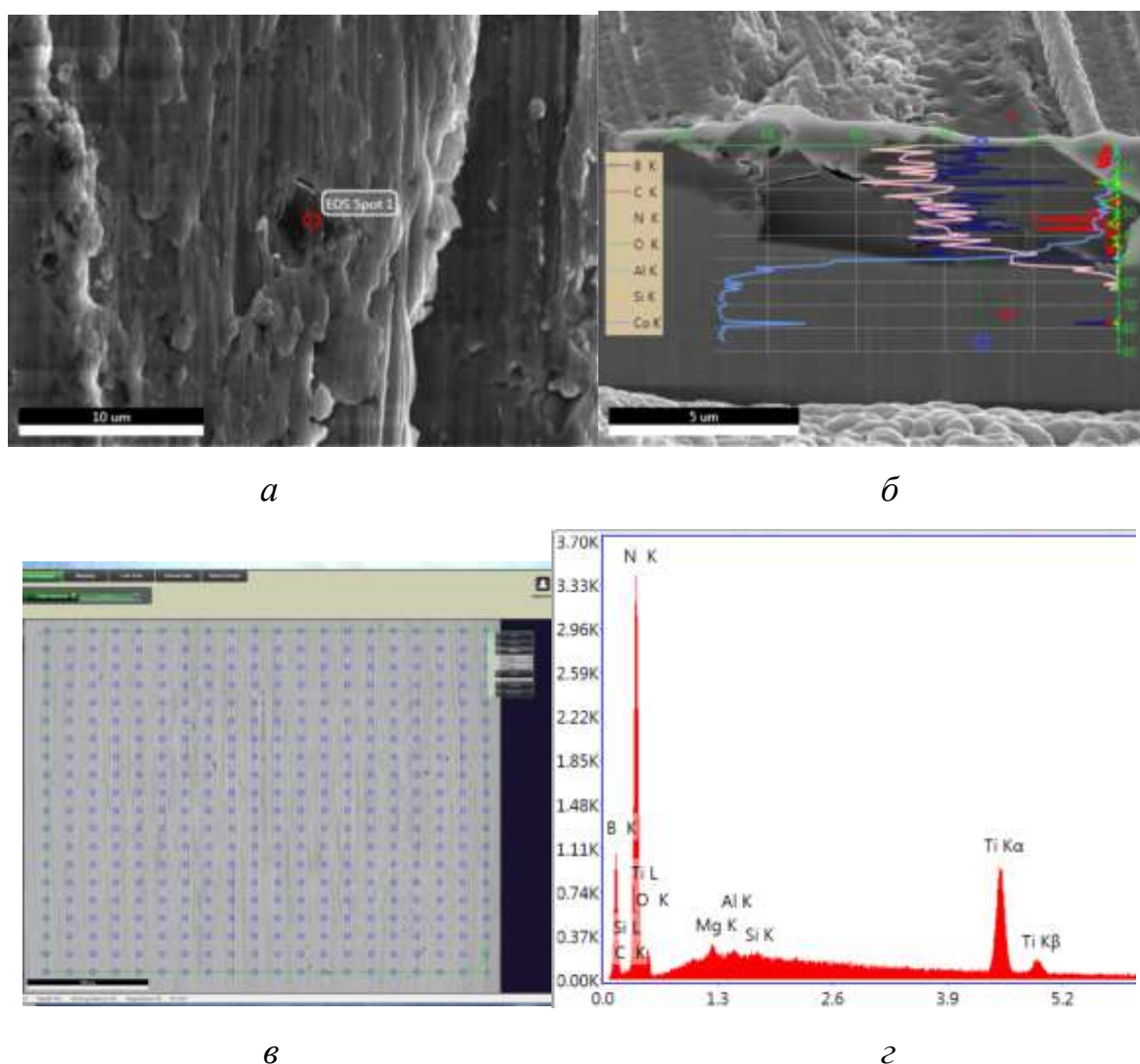


Рисунок 2.4 – Энергодисперсионный анализ (а) точки; (б) линии; (в) множества точек; (г) пример спектрограммы

Для создания изображений поперечных сечений проводилось ионное травление материала заготовки ионами галлия. Для того, чтобы не повредить

исследуемую поверхность, по линии будущего реза наносится защитный слой платины. После этого область, которая подвергается травлению, бомбардируется ионами. На рисунке 2.5 представлена последовательность получения изображений с поперечного сечения поверхности на примере кобальта. Стоит отметить, что изображения, полученные путем регистрации вторичных электронов, возникших в результате взаимодействия вещества с пучком ионов, отличаются от аналогичных, полученных пучком электронов. Дело в том, что ион отличается массой, вследствие чего может приобретать больший импульс, а также он больше, что уменьшает глубину проникновения ионов по сравнению с электронами при равных энергиях. Следствием этих факторов является отличный механизм взаимодействия с поверхностью – ионный пучок, вступая по взаимодействию с веществом, удаляет атомы с поверхности образца. Однако по полученным изображениям можно судить о структуре материала.

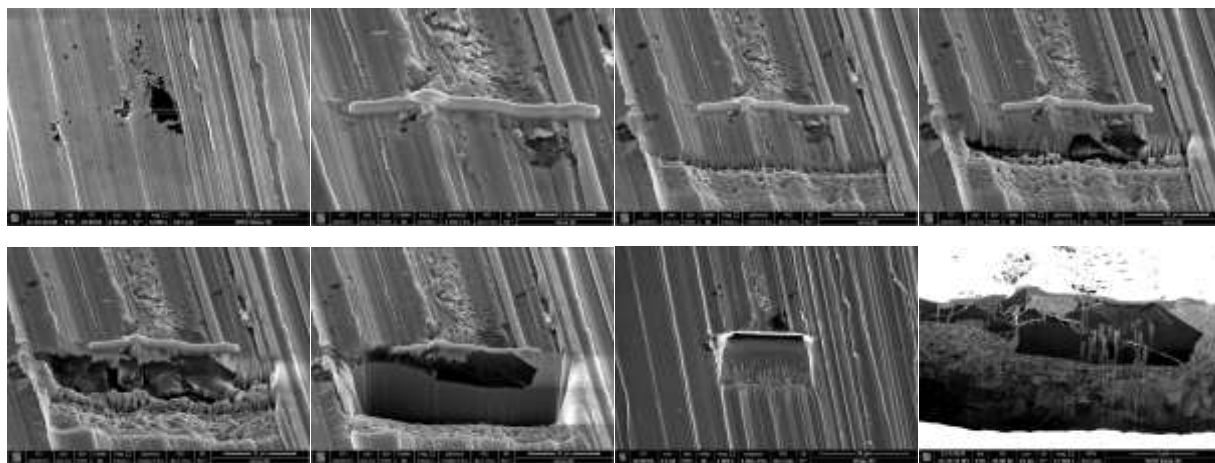


Рисунок 2.5 – Этапы получения поперечного сечения в ионном излучении

### 3. Исследования морфологии и шаржирования поверхности при шлифовании

#### 3.1. Влияние условий обработки на показатели процесса шлифования

Время обработки при шлифовании можно разделить на два этапа: приработку (начальный этап) и установившееся шлифование. На начальном этапе обработки происходит активное изменение рабочей поверхности шлифовального круга, сопровождающееся отделением слабо закрепленных абразивных зёрен, поврежденных в процессе правки, с образованием новых режущих кромок. Этот процесс сопровождается изменением силы резания, которая в начальный момент времени растёт, а после снижается до уровня, характерного для установившегося шлифования. Во время установившегося шлифования предпочтительным является износ абразивных зёрен путем скалывания микрочастиц. За счёт этого происходит самозатачивание инструмента, то есть образование новых режущих кромок. Такой режим работы приводит к снижению теплосиловой нагрузки и улучшению качества обработанной поверхности.

Показателем эффективности удаления материала может являться отношение составляющих сил резания  $P_y/P_z$  [113]. Согласно работе [114], при обработке титановых сплавов характерно значение этого отношения от 1,5 до 3. При обработке кругами с характеристиками *B126M* и *B251K* отношение  $P_y/P_z$  составляет 1,8 и 1,6 соответственно. Сила резания кругом *B251K* выше, что противоречит представлениям о влиянии твердости и зернистости на процесс обработки [115]. Вероятно, это вызвано участием в резании наполнителя из электрокорунда, зернистость которого на 4-6 номеров ниже зернистости основного абразивного материала (КНБ).

После шлифования кругом *B126M* шероховатость поверхности  $R_a$ , меньше в 1,7 раз, а радиальный износ ниже в 3,5 раза по сравнению с *B251K*. Высокий расход дорогостоящего инструмента из КНБ характеристики *B251K* свидетельствует о



том, что применение этого круга не рационально. В дальнейшей работе использованы данные, полученные при шлифовании титана этим кругом. Железо, кобальт и никель были обработаны кругом с характеристиками *B126M*. Проведены эксперименты по шлифованию кругом *B126O*, при использовании которого на обработанных поверхностях наблюдались цвета побежалостей, свидетельствовавшие о прижоге и не целесообразности применения этого инструмента (рисунок 3.1).

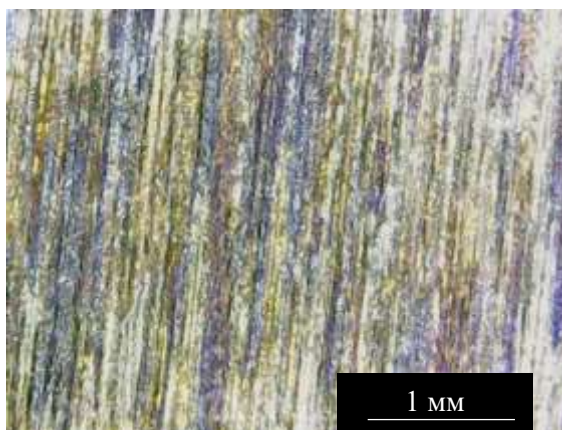


Рисунок 3.1 – Поверхность титана после шлифования кругом  
*CBN30B126O100%V*

Состояние обработанной поверхности титана, после шлифования кругами *B126M* и *B251K* (рисунок 3.2а, б) свидетельствует о высоком адгезионном взаимодействии пары металл-абразивный инструмент. На поверхности титана хорошо различимы царапины, оставленные вершинами зерен абразивного инструмента. По длине большого количества царапин встречаются участки, где траектория царапины прерывается. На обеих поверхностях видны налипсы и пластически деформированный металл. Визуально, после шлифования крупнозернистым кругом налипов меньше, однако на поверхности, даже при низком увеличении, различимы внедренные инородные объекты.

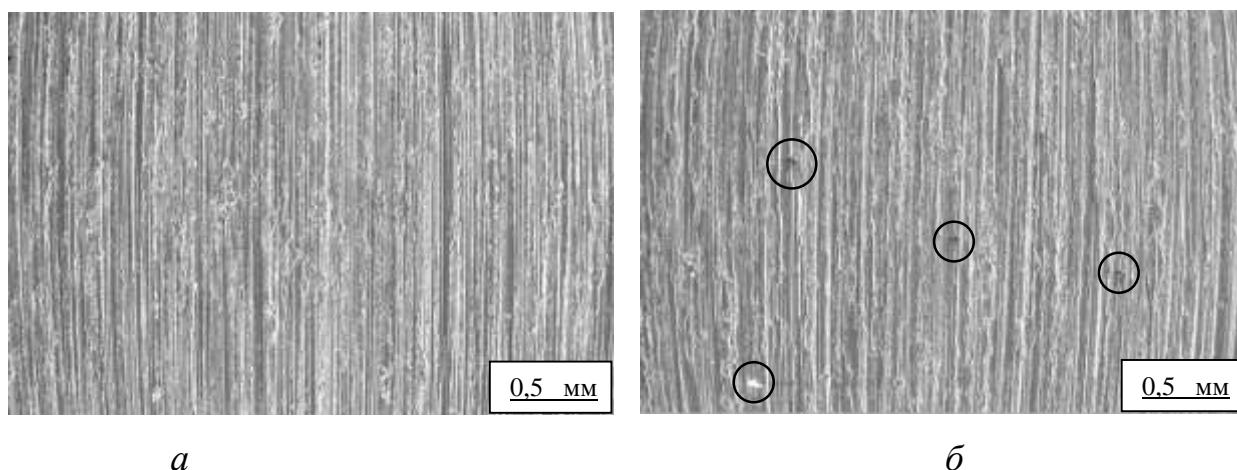


Рисунок 3.2 – Поверхность титана после шлифования кругом а) *B126M*, б) *B251K*

В отличие от традиционных абразивных материалов, таких как карбид кремния и электрокорунд, износостойкость кругов из КНБ позволяет им дольше сохранять микропрофиль, сформированный в процессе правки. С другой стороны, правка такого инструмента является и более сложной задачей, так как твердость абразивных зёрен близка или выше твердости правящего инструмента. Исходя из этого, выбор метода правки шлифовальных кругов из КНБ является важным фактором, влияющим на все параметры процесса и получаемой поверхности, включая её качество и, вероятно, шаржирования. В работе [116] сообщается, что при правке свободным абразивом, рекомендованной ранее для кругов из КНБ [105], может происходить интенсивное шаржирование, связанное с внедрением свободного абразива в поры круга.

При выборе метода правки рассматривалось 3 варианта: правка обтачиванием, правка шлифованием и правка обкаткой (твердосплавным роликом). Для выбора метода были проведены анализ литературных источников [117-122] и представленные ниже исследования.

При обтачивании и шлифовании кругов из СТМ происходит хрупкое разрушение поверхностных абразивных зёрен и связки, которые удаляются при последующих ходах. Правка обтачиванием является наиболее простой и доступной, позволяющей, изменяя значение поперечной подачи, формировать профиль различной шероховатости.

Правка шлифованием алмазным роликом не рекомендована, так как велик расход дорогостоящего алмазного инструмента. Механизм правки обкаткой отличается от рассмотренных выше тем, Твердость абразивного материала (КНБ) выше твердости правящего инструмента (твердосплавного ролика). В процессе правки обкаткой происходит хрупкое разрушение абразивных зёрен и связи под воздействием давления правящего ролика.

На рисунках 3-5 представлены результаты исследований по шлифованию титана марки ВТ1-00 с припуском 0,5 мм, радиальной подачей 0,005 мм/ход, скоростью шлифования 35 м/с, скоростью продольной подачи 12 м/мин. При правке круга *В126М* алмазным карандашом 3908-0061 ГОСТ 607-80 с режимами правки: скорость осевой подачи 200 мм/мин, припуск под правку 0,05 мм, радиальная подача 0,005 мм шероховатость образца может отличаться в 1,6 раз между проведенными повторениями. Силы резания так же значительно различаются. В качестве примера на рисунке 3.3 приведено сравнение составляющей силы резания  $P_y$ , полученной во время шлифования при проведении 3 повторений эксперимента. В результате их анализа установлено, что задаваемый правкой точением микропрофиль рабочей поверхности значительно различается. Кроме того, в зависимости от начальных условий меняется и протекание процесса шлифования. Полученные данные хорошо согласуются с теорией, согласно которой при правке точением кругов из СТМ происходит интенсивный износ алмазного карандаша. На поверхности правящего инструмента формируется плоская площадка износа, которая увеличивается с каждым последующим поперечным ходом стола [105, 119, 121]. Износ алмазного карандаша визуально заметен после правки.

Использование метода обкатки позволило снизить силы резания и добиться удовлетворительной повторяемости проводимых экспериментов (рисунок 3.4). Правка осуществлялась на следующих режимах: припуск 0,05 мм, радиальная подача 0,005 мм, поперечная подача 200 мм/мин, скорость резания 5 м/с (136 об/мин для круга и 2388 об/мин для ролика).

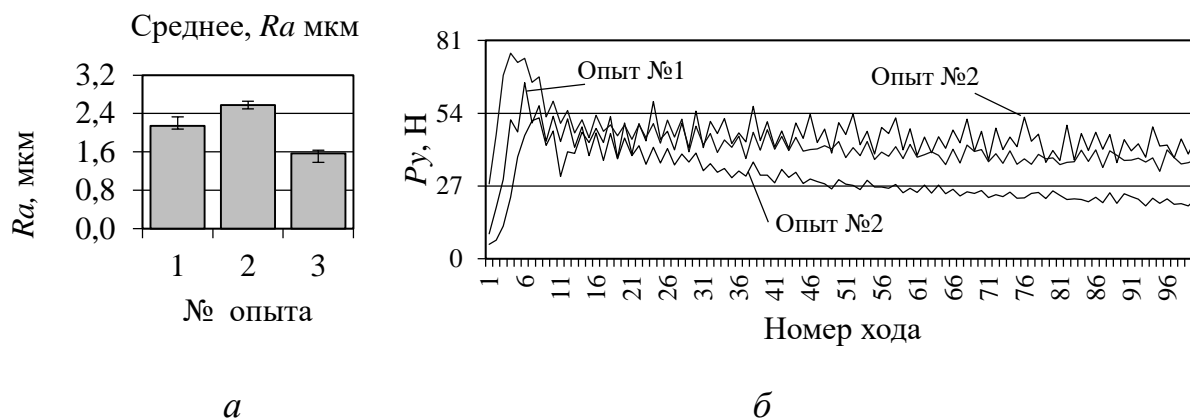


Рисунок 3.3 – Данные, полученные в результате исследований правки круга В126 М алмазным карандашом:

а – шероховатость образцов, б – радиальная составляющая силы резания.

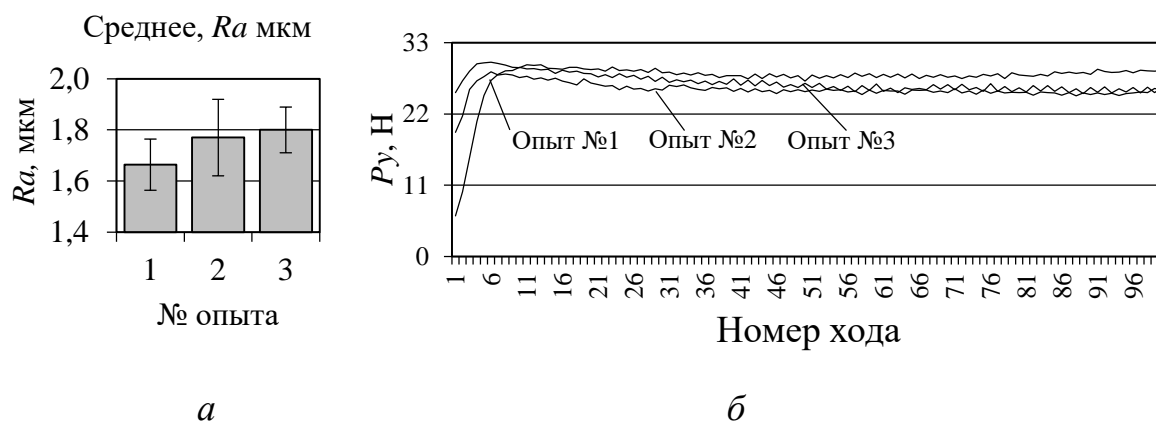


Рисунок 3.4 – Данные, полученные в результате исследований правки круга В126М твердосплавным роликом:

а – шероховатость образцов, б – радиальная составляющая силы резания.

С увеличением снятого припуска при шлифовании кругом, правленным обкаткой, шероховатость значимо не меняется. При правке точением на начальном этапе (после 4-го хода) значение  $Ra$  ниже, чем при правке обкаткой, однако с увеличением припуска до 0,5 мм шероховатость увеличивается в 1,6 раз, с увеличением припуска до 1 мм – ещё в 1,2 раза (рисунок 3.5).

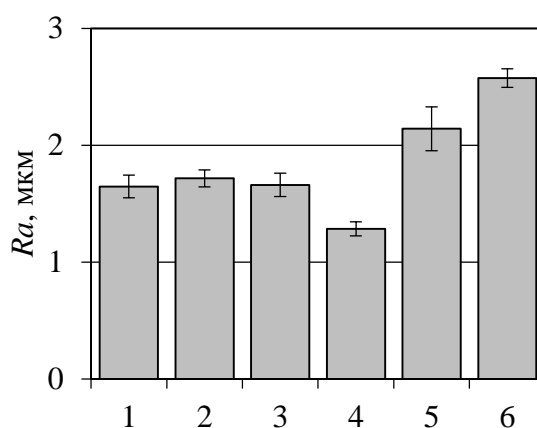


Рисунок 3.5 – Среднее значение  $Ra$  обработанной поверхности титана после шлифования: 1-3 – при правке обкаткой, 4-6 – точением, где 1, 4 – начальный этап обработки, 2, 5 – после съема 0,5 мм, 3, 6 – после съема 1 мм припуска

В общем случае использование обкатки в качестве метода правки абразивного инструмента привело к снижению сил резания и увеличению коэффициента шлифования  $Kg$ .

С точки зрения оценки шаржирования значимым фактором является снижение износа инструмента при правке методом обкатки. Точная оценка разницы для всех металлов затруднительна, так как при таком методе правки, при шлифовании железа и кобальта, не удалось измерить радиальный износ, что свидетельствует о том, что его величина не превышает 2 мкм. Измерение износа и расчет  $Kg$  для указанных металлов проведено при увеличении припуска до 2 мм, полученные значения близки полученным ранее в работе [105]. При шлифовании титана и никеля, использование обкатки позволило повысить  $Kg$  2 раза. В дальнейшей работе рассмотрены поверхности, полученные при шлифовании кругом с характеристикой  $B126M$ , с правкой обкаткой, поверхности титана получены так же при шлифовании кругом  $B251K$  с правкой точением.

### **3.2. Исследование морфология поверхности металлов после шлифования**

#### **3.2.1. Морфология поверхности титана после шлифования кругом характеристики *B251K***

Морфология поверхности титана после шлифования кругом с характеристикой *B251K* свидетельствует об интенсивном адгезионном взаимодействии с абразивным инструментом. На поверхности присутствуют отдельные продольные царапины, оставленные вершинами зерен шлифовального круга, например, на участках 1 и 2 (рисунок 3.6а). В отдельных областях видны следы адгезионного взаимодействия инструмента с поверхностью металла. На этих участках поверхности царапины практически не различимы (рисунок 3.6б). Судя по электронным фотографиям, поверхность обладает слоистой структурой: царапины, оставленные предыдущими зёрнами, покрыты металлом, вытесненным из соседних царапин, на котором могут присутствовать налипы. На отдельных участках поверхность покрыта чешуйками, образование которых связано с высокой локальной температурой контактных поверхностей металла в момент взаимодействия с абразивом. Пластическое течение металла, а также когезионное взаимодействие поверхности образца с металлом, налипшим на абразивные зёрна, индуцировали высокую температуру в зоне резания и образовали развитую морфологию, включающую в себя: слоистую структуру, налипы, навалы, микропоры, чешуйчатость, микротрещины и шаржирование.

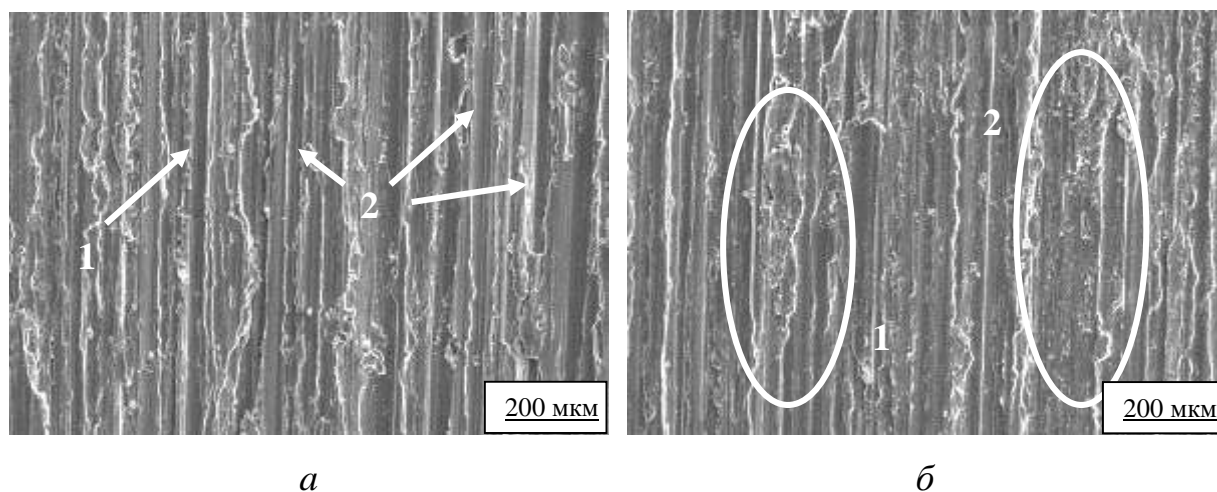


Рисунок 3.6 – Поверхность титана после шлифования кругом *B251K*

При базовом увеличении  $4000\times$  на обработанной поверхности, особенно, на дне царапин заметны, выделяющиеся темным цветом, посторонние включения (рисунок 3.7).

Из представленных на рисунке 3.7а включений, выделены фрагменты 1 и 2. Фрагмент 1 расположен в верхней части царапины, полученной после прохождения зерна шлифовального круга с площадкой износа, ширина которой в направлении перпендикулярном скорости главного движения около 20 мкм. Следы адгезионного взаимодействия по траектории движения вершины зерна минимальны, так как на поверхности царапины различимы и более мелкие линии, оставленные микронеровностями площадки износа. Фрагмент 1 состоит из двух полностью внедренных кристаллов. Фрагмент 2 расположен в нижней части рисунка 3.7а на участке интенсивного адгезионного взаимодействия.

Фрагменты 1 и 2 показаны на рисунках 3.7б, в при базовом увеличении  $30000\times$ . Оба тела фрагмента 1 вдавлены в поверхность царапины и покрыты слоем металла. В меньшей степени слоем металла покрыто верхнее тело [123].

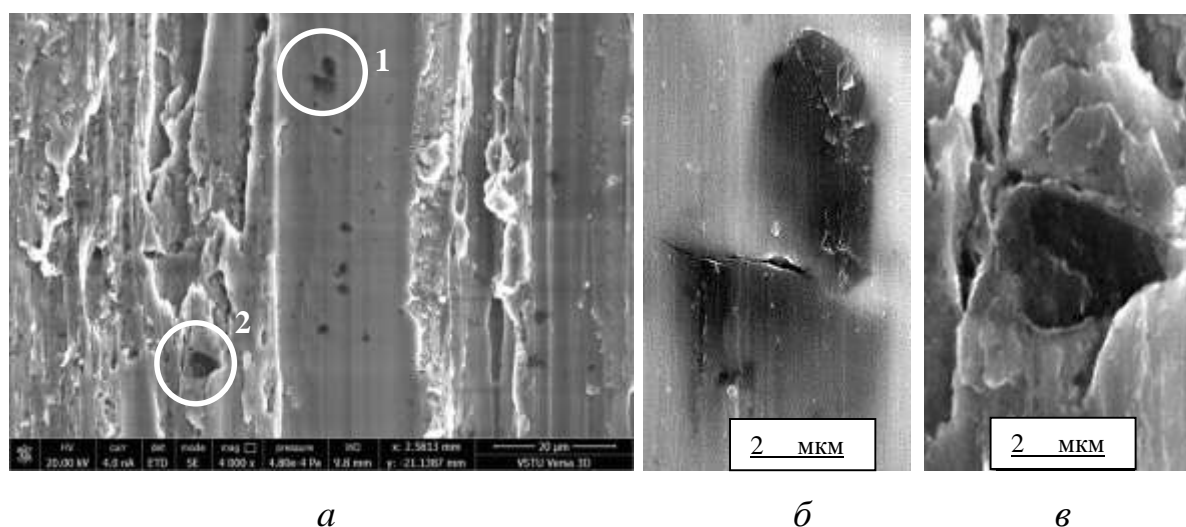


Рисунок 3.7 – Поверхность титана после шлифования кругом B251K.

На начальном этапе шлифования (рисунок 3.8) параметр шероховатости поверхности образца ниже, чем после шлифования,  $Ra$ , соответственно, 1,14 и 3,02 мкм. Существенную площадь поверхности занимают выглаженные участки, которые чередуются с глубокими, часто, прерывистыми царапинами, образованными вследствие скалывания абразивного материала (рисунок 3.8а). Для начального этапа работы шлифовального круга характера менее шероховатая рабочая поверхность круга, о которой можно судить по выглаженным участкам и значениям шероховатости.

Следствием правки является наличие на рабочей поверхности круга поврежденных абразивных зёрен, частиц связки и наполнителя, которые в процессе правки могут внедряться в поры инструмента. В результате, поверхность обильно шаржирована как единичными кристаллами, так и группами частиц, имеющими разную степень рассеяния по поверхности (рисунок 3.8б) [124].



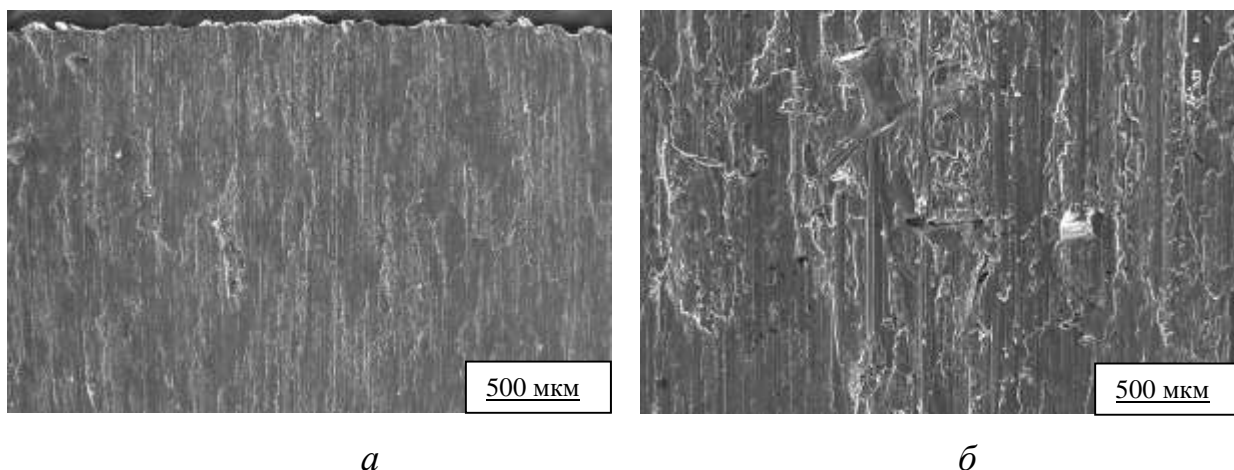


Рисунок 3.8 – Поверхность титана после шлифования кругом B251K на начальном этапе

### 3.2.2. Морфология поверхности титана после шлифования кругом характеристики *B126M*

При увеличении твердости и соответствующем снижении зернистости образованная поверхность менее развита (рисунок 3.9). Выражается это в меньшей ширине царапин, навалов, меньшем расстоянии между царапинами. Параметр  $Ra$  ниже примерно в 1,7 раз и составляет – 1,77 мкм. Вся поверхность образована различными царапинами, оставленными абразивными зёрнами, пластически вытесненным металлом, налипами, перенесенными с поверхности абразивных зёрен. Также, как и при шлифовании более мягким кругом с большим размером зёрен, получена слоистая структура поверхностного слоя. Судя по морфологии поверхности, при шлифовании происходит интенсивное адгезионное взаимодействие пары металл-абразивный инструмент.

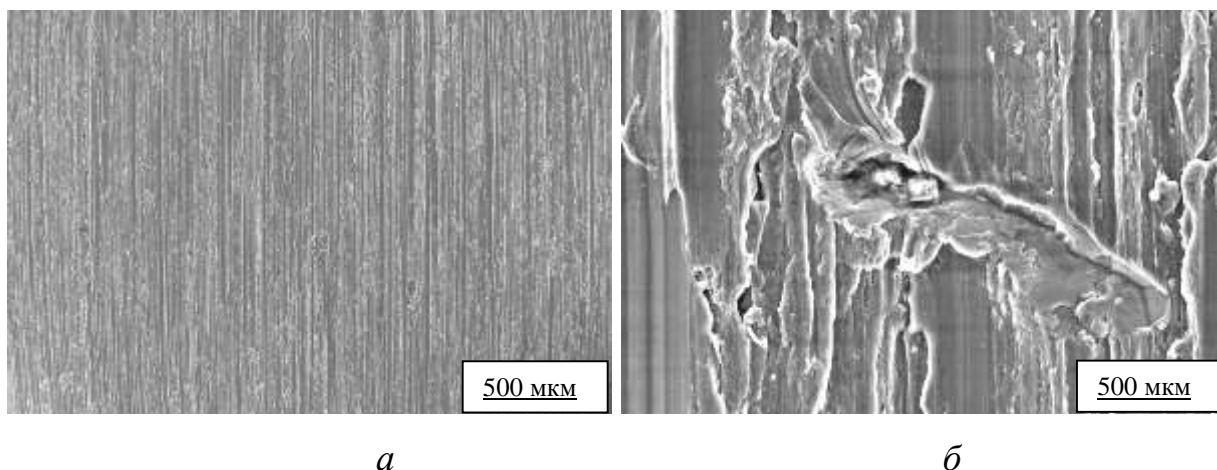


Рисунок 3.9 – Поверхность титана после шлифования кругом B126 M

На начальном этапе шлифования количество налипов существенно меньше, однако поверхность обильно шаржирована инородными объектами (рисунок 3.10), располагающимися как единично, так и относительно небольшими группами. Параметр  $Ra$  поверхности ниже, чем после съема припуска 0,5 мм, менее чем на 10%. Морфология поверхности, полученная на начальном этапе шлифования менее развита, чем после окончания процесса.

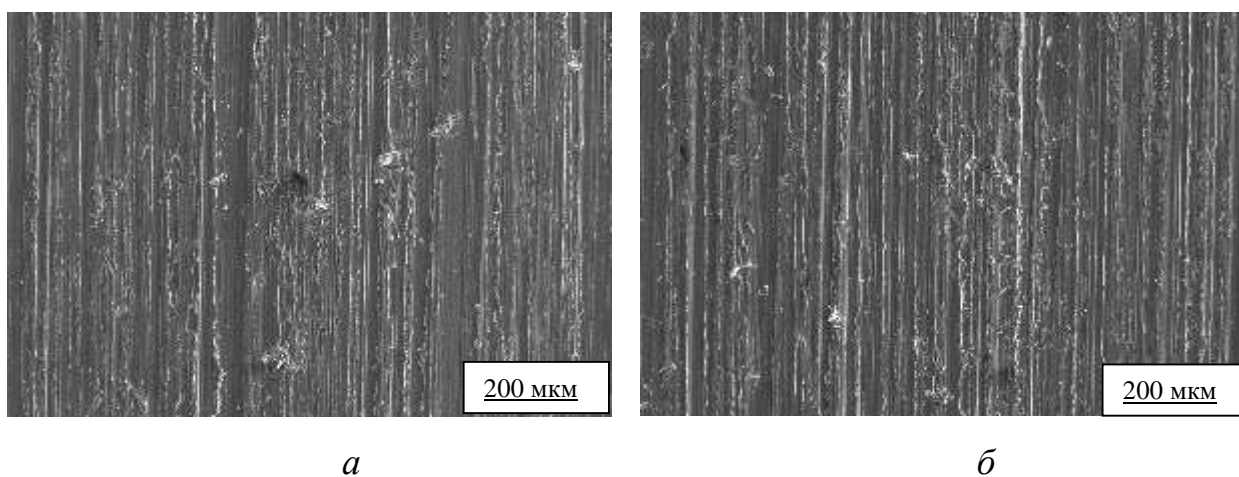


Рисунок 3.10 – Поверхность титана после шлифования кругом B126M на начальном этапе

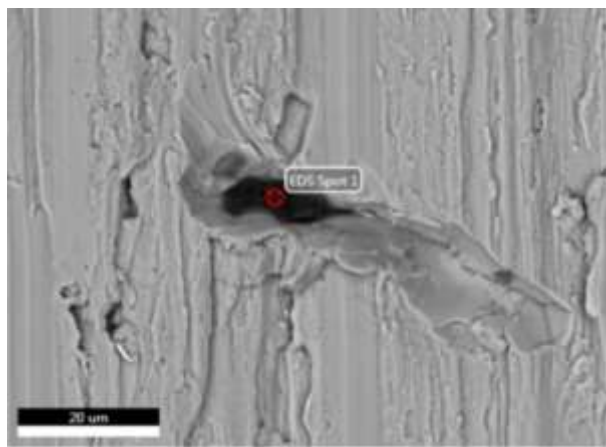
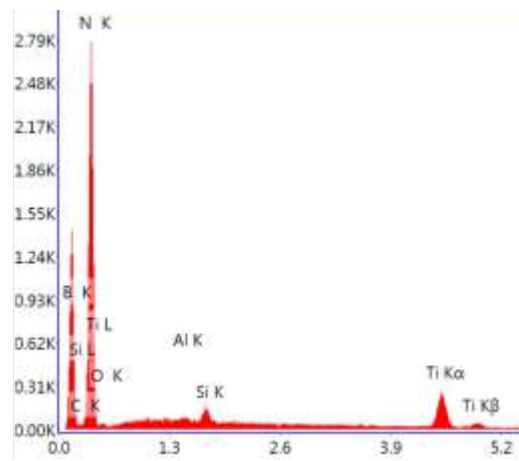
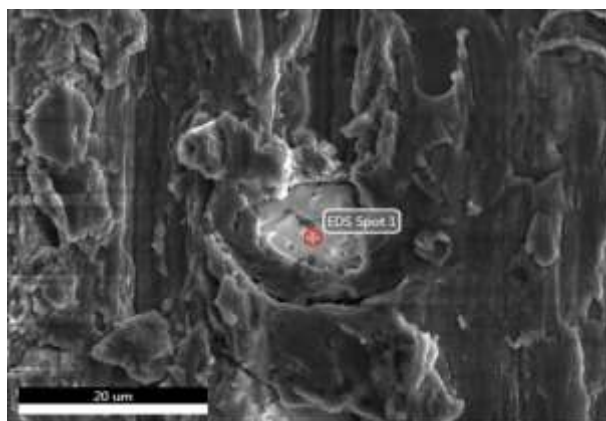
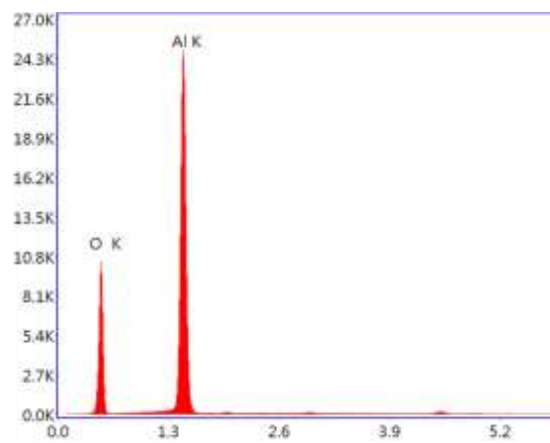
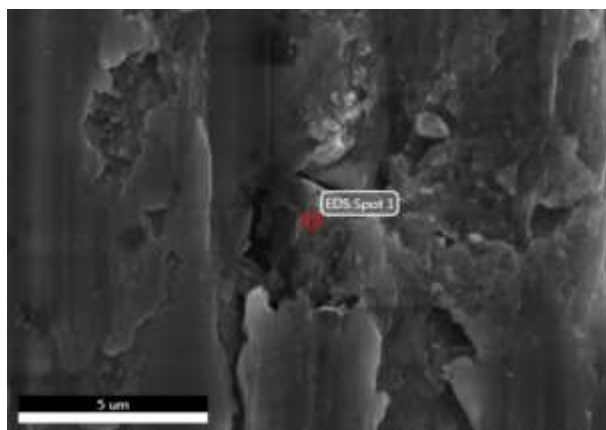
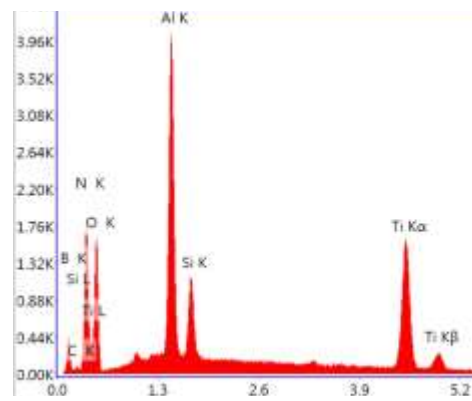
Для идентификации объектов, обнаруженных в ходе исследования поверхности металлов после взаимодействия с абразивным инструментом, был использован энергодисперсионный анализ.

На рисунке 3.11а представлена внедренная в поверхность образца частица, предположительно, являющаяся продуктом износа абразивного инструмента. По изображению, полученному обратно-рассеянными электронами заметна значимая разница в среднем атомном номере вещества объекта по сравнению с атомным номером титана. В выбранной точке, показанной на рисунке, был проведен энергодисперсионный анализ, результаты которого приведены на рисунке 3.11б. На спектрограмме присутствуют 3 пика: бор, азот и титан. При этом соотношение  $B$  и  $N$  близко к пропорции 1:1 (элементный состав приведен ниже). Эти данные позволяют идентифицировать данный объект, как нитрид бора, являющийся сколовшимся фрагмент абразивного зерна КНБ.

На поверхности присутствуют объекты, подобные приведенному, однако, как показано на рисунке, они могут отличаться по химическому составу. Так, на рисунке 3.11г приведена спектрограмма, на которой два пика, соответствующих алюминию и кислороду. Соотношение, близкое к 2:3 позволяет утверждать, что данный объект является наполнителем шлифовального круга, то есть  $Al_2O_3$ .

В отличие от объектов, представленных на рисунках 3.11а, в, объект на рисунке 11д гетерогенен. В его состав входят бор и азот, в пропорции близкой к 1:1, а также кремний, алюминий, кислород и небольшое количество углерода. Перечисленные элементы входят в состав алюмосиликатного стекла, которое составляет основу связки шлифовального круга и так же, как КНБ или корунд, могло попасть на обрабатываемую поверхность вследствие изнашивания инструмента. Таким образом данный объект представляет собой фрагмент связки, сколовшийся вместе с зерном КНБ.

Таким образом на поверхности титана были идентифицированы: зерно КНБ (рисунок 11а), зерно корунда (рисунок 11в), фрагмент связки (рисунок 11д).

*a**b**b**c**d**e*

## Элементный состав объектов

<i>a</i>			<i>в</i>			<i>д</i>		
Element	Atomic%	Error%	Element	Atomic%	Error%	Element	Atomic%	Error%
B	46,9	8,6	O	61,8	7,2	B	34,9	13,6
C	0,1	100,0	Al	38,2	3,7	C	1,3	28,2
N	52,5	9,7				N	32,0	9,8
O	0,0	100,0				O	22,7	10,9
Al	0,0	66,2				Al	4,9	4,6
Si	0,1	11,0				Si	1,3	5,9
Ti	0,4	5,0				Ti	3,1	2,4

Рисунок 3.11 – Электронные фотографии объектов (*a*, *в*, *д*): *a* – обратно-рассеянные электроны, *в*, *д* – вторичные электроны; рентгенограммы выделенных участков поверхности соответствующих объектов (*б*, *з*, *е*) и их количественный анализ.

### 3.2.3 Морфология поверхности железа после шлифования кругом характеристики *B126M*

Общий вид шлифованной поверхности представлен на рисунке 3.12*а*. Полученная поверхность однородна, равномерно покрыта царапинами, оставленными режущими зёрнами. Края царапин пластически деформированы, встречаются элементы стружки и налипы, размером менее 30 мкм.

При более детальном изучении, на поверхности были обнаружены инородные включения, которые, методом энергодисперсионного анализа были идентифицированы как сколовшиеся кристаллы корунда и КНБ (рисунок 3.12*б*, *в*, *з*). Присутствие таких элементов, как *Ca*, *Na*, *K*, *Si*, в сколовшемся фрагменте свидетельствует о наличии следов керамической связки. Перечисленные химические элементы обычно входят в состав керамических связок [Сошлись на источник]

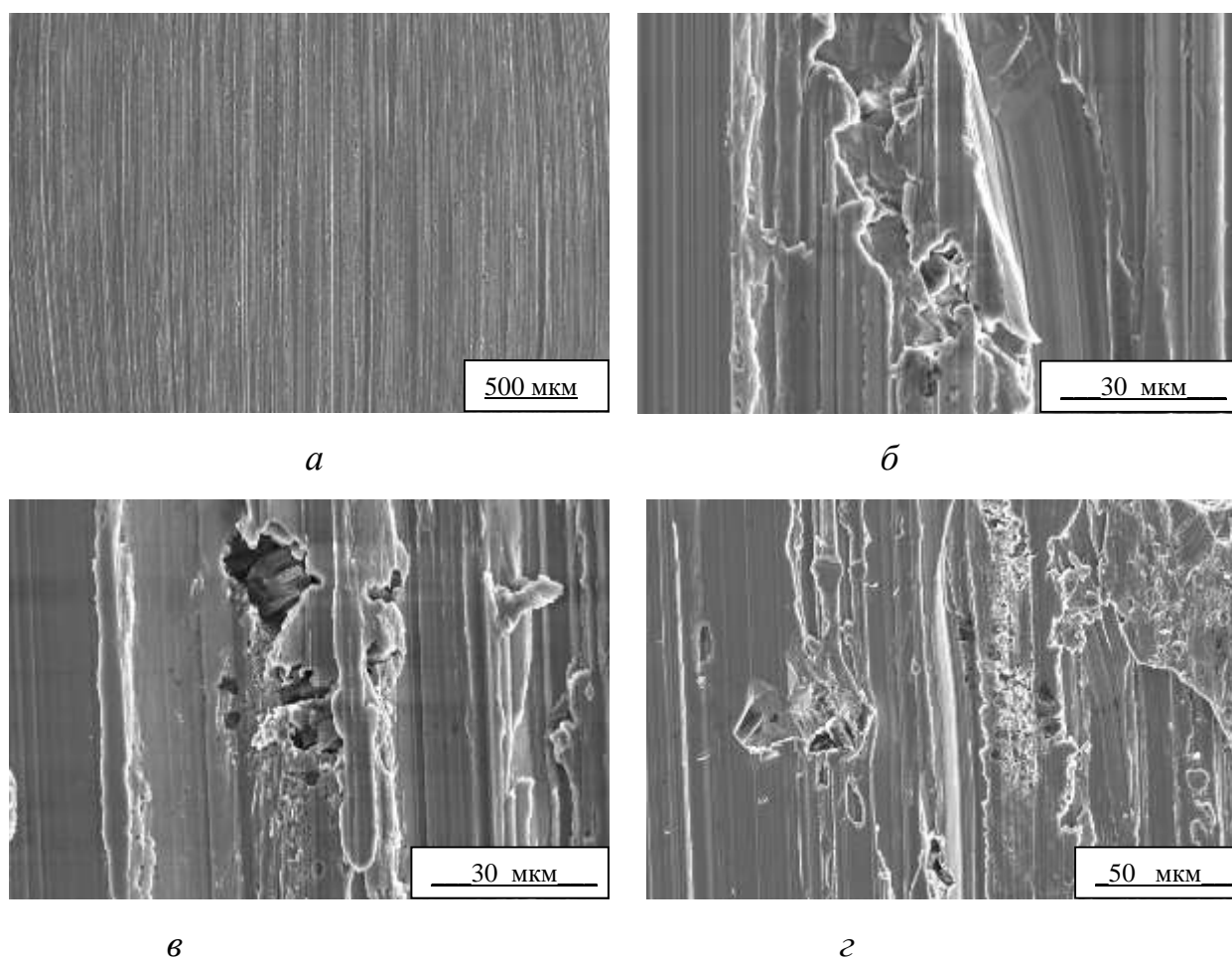


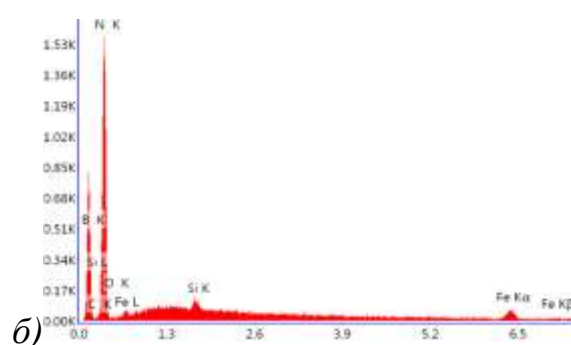
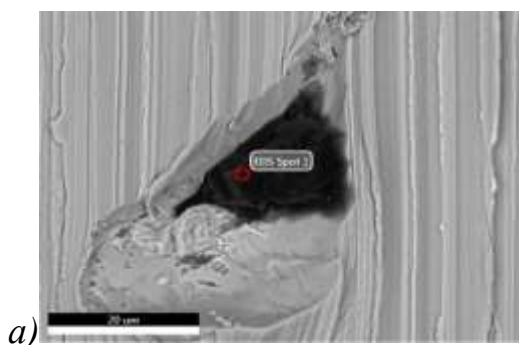
Рисунок 3.12 – Шлифованная поверхность железа после съема припуска 0,5 мм (*а*, *б*) и на начальном этапе (*в*, *г*).

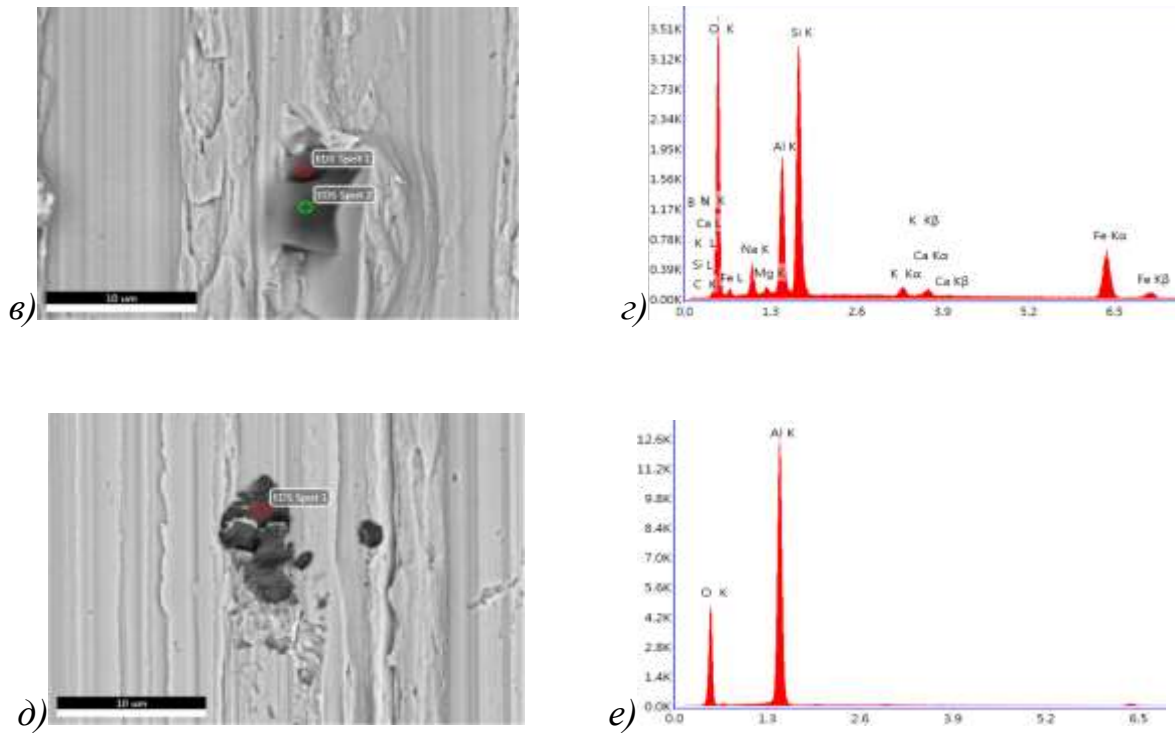
На рисунке 3.12*б* представлено изображение царапины, расположенной под углом  $10^\circ$  к направлению хода подачи заготовки. Форма царапины, повторяющая траекторию движения абразивного зерна, свидетельствует о том, что зерно скололось с рабочей части инструмента во время заключительного хода стола. Удаление зерна, возможно, произошло в результате столкновения с другим зерном, о чём свидетельствует изображение, полученное в обратно-рассеянных электронах и результаты рентгеноспектрального анализа. Микрочастицы нитрида бора были найдены на дне царапины и у её начала.

На начальном этапе взаимодействия (рисунок 3.12 *в*, *г*) поверхность отличается обильным шаржированием абразивным материалом. В отличие от титана, поверхность зёрен КНБ в меньшей степени покрыта металлом. Морфология

поверхности железа свидетельствует о низкой интенсивности адгезионного взаимодействия с рабочей поверхностью шлифовального круга [125].

Для найденных на поверхности железа инородных объектов проведен энергодисперсионный анализ, результаты которого представлены на рисунке 3.13. Изображения получены детектором обратно-рассеянных электронов. Объект, представленный на рисунке 3.13а располагается в конце отпечатка, оставленного более крупным зерном, часть которого, вероятно, скололась. Оставшийся кристалл внедрен в поверхность, образуя перед собой навал из вытесненного металла. Видимый размер частицы составляет около 25 мкм. Энергодисперсионный анализ (рисунок 3.13б), позволяет идентифицировать объект как нитрид бора. Небольшой кристалл, около 6 мкм (рисунок 3.13 в) располагается в конце царапины. Его положение и цвет в обратно-рассеянных электронах позволяет предположить, что он обладает небольшой толщиной, так как края кристалла в его левой части имеют тот же цвет, что и поверхность металла. Это вызвано тем, что длина пробега электронов в данном кристалле превышает его высоту. Энергодисперсионный анализ в точке 2 позволил идентифицировать объект как частицу керамической связки, по аналогии с рисунком 3.11 д. На рисунке 3.13д изображен кристалл, идентифицированный как  $Al_2O_3$  (рисунок 3.13е). Кристалл корунда внедрен в поверхность и не имеет следов перемещения. Результаты проведенного количественного химического анализа каждого из объектов представлены на рисунках .





Элементный состав объектов

<i>a</i>			<i>в</i>			<i>д</i>		
Element	Atomic%	Error%	Element	Atomic%	Error%	Element	Atomic%	Error%
B	46,37	9,38	B	11,29	32,73	O	60,69	7,42
C	1,2	31,13	N	2,25	21,98	Al	39,31	3,73
N	51,76	10,05	O	53,88	8,04			
O	0,38	30,88	Na	4,67	9,99			
Si	0,07	21,7	Mg	0,71	13,13			
Fe	0,22	15,41	Al	7,63	6,24			
			Si	12,91	5,38			
			K	0,54	11,19			
			Ca	0,49	13,25			

Рисунок 3.13 – Электронные фотографии объектов на поверхности железа после шлифования кругом из КНБ (*a*, *в*, *д*), рентгенограммы выделенных точечных участков поверхности (*б*, *г*, *е*) и их элементный состав



### 3.2.4. Морфология поверхности кобальта после шлифования кругом характеристики *B126M*

Из выбранной группы металлов, кобальт является наименее адгезионно-активным материалом. Поверхность кобальта однородна, покрыта царапинами, образованными вследствие взаимодействия со шлифовальным кругом. Присутствуют единичные налипы и пластически деформированные фрагменты стружки, что, в целом, характерно для поверхностей пластичных материалов, обрабатываемых шлифованием (рисунок 3.14а).

В процессе более детального изучения поверхности обнаружены инородные включения, представленные микрочастицами размером менее 5 мкм (рисунок 3.14б).

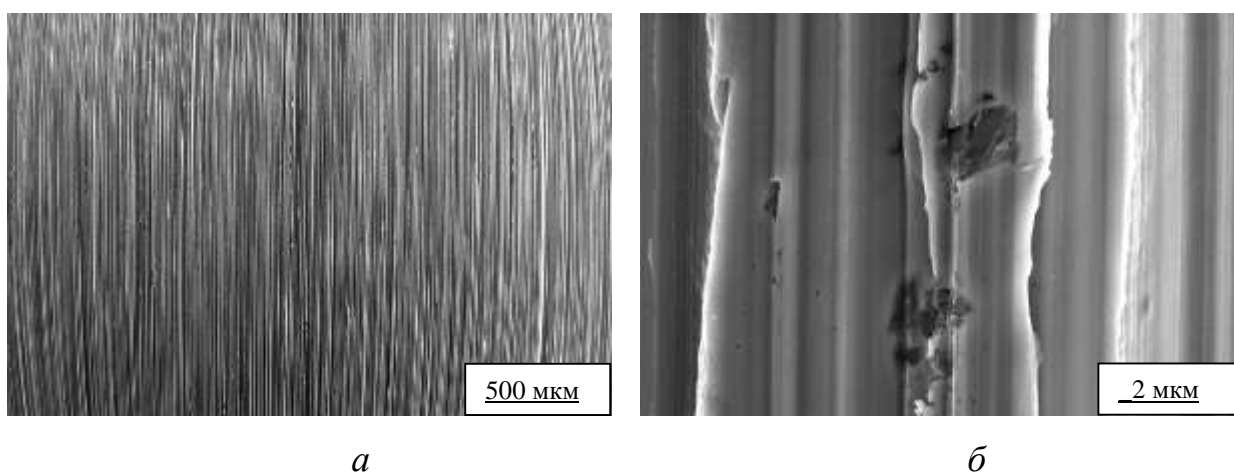


Рисунок 3.14 – Поверхность кобальта после шлифования кругом B126 M:

а) общий вид, б) внедренные инородные объекты

По сравнению с вышерассмотренными металлами, на начальном этапе шлифования поверхность кобальта практически не содержит следов адгезионно-когезионного взаимодействия с абразивным инструментом (рисунок 3.15а). Перенос продуктов износа шлифовального круга на поверхность кобальта происходит с наименьшей интенсивностью из группы выбранных металлов [126].

В отличие от более адгезионно активных металлов, на поверхности кобальта сколовшиеся абразивные зерна КНБ расположенных на относительно небольшой

площади (рисунок 3.15б). При шлифовании кобальта абразивный инструмент работает в режиме самозатачивания с минимальным износом. Обновление затупившихся вершин зерен происходит со скалыванием небольших фрагментов абразивного материала.

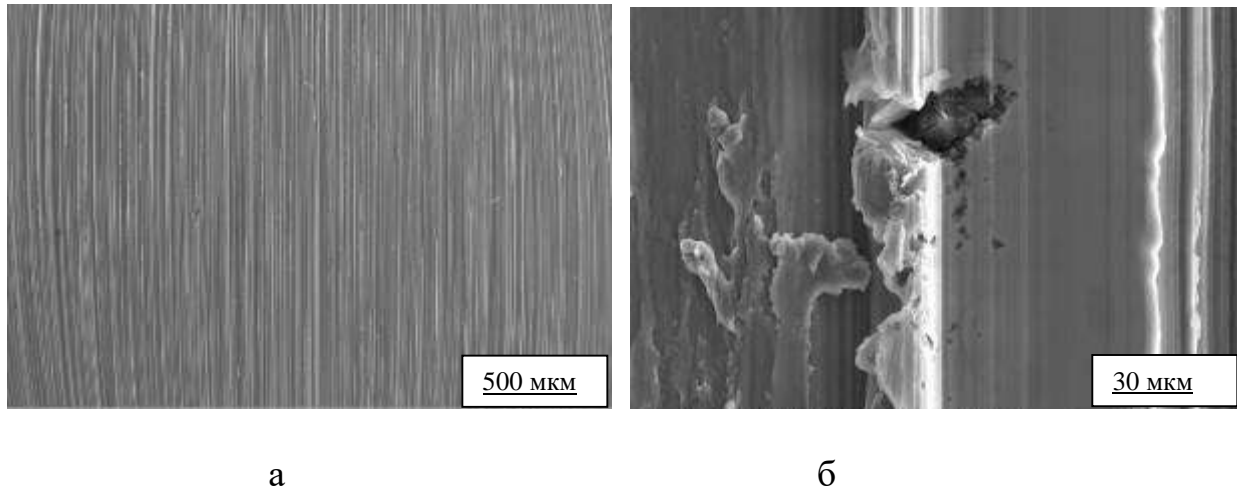
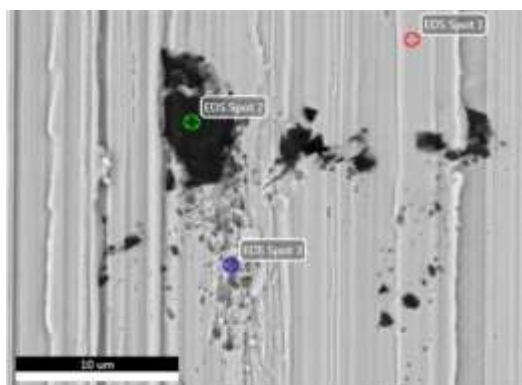


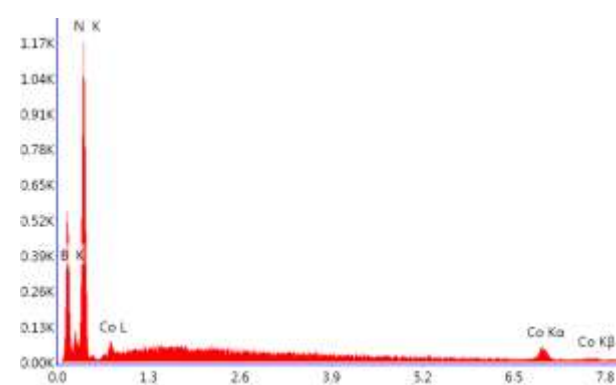
Рисунок 3.15 – Поверхность кобальта на начальном этапе шлифования кругом В126 М

Количество внедренных инородных объектов на поверхности кобальта существенно меньше, чем на других металлах. На рисунке 3.16 приведены изображения внедренных продуктов износа, спектрограммы, сделанные в соответствующих областях и их количественный анализ. Кристалл, идентифицированный как нитрид бора (рисунок 3.16а, б), внедрен в поверхность без следов перемещений. Размер его видимой части достигает 10 мкм, а на расстоянии менее 5 мкм располагаются другие видимые части нитрида бора.

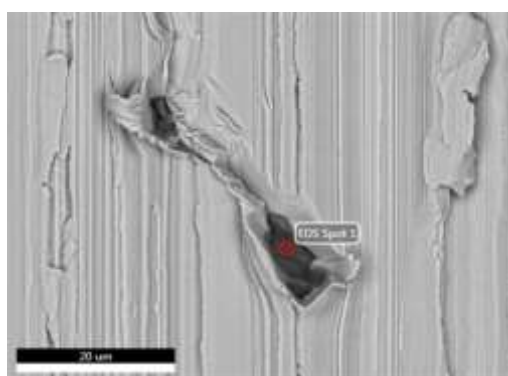
Объект, изображенный на рисунке 3.16в располагается в характерном углублении, образовавшемся вследствие перемещения сколовшейся частицы по поверхности. Полученная царапина имеет положение под углом к направлению главного движения, а в левой верхней части изображения наблюдается частица так же отличающаяся средним атомным номером от металла. Результаты количественного анализа представленных объектов приведены под рисунком (рисунок 3.16д, е).



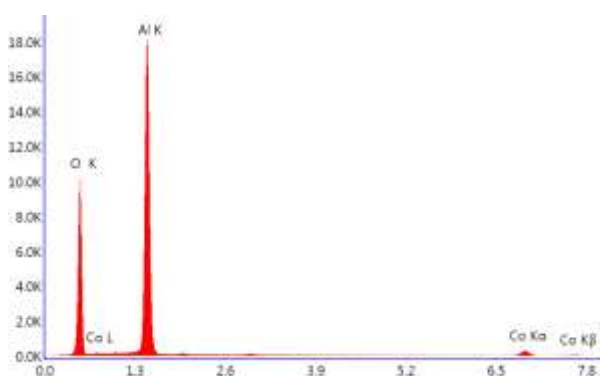
а)



б)



в)



г)

Спектрограмма, рис. б		
Element	Atomic %	Error %
BK	59,29	7,68
NK	40,54	10,64
CoK	0,17	17,42

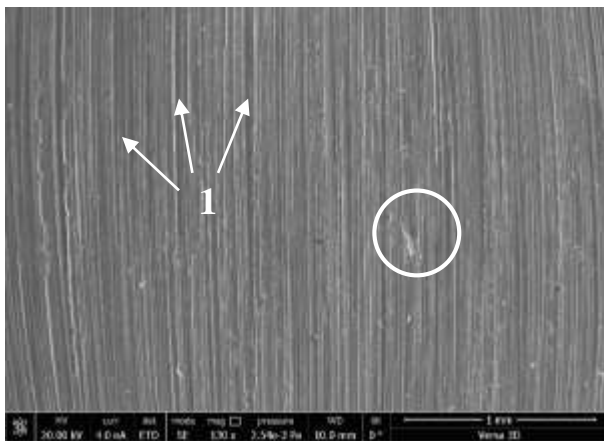
Спектрограмма, рис. г		
Element	Atomic%	Error%
OK	64,72	6,92
AlK	33,76	4,29
CoK	1,53	4,66

Рисунок 3.16 – Электронные фотографии объектов на поверхности кобальта после обработки кругом из КНБ (а, в), рентгенограммы выделенных точечных участков поверхности (б, г) и их элементный состав

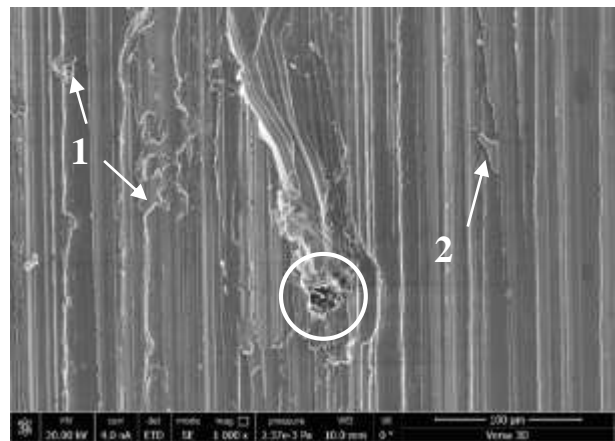
### 3.3.5 Морфология поверхности никеля после шлифования кругом характеристики *B126M*

Шлифованная поверхность никеля покрыта царапинами, оставленными вершинами абразивных зерен, например, на участке 1 (рисунок 3.17а). Помимо царапин, на поверхности обнаружены следы адгезионно-когезионного

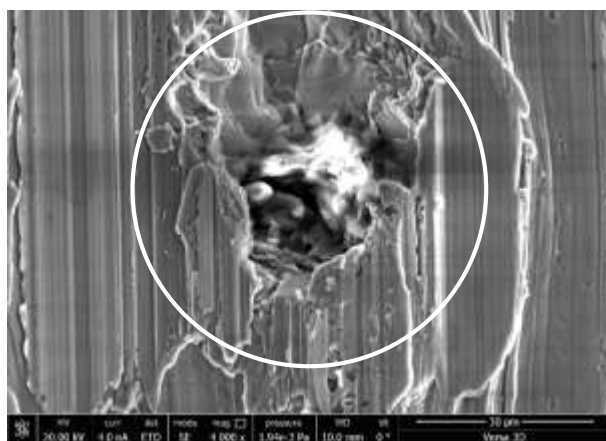
взаимодействия с абразивным инструментом, о чём свидетельствуют навалы и налипы, представленные на рисунке 3.17б на участках 1, 2. При увеличении 130× (рисунок 3.17а) на поверхности выявлены внедренные инородные объекты, один из которых представлен на рисунок 3.17б, в. Выделенный инородный объект достигает размера 30 мкм и располагается в слое пластически деформированного металла, образовавшегося в процессе его перемещения по поверхности. Проведение идентификации методом энергодисперсионного анализа кристалла затруднено вследствие низкой суммарной интенсивности рентгеновского излучения, полученного от исследуемого фрагмента (рисунок 3.17г). Вероятнее всего, это вызвано тем, что частица располагается в углублении, что ухудшает точность проведения анализа. Имеющиеся на спектрограмме пики бора и азота, отличающиеся интенсивностью от тормозного излучения, позволяют утверждать, что в этой области располагается нитрид бора. Наличие углерода, кислорода, алюминия и кремния возможно, однако достоверность количественной оценки содержания этих элементов низкая.



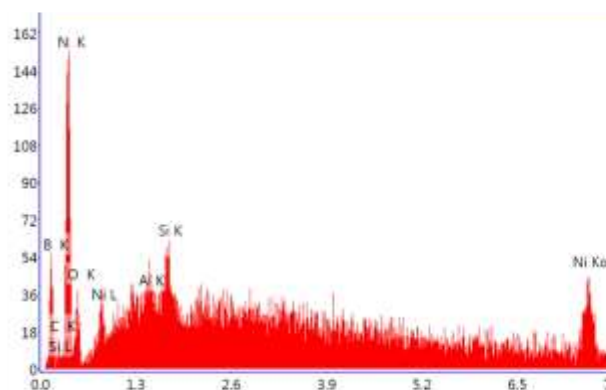
а)



б)



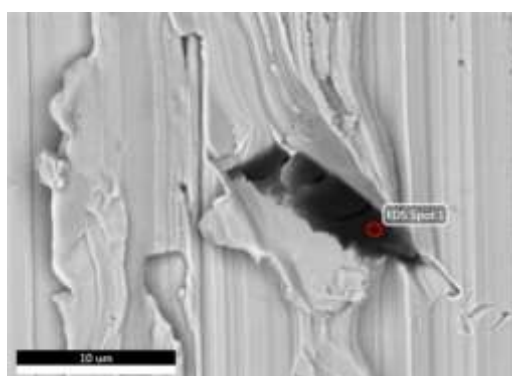
в)



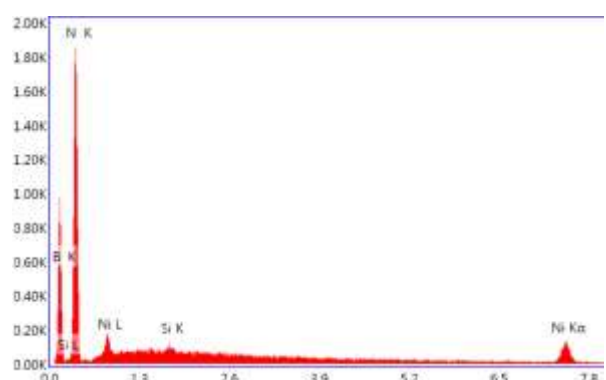
г)

Рисунок 3.17 – Поверхность никеля после шлифования кругом В126М

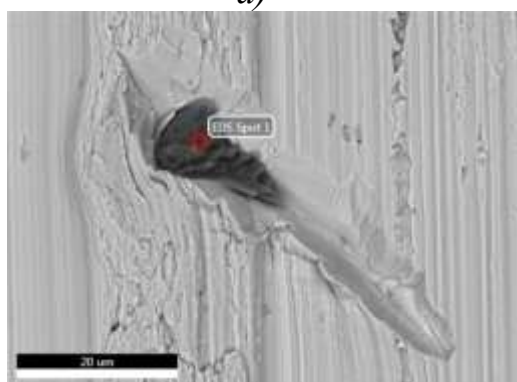
Отмечено [127], что на поверхности никеля встречается множество относительно крупных (до 30 мкм) продуктов износа АИ, некоторые из которых представлены на рисунке 18. По аналогии с предыдущими разделами, на поверхности идентифицированы нитрид бора, корунд и фрагменты керамической СВЯЗКИ



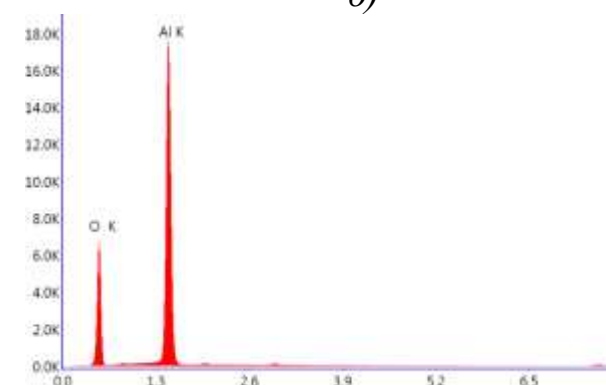
а)



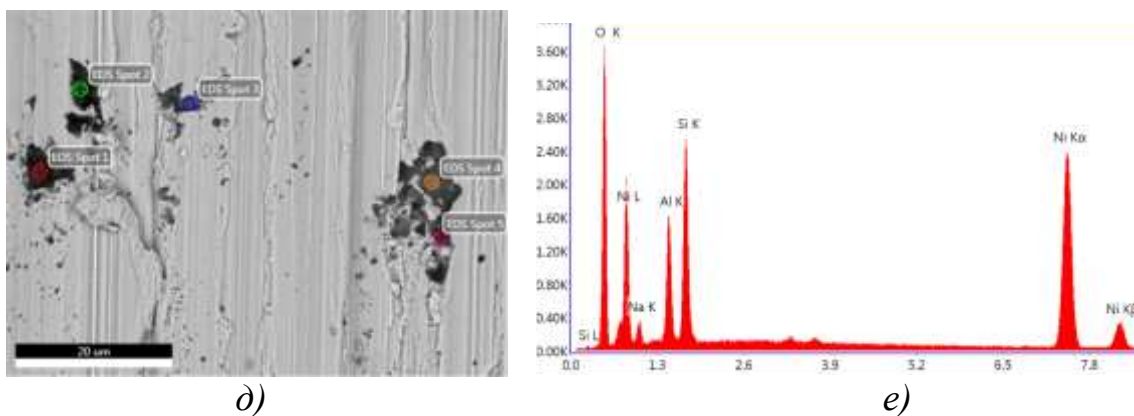
б)



в)



г)



Спектрограмма, рис. б		
Element	Atomic%	Error%
BK	45,86	9,77
NK	53,45	9,87
SiK	0,05	31,06
NiK	0,64	9,01

Спектрограмма, рис. г		
Element	Atomic%	Error%
OK	60,69	7,33
AlK	39,31	3,68

Спектрограмма, рис. бе		
Element	Atomic%	Error%
OK	45,52	7,73
NaK	6,42	11,74
AlK	9,08	8,43
SiK	11,58	7,18
NiK	27,4	2,18

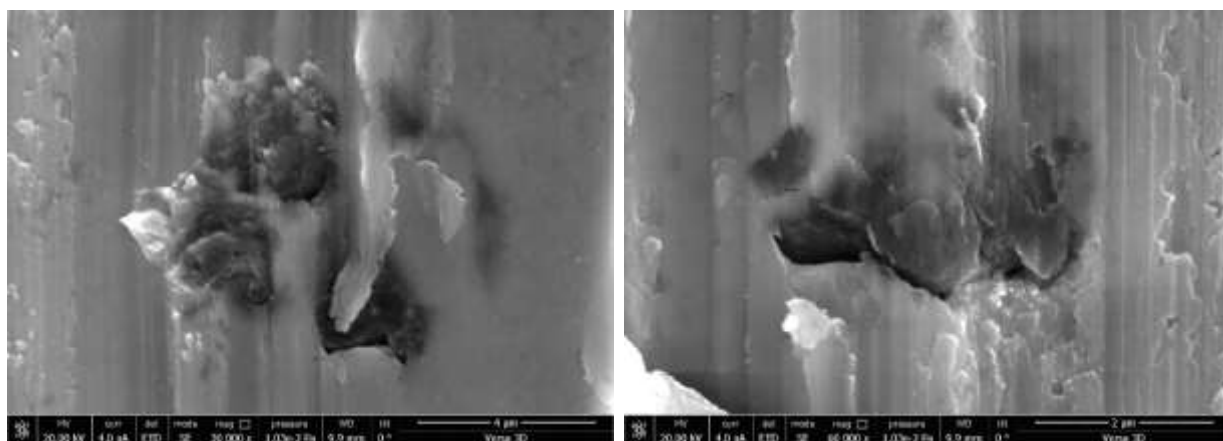
Рисунок 3.18 – Электронные фотографии объектов на поверхности никеля после обработки кругом из CBN (*а, в, д*), рентгенограммы выделенных точечных участков поверхности (*б, г, е*) и элементный состав

Известно, что на формирование поверхности влияют свойства материалов, в частности, склонность материала к адгезионному взаимодействию. Примером является поверхность титана, полученная при взаимодействии с корундом [128], никеля – при шлифовании карбидом кремния или стали – при обработке алмазом. Как правило, чем выше адгезионная активность материала, тем более развита обработанная поверхность. Исходя из этого, выбранные материалы можно условно разделить на 3 группы: с наиболее развитой морфологией (поверхность покрыта налипами, навалами, выглаженными участками, как на титане), с умеренно развитой морфологией (никель) и с однородной морфологией (получена копированием профиля круга в выбранном сечении, как на кобальте и железе).

### 3.3 Морфология элементов рельефа, содержащих внедренные продукты износа АИ

При исследовании морфологии выбранных металлов на всех поверхностях обнаружены внедренные инородные объекты. По результатам анализа полученных изображений предложена классификация шаржирующих поверхность металлов продуктов износа.

Большая часть наблюдаемых зёрен представляет собой внедренные единичные включения, большую площадь которых покрывает металл, например, объекты, приведенные на рисунок 3.7б или рисунок 3.14б. Линейный размер видимой части этих частиц около 2 мкм, однако присутствуют и более мелкие объекты. Размер таких частиц, наличие на них металла, а также их расположение усложняет поиск и идентификацию подобных объектов, когда они располагаются в областях с развитой морфологией поверхности, например, в налипках, навалах, углублениях. Дополнительный пример таких объектов представлен на рисунке 3.19.



*a*

*б*

Рисунок 3.19 – Внедренные продукты износа АИ, идентифицированные как нитрид бора.

Так же встречаются крупные единичные кристаллы (размером до 30 мкм) не покрытые металлом. Такие объекты, как правило, имеют следы перемещения, в

отдельных случаях под углом к направлению главного движения (рисунках 3.9б, 3.11а, 3.17в, 3.18в).

Часть таких объектов может быть внедрена в поверхность металла целиком.

Размеры и расположение таких продуктов износа облегчают их поиск и идентификацию методами РЭМ.

В отдельных случаях объекты могут располагаться группами различных размеров. На рисунках 3.12в, 3.18а, приведены изображения продуктов износа, расколовшихся в результате внедрения в обрабатываемую поверхность на множество частиц. Такие тесно расположенные группы зёрен могут не иметь следов перемещения. Продукты износа, представленные на рисунке 3.20 состоят из множества более мелких частиц: 3.20а – объект, идентифицированный как нитрид бора разделен не менее чем на 8 частей, при этом, судя по наличию углубления и навалов, дробление произошло в процессе скалывания. На рисунке 20б под слоем металла располагается россыпь частиц, так же идентифицированных как нитрид бора. Количество частиц достигает 6, а размер мельчайшей около 3 мкм.

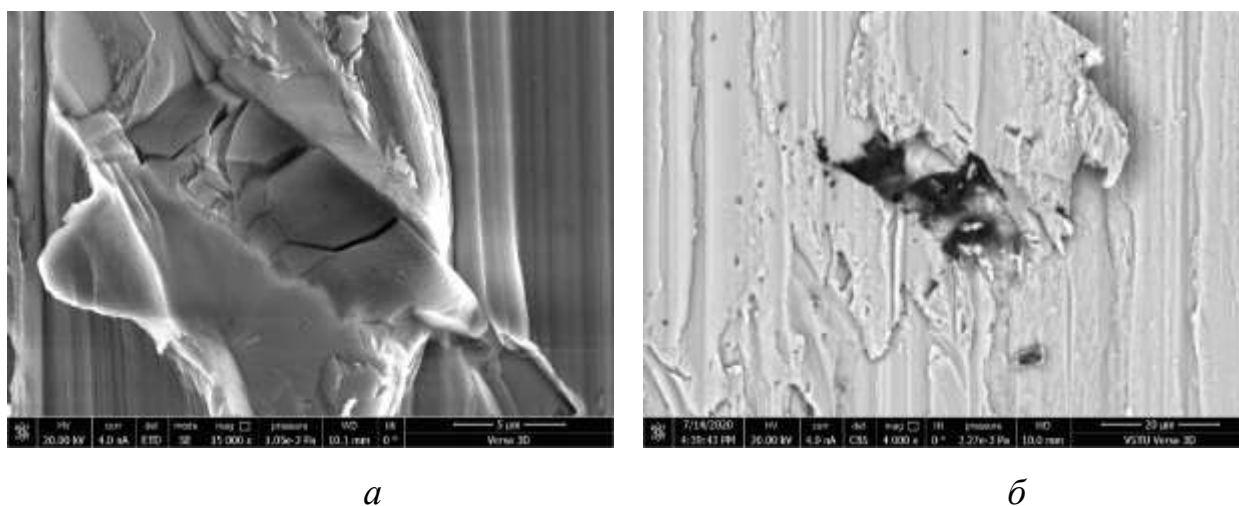


Рисунок 3.20 – Группа зерен относительно больших размеров

Другая характерная форма расположения продуктов износа заключается в высокой концентрации единичных внедренных зёрен в небольшой области, радиусом до 50 мкм (рисунок 3.12г, 3.21а, б). Как правило, в этом случае кристаллы внедрены в поверхность и могут располагаться вдоль направления главного



движения. Как правило, таким участкам поверхности свойственна развитая морфология: наличие налипов, навалов, следов адгезионного взаимодействия и пластической деформации металла. На поверхности металла, при этом, могут возникать трещины и раковины.

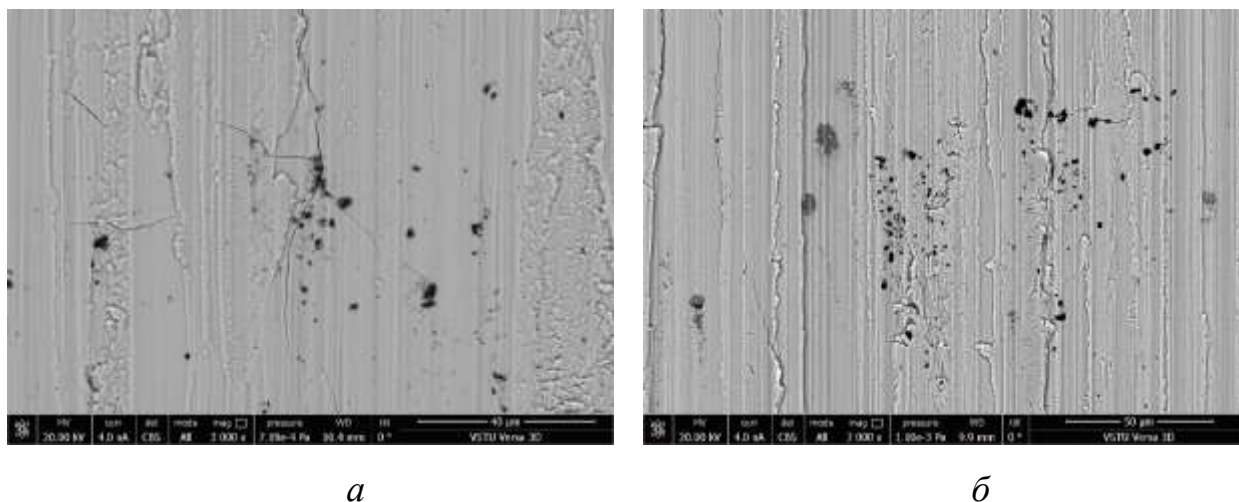


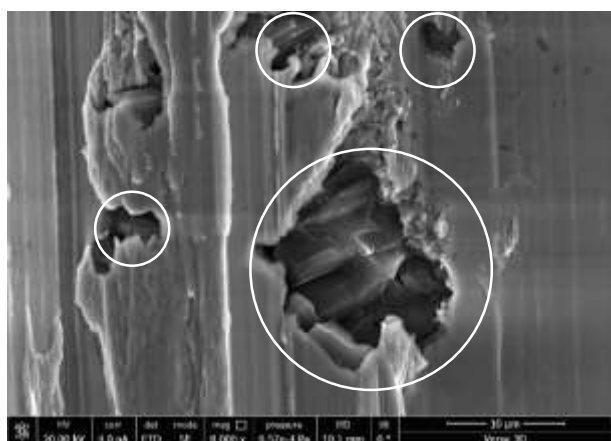
Рисунок 3.21 – Обильно шаржированные участки поверхности

### 3.4 Исследование поперечных сечений участков поверхности, содержащих внедренные продукты износа АИ

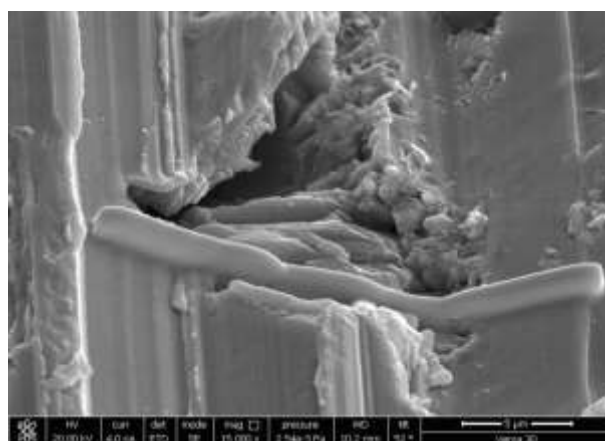
На поверхности железа (рисунок 3.22) выбран участок, на котором внедренные продукты износа располагаются вблизи пластически деформированного слоя металла, «намазанного» абразивным зерном на поверхность металла. На рисунке 14а хорошо различимы 4 частицы, внедренные в поверхность материала, по одной из которых и проводилось сечение. Перпендикулярно направлению главного движения нанесен защитный слой платины и произведено травление металла таким образом, чтобы продукты износа располагались в центральной части изображения, навал слева, а справа относительно ровный слой металла.

При анализе изображения, полученного вторичными электронами с поперечного сечения (рисунок 3.22б) установлено, что глубина внедрения зерна достигает 8 мкм в данном сечении. Слева от зерна КНБ располагаются полости, в

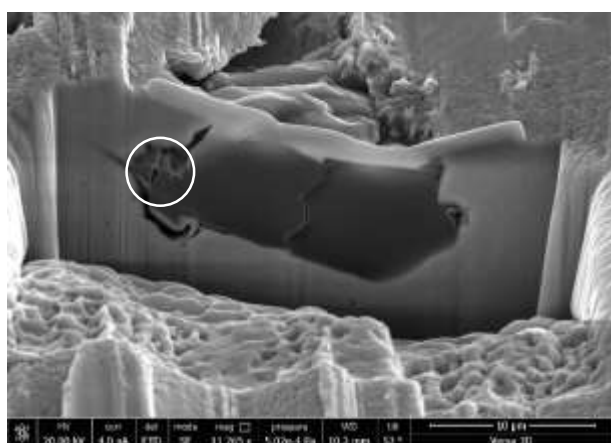
которых находятся мелкие зерна продуктов износа (размер менее 1 мкм). Центральное зерно КНБ разделено по центру трещиной. Левый фрагмент имеет трещины в верхней своей части. Эти трещины так же видны на изображении, полученном в ионном излучении (Рисунок 3.22г). Мелкозернистая структура в левой части изображения свидетельствует о пластической деформации, которой был подвержен этот объем металла. Глубина этого слоя не может быть оценена по данному изображению и превышает 10 мкм. Такая структура окружает внедренный фрагмент зерна КНБ снизу и справа, однако толщина этого слоя под правой частью зерна существенно меньше – около 2 мкм. В правой части изображения, под ровной поверхностью металла, деформированный слой не превышает 4 мкм.



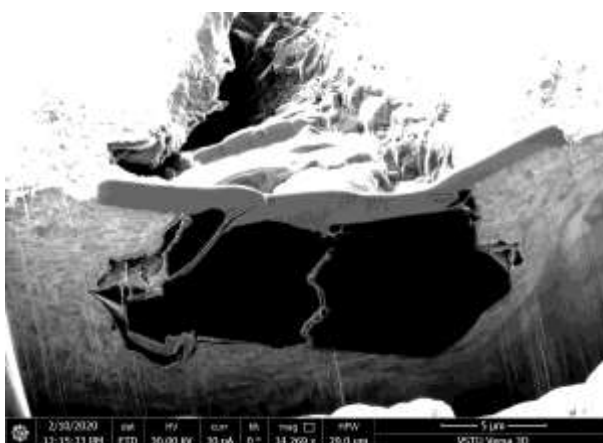
а



б



в



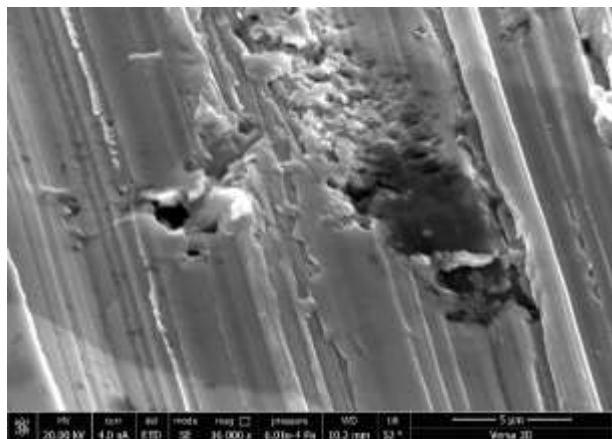
г

Рисунок 3.22 – Поперечное сечение участка поверхности железа, содержащего продукты износа КНБ.

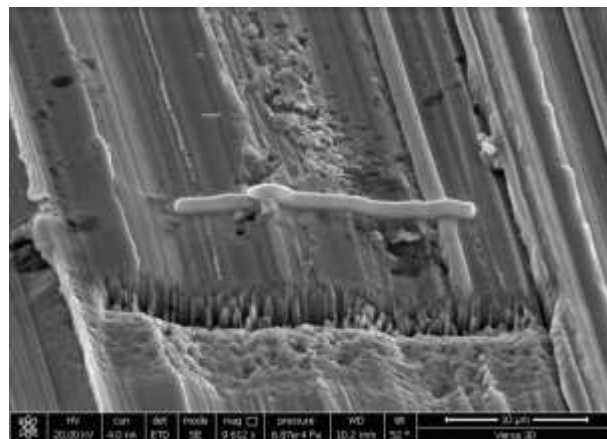
На поверхности кобальта так же был выбран участок, содержащий продукты износа КНБ. По изображению, полученному во вторичных или обратно-рассеянных электронах подсчет количества фрагментов, шаржированных в поверхность, затруднен, из-за наличия нанесенного металла (рисунок 3.23а, б). Нанесение покрытия и создание поперечного сечения было выполнено под углом около  $75^\circ$  к направлению главного движения.

На рисунке 3.23в хорошо различимы 4 части, на которые раздробилось зерно. При этом большая часть этих продуктов износа покрыты металлом, в частности, центральная и левая области изображения.

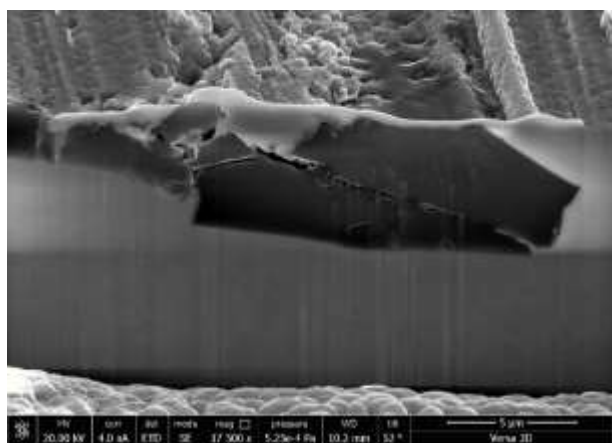
На рисунке 3.23г различимы 12 фрагментов, разделенных трещинами разной толщины, в том числе, не видимых на рисунке 3.23в. Зерно располагается в слое металла, структура которого изменена, по сравнению с более глубокими слоями: на глубине более 6 мкм структура образована случайно расположенными зёрнами, размеры которых составляют до 3 мкм. На глубине 5 мкм, на границе расположения зерна КНБ в материале структура является мелкозернистой, как и на поверхности заготовки.



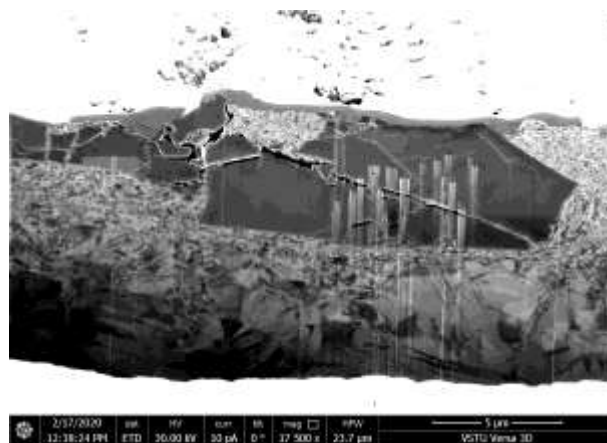
а



б



в



г

Рисунок 3.23 – Поперечное сечение поверхности кобальта, содержащей продукты износа.

Как и для предыдущих поперечных сечений, аналогичный участок был выбран на поверхности никеля. На виде сверху и сбоку (рисунок 3.24а, б), в выбранной области поверхности, визуально заметны, по меньшей мере, 6 отдельных частиц кубического нитрида бора. В отличие от предыдущих сечений, в данном случае нанесение покрытия и травление было осуществлено в плоскости, параллельной главному движению. На изображении, полученном во вторичных электронах видны 3 отдельных частицы кубического нитрида бора. При этом размер и глубина внедрения наибольшего из них, расположенного слева, достигает 6,5 мкм. Два других, расположенных правее были так же видны на исходном изображении. Так как при создании изображения в ионном излучении происходит бомбардировка поверхности ионами, поверхностный слой постоянно подвергается травлению, в связи с чем, правое и наименьшее зерно было стравлено полностью, на его месте заметен отпечаток, выраженный мелкозернистой текстурой.

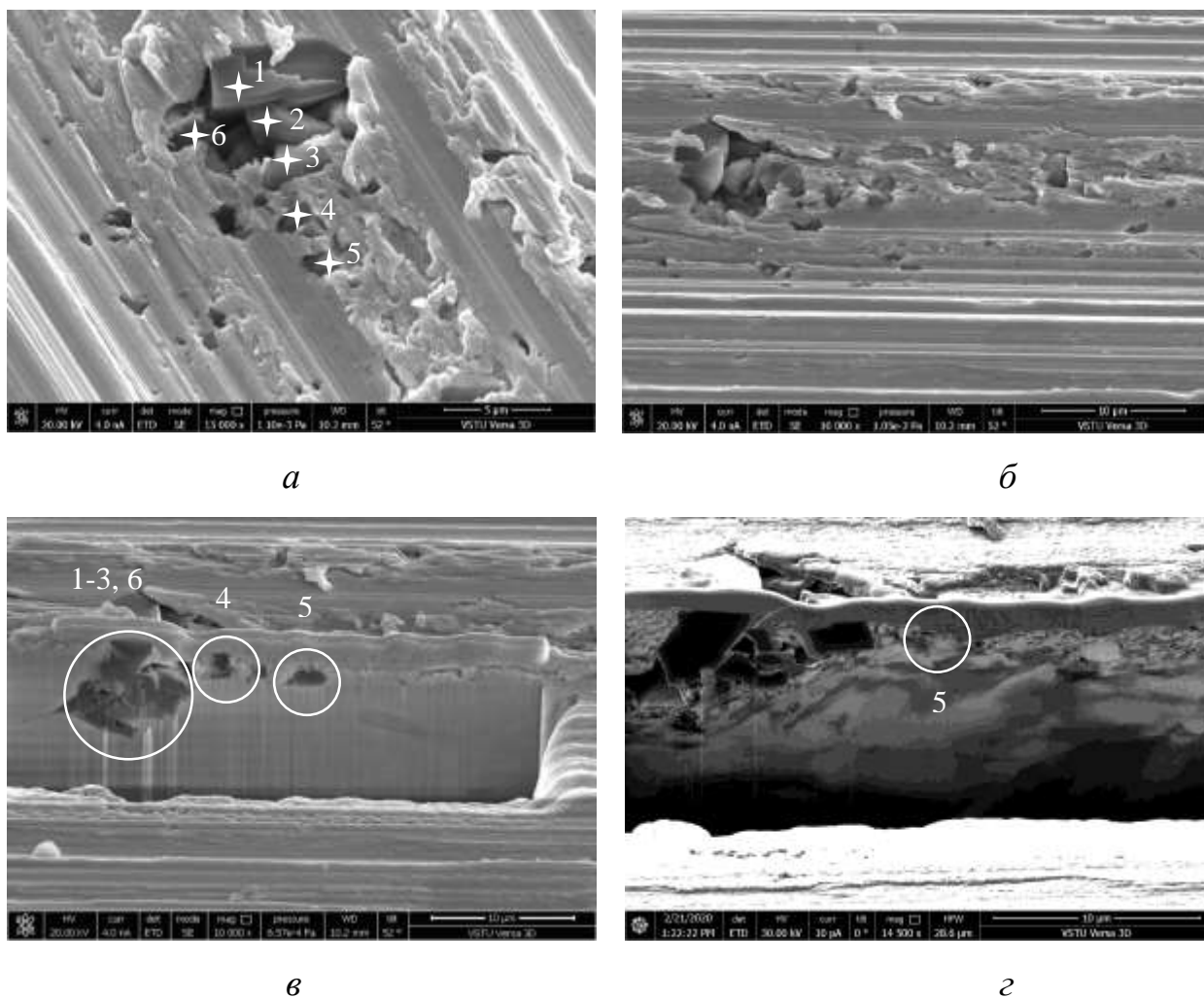


Рисунок 3.24 – Поперечное сечение поверхности никеля, содержащей продукты износа.

### 3.5 Выводы

В результате анализа морфологии обработанной поверхности исследуемых металлов после шлифования абразивным инструментом из кубического нитрида бора установлено, что по снижению интенсивности адгезионного взаимодействия с абразивным инструментом металлы располагаются в следующем порядке: *Ti, Ni, Fe, Co*.

На поверхности всех металлов присутствуют шаржированные объекты. Методом энергодисперсионного анализа определен их элементный химический состав. Установлено, что включения являются продуктами износа абразивного

инструмента из кубического нитрида бора: кристаллами основного абразивного материала - кубического нитрида бора, кристаллами наполнителя, в качестве которого в исследуемых абразивных инструментах используется корунд и фрагментами керамической связки.

Расположение этих объектов относительно поверхности металла так же различно: крупные единичные частицы (более 5 мкм), сколовшись, могут оставить царапину в направлении главного движения или под углом к этому направлению. После скалывания кристалла перемещение, совпадающее с направлением главного движения или под углом к этому движению, обусловлено формой сколовшегося кристалла или происходит в результате соударения с последующими выступающими вершинами абразивного инструмента. Единичные кристаллы меньшего размера, как правило, полностью вдавлены в обрабатываемую поверхность и покрыты слоем металла.

Известно, что КНБ склонен к самозатачиванию, т.е. скалыванию затупившихся участков микронеровностей вершины зерна с образованием новых режущих кромок.

Таким образом, механизм шаржирования шлифованной поверхности абразивным материалом из кубического нитрида бора можно представить следующим образом: вследствие износа с поверхности абразивного зерна скалывается частица. Получая удар от абразивных зёрен круга, эта частица перемещается по поверхности металла и может быть в неё внедрена. При этом происходит образование борозды, направление которой может не совпадать с направлением главного движения, так как зависит от геометрии частицы и направления удара. В результате контакта рабочих вершин зерен со сколовшимся зерном или отдельным фрагментом возможно измельчение сколовшейся части кубического нитрида бора, корунда или связки с образованием более мелких кристаллов основного абразивного материала (кубического нитрида бора), кристаллов наполнителя или связки. Крупные или мелкие кристаллы могут располагаться группами и отдельными кристаллами, быть частично или полностью вдавленными в поверхность металла и покрыты слоем металла.

Размер шаржирующих продуктов износа на шлифованной поверхности колеблется от долей микрона до 30 мкм. Продукт может быть частично или полностью вдавлен в обработанную поверхность, находиться в образовавшейся царапине, окружен навалами обрабатываемого металла. При размере кристалла около 10 мкм глубина вдавливания в обработанную поверхность достигает 8 мкм. Под нижней частью кристалла формируется микрокристаллическая текстура толщиной около 1,5-2 мкм, что увеличивает глубину деформированного слоя обработанной поверхности в 2-3 раза.

## 4. Разработка методики измерения параметров шаржирования

### 4.1. Оценка химического состава шлифовального круга

При шлифовании выбранных металлов кругами из КНБ, вследствие самозатачивания, происходит скалывание и внедрение продуктов износа АИ в обработанные поверхности. При этом сколовшиеся фрагменты можно разделить на две группы: размер которых превышает 5 мкм и частицы размером менее 5 мкм. Максимальный наблюдаемый размер зёрен КНБ не превышал 30 мкм. При этом для первых характерны следы скалывания на поверхности (навалы, царапины). Энергодисперсионный анализ таких кристаллов показал наличие фрагментов связки на их поверхности. Частицы небольшого размера внедрены в поверхность не выступая над её уровнем и не имея следов перемещения по поверхности. Их энергодисперсионный анализ не показал присутствия каких-либо элементов, кроме бора, азота и обрабатываемого металла. Это, в совокупности с литературными данными о механизме самозатачивания абразивных зёрен из КНБ [88, 129-131] позволяет предположить, что крупные зёрна, сколовшись, вследствие дальнейшего взаимодействия с вершинами зерен шлифовального круга, могут расщепляться на множество более мелких фрагментов, которые шаржируют поверхность.

Для идентификации объектов, обнаруженных в ходе исследования поверхности металлов после взаимодействия с абразивным инструментом, был использован точечный энергодисперсионный анализ. При его проведении отмечено, что состав некоторых объектов, идентифицированных, как фрагменты керамической связки, может отличаться, в том числе, и по содержанию элементов.

В состав связки керамических кругов из КНБ, в качестве основных компонентов, входят  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ , при этом основным



компонентом является  $SiO_2$ , который может составлять до 64% от состава связки.

Известны связки, содержащие:

$Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $BaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $Li_2O$  [132],

или  $K_2O$ ;  $CaO$ ;  $MgO$ ;  $ZrO_2$ ;  $MnO$ ;  $Li_2O$ ;  $BaO$  [132],

или  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $Li_2O$ ,  $MnO$ ,  $ZrO_2$ ,  $PbO$ ,  $Fe_2O_3$  [133],

или  $MnO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$ ,  $BaO$ ,  $SrO$  [133], однако доля таких компонентов не превышает 5-10% [132-134].

На рабочей поверхности кругов из кубического нитрида бора находится большое количество зёрен наполнителя, превышающее количество зёрен КНБ в 3-10 раз, так как в качестве наполнителя используют порошки электрокорунда, с номером зернистости на 4-6 номеров ниже, чем у зёрен из КНБ [135].

Для определения элементов, входящих в состав круга проведено исследования его поверхности методом энергодисперсионного микроанализа. Установлено наличие алюминия, кремния, кислорода, углерода, которые присутствуют во всех исследуемых областях связки круга. Наличие калия, кальция, магния и натрия так же было установлено в некоторых точках поверхности связки. Количественный анализ их содержания показал, что их концентрация не превышает 1-3% в исследуемых областях. При рентгеноспектральном анализе химического состава круга по площади было установлено наличие 19% углерода, 54% кислорода, 15% алюминия, 8% кремния, 2,3% натрия и менее 0,5% кальция. Стоит отметить, что, как и при идентификации продуктов износа на поверхности металлов, при количественном анализе лёгких элементов высока доля ошибки. Факторами, ухудшающими точность измерения так же является пористость исследуемого образца и его рельеф [136].

Проведенные исследования свидетельствуют о неоднородности керамической связки по химическому составу. При этом основными её компонентами, определение которых целесообразно, являются углерод, кислород, алюминий и кремний (рисунок 4.1).

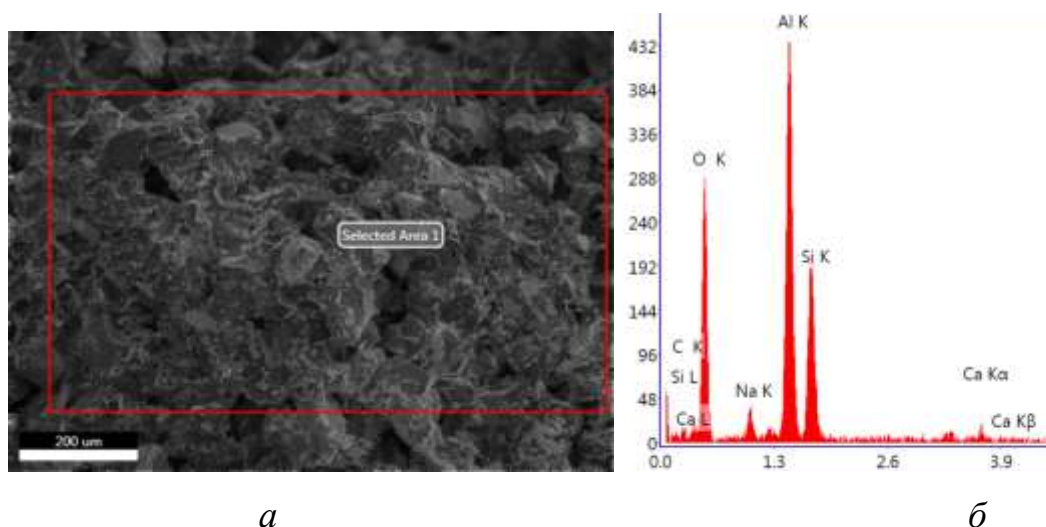


Рисунок 4.1 – Энергодисперсионный анализ шлифовального круга из КНБ:  
 а) выбранный участок поверхности, б) спектрограмма.

#### 4.2. Факторы, влияющие на погрешность количественной оценки химического состава методом ЭДС

Так как рассматриваемые поверхности металлов получены в результате шлифования, исследуемая поверхность имеет относительно высокие выступы микронеровностей шероховатости, что неизбежно приводит к погрешности при количественной оценке элементного состава. Особое значимо это явление при оценке элементов с совпадающими пиками  $K$ - и  $L$ -линий, такими как  $Ti$  и  $N$ .

При оценке лёгких элементов ( $B$ ,  $C$ ,  $N$ ) высока доля ошибки, связанная с невозможностью отделить пик характеристического рентгеновского излучения от тормозного рентгеновского излучения [136], так как энергия характеристического излучения этих материалов существенно ниже, чем у тяжёлых элементов, а определение этой энергии, из-за строения атомов, происходит по линии  $K$ .

Ещё одним фактором, влияющим на погрешность количественного рентгеноспектрального анализа продуктов износа, расположенных на поверхности металла является величина области генерации рентгеновского излучения. Она может быть оценена по длине максимального пробега электронов, который вычисляется по формуле Канайя-Окаямы (1) [137]:

$$R(\text{мкм}) = 0,0276 \frac{AZ^{-8/9}}{\rho} E_0^{5/3} \quad (1)$$

где  $R$  – глубина проникновения электронов (мкм),  $A$  – атомный вес,  $E_0$  – энергия первичного пучка электронов (кэВ),  $Z$  – атомный номер,  $\rho$  – плотность вещества (г/см<sup>3</sup>).

Как видно из таблицы 1, содержащей расчётную длину пробега электронов в различных элементах и соединениях, для продуктов износа шлифовального круга эта величина составляет около 3 мкм и более. Таким образом, при количественном анализе химического состава частиц, толщина которых менее 3 мкм, может возникать ошибка, связанная с превышением размеров зоны генерации характеристического рентгеновского излучения границ объекта [136].

Таблица 4.1. Максимальная длина пробега электронов

Материал	Ti	Fe	Co	Ni	cBN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Максимальный пробег электронов, мкм	2,76	1,60	1,44	1,39	2,95	3,05	4,38

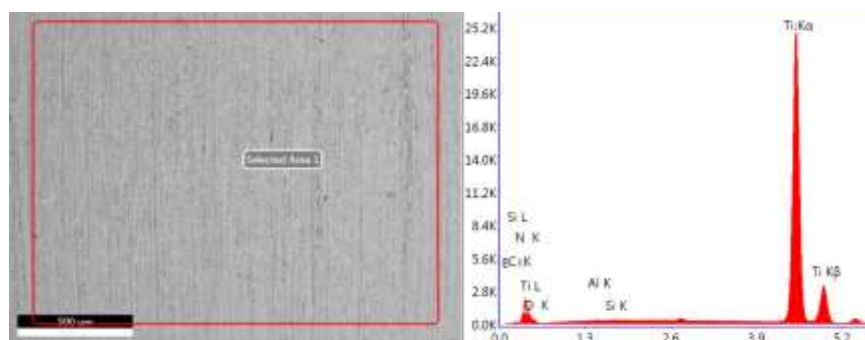
#### 4.3. Оценка интенсивности шаржирования поверхности при шлифовании кругом из КНБ методом ЭДС

Известно, что интенсивность шаржирования при шлифовании карбидом кремния и электрокорундом оценивается энергодисперсионным анализом поверхности [60, 76]. В качестве критерия интенсивности шаржирования в этом случае выступает насыщение поверхности элементом, входящим в состав абразивного материала. По сравнению с традиционными кругами, инструмент из КНБ обладает более сложной структурой, включающей абразивные зёрна, наполнитель и керамическую связку. Поэтому, при оценке ИШ целесообразно учитывать не только основной абразивный материал (кубический нитрид бора), но и наполнитель (корунд).

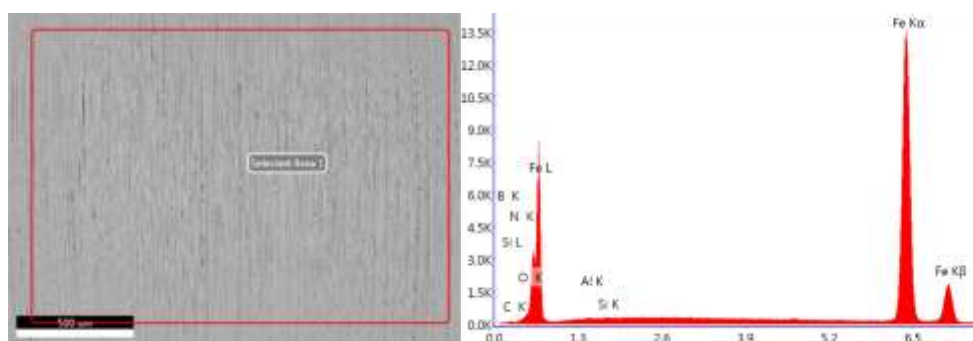
Исходя из проведенных рентгеноспектральных исследований продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность (глава 3) и шлифовального

круга (п. 4.1 настоящей главы), в качестве элементов, по которым возможно было бы оценить ИШ, выбраны бор, углерод, азот, кислород, алюминий и кремний.

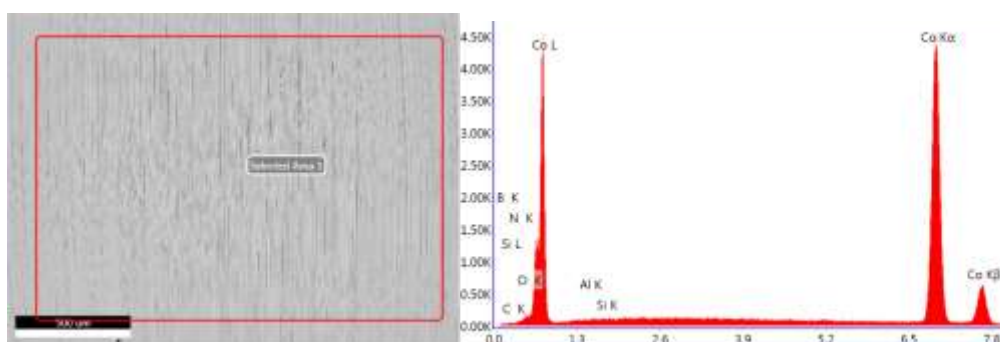
На всех шлифованных поверхностях металлов проведена количественная оценка содержания перечисленных элементов. Примеры выбранных площадей и соответствующие им спектрограммы приведены на рисунке 4.2.



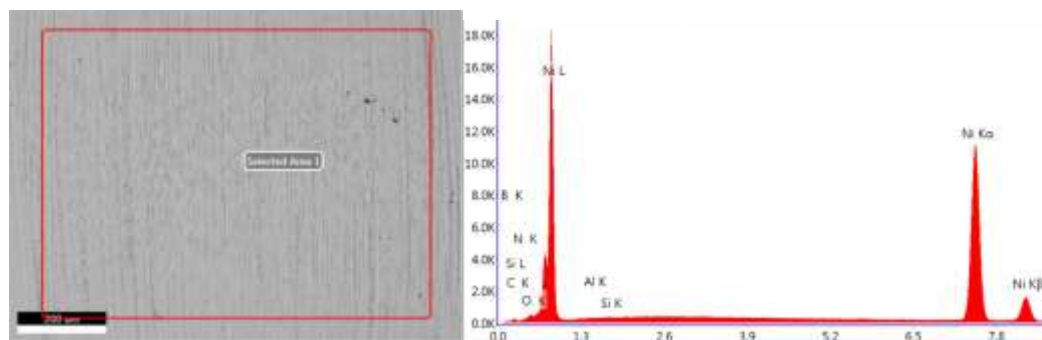
*a*



*б*



*в*

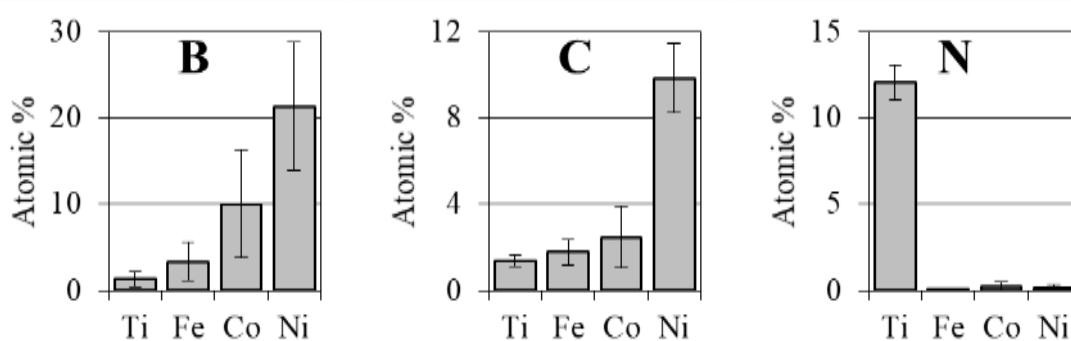


(z)

Рисунок 4.2 – Энергодисперсионный анализ поверхности металлов:

(a) *Ti*; (б) *Fe*; (в) *Co*; (z) *Ni*

Результаты средних значений атомной концентрации каждого из выбранных элементов, полученные в результате 5 измерений в случайно расположенных областях заготовки представлены на рисунке 4.3. Значения доверительных интервалов рассчитаны в автоматическом режиме программой микроскопа. Анализ полученных данных показал, что для всех сплавов получены аномально высокие значения концентрации бора, углерода, азота и кислорода. Концентрация бора и углерода увеличивается в направлении *Ti*, *Fe*, *Co*, *Ni* в то время как концентрация азота и кислорода в этом направлении снижается. Содержание алюминия и кремния, определение которого представляется наиболее достоверным, значимо не отличается между сплавами. Это вызвано низкими значениями, которые не могут быть определены с требуемой точностью. Достоверность оценки лёгких элементов, к которым, согласно ГОСТ Р ИСО 22309—2015, так же относится кислород, очевидно, не достаточна для определения ИШ.



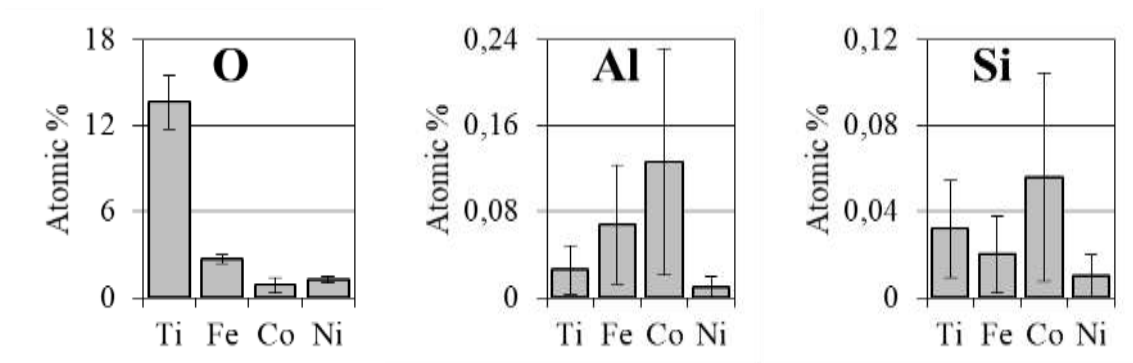
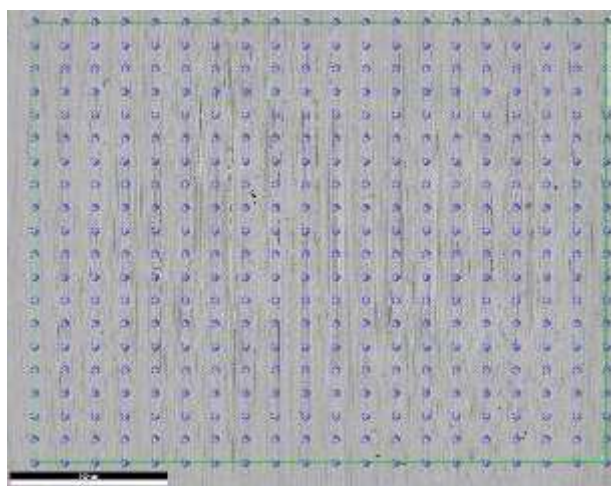
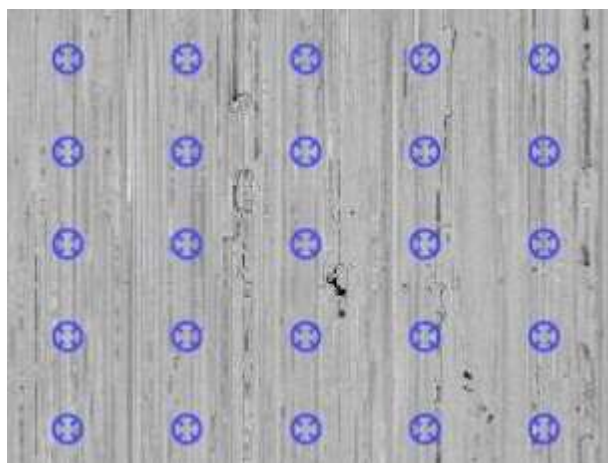


Рисунок 4.3 – Атомная доля элементов на поверхностях сплавов, определенная энергодисперсионным анализом

Низкая достоверность полученных данных может быть вызвана как свойствами металлов (совпадение энергий характеристического рентгеновского излучения  $K$  линий лёгких элементов с  $L$  линиями металлов), так и более низким, по сравнению с кругами из традиционных абразивных материалов, значением интенсивности шаржирования. При проведении измерения таким методом, оценивается спектр, полученный суммированием результатов из 400 точек, расположенных на выбранной площади с заданным шагом (Рисунок 4.4а). При низких значениях ИШ снижается вероятность попадания указанных точек в области, содержащие продукты износа АИ (Рисунок 4.4б).



а



б

Рисунок 4 – Расположение точек, сигнал из которых формирует спектр

#### 4.4. Картирование химических элементов на поверхности металлов

При создании карты распределения элементов изображение формируется на основании энергодисперсионного анализа в каждой точке, соответствующей каждому пикселю формируемого цифрового изображения.

При больших значениях увеличения картирование дает представление о распределении элементов на исследуемой поверхности. Благодаря этому методу созданы карты распределения элементов в областях, в которых идентифицированы различные продукты износа шлифовального круга. На рисунке 4.5 представлен пример карты распределения элементов в области, содержащей внедренное зерно кубического нитрида бора и фрагменты связки. На рисунке 4.5а представлено изображение этих внедренных объектов, полученное в режиме вторичных электронов. Справа и слева от внедренных частиц КНБ и связки видны следы перемещения абразивных зёрен круга по поверхности. В центре изображения наблюдается инородный объект, внедренный в поверхность. Снизу от этого объекта находится навал металла, образованный вследствие перемещения и внедрения объекта в поверхность. Справа от этого объекта множество более мелких частиц, внедренных в поверхность. Наиболее мелкие частицы находятся в верхней части изображения и, судя по следам, оставленным на металле, вдавлены в поверхность другим абразивным зерном.

Этот участок поверхности был найден по изображению, полученному в режиме отраженных электронов (рисунок 4.5б). Судя по этому изображению, на поверхности присутствуют три области, имеющие разницу в среднем атомном номере: внедренные объекты в правой части изображения имеют наиболее низкий атомный номер и чёрный цвет; частица в центре изображения имеет серый цвет, однако он намного темнее металла; металл имеет светлый цвет. В левой части изображения видны частицы, которые есть и на рисунке 4.5а.



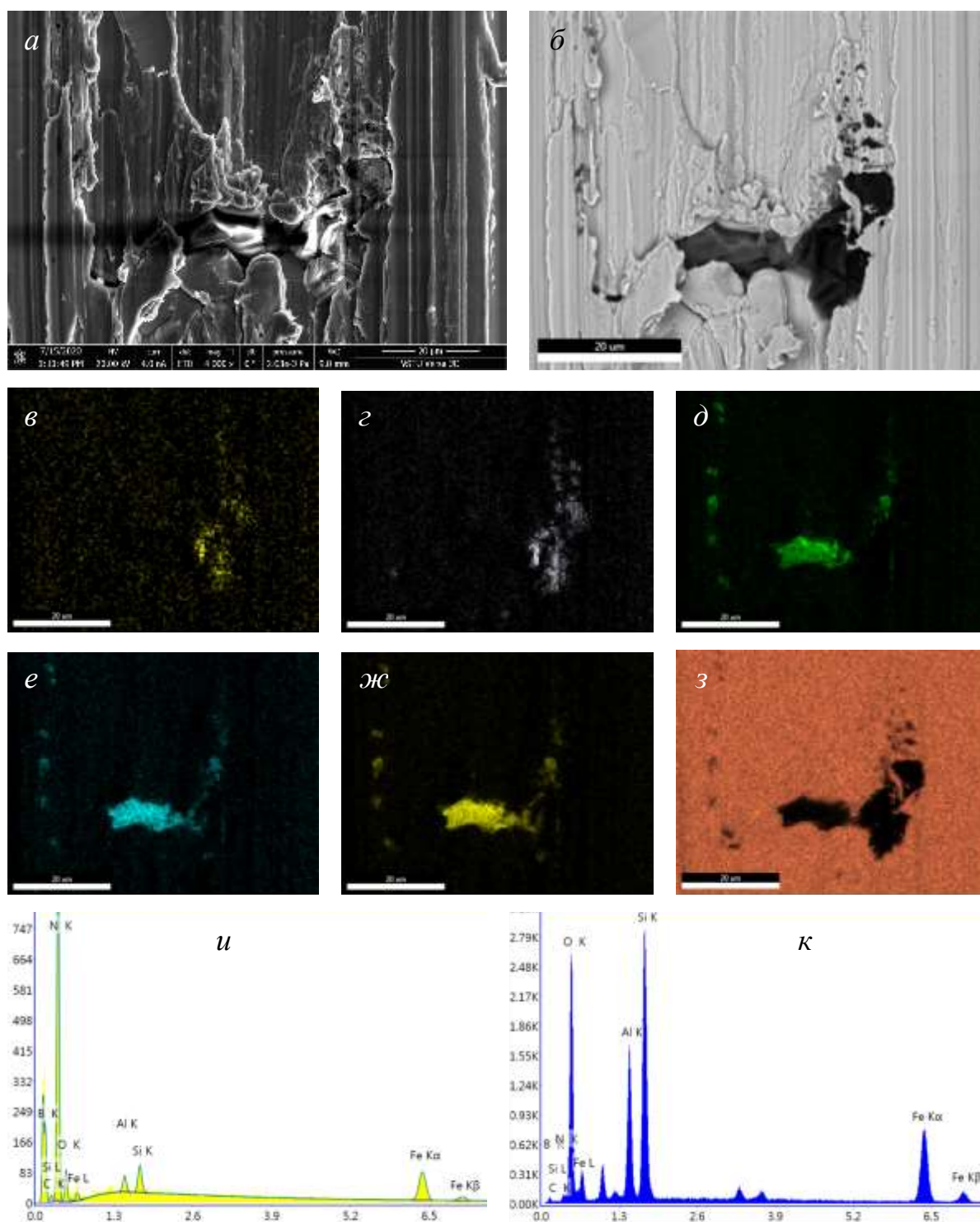


Рисунок 4.5. Картирование участка поверхности стали, содержащего продукты износа АИ

При оценке карт распределения элементов наименее точной и детализированной является карта распределения бора (Рис. 4.5в). В правой части изображения находится множество светлых точек, свидетельствующих о наличии бора в этой области, однако, светлые точки присутствуют и на свободных от



внедренных частиц областях, на изображениях которых ни в отраженных, ни во вторичных электронах внедренные объекты не обнаружены. Это связано с невозможностью отделения сигнала бора от тормозного рентгеновского излучения. При создании карты распределения азота (Рис. 4.5г) наблюдается подобное явление – яркая область, содержащая азот в правой части изображения и ложные единичные сигналы, приходящие из областей свободных от внедренных частиц.

Кислород распределен по поверхности таким образом, что небольшое его количество содержится в правой части изображения; кислород содержится в объекте, который в обратно-рассеянных электронах имел серый цвет и в мелких частицах, расположенных в левой части изображения (Рисунок 4.5д). Карты распределения алюминия (Рисунок 4.5е) и кремния (Рисунок 4.5ж) идентичны и имеют множество общих с кислородом областей. В отличие от распределения кислорода, алюминий и кремний содержатся так же на левой части чёрных (в отраженных электронах) частиц, расположенных в правой части изображения. Карты распределения кремния и алюминия имеют удовлетворительный уровень детализации и позволяют, при сравнении карт с изображениями во вторичных и отраженных электронах, определить границы частицы, к которой они относятся.

Наилучшая детализация изображения, очевидно, получена на карте распределения металла (железа) (Рисунок 4.5з). На этой карте тёмными областями выделяются участки, на которых содержится минимальное количество железа. Расположение этих областей согласуется с изображением в отраженных электронах и другими картами распределения элементов.

По результатам картирования в автоматическом режиме определены 3 вида наиболее характерных спектрограмм: спектрограмма, на которой содержатся только пики железа; спектрограмма, содержащая интенсивные пики бора, азота, а также пики кислорода, кремния, алюминия и железа (Рисунок 4.5и); спектрограмма, содержащая интенсивные пики кислорода, кремния, алюминия, а также небольшие пики углерода, железа и натрия (Рисунок 4.5к). Количественная оценка ИШ такого участка поверхности по насыщению элементом (элементами)

затруднительна из-за низкой достоверности результатов количественной оценки бора и азота на суммарном спектре.

Представленные на рисунке 4.5 изображения позволяют идентифицировать внедренный объект, расположенный в центре, как фрагмент связки, а частицы в правой части изображения, как кристаллы кубического нитрида бора, содержащие на своей поверхности следы связки. К фрагментам связки так же относятся частицы, расположенные в левой части изображения.

Отдельно было исследовано распределение перенесенных фрагментов связки и наполнителя на поверхности металла при шлифовании. На рисунке 4.6 при аналогичном рисунку 4.5 увеличении представлены изображения, карты распределения и спектры характеристического рентгеновского излучения области, на которой были идентифицированы фрагменты наполнителя. По изображению, полученному в режиме вторичных электронов (рисунок 4.6а), видно, что в центральной части изображения расположены внедренные частицы. Эти объекты неравномерно покрыты слоем металла, в котором в местах внедрения частиц возникли полости (в центральной части изображения). Анализ изображения обратно-рассеянных электронов (рисунок 4.6б) показал наличие двух областей белого и серого цветов, отличающихся средним атомным номером. Помимо внедренных объектов на этом изображении видно множество более мелких частиц, которые располагаются в верхней части изображения.

Для данной области карты распределения бора (Рисунок 4.6в) и азота (Рисунок 4.6г) не информативны, так как на них присутствует интенсивный шум, не позволяющий идентифицировать продукты износа зёрен КНБ. Стоит отметить закономерность распределения шума, интенсивность которого явно связана с рельефом исследуемой поверхности. Карты распределения алюминия (Рисунок 4.6е) и кислорода (Рисунок 4.6д) идентичны на всех участках исследуемой области, кроме центрального участка, на котором расположена внедренная частица. На этом участке присутствуют кремний (Рисунок 4.6ж) и кислород, что позволяет отнести эту частицу к связке, а мелкие частицы в верхней части

изображения, внедренные объекты в правой и нижней части изображения, как продукты износа наполнителя.

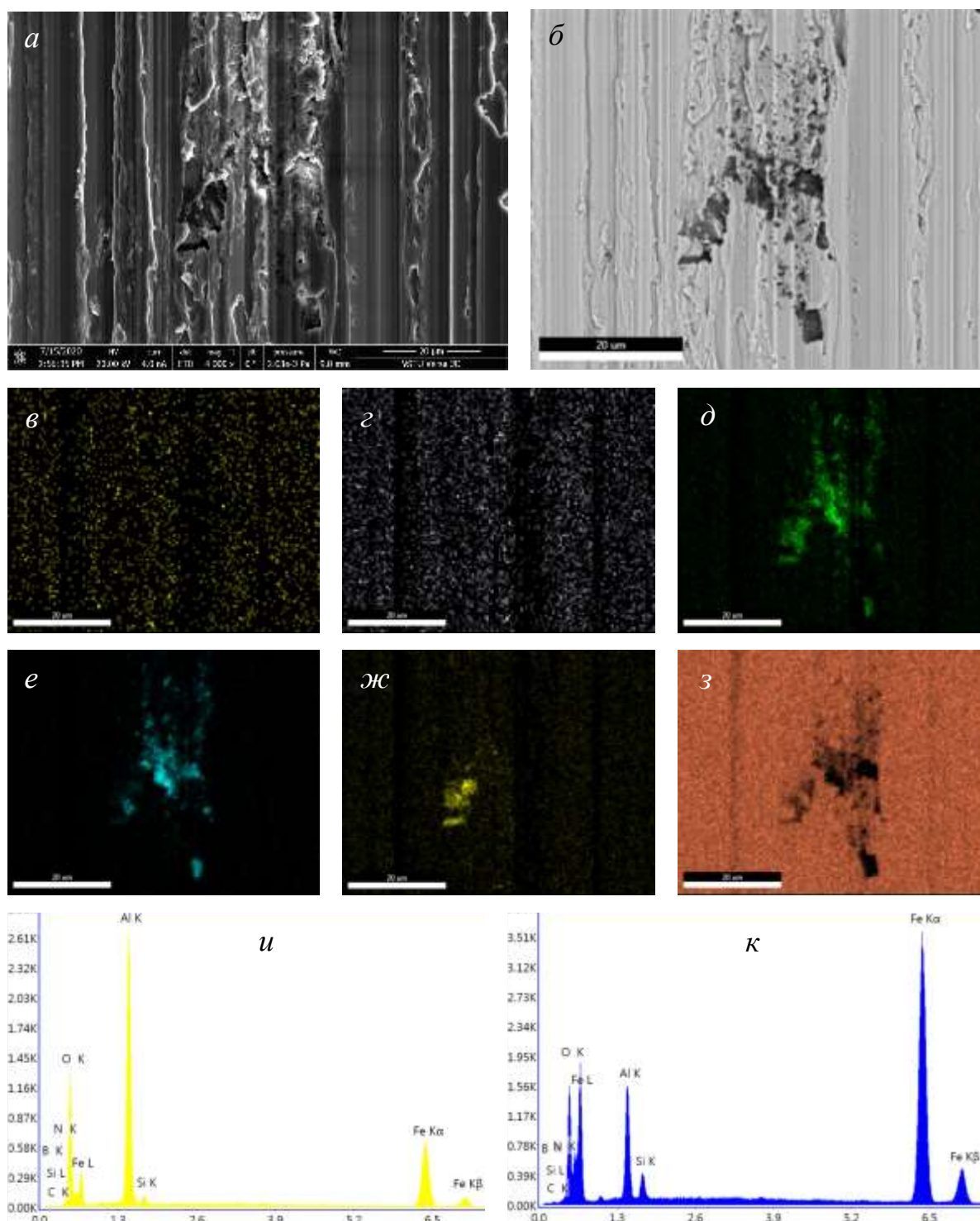


Рисунок 4.6. Картирование участка поверхности железа, содержащего продукты износа АИ при увеличении 4000×

По изображениям, полученным в режиме вторичных (рисунок 4.7а) и обратно-рассеянных (рисунок 4.7б) электронов, на поверхности титана обнаружено множество инородных частиц. Для оценки интенсивности шаржирования картирование было проведено на меньшем увеличении 130×. Построение карт распределения бора и азота (рисунок 4.7в,г) не даёт представления о реальном расположении продуктов износа. В отличие от этих элементов, карта распределения кислорода, кремния и алюминия при увеличении 130× достаточно детализирована для определения участков, на которых присутствуют продукты износа. Соответствующие продуктам износа спектры характеристического излучения были получены для наполнителя и керамической связки абразивного инструмента.

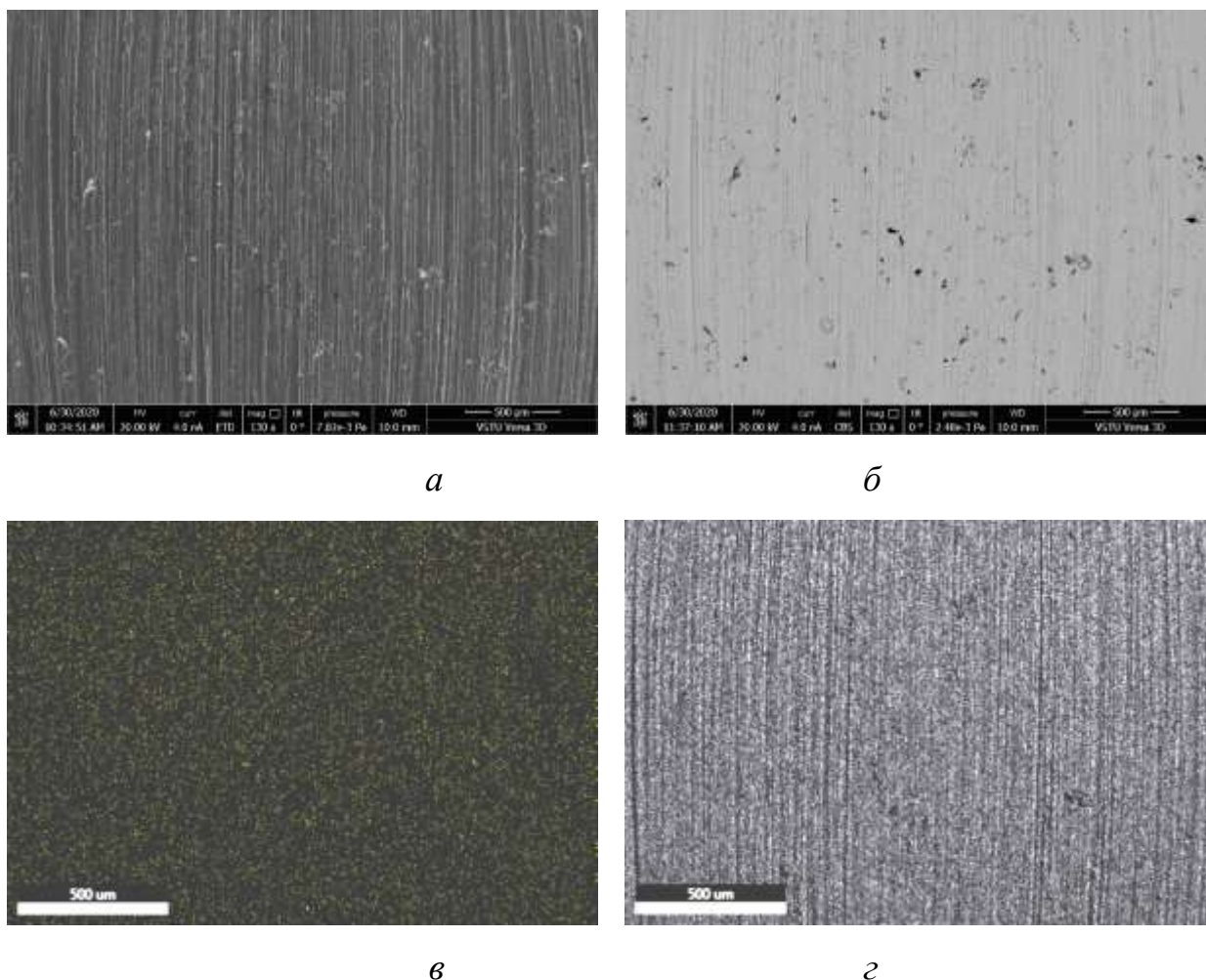


Рисунок 4.7 – Картирование участка поверхности титана при увеличении 130×

При увеличении  $130\times$  по изображениям поверхности так же можно предположить, что поверхность обильно покрыта продуктами износа, однако, при сравнении этих изображений с картами распределения кислорода, кремния и алюминия был сделан вывод о недостаточной детализации карт распределения элементов при исследовании продуктов износа на поверхности металла, так как во многих областях, судя по изображениям в отраженных электронах, средний атомный номер существенно ниже атомного номера металла. На картах распределения элементов какой либо из выбранных элементов отсутствует.

Была выдвинута гипотеза о возможности определения параметров шаржирования по изображениям, полученным в режиме обратно-рассеянных электронов.

#### **4.5. Уровни градационной яркости полутоновых изображений**

При сопоставлении карт распределения элементов и изображений, полученных детектором обратно-рассеянных электронов, шаржирующие продукты износа, содержащие бор, азот, алюминий, кремний и кислород, по сравнению с обрабатываемым металлом, имеют более тёмный цвет. В отличии от карт распределения элементов, построенных на основании рентгеноспектрального анализа, изображения, полученные детектором обратно-рассеянных электронов, обладают более высокой линейной разрешающей способностью и с более высокой точностью передают размеры видимых внедренных частиц.

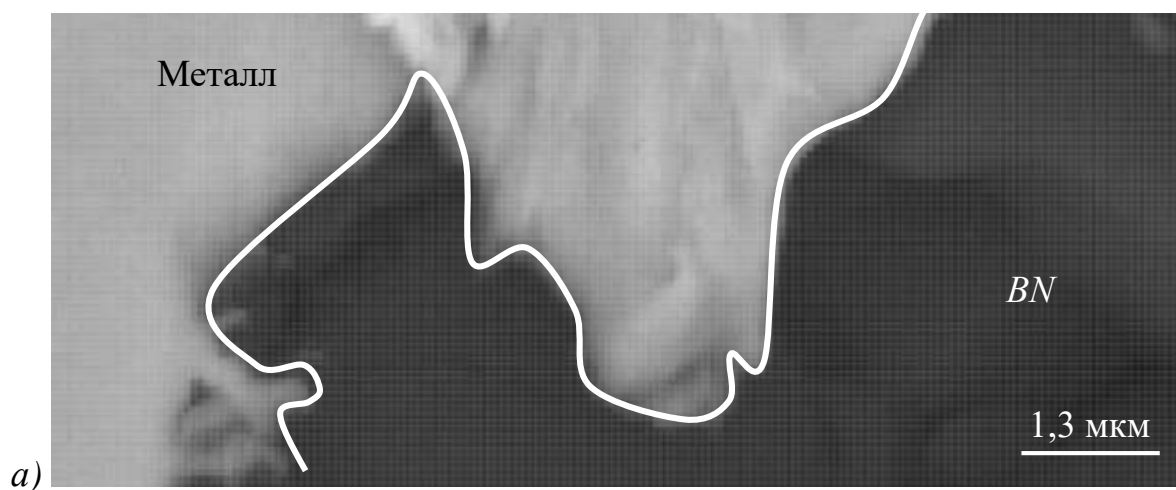
Шаржирование оценивали путем анализа изображений, полученных в обратно-рассеянных электронах. Проведены исследования яркости пикселей полутоновых изображений (в оттенках серого) и возможность их преобразования в бинарные (монохромные). Исходные изображения имеют 24 битную систему кодирования цветовых компонент  $R$ ,  $G$ ,  $B$  (*Red*, *Green*, *Blue*), которые преобразуются в полутоновой вид по формуле [138]:

$$E = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B,$$

где  $E$ - градационный уровень яркости пикселя, формат 8 бит. Каждому пикселю файла изображения соответствует значение уровня яркости от 0 до 255, где 0 – чёрный цвет (минимальное значение), 255 – белый цвет (максимальное значение).

Использование растровых графических редакторов позволяет определить уровни яркости каждого пикселя цифрового изображения. В обратно рассеянных электронах уровень яркости элемента рельефа зависит от энергии отраженных электронов, т.е. от среднего атомного номера и удаленности области от детектора. Низкий уровень яркости характерен для продуктов износа, состоящих из более лёгких, чем металл, элементов и углублений поверхности, сигнал из которых имеет низкую интенсивность.

При исследовании продуктов износа установлено, что уровень яркости пикселей, передающих их расположение и цвет может изменяться в широком диапазоне. В наибольшей степени это свойственно частицам, идентифицированным как корунд и фрагментам связки (рисунок 4.9).



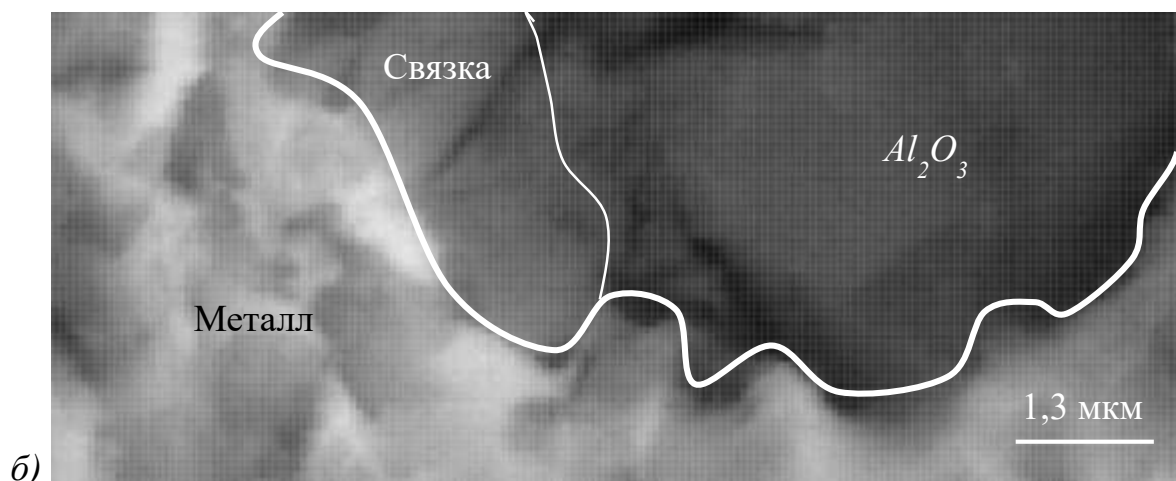
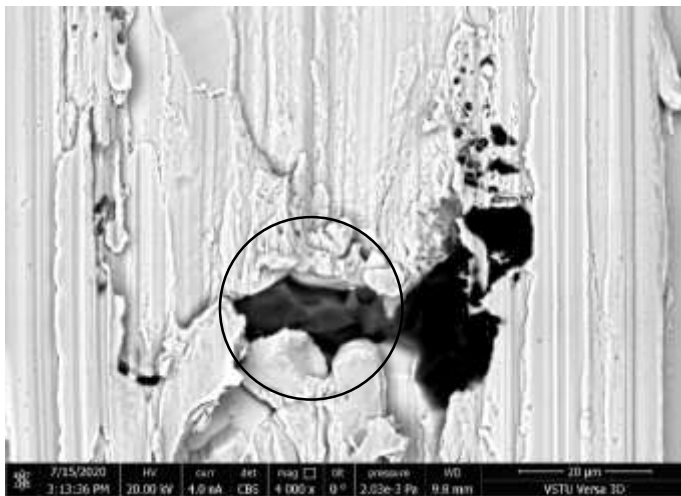


Рисунок 4.9. Граница между внедренными продуктами износа и металлом:  
 а) КНБ, б) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с фрагментами связки и железом.

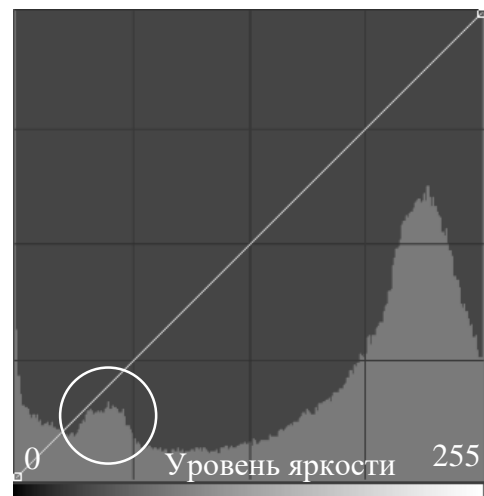
Для выделения продуктов износа на изображениях использован метод, предложенный Оцу [139], основанный на минимизации внутриклассовой дисперсии. Это пороговый метод, при котором все пиксели изображения по признаку градационного уровня яркости делятся на фоновые (металл) и объектные (продукты износа). Аналогичный способ используется, например, при оценке переноса во время изнашивания [140], гидроабразивной и пескоструйной обработке [48], для измерения площади поверхности абразивных зёрен [141].

Продукты износа, включающие кристаллы КНБ, корунда и фрагменты керамической связки имеют различный средний атомный номер, соответственно, отличаются значениями. Уровень яркости пикселей, отображающих поверхность металла может изменяться и зависит от многих, в том числе случайных, факторов, таких как размер образца или наличие на поверхности частиц-диэлектриков (таких как корунд). Анализ изображений продуктов износа (Рисунок 4.8а, в) в графическом редакторе позволил получить гистограммы распределения уровней яркости пикселей изображений (Рис 4.8б, г). Принимая, что уровень яркости класса металл имеет нормальное распределение, его среднее значение на рисунке 4.8б около 220 (значение с максимальной частотой), на рисунок 4.8г – 160. Для КНБ на рисунок 4.8а, б характерен уровень яркости, близкий 0. Уровень яркости

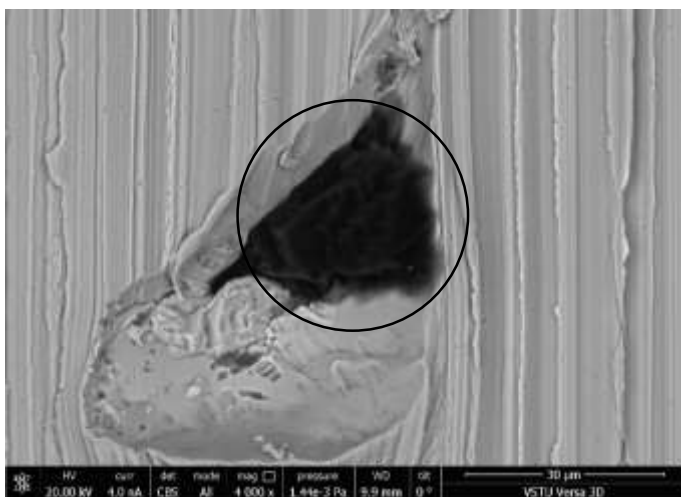
кристалла корунда, выделенного на изображении, находится в пределах от 31 до 64. КНБ на рисунок 4.8б,  $z$  не превышает 40.



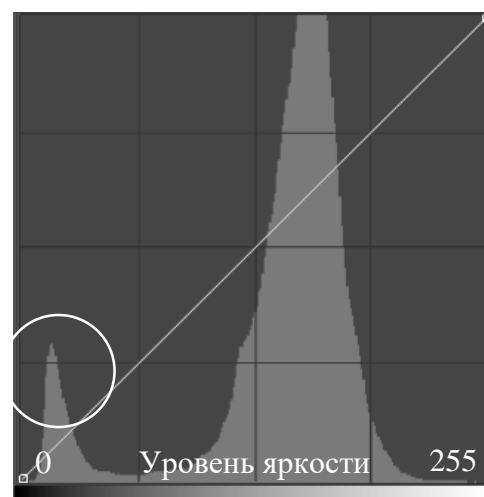
а



б



в



г

Рисунок 4.8. Продукты износа в обратно-рассеянных электронах и соответствующие гистограммы распределения яркости:

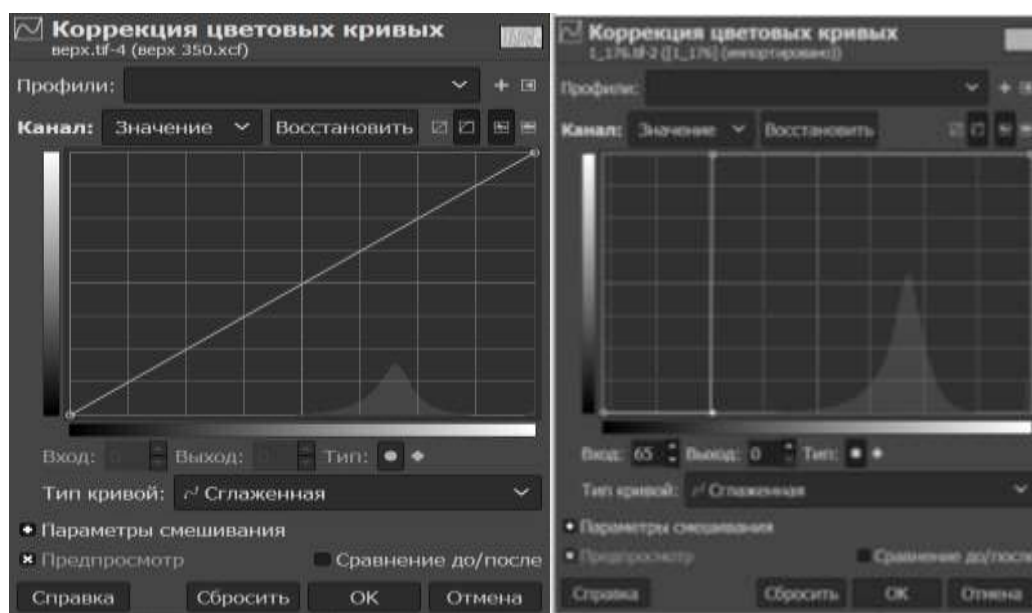
а), б) корунд, КНБ; в), г) КНБ



#### 4.6. Обработка полутоновых изображений методом коррекции цветовых кривых

Для определения интенсивности шаржирования по изображениям, полученным в режиме обратно-рассеянных электронов, необходимо провести цветовую корректировку изображения, направленную на отделение шаржированных частиц от элементов профиля, имеющих сходный цвет, а потому маскирующих внедренные объекты. Целью этой цифровой обработки является приведение изображения к двухцветному виду, в котором шаржированные зёрна будут иметь чёрный цвет, а вся остальная поверхность – белый.

Для проведения такой обработки используется коррекция градационных кривых, общий вид которых представлен на рисунке 4.9.



а

б

Рисунок 4.9 – Цветовые кривые, а) до, б) после настройки

На рисунке представлен график, характеризующий входные параметры изображения во всём тональном диапазоне от чёрного к белому по горизонтальной оси. Вертикальная ось представляет значения, полученные после обработки, то есть выходные значения. Диагональная линия (рисунок 4.9а)

представляет изначальную тональность изображения. Определяя цвет внедренных объектов, идентифицированных как кубический нитрид бора методом энергодисперсионного микроанализа, определяем входной градационный уровень яркости, при значении ниже которого объект идентифицируется как КНБ. Цветовая кривая, представленная на рисунке 4.9б, строится таким образом, чтобы все пиксели, светлее выбранного значения приобретали белый цвет, а темнее – чёрный. Результат обработки приведен на Рисунок 4.10.

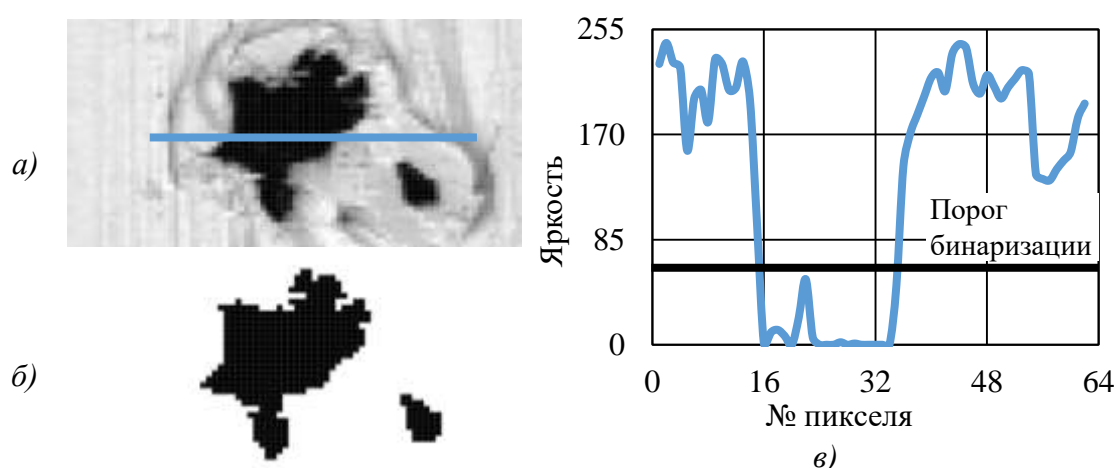


Рисунок 4.10 – Выделение объектов на полутоновых изображениях (а) путем преобразования их в бинарные (б) с определенным порогом (в)

Изображения, полученные после обработки, отображают информацию о размерах, площади, количестве и расположении шаржирующих частиц. Эти параметры могут быть измерены дальнейшей обработкой в графическом редакторе. Для получения информации о количестве, площади и размерах зёрен выделяются все объекты, имеющие одинаковый цвет, то есть шаржирующие продукты износа, после чего все эти параметры вычисляются в автоматическом режиме, после чего выводятся в виде таблицы.

Обработка проведена для продуктов износа КНБ, наполнителя и связки, шаржированных в поверхности металлов при увеличениях 8000, 4000, 2000, 500, 350, 130 крат. В результате анализа полученных данных установлено, что при высоких значениях порога уровня яркости происходит ошибочная идентификация элементов рельефа (границ навалов, царапин, углублений). При низких значениях

часть продуктов износа не выделена. Так же наблюдается зависимость количества ошибочно идентифицированных элементов рельефа от увеличения: на изображениях с низким увеличением меньшая доля элементов рельефа выделена как продукты износа. Вероятнее всего, это вызвано формой элементов рельефа, отличающихся черным цветом: как правило это узкие границы между микрослоями металла. Ширина таких участков, как правило, менее 2 мкм, в результате чего на изображениях с низким увеличением они имеют более светлый тон за счет соседних участков.

В результате анализа гистограмм уровней яркости пикселей более чем 100 изображений и путем сравнения результатов цифровой обработки, в качестве порогового значения принят градационный уровень яркости 65.

#### **4.7. Идентификация продуктов износа по изображениям, полученным в режиме обратно-рассеянных электронов**

Разница энергии отраженных электронов является причиной наличия контраста на полученных цифровых изображениях, который позволяет производить выделение и подсчёт видимой части внедренных продуктов износа. Известно, что значимым фактором, влияющим на уровень яркости участка поверхности, передаваемого цифровым изображением, является рельеф поверхности. Как было отмечено выше, погрешность идентификации продуктов износа вызвана наличием на поверхности пор/раковин, уровень яркости которых не отличается от продуктов износа. По результатам проведенного анализа морфологии поверхностей металлов и на основании литературного обзора установлено, что подобные углубления образуются вследствие пластической деформации металла, на границе слоев металла. Количество таких участков поверхности тем больше, чем выше адгезионная активность между абразивным и обрабатываемым материалом и шероховатость образца.

Для проверки гипотезы о возможности определения параметров шаржирования по изображениям на поверхности титана выбран участок с большим количеством предполагаемых продуктов износа, выделяющихся низким уровнем яркости (Рисунок 4.11). Изображение получено при увеличении 130 $\times$ . Параметр шероховатости шлифованной поверхности  $Ra$  2,8...3,0. На фотографии выделены 44 объекта с уровнем градационной яркости менее 65. Элементный состав всех объектов определяли методом точечного энергодисперсионного микроанализа.

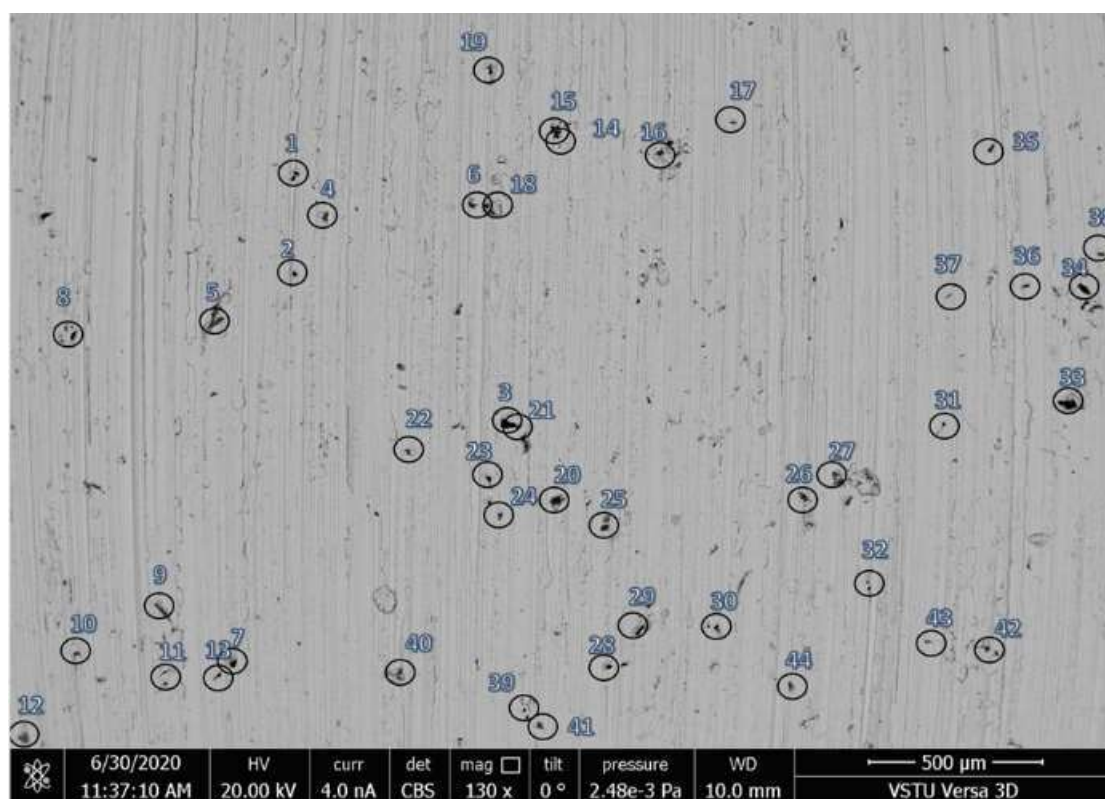
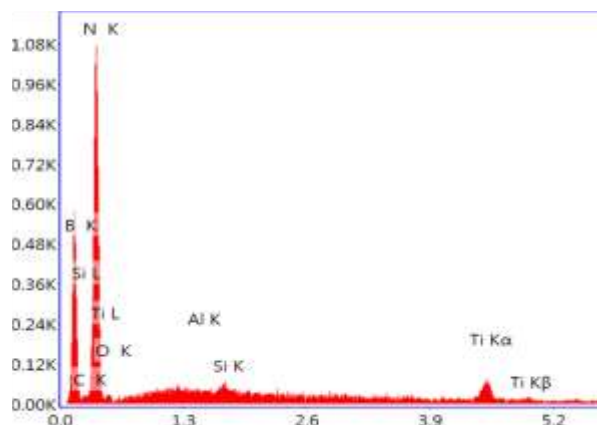


Рисунок 4.11 – Поверхность титана с выделенными предполагаемыми продуктами износа абразивного инструмента из КНБ, полученная в обратно-рассеянных электронах

На рисунке 4.12а приведена типовая спектрограмма зерна кубического нитрида бора на примере объекта 2. На спектрограмме получены пики бора, азота и титана. Элементный состав показан в таблице (рисунок 4.12б). Атомарные концентрации азота и бора близки, что соответствует химической формуле

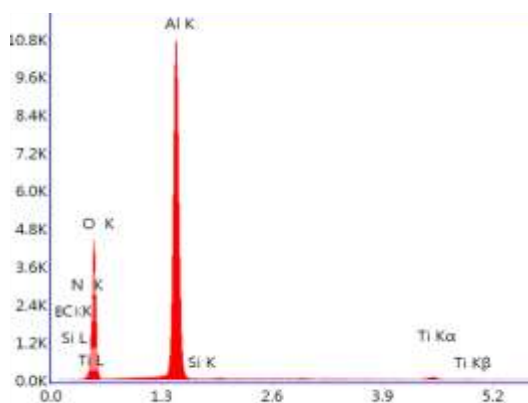
нитрида бора. Подобные результаты получены на объектах 1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42. Всего 29 объектов из 44, что составляет 66% от числа анализируемых объектов. Характерная спектрограмма корунда приведена на примере объекта 4. На рентгенограмме (рисунок 4.12в) выделяются два пика основных элементов корунда (кислород и алюминий) и пик металла (титан). Атомарная концентрация алюминия и кислорода близка к пропорции 2:3 (рисунок 4.12г) и соответствует химической формуле корунда. К корунду отнесены объекты 4, 5, 9, 10, 17, 27, 43, всего 7 объектов, что составляет 16 %. Спектрограммы связки намного разнообразнее (рисунок 4.12д, ж). В состав связки могут входить Al, O, Si, C, Mg, Ca, K, Na. Спектрограммы и химический состав некоторых объектов представлены на рисунке 4.12е, з. Необходимо отметить, что пропорция концентраций химических элементов не постоянна. К связке отнесены пять объектов: 12, 20, 25, 34, 44. Объекты составляют около 11% от общего числа объектов. В последнюю группу включены углубления на обработанной поверхности, которые также выделяются темным цветом. Спектрограмма таких объектов имеет низкую суммарную интенсивность (рисунок 4.12и), а концентрация химических элементов отличается высокой погрешностью (рисунок 4.12к). Подобные характеристики имеют объекты 19, 31 и 37, что составляет 7 % от общего числа затемненных объектов. Площадь указанных объектов составляет около 2% от общей площади, занимаемой шаржированными частицами. При такой площади, занимаемой продуктами износа абразивного инструмента, погрешность 7% можно считать удовлетворительной.



а)

Элементный состав в точке 2		
Element	Atomic%	Error%
B	44,13	10,06
C	2,73	22,9
N	51,76	10,28
O	1,11	26,07
Si	0,04	42,91
Ti	0,22	14,27

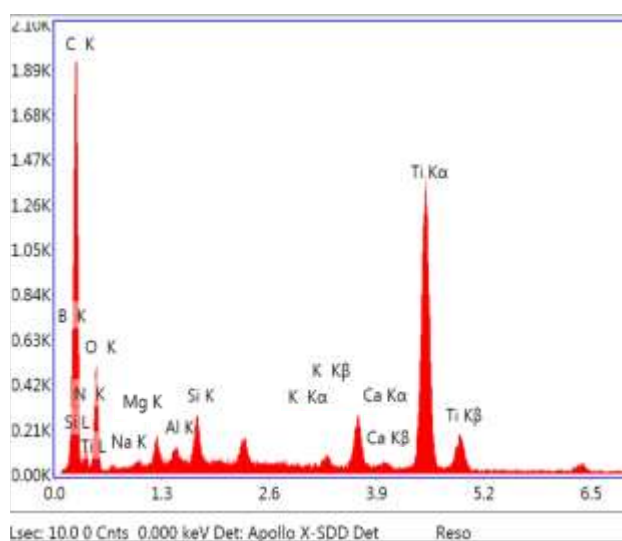
б)



в)

Элементный состав в точке 4		
Element	Atomic%	Error%
B	5,43	53,14
C	1,05	50,43
O	58,36	7,76
Al	34,64	3,83
Ti	0,43	13,47

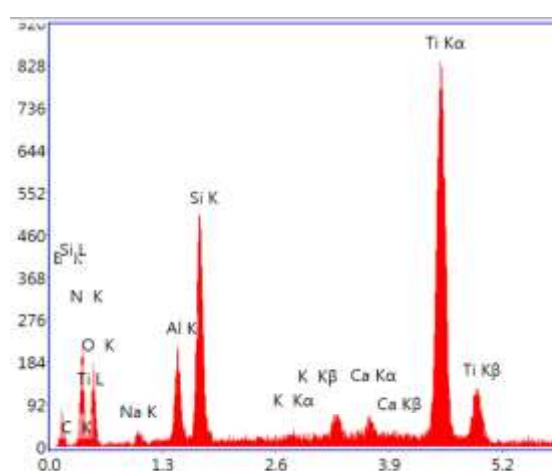
г)



д)

Элементный состав в точке 20		
Element	Atomic%	Error%
B	20,45	10,42
C	57,3	9,44
N	6,58	17,95
O	9,48	12,04
Na	1,24	16,22
Mg	0,25	11,08
Al	0,05	36,58
Si	0,2	10,2
K	0,33	18,67
Ca	1,31	6,8
Ti	2,81	2,62

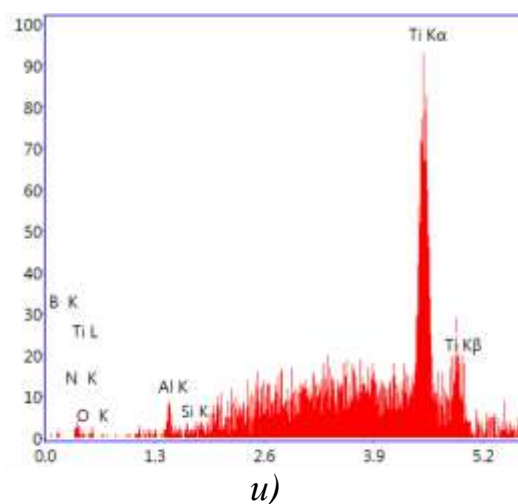
е)



ж)

Элементный состав в точке 26		
Element	Atomic%	Error%
B	41,14	18,41
C	1,02	69,02
N	23,95	12,31
O	18,58	13,91
Na	1,35	12,68
Al	1,46	8,94
Si	3,64	5,53
Ca	0,92	7,4
Ti	7,72	2,54

з)



Элементный состав в точке 19		
Element	Atomic%	Error%
B	21,13	99,99
C	1,09	99,99
N	10,96	43,33
O	12,84	62,23
Al	1,2	91,02
Si	0	4,63
Ti	52,8	6,67

к)

Рисунок 4.12 – Типовые спектрограммы объектов, полученные на основании точечного рентгеноспектрального анализа на поверхности титана (см. рисунок 4.11) после обработки кругом из КНБ (а, в, д, ж, и) и элементный состав (б, г, е, з, к)

#### 4.8. Исследование влияния увеличения на определение параметров шаржирования

На точность определения занимаемой частицами площади, а также на точность определения их количества влияет увеличение, на котором проведена съемка. При этом, чем меньше значение увеличения, тем больше поле зрения и площадь, подвергаемая оценке.

Проведено измерение параметров шаржирования поверхности титана по изображению, полученному при увеличении 130×. Отображаемая на изображении разрешением 1536×1024 пикселя область имеет площадь 6,7 мм<sup>2</sup>, исходя из чего, площадь, передаваемая одним пикселем составляет около 4,25 мкм<sup>2</sup>. Эта область была разбита на 5 участков, изображения которых были получены при увеличении 350×, с тем же разрешением и площадью, передаваемой одним пикселем, равной 0,58 мкм<sup>2</sup> (поле зрения при увеличении х350 составляет 0,9 мм<sup>2</sup>).

Получены распределения площадей внедренных частиц, представленные на рисунке 4.13. При увеличении  $350\times$  более 99% частиц имеют площадь менее  $160 \text{ мкм}^2$ , 85% из них попадают в диапазон до  $5 \text{ мкм}^2$ . При увеличении  $130\times$  площадь менее  $160 \text{ мкм}^2$  имеют 94% частиц. Распределение имеет более пологую форму, по сравнению с  $350\times$ . Проведена проверка статистических гипотез о принадлежности полученных выборок законам распределения [142]. Все выдвинутые статистические гипотезы отвергнуты. С наибольшей достоверностью аппроксимации  $R^2 > 0,85$  полученные данные аппроксимированы степенными функциями:

$$350\times - f = 6,6 \times S_i^{-1,8};$$

$$130\times - f = 6,0 \times S_i^{-1,4},$$

где  $f$  – частота,  $S_i$  – площадь  $i$ -ой частицы.

Различие распределений вызвано тем, что при увеличении  $350\times$  обнаружено множество частиц, площадью от  $0,58 \text{ мкм}^2$  до  $4,25 \text{ мкм}^2$ , которые не могут быть обнаружены при увеличении  $130\times$ .

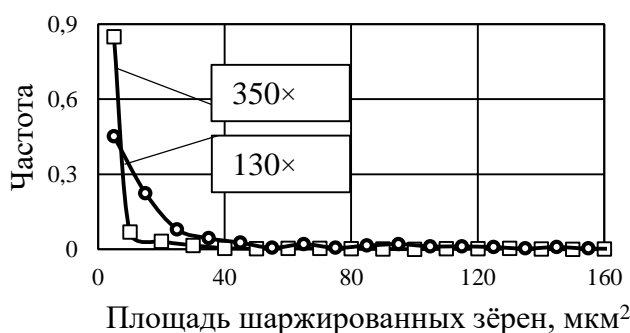


Рисунок 4.13 – Распределение площадей частиц, внедренных в поверхность титана при различных увеличениях

При сравнении абсолютных значений числа зёрен  $N_c$  и площади, занимаемой шаржированными частицами  $S_c$  наблюдается существенное расхождение результатов: площадь, занимаемая шаржированными зёрнами, определенная по изображениям, полученным при  $130$  кратном увеличении ниже



соответствующих значений при 350 кратном увеличении на 20% (рисунок 4.14*а*), число шаржированных зёрен отличается в среднем в 5 раз (рисунок 4.14*б*).

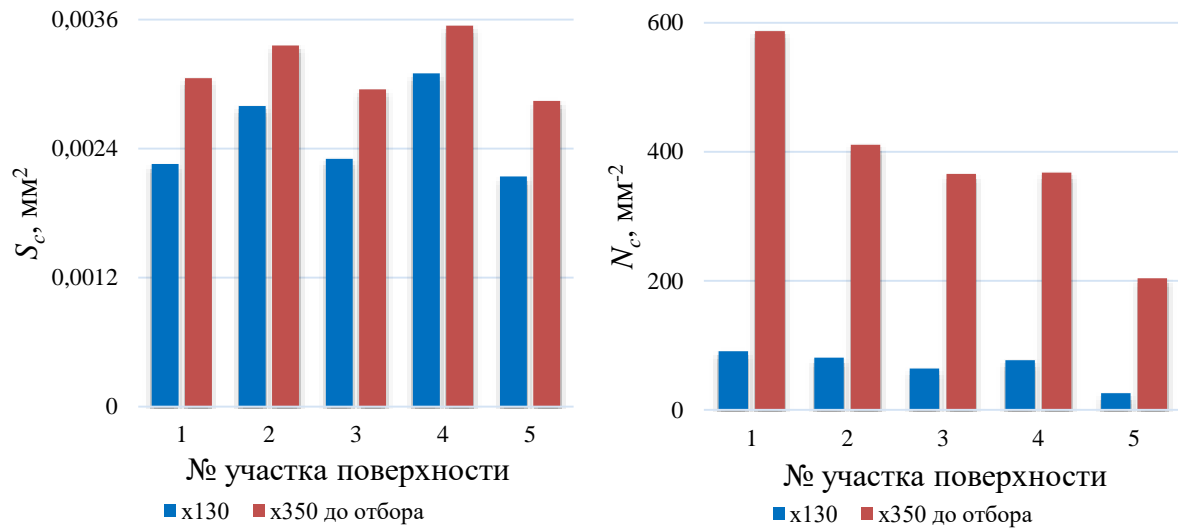


Рисунок 4.14 – Сравнение параметров шаржирования при различных увеличениях (а)  $S_c$ ; (б)  $N_c$ .

При отборе зёрен, площадь которых больше, чем минимально определяемая при увеличении 130×, разница между значениями существенно сокращается и может быть использована для расчёта погрешности, возникающей при определении количества и площади шаржированных зёрен, площадью более 4,25  $\text{мкм}^2$  (рисунок 4.15).

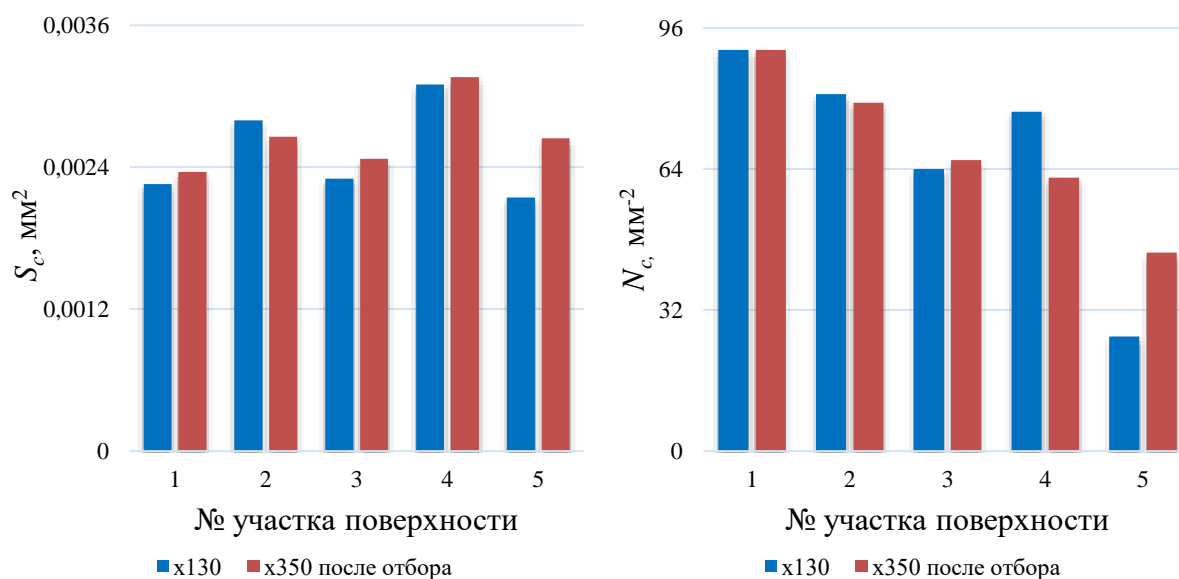


Рисунок 4.15 – Сравнение параметров шаржирования при различных увеличениях (а)  $S_c$ ; (б)  $N_c$  после отбора частиц площадью более  $4,25 \text{ мкм}^2$ .

В результате анализа представленных данных установлено, что средняя ошибка определения площади, занимаемой шаржированными частицами, вызванная увеличением, составляет 7%, ошибка определения числа шаржированных зёрен – 14%, а средняя ошибка определения площади единичного зерна (при сопоставлении одних и тех же зёрен при  $130\times$  и  $350\times$ ) – 31%, при этом для зёрен до  $20 \text{ мкм}^2$  это значение составляет 39%, а для зёрен большего размера – 11%.

Общая погрешность определения количества видимых шаржированных частиц складывается из погрешности, вызванной ошибкой идентификации, при которой за продукты износа могут быть приняты элементы рельефа (углубления) и ошибки, вызванные значением увеличения, при котором группы зёрен могут быть приняты за одно и т.д. Так как погрешность идентификации является систематической и завышает полученные значения, то верхняя граница доверительного интервала при определении среднего значения количества частиц на 7% выше среднего значения, а нижняя граница на 9% меньше среднего. Погрешность определения площади, занимаемой видимыми шаржированными частицами складывается из этих же факторов и в сумме составляет 9%.

При измерении параметров шаржирования 60 областей площадью 1,1 мм получены значения суммарных относительных площадей, занимаемых шаржированными частицами  $S_{cr}$  и относительного числа частиц  $N_c$ . Установлено, что оба параметра  $S_c$  и  $N_c$ , подчиняются логнормальному закону распределения. Критерий Пирсона для  $S_c$  составил 7,3 при критическом значении 11,0 (для  $\alpha=0,05$ ) с параметрами распределения (стандартное отклонение  $\sigma$  и математическое ожидание  $\mu$  натурального логарифма,  $\text{мкм}^2$ )  $\sigma = 0,8$ ,  $\mu = 6,6$  (Рисунок 4.16б); для  $N_c$  критерий Пирсона 5,5, параметры  $\sigma = 0,8$ ,  $\mu=4,4$   $\text{мм}^{-2}$  (Рисунок 4.16в).

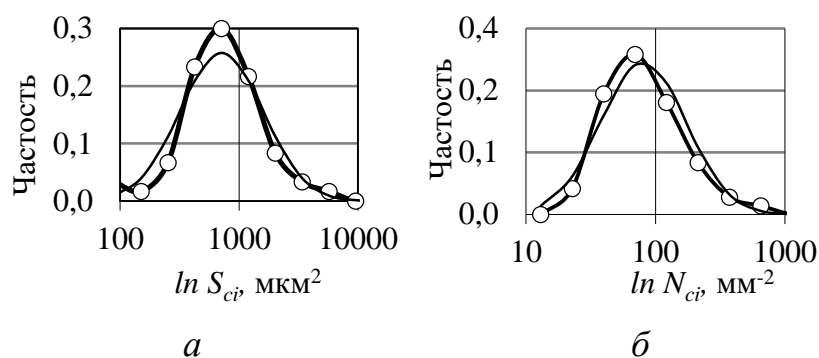


Рисунок 4.16 –распределение  $S_{ci}$  (а) и  $N_{ci}$  (б)

#### 4.9. Выводы

По результатам энергодисперсионного анализа круга и шлифованных поверхностей определен набор элементов, который входит в состав шаржирующих продуктов износа АИ.

Измерение интенсивности шаржирования по определению концентрации элементов, входящих в состав абразивного материала методами энергодисперсионного анализа не дало положительных результатов. В связи с этим был предложен способ определения параметров шаржирования по полутоновым изображениям, полученным обратно-рассеянными электронами.

Для измерения параметров шаржирования определен порог бинаризации изображений.

Анализ представленных выше данных показал, что предложенным методом интенсивность шаржирования может быть измерена по количеству видимых внедренных продуктов износа и площади, занимаемой их видимой частью. Наблюдается сильная корреляция между этими двумя параметрами. При их оценке возникают сходные систематические ошибки, вызванные увеличением микроскопа и ошибкой идентификации, которые приведены выше. Разброс значений числа видимых внедренных продуктов износа при различных увеличениях микроскопа имеет гораздо большую величину, по сравнению с разбросом значений площади, занимаемой этими продуктами износа. Так как эта ошибка имеет большее значение, по сравнению с ошибкой идентификации, целесообразно, в качестве параметра критерий интенсивности шаржирования, выбрать именно площадь, занимаемую видимой частью внедренных продуктов износа. Точно – среднее значение относительной площади шаржирования,  $\text{мкм}^2/\text{мм}^2$ .

## 5. Закономерности процесса шаржирования

### 5.1. Параметры шаржирования при шлифовании металлов

На основе разработанного способа измерена площадь каждого шаржирующего объекта ( $S_i$ , мкм<sup>2</sup>) и рассчитана средняя площадь шаржированных частиц  $\bar{S}_i$ , определено значение максимальной площади  $S_{max}$ , относительной площади ( $S_{ci}$ , мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) и относительное количество шаржирующих продуктов износа ( $N_{ci}$ , мм<sup>-2</sup>) на заданной площади обработанной поверхности. Параметры шаржирования определены при шлифовании титана ( $Ti$ ), железа ( $Fe$ ), кобальта ( $Co$ ) и никеля ( $Ni$ ) абразивными инструментами двух характеристик  $CBN30B126M100\%V$  ( $B126M$ ) и  $CBN30B251K100\%V$  ( $B251K$ ) на начальном этапе шлифования непосредственно после правки шлифовального круга (удаляемый припуск – 0,02 мм) ( $b$ ) и в конце периода шлифования (припуска 0,5 мм) ( $a$ ). Рассмотрено влияние правки абразивного инструмента: правка методом обкатки роликом (обкатка) и правка методом точения алмазным карандашом (точение).

Полученные распределения площадей шаржирующих зёрен  $S_i$  при шлифовании титана в различных условиях представлены на рисунке 5.1, где 1 – после шлифования кругом с характеристиками  $B126M$ , правка обкаткой, припуска 0,5 мм; 2 – то же, на начальном этапе шлифования; 3 – кругом  $B251K$ , правкой точением, припуск 0,5 мм; 4 – то же, на начальном этапе шлифования. Графики описываются степенной зависимостью частоты  $f$  от  $S_i$ :  $f = aS_i^b$ : 1 –  $a=11,1$ ,  $b=-2,2$ , достоверность аппроксимации  $R^2=0,84$ ; 2 –  $a=3,5$ ,  $b=-1,5$ ,  $R^2=0,90$ ; 3 –  $a=16,4$ ,  $b=-2,1$ ,  $R^2=0,99$ ; 4 –  $a=25,3$ ,  $b=-2,3$ ,  $R^2=0,98$ .

Средняя площадь частиц  $\bar{S}_i$  и максимальная наблюдаемая площадь  $S_{max}$  составляет 1 – 9 и 540; 2 – 15 и 1118; 3 – 21 и 965; 4 – 33 и 2754 мкм<sup>2</sup> соответственно.

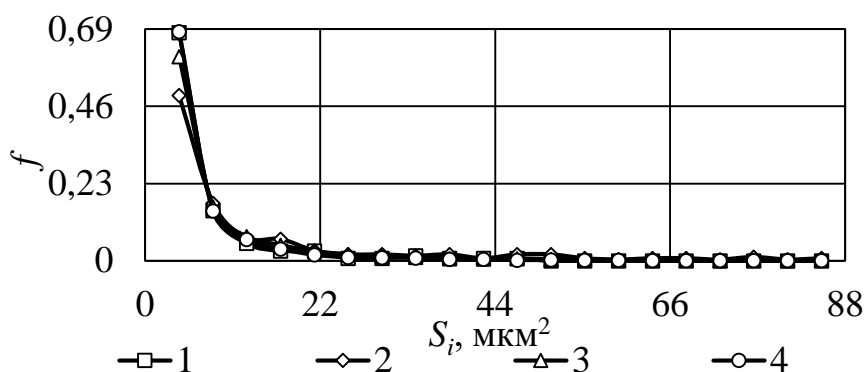


Рисунок 5.1 – Распределение  $S_i$  на поверхностях титана при шлифовании кругами из КНБ в различных условиях

Установлено, что распределение параметров  $S_{ci}$  и  $N_{ci}$  при шлифовании титана во всех рассматриваемых условиях подчиняется логнормальному закону распределения. В качестве примеров, на рисунке 2 приведены распределения  $S_{ci}$  в наиболее контрастных условиях 1 и 4. Параметры распределений ( $\sigma$  – стандартное отклонение,  $\mu$  – математическое ожидание натурального логарифма величины, размерность  $\text{мкм}^2/\text{мм}^2$ ): 1)  $\sigma = 1,4$ ,  $\mu = 1,4$ ; 2)  $\sigma = 1,1$ ,  $\mu = 6,8$ ; 3)  $\sigma = 1,2$ ,  $\mu = 6,3$ ; 4)  $\sigma = 0,7$ ,  $\mu = 7,6$ .

Соответствующие распределения  $N_{ci}$  имеют аналогичный рисунку 5.2 вид с параметрами распределений (размерность  $1/\text{мм}^2$ ): 1)  $\sigma = 0,9$ ,  $\mu = 0,9$ ; 4)  $\sigma = 0,8$ ,  $\mu = 4,8$ .

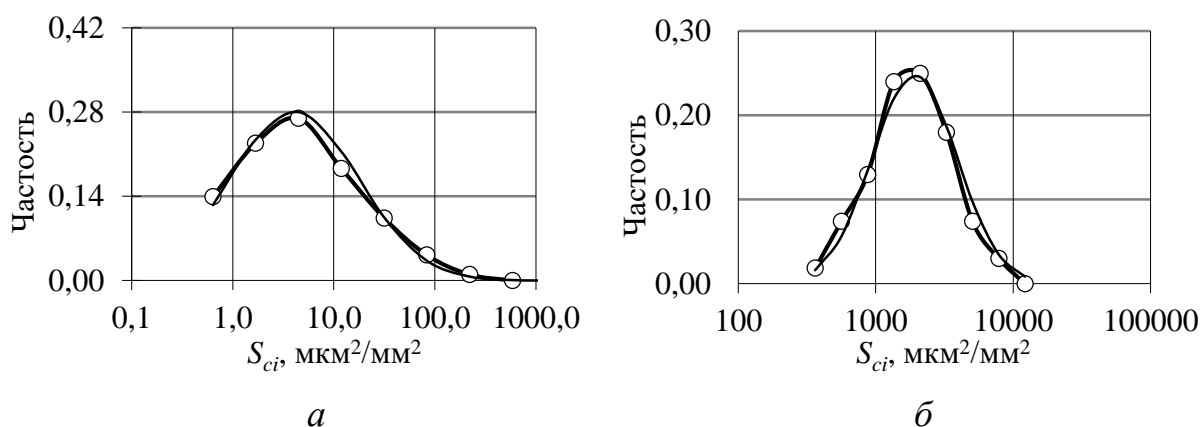


Рисунок 5.2 – Распределение относительной площади шаржирующих продуктов износа после шлифования кругом характеристики *B126M*, с припуском 0,5 мм (а); на начальном этапе обработки кругом *B251K* (б).

Распределения площади шаржирующих зёрен  $S_i$  при шлифовании железа, кобальта и никеля подчиняются тем же закономерностям, что и при шлифовании титана (Рисунок 5.3). При шлифовании кобальта распределение площадей шаржирующих частиц не было получено из-за их небольшого количества (около 10 штук).

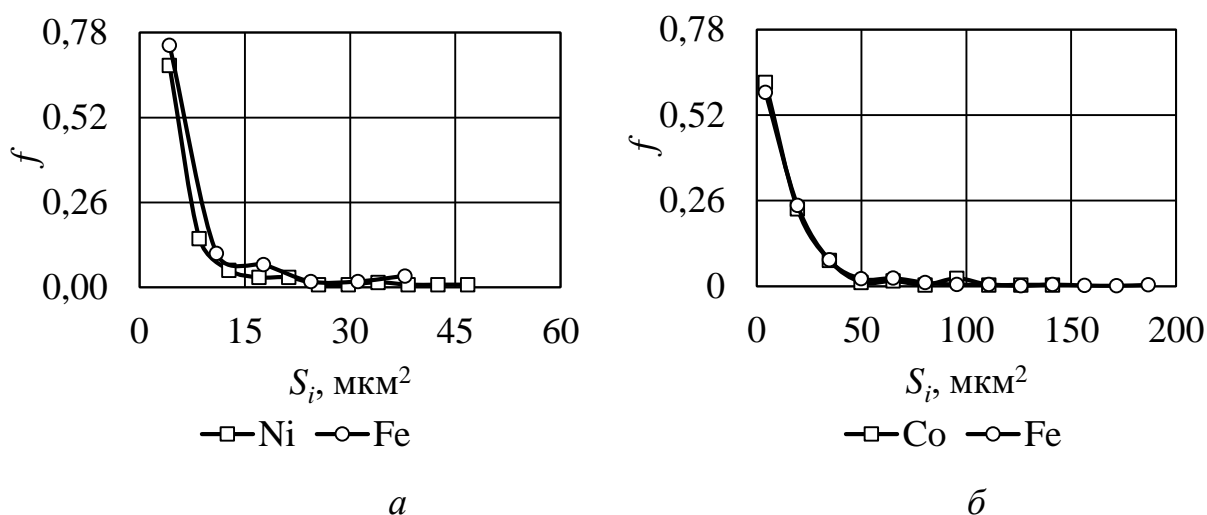


Рисунок 5.3 – Распределения площадей шаржирующих частиц при шлифовании со съемом припуска 0,5 мм (а), на начальном этапе (б)

Низкая интенсивность шаржирования при шлифовании кобальта и железа, вследствие их низкой адгезионной активности, не позволяет определить закон распределения параметров  $S_{ci}$  и  $N_{ci}$  на принятом увеличении 130 $\times$ . Более 80% участков не содержат внедренных частиц, для них  $S_{ci}=0$ . В таком случае, для определения закона распределения необходимо перейти на большую кратность увеличения.

Средние значения площади шаржирующих частиц  $\bar{S}_i$ , приведённой площади частиц  $\bar{S}_{cr}$  и приведенного количества  $\bar{N}_c$  на единицу анализируемой площади шлифованной поверхности определены для всех анализируемых выборок измерений (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Параметры шаржирования металлов при шлифовании в различных условиях

Круг	<i>B126M</i>							<i>B251K</i>
Метод правки	Обкатка							Точение
Этап обработки	<i>a</i> (припуск 0,5 мм)				<i>b</i> (припуск 0,02 мм)			<i>a</i>
Металл	<i>Ti</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ti</i>
$\bar{N}_c$ , шт/мм <sup>2</sup>	5,9	4,0	1,7	0,2	44,4	7,7	23,8	85,2
$\bar{S}_{cr}$ , мкм <sup>2</sup> /мм <sup>2</sup>	29,2	7,9	3,8	0,4	202	23,3	94,1	178
$\bar{S}_i$ , мкм <sup>2</sup>	8,9	8,5	9,3	8,0	15,2	18,2	12,9	—
$K_g$ , мм <sup>3</sup> /мм <sup>3</sup>	4,65	5,44	14,93	55,58	—	—	—	1,21

## 5.2. Влияние условий шлифования на параметры шаржирования

Параметр  $\bar{S}_{cr}$ , принятый в качестве критерия интенсивности шаржирования, при шлифовании исследованных металлов снижается в направлении *Ti*, *Ni*, *Fe*, *Co*. В этом же направлении снижается интенсивность адгезионного взаимодействия металлов с абразивным инструментом при шлифовании. Заключение сделано по результатам анализа морфологии обработанных поверхностей металлов. (Глава 3 «Исследования морфологии и шаржирования поверхности») В рассмотренном ряду металлов  $\bar{S}_{cr}$  уменьшается в 65 раз. Аналогичная закономерность наблюдается с показателем  $\bar{N}_c$ : от *Ti* к *Co* данный показатель шаржирования снижается почти в 24 раза, средняя площадь шаржирующей частицы  $\bar{S}_i$  – в 2,6 раза.

Статистические параметры шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструментов определяли на этапе приработки круга. Например,  $\bar{S}_{cr}$  в направлении от *Ti* к *Co* снижается почти в 9 раз,  $\bar{N}_c$  – в 6 раз,  $\bar{S}_i$  – в 2,6 раза. При шлифовании никеля исследования показателей шаржирования на этапе приработки не проводили.

Максимальное значение ИШ наблюдается на начальном этапе обработки, непосредственно после правки шлифовального круга, что обусловлено



частичным разрушением шлифовальных порошков и связки круга в процессе правки. На первых проходах в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом отделяются фрагменты зерен и связки с нарушениями целостности поверхности, часть из которых шаржирована в обрабатываемую поверхность. Критерий интенсивности шаржирования  $\bar{S}_{cr}$  на этапе приработки в 7-52 раза больше, чем на последнем проходе. Различие возрастает с уменьшением склонности обрабатываемого материала к шаржированию.

Причина в том, что на этапе приработки (непосредственно после правки круга) с уменьшением адгезионного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в направлении от  $Ti$  к  $Co$  критерий ИШ, что было отмечено выше, снижается всего в 9 раз, а в конце периода шлифования, когда инструмент работает в режиме равномерного самозатачивания – в 65 раз.

Такая же закономерность прослеживается и в отношении показателей  $\bar{N}_c$  и  $\bar{S}_i$ . Различие в значениях  $\bar{N}_c$  на этапе приработки и в конце периода шлифования возрастают в направлении от  $Ti$  к  $Co$  с 8 до 32 крат, для показателя  $\bar{S}_i$  – с 2,6 до 1,0.

Представленные закономерности изменения показателей шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструментов свидетельствуют о правомерности выбора статистического параметра средней приведённой площади шаржирующих частиц  $\bar{S}_{cr}$  в качестве критерия интенсивности шаржирования, как наиболее чувствительного к изменению условий шлифования.

При шлифовании титана более мягким кругом большей зернистости  $\bar{S}_{cr}$  возрастает почти в 6 раз, количество шаржирующих частиц, соответственно, в 15.

Коэффициент шлифования  $Kg$  от  $Ti$  к  $Co$  возрастает 12 раз. Если оперировать не  $Kg$ , а относительным износом абразивного инструмента ( $1/Kg$ ), закономерности его изменения согласуются с закономерностями изменения параметров шаржирования. Тем не менее, коэффициент парной линейной корреляции  $Kg$  с показателями шаржирования не превышает 0,6. При

логарифмировании значений коэффициент парной линейной корреляции для всех показателей, кроме среднего размера площади объекта шаржирования превышает 0,95.

Коэффициент шлифования  $Kg$  от  $Ti$  к  $Co$  возрастает 12 раз. Если оперировать не  $Kg$ , а относительным износом абразивного инструмента ( $1/Kg$ ), закономерности его изменения согласуются с закономерностями изменения параметров шаржирования. Тем не менее, коэффициент парной линейной корреляции  $Kg$  с показателями шаржирования не превышает 0,6 (табл. 5.2). При логарифмировании значений коэффициент парной линейной корреляции для всех показателей, кроме среднего размера площади объекта шаржирования превышает 0,95, что свидетельствует о более высокой силе связи между логарифмированными значениями показателей.

Таблица 5.2 Коэффициент парной линейной корреляции между показателями шаржирования и шлифования (натуральные значения показателей)

Показатели	$\bar{S}_{cr}$	$\bar{N}_c$	$\bar{S}_i$	$S_{max}$	$Kg$
$\bar{S}_{cr}$	1,00	1,00	0,41	0,93	-0,46
$\bar{N}_c$	1,00	1,00	0,31	0,89	-0,42
$\bar{S}_i$	0,41	0,31	1,00	0,71	-0,53
$S_{max}$	0,93	0,89	0,71	1,00	-0,59
$Kg$	-0,46	-0,42	-0,53	-0,59	1,00

Зависимость критерия интенсивности шаржирования  $\bar{S}_{cr}$  от коэффициента шлифования  $Kg$  с высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации описывается степенными функциями (рис. 5.4).

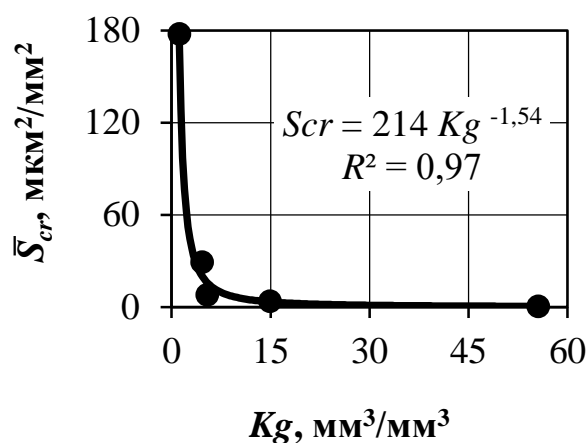


Рисунок 5.4 – Зависимость критерия ИШ  $\bar{S}_{cr}$  от коэффициента шлифования  $Kg$

## 5.1 Выводы

Проведено измерение параметров шаржирования поверхностей металлов, шлифованных в различных условиях. Установлено, что при шлифовании показатели шаржирования возрастают с увеличением интенсивности адгезионного взаимодействия абразивного инструмента из КНБ в ряду металлов *Co, Fe, Ni, Ti*:  $\bar{S}_{cr}$  – в 65 раз,  $\bar{N}_c$  – в 24 раза.

Установлена степенная зависимость параметров шаржирования  $\bar{S}_{cr}$  и  $\bar{N}_c$  от коэффициента шлифования  $Kg$

Максимальное значение критерия ИШ и среднего количества шаржирующих продуктов износа АИ наблюдается на начальном этапе обработки кругом, что обусловлено частичным разрушением шлифовальных порошков и связки круга в процессе правки. Критерий интенсивности шаржирования  $\bar{S}_{cr}$  и относительное количество внедренных продуктов износа АИ  $\bar{N}_c$  на этапе приработки непосредственно после правки АИ, соответственно, в 7-52 и 8-32 раз больше, чем на последнем проходе. Различие возрастает с уменьшением склонности обрабатываемого материала к шаржированию. Полученные данные согласуются с известными выводами о влиянии времени обработки на параметры шаржирования при доводке и полировке.

При шлифовании титана более мягким кругом большей зернистости  $\bar{S}_{cr}$  возрастает почти в 6 раз, количество шаржирующих частиц, соответственно, в 15.

## Заключение

Решена актуальная научная задача по выявлению особенностей и закономерностей процесса шаржирования, сопровождающего шлифование металлов с применением инструмента из КНБ. Определены особенности процесса: вид продуктов износа, глубина их внедрения и влияние на структуру поверхностного слоя, закон распределения относительного количества шаржирующих продуктов износа абразивного инструмента и относительной площади шаржирования. Установлены взаимосвязи между показателями шаржирования и показателем процесса шлифования.

На основании выполненной работы получены следующие основные **выводы:**

1. Доказано, что при шлифовании кругом из кубического нитрида бора титана, железа, кобальта и никеля происходит шаржирование обработанной поверхности продуктами износа АИ.

2. На основе результатов рентгеноспектрального микроанализа установлено, что материал шаржирующих включений содержит нитрид бора (основной компонент – шлифовальный порошок из кубического нитрида бора), окись алюминия  $Al_2O_3$  (корунд, шлифовальный порошок используемый в качестве наполнителя), материал отдельных включений содержит атомы кислорода, кремния, натрия, калия, кальция, магния, что позволяет считать посторонние включения продуктами износа керамической связки абразивного инструмента.

3. Разработан способ измерения показателей процесса шаржирования: площадь шаржирующего продукта износа АИ, относительная площадь и относительное количество шаржирующих тел на единице обработанной поверхности. Измерение производится путем выделения, бинаризации и подсчёта связных областей изображений шлифованной поверхности в обратно-рассеянных электронах.

4. При шлифовании показатели шаржирования возрастают с увеличением интенсивности адгезионного взаимодействия абразивного

инструмента из КНБ в ряду металлов  $Co$ ,  $Fe$ ,  $Ni$ ,  $Ti$ :  $\bar{S}_{cr}$  – в 65 раз,  $\bar{N}_c$  – в 24 раза,  $\bar{S}_i$  – в 2,4 раза.

5. Максимальное значение критерия ИШ и среднего количества шаржирующих продуктов износа АИ наблюдается на начальном этапе обработки кругом, непосредственно после правки АИ, что обусловлено частичным разрушением шлифовальных порошков и связки круга в процессе правки.

6. Установлена степенная зависимость показателя интенсивности шаржирования от коэффициента шлифования. Таким образом, факторы, способствующие увеличению коэффициента шлифования, будут способствовать снижению интенсивности шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента.

7. Размер шаржирующих продуктов износа на шлифованной поверхности колеблется от долей микрона до 30 мкм. Продукт может быть частично или полностью вдавлен в обработанную поверхность, находиться в образовавшейся царапине, окружен навалами обрабатываемого металла. При размере кристалла около 10 мкм глубина вдавливания в обработанную поверхность достигает 8 мкм. Под нижней частью кристалла формируется микрокристаллическая текстура толщиной около 1,5-2 мкм, что увеличивает глубину деформированного слоя обработанной поверхности в 2-3 раза.

**Список литературы**

1. Масловский В.В. Справочник по доводочным работам. – Х.: Прапор, 1985. – 121 с.
2. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов. - Москва: Машгиз, 1951. - 179 с.
3. Орлов П.Н. 1988 Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
4. Малышев, В. Н. Основы механического изнашивания сталей и сплавов [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Н. Малышев, Г. М. Сорокин. — Электрон. текстовые данные. — М. : Логос, 2015. — 308 с. — 978-5-98704-661-6
5. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966.– 331 с.
6. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. –М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
7. Мюнзе В.Х. Усталостная прочность стальных сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1968. – 311 с.
8. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
9. Современные технологии финишной обработки гильз гидроцилиндров / А. П. Минаков, Е. В. Ильюшина, П. В. Афанасьев, А. Г. Суворов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 3(48). – С. 45-56.
10. Mayville R. A. Abrasive concentration effects on wear under reciprocating conditions // Wear. – 1990. – Vol. 140. – Pp. 359-367.
11. The study on abrasive wear of grooved journal bearings / J. Sep, L. Tomczewski, L. Galda, A. Dzierwa // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – Pp. 54-62. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.034
12. Junbiao, L. Towards a better understanding of material imperfections.// Technology. – 2018. – Vol. 3. – Pp. 26-30.

13. Warnesa, B. M. The manufacture and fatigue cracking resistance of grit free aluminide diffusion coatings / B. M. Warnesa, A. L. Purvisa, J. E. Schilbeb // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 163 –164. – Pp. 100–105.
14. Chen, F.L. Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique / Chen F.L., Siores E., Patel K., Momber A.W.// *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42. Pp. – 1385–1390.
15. Зубарев, Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении: Учебное пособие. — СПб.: «Лань», 2015. — 400 с.
16. Отений Я. Н., Смольников Н. Я., Олыштынский Н. В. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: Монография / ВолгГТУ.— Волгоград, 2003. – 136 с
17. Study of defects of the surface of rolls of rolling bearings under grinding / N. Nosov, S. Bobrovskij, O. Levitskih [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019*. – P. 32032.
18. Surface Grinding of Ti-6Al-4V Alloy with SiC Abrasive Wheel at Various Cutting Conditions / A. V. Mello, R. D. Silva, A. Machado, R. Gelamo, A. Diniz, R. Oliveira // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 10. – Pp. 590-600.
19. Effect of near-surface residual stress and microstructure modification from machining on the fatigue endurance of a tool steel / F. Ghanem, C. Braham, M.E. Fitzpatrick, H. Sidhom// *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2002. – Vol. 11 (6). – Pp. 631–639.
20. Kalpakjian S., Schmid S.R. Manufacturing processes for engineering materials / 5th edition, Prentice-Hall, 2007. – 1040 p.
21. The effect of machined topography and integrity on fatigue life / D. Novovic, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44. – Pp. 125–134.



22. Effect of surface treatment on the bioactivity of nickel–titanium / W. Chrzanowski, E.A. Abou Neel, D.A. Armitage, J.C. Knowles // *Acta Biomaterialia*. – 2008. – Vol. 4. – Pp. 1969–1984.
23. Field M. Surface finish and surface integrity / M. Field, J.F. Kahles, W.P. Koster // *USAF Technical Report AFML-TR-74-60 Metcut Research, Associates Inc., Cincinnati, OH*, – 1974.
24. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products / R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O.W. Dillon Jr., I.S. Jawahir // *International Journal of Sustainable Manufacturing*. – 2008. – Vol. 1. Pp. 203–236.
25. Guo Y.B. Surface integrity characterization and prediction in machining of hardened and difficult-to-machine alloys; a state-of-the-art research review and analysis / Y.B. Guo, W. Li, I.S. Jawahir // *Machining Science and Technology*. – 2009. – Vol. 13 – Pp. 437–470.
26. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review / D. Ulutan, T. Özel, // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2011. – Vol. 51. – Pp. 250–280
27. Ермолаев В.К. Современные шлифовальные станки: новые методы абразивной обработки (часть 1). РИТМ машиностроения – 2017. – № 10. – С. 28-33.
28. Редько С.Г. Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании. - Станки и инструменты, 1960, №12. - с. 10-12.
29. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. – М., «Машиностроение», 1969. – С. 334
30. Козлов, А.М. Определение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента на основе моделирования / А.М. Козлов // *Изв. ВУЗов. Машиностроение*. – 2008. – № 1. – С. 51–56.
31. Xu X. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys / X. Xu, Y. Yu, H. Huang // *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – Pp. 1421-1426.

32. Evaluation of Workpiece Surface Integrity Following Point Grinding of Advanced Titanium and Nickel Based Alloys / D. Curtis, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, A. Mantle, // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 45. – Pp. 47-50.
33. Tanabe, M. Improvements in Integrity by CBN Wheel Grinding. / M. Tanabe, K. Yokogawa // *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21*. – 2003. – Pp. 291-296.
34. Ardashev, D. Physicochemical wear of abrasive grains during grinding processes // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – Vol. 35. – Pp. 284-289.
35. The effect of surface and subsurface condition on the fatigue life of Ti–25V–15Cr–2Al–0.2C%wt alloy / D. Novovic, D. Aspinwall, R. Dewes, P. Bowen, B. Griffiths // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 65. – Pp. 523-528.
36. Liang, X. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review / X. Liang, L. Zhanqiang, B. Wang, // *Measurement*. – 2018. – Vol 132.
37. Xi, X. Grinding of Ti 2 AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: Tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality / X. Xi, T. Yu, W. Ding, J. Xu // *Precision Engineering*. – 2018. – Vol. 53.
38. A review of surface integrity in machining of hardened steels / W. Sales, J. Schoop, L. Rosa Ribeiro da Silva, A. Machado, I.s. Jawahir, // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – Pp. 136-162.
39. Miao, Q. Comparison on grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH4169, K403, DZ408 and DD6 nickel-based superalloys. / Q. Miao, W. Ding, W. Kuang, C. Yang, // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 49. – Pp. 175-186.
40. Gostimirović, M. Surface Integrity Study of Creep-Feed Grinding / M. Gostimirović, M. Sekulić, D. Rodic, // *Applied Engineering Letters Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 5. – Pp. 94-103.
41. Varga, M. High temperature abrasive wear of metallic materials // *Wear*. – 2017. – Vol. 376-377. – Pp. 443-451.

42. Реченко, Д. С. Обработка титановых и жаропрочных сплавов высокоскоростным шлифованием / Д. С. Реченко // Омский научный вестник. – 2008. – № 4(73). – С. 59-61.
43. An investigation on machined surface quality and tool wear during creep feed grinding of powder metallurgy nickel-based superalloy FGH96 with alumina abrasive wheels / B. K. Li, Q. Miao, M. Li, X. Zhang, W. F. Ding // *Advances in Manufacturing*. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 160-176.
44. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H. Ding, W. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // *Wear*. – 2020. 203332.
45. Nosov, N. Investigation of impact of cutting oils on formation of surface defects during grinding // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 709. 022104.
46. Deep Active Learning for Surface Defect Detection / L. Xiaoming, D. Fajie, J. Jia-Jia, F. Xiao, G. Lin // *Sensors*. – 2020, – Vol. 20. – Pp. 1650.
47. Blau P. Fifty Years of Research on the Wear of Metals // *Tribology International*. – 1997. – Vol. 30. – Pp. 321-331.
48. Fowler G. A technical note on grit embedment following abrasive water-jet milling of a titanium alloy / G. Fowler, P. Shipway, I. Pashby // *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*. – 2005. – Vol. 159. – Pp. 356-368.
49. Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality / F. Boud, C. Carpenter, J. Folkes, P. Shipway // *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*. – 2010. – Vol. 210. – Pp. 2197-2205.
50. Maruyama T. Effects of Blasting Parameters on Removability of Residual Grit / T. Maruyama, K. Akagi, T. Kobayashi, // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2006. – Vol. 15. – Pp. 817-821.
51. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М., «Машиностроение», 1976, 271 с.

52. Кремень, З.И. Методы исследования шаржированной поверхности доводочных притиров / З.И. Кремень, Р.Л. Певзнер, Т.Ю. Гавронская // Абразивы. – ЦИНТИАМ. – №6 (38). –1963. – с. 61
53. Кремень, З.И. О некоторых закономерностях шаржирования металлических поверхностей при абразивной доводке / З.И. Кремень, А.И. Хазанова, Г.П. Афанасьева, Р.Л. Певзнер // Труды ВНИИАШ. –№10. – 1970. – с. 68.
54. Гриднев, В.Н. Электронно-микроскопические исследования поверхностей, доведенных алмазными пастами. – В сб. «Внедрение алмазов в промышленность», М., НИИМАШ, 1967.
55. Назаров, Ю.Ф. Оценка процессов шаржирования при абразивной обработке металлических зеркал / Ю.Ф. Назаров, В.М. Рубан, И.В. Рубан, В.М. Климанов // Научно-технический сборник. Технология машиностроения. – №8. – 1990. – с. 59.
56. Ефремов и др. Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. №2. С. 137.
57. Беккауер, Н.И. Электронно-микроскопическое исследование структуры медных поверхностей / Н.И. Беккауер, Н.В. Загоруйко, В.И. Белин // Физика и химия оптических поверхностей. М.: Университет Дружбы народов. 1985. С. 22-36.
58. Maslov E. N. In coll.: Fundamental Problems of High-output Grinding, Mashgiz, Moscow, 1960.
59. Takanaka H. A Study of the Grinding Action by Jingle Grit // University Press, Tokyo, 1964.
60. Горбунов, Б. И. Исследование количественных характеристик шаржирования поверхности абразивом при бесцентровом шлифовании стальных деталей / Б.И. Горбунов, В.Я. Моисеев, Ю.С. Степанов // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. - № 5.- с. 122 - 126.
61. А. Я. Артамонов Шаржирование металлокерамических пористых материалов при шлифовании / А.Я. Артамонов, Л.С. Шишкин // Порошковая металлургия. – 1967. – №12. – с. 84-88.
62. Кремень Э.И. и др. Методы исследования шаржированной поверхности доводочных притиров. Абразивы. – 1963. – № 6 (38). – с. 25-29.

63. Способ определения степени шаржирования поверхностей изделия абразивными частицами Клямкин К.Х., Коган Б.С., Платонов Ю.П., Харыкина Т.И., Шальман С.И. Авторское свидетельство SU 179072 A1, 03.02.1966. Заявка № 891890/25-28 от 06.04.1964.
64. Способ исследования шаржирования продуктов изнашивания инструмента Горбунов Б. И., Моисеев В. Я., Степанов Ю. С. Авторское свидетельство SU 903746 A1, 07.02.1982. Заявка № 2723130/25-28 от 02.02.1979.
65. Способ контроля шаржирования металлических поверхностей абразивом Переверзев Е.С., Борщевская Д.Г., Бигус Г.А., Романов В.С., Тремба Т.С. Авторское свидетельство SU 1409914 A1, 15.07.1988. Заявка № 4085405/25-28 от 10.06.1986.
66. Способ определения степени шаржирования Орлов П.Н., Полухин В.А., Платонов Г.Л. Ключев Ю.А. Авторское свидетельство SU 1525552 A1, 30.11.1989. Заявка № 4287074/25-28 от 20.07.1987.
67. Способ определения степени шаржирования поверхности материала Маковецкий В.В. Авторское свидетельство SU 1620911 A1, 15.01.1991. Заявка № 4628875/28 от 30.12.1988.
68. Turley D. M. The importance of surface characterization in surface treatment processes / Turley D. M., Doyle E. D. // Wear. – 1982. – Vol. 81. Pp. 145 – 158
69. Zhang Q. A systematic investigation on the diamond wear mechanism during the dry scratching of WC/Co. / Zhang Q., Zhao Q., Su H., To S., // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. – Vol. 70.
70. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718 / M. Sinha, D. Setti, S. Ghosh, V. R. Paruchuri, // Journal of Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 21. – pp. 124-133.
71. Sayutin, G.I., Nosenko, V.A., Larionov, N.F. Transfer of Silicon to the Metal Surface during Grinding by Wheels and Microscratching by Indentors Made out of Silicon Carbide. (1984) Trenie i Iznos, 5 (3), pp. 513-519.
72. Саютин Г.И. Шлифование деталей из сплавов на основе титана / Саютин Г.И., Носенко В.А. // М.: Машиностроение, 1987. – 80 с.

73. Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов / В. А. Носенко, А. В. Фетисов, С. В. Носенко, В. О. Харламов // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 10(76). – С. 9-17.
74. Носенко, В. А. Технология шлифования металлов / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – 2-е, стереотипное. – Старый Оскол : ООО «Тонкие научные технологии», 2019. – 616 с. – ISBN 978-5-94178-373-1.
75. Nosenko, S. V. The Condition of Machined Surface of Titanium Alloy in Dry Grinding / S. V. Nosenko, V. A. Nosenko, L. L. Kremenetskii // Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 мая 2017 года. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 115-120.
76. Nosenko, S. V. Concentration gradients in the surface layer of titanium alloy ground by a silicon-carbide wheel / S. V. Nosenko, V. A. Nosenko, L. L. Kremenetskii // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No 1. – P. 43-45.
77. Wentorf R.H. Cubic form of boron nitride. // J. Chem. Phys”. – 1957. – Vol.26, N.4, – pp. 956.
78. С. В. Дигонский. Некоторые сведения из истории синтеза кубического нитрида бора для лезвийного режущего инструмента. // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 9 (149), – С. 49-57
79. Klocke, F. Appropriate Conditioning Strategies Increase the Performance Capabilities of Vitrified-Bond CBN Grinding Wheels / F. Klocke, W. König // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 1995. – Vol. 44. – Pp. 305-310.
80. Dressing of Hybrid Bond CBN Wheels Using Short-Pulse Fiber Laser / M. Rabiey, C. Walter, F. Kuster, J. Stirnimann, F. Pude, K. Wegener, // Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 58. – pp. 462-469.
81. Jackson, M.J., Davim, J.P. Nanogrinding. In: Jackson, M., Davim, J. (eds) Machining with Abrasives. Springer, Boston, MA. – 2011. – Pp. 303-343.
82. Analysis of the performance of superabrasive and alumina grinding wheels with different bonds and machining conditions / B. Carlos, P. Aguiar, M. Daun, D. Luiz, D. Silva. // Materials Research. – 2003. – Vol. 6. – Pp. 239-246.

83. Characterization of Wheel Surface Topography in cBN Grinding / M. Fujimoto, Y. Ichida, R. Sato, Y. Morimoto // *Jsme International Journal Series C-mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing - JSME INT J C.* – 2006. – Vol. 49. – Pp. 106-113.
84. Kompella, S. A New CBN Crystal for Improved Grinding Performance in Vitrified Bonds / S. Kompella, K. Zhang, R. Pakalapati, // *Key Engineering Materials - KEY ENG MAT.* – 2009. – Vol. 389-390. – Pp. 211-216.
85. Comparative research on the grindability of Ti-6Al-4V and PTMCs with WA wheel and CBN wheel / B. Zhao, W. Ding, Q. Miao, J. Xu, Z. Liu, // *Advanced Materials Research.* – 2013. – Vol. 774. Pp. 1075-1079.
86. Kuffa, M. Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated cBN wheel / M. Kuffa, F. Kuster, K. Wegener, // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* – 2016. – Vol. 18. Pp. 53-59.
87. Microstructures and grain boundaries of cubic boron nitrides. / C. Chen, R. Huang, Z. Wang, N. Shibata, T. Taniguchi, Y. Ikuhara, // *Diamond and Related Materials.* – 2013. – Vol. 32. – Pp. 27–31. 10.1016/j.diamond.2012.11.011.
88. Ichida, Y. Fractal Analysis of Micro Self-Sharpening Phenomenon in Grinding with Cubic Boron Nitride (cBN) Wheels. – 2012 10.5772/35781.
89. Zhao, Z. Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in high-speed grinding of nickel-based superalloy / Z. Zhao, Y. Fu, J. Xu, Z. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2016. Vol. 87. – Pp. 3545-3555.
90. Zhao, B. Effect of grain wear on material removal behaviour during grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy with single aggregated cBN grain / B. Zhao, W. Ding, Y. Zhou, H. Su, J. Xu, // *Ceramics International.* – 2019. – Vol. 45. – Pp. 14842-14850
91. Zhu, Y. Self-sharpening ability of monolayer brazed polycrystalline CBN grinding wheel during high-speed grinding / Y. Zhu, W. Ding, Z. Rao, Z. Zhao // *Ceramics International.* – 2019. – Vol. 45. – Pp. 24078-24089.

92. Rao, Z. Effect of wear behaviour of single mono- and poly-crystalline cBN grains on the grinding performance of Inconel 718 / Z. Rao, X. Guodong, B. Zhao, Y. Zhu, W. Ding, // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47. Pp. 17049-17056
93. Huang, X. Fracture behavior and self-sharpening mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride in grinding based on cohesive element method / X. Huang, H. N. LI, Z. Rao, W. Ding, // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2018. – Vol. 32. – Pp. 2727-2742.
94. Macerol, N. Effect of the grit shape on the performance of vitrified-bonded CBN grinding wheel / N. Macerol, L. Franca, P. Krajnik // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 277. 116453.
95. Rao, Z. Numerical simulation analysis and experimental validation on wear/fracture mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride superabrasives in high-speed grinding. / Z. Rao, W. Ding, Y. Zhu, J. Xu, // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 45. – Pp. 3377-3389.
96. Li, B. Grain wear evolution of cubic boron nitride abrasives during single grain grinding of powder metallurgy superalloy FGH96 / B. Li, J. Yin, Y. Zhu, X. Zhang, W. Ding, // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 47. Pp. 2508-2516
97. Wu, B. Investigation of the wear characteristics of microcrystal alumina abrasive wheels during the ultrasonic vibration-assisted grinding of PTMCs / B. Wu, B. Zhao, W. Ding, H. Su, // *Wear*. – 2021. – Vol. 477. 203844.
98. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel / R. Javaroni, J. C. Lopes, M. Garcia [et al] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107. – Pp. 2065-2080.
99. Zhong, Z. W. Grinding of nickel-based super-alloys and advanced ceramics / Z. W. Zhong, K. Ramesh, S. H. Yeo // *Mater Manuf Processes*. – 2001. – Vol. 16(2). – Pp. 195–207.
100. Alessandra, C. CBN grinding performance improvement in aircraft engine components manufacture / C. Alessandra, T. Roberto // *Proc CIRP*. – 2013. – Vol. 9. – pp. 9–14.



101. Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with vitrified CBN wheels. / C. Dai, W. Ding, Y. Zhu, J. Xu, H. Yu, // Precision Engineering. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 192-200.
102. Yang, C. Dimension Accuracy and Surface Integrity of Creep Feed Ground Titanium Alloy with Monolayer Brazed CBN Shaped Wheels / C. Yang, J. Xu, W. Ding, Z. Chen, Y. Fu, // Chinese Journal of Aeronautics. – 2010. – Vol. 23. – Pp. 585–590.
103. Grinding behavior and surface appearance of (TiCp+TiBw)/Ti-6Al-4V titanium matrix composites / W. Ding, B. Zhao, J. Xu, C. Yang, Y. Fu, H. Su, // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – Vol. 27.
104. Viat, A. Fretting wear of pure cobalt chromium and nickel to identify the distinct roles of HS25 alloying elements in high temperature glaze layer formation / A. Viat, A. Dréano, S. Fouvry, M. Bouchet, J. Henne, // Wear. – 2017. – Vol. 376-377. – Pp. 1043-1054.
105. Лысанов, В.С. Эльбор в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1978. 280 с.
106. Зубарев, Ю. М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учебное пособие / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 304 с. — ISBN 978-5-8114-0973-0.
107. Электронная микроскопия в металловедении: Справ. Изд. / Смирнова А.В., Корорин Г.А., Полонская С.М. и др – М.: Металлургия, 1985. 192 с.
108. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах. Книга 1. Пер. с англ. / Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 303 с.
109. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах. Книга 2. Пер. с англ. / Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 348 с.
110. Шиммель, Г. Методика электронной микроскопии / Пер. с нем. А. М. Розенфельда и М. Н. Спасского ; - М. : Мир, 1972. - 300 с.
111. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия / Синдо Д., Оикава Т. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.

112. Патент № 2768518 Российская Федерация, МПК G01N 19/08, G01N 23/04, G01N 23/18, G01N 23/203. Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов / В.А. Носенко, С.П. Кузнецов, Н.Д. Сердюков; ВолгГТУ. – 2022.
113. Федоров, Д. Г. Шлифование титановых сплавов. Краткий литературный обзор / Д. Г. Федоров, Д. В. Евдокимов, А. А. Пластинин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 1(81). – С. 129-133.
114. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Ч.1: учеб. пособие. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 196 с.
115. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, – 2014. – 195 с.
116. Полтавец, В.В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В. В. Полтавец // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. Випуск 6 (154). Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.79-86.
117. Mohan, R A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools / R Mohan, D. Ramachandran // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. –2019. – Vol. 10. – Pp. 965-974.
118. Tsuwa, H. An Investigation of Grinding Wheel Cutting Edges. Journal of Engineering for Industry. – 1964. – Vol. 86. 371.
119. Diamond Wheel Dressing: A Comprehensive Review / W. Ding, H. N. LI, L. Zhang, J. Xu, Y. Fu, H. Su, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. –2017. – Vol. 139.
120. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2007. – 299 с.

121. Унянин, А. Н. Силовое взаимодействие абразивного бруска с рабочей поверхностью эльборового круга / А. Н. Унянин, С. А. Таркаев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2009. – № 1(45). – С. 34-36.
122. Chen, X. & Rowe, W. & Mills, B. & Allanson, D. (1996). Analysis and simulation of the grinding process. Part III: Comparison with experiment / X. Chen, W. Rowe, B. Mills, D. Allanson, // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1996. – Vol. 36. – Pp. 897-906.
123. Носенко, В.А. Transfer of Abrasive Material at Grinding a Titanium Alloy with a Wheel of Cubic Boron Nitride / В.А. Носенко, А.В. Фетисов, С.П. Кузнецов // Solid State Phenomena. – 2021. – № 316. – С. 521-526.
124. Носенко, В.А. Морфология и химический состав поверхности титанового сплава на начальном этапе шлифования кругом из кубического нитрида бора / В.А. Носенко, А.В. Фетисов, С.П. Кузнецов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты) - 2020. - Т. 22, № 2 - С. 30-40.
125. Носенко, В.А. Морфология и химический состав поверхности стали 10895 на начальном этапе шлифования кругом из кубического нитрида бора / В.А. Носенко, А.В. Фетисов, С.П. Кузнецов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2020. - № 3 (238) Март. - С. 42-45.
126. Носенко, В.А. Морфология поверхности сплавов d-переходных металлов IV периода после шлифования кругом из кубического нитрида бора / В.А. Носенко, А.В. Фетисов, С.П. Кузнецов // Научные технологии в машиностроении. - 2021. - № 11. - С. 42-48. - DOI: 10.30987/2223-4608-2021-11-42-48.
127. Носенко, В.А. Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface / В.А. Носенко, А.В. Фетисов, С.П. Кузнецов // MATEC Web of Conferences. – 2020. – № 329. – 8 с.
128. Морфология и химический состав титанового сплава и электрокорунда при шлифовании и микроцарапании / В. А. Носенко, А. В. Фетисов, С. П. Кузнецов, В. Е. Пузырькова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 8(231). – С. 31-37.

129. Dhanavathu, N. N. Wear of Electroplated Super Abrasive CBN Wheel during Grinding of Inconel 718 Super Alloy / N. N. Dhanavathu, N. Mathew, L. Vijayaraghavan, // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 43. – Pp. 1-8. 10.1016/j.jmapro.2019.04.033.
130. Wang, J. Wear evolution and stress distribution of single CBN superabrasive grain in high-speed grinding / J. Wang, T. Yu, W. Ding, Y. Fu, A. Bastawros, // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 54. – Pp. 70-80.
131. Fujimoto, Masakazu & Ichida, Yoshio & Inoue, Yuichiro. (2009). Microscopic Wear Behavior of Grain Cutting Edges in cBN Grinding / M. Fujimoto, Y. Ichida, Y. Inoue // Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, LEM 2009. – 2009.
132. Патент № 2024465 С1 Российская Федерация, МПК С04В 35/00. Керамическая связка для инструмента из кубического нитрида бора : № 5009583/33 : заявл. 15.07.1991 : опубл. 15.12.1994 / Г. Н. Стародубова, В. М. Коломазин, М. Г. Эфрос [и др.] ; заявитель Государственный научно-исследовательский институт абразивов и шлифования. – EDN VVIMOY.
133. Патент № 2082596 С1 Российская Федерация, МПК В24Д 3/14. Стеклосвязка для изготовления абразивного инструмента из кубического нитрида бора : № 93003643/02 : заявл. 22.01.1993 : опубл. 27.06.1997 / А. Н. Краснов, А. А. Лисова, М. Г. Эфрос [и др.] ; заявитель Государственный научно-исследовательский институт абразивов и шлифования. – EDN EONHIG.
134. Sun, X. Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites / X. Sun, T. Yu, Y. Chen, C. Zhang, Z. Ma, // Ceramics International. – 2019. – Vol. 46. Pp. 5337-5343
135. Полканов, Е. Г. Влияние состава абразивно-керамических композиций на основе кубического нитрида бора на их эксплуатационные свойства / Е. Г. Полканов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 11-12. – С. 19-23.
136. ГОСТ Р ИСО 22309-2015. Микроанализ электронно-зондовый Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии

для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше. -Введ. 2016-06-01. - М.: Стандартиформ, 2015 – 24 с.

137. Kanaya K., Okayama S. Penetration and energy loss theory of electrons in solid targets // J. Phys. D. – 1972. – № 5. – P. 43-58.

138. Крыжаковский В.Д., Костыков Ю.В. Телевидение цветное и черно-белое. М.: Связь, 1980. 336

139. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics. — 1979. — Vol. 9 (1). — Pp. 62–66.

140. Lin, Z. Effect of abrasive grain size on surface particle deposition behaviour of PTFE/bronze composites during abrasive wear / Z. Lin, B. Gao, X. Li, K. Yu, // Tribology International. – 2019. – Vol. 139. – Pp. 12-21

141. Kapłonek, W. Nadolny, K. (2013). Assessment of the Grinding Wheel Active Surface Condition using SEM and Image Analysis Techniques / W. Kapłonek, K. Nadolny// Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2013. – Vol. 35. – Pp. 207-215.

142. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М: Физматлит. 2006.

## Акт внедрения в учебный процесс

Утверждаю  
Зам. директор ВПИ (филиал) ВолгГТУ  
д.т.н., профессор

  
М.П. Спиридонова  
20 \_\_\_\_ года

## Акт

**об использовании результатов диссертационного исследования  
Кузнецова Семена Павловича в учебном процессе**

Настоящий акт составлен о том, что результаты исследования шаржирования металлов при шлифовании кругами из кубического нитрида бора, полученные при выполнении диссертационного исследования, используются в лабораторных работах студентов, обучающихся по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» по дисциплине «Прогрессивные технологии абразивной обработки» в Волжском политехническом институте (филиале) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Комиссия, в лице декана автомеханического факультета, кандидата технических наук, доцента Костина Василия Евгеньевича и заведующего кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств», доктора технических наук, профессора Носенко Владимира Андреевича подтверждает данный факт.

Лабораторные работы опубликованы в методических указаниях «Измерение параметров шаржирования путем обработки цифровых изображений» авторов Носенко В.А., Кузнецов С.П.

Декан автомеханического факультета,  
канд. техн. наук, доцент

 Костин В.Е.

Заведующий кафедрой  
«Технология и оборудование  
машиностроительных производств»  
д. т. н., профессор

 Носенко В.А.

## Титульный лист патента

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	(19) <b>RU</b> (11) <b>2 768 518</b> (13) <b>C1</b>
	(51) МПК <i>G01N 19/08</i> (2006.01) <i>G01N 23/04</i> (2006.01) <i>G01N 23/18</i> (2006.01) <i>G01N 23/203</i> (2006.01)
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ	

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01N 19/08* (2022.02); *G01N 23/04* (2022.02); *G01N 23/18* (2022.02)

(21)(22) Заявка: 2021114763, 25.05.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 25.05.2021

Дата регистрации:  
 24.03.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.05.2021

(45) Опубликовано: 24.03.2022 Бюл. № 9

Адрес для переписки:  
 400005, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, 28, ВолгГТУ, Кузьмину С.В.

(72) Автор(ы):

Носенко Владимир Андреевич (RU),  
 Кузнецов Семен Павлович (RU),  
 Сердюков Никита Денисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 903746 A1, 07.02.1982. SU 1541512 A1, 07.02.1990. SU 179072 A1, 03.02.1966. WO 2018003128 A1, 04.01.2018.

(54) Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов

(57) Реферат:

Изобретение относится к абразивной обработке материалов и может быть использовано для контроля степени шаржирования материала после абразивной обработки с использованием алмаза или кубического нитрида бора. Сущность: получают изображение обработанной поверхности с помощью микроскопа методом обратно-рассеянных электронов. Для оценки количества шаржированных частиц выполняется дополнительная обработка изображения в виде изменения контраста и яркости изображения,

затем определяют количество самых темных (черных) пикселей на растровом изображении посредством программного обеспечения с последующим определением степени шаржирования по выражению:  $S = \frac{C_2}{C_1} * 100\%$ , где  $S$  – степень шаржирования,  $C_1$  – общее количество пикселей изображения,  $C_2$  – количество темных пикселей. Технический результат: повышение надежности и точности оценки степени шаржирования поверхности при абразивной обработке. 3 ил.

## Грант

РОССИЙСКИЙ ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Добро пожаловать, Кузнец

Главная Личные данные **Мои проекты** Мои приглашения Организация

**19-38-90322 Аспиранты**

**Исследование контактных поверхностей d-переходных металлов четвертого периода при взаимодействии с абразивными материалами в экстремальных условиях**

Проект подан от имени	юридического лица	
Основной код классификатора	08-103 Трибология	
Дополнительные коды классификатора	08-102 Механика технологических процессов	Продолжительность 3 года
Ключевые слова	экстремальные условия, d-переходные металлы, контактное взаимодействие, морфология, электронное строение, рентгеноспектральный анализ, нанослой, карбид кремния, кубический нитрид бора, алмаз	
Номер ЦИТИС	AAAA-A19-119120490014-B	

**Участники проекта (2) [ 2020 ]**

ФИО	Дата рождения	Основное место работы
Носенко Владимир Андреевич (Р)	01.05.1949	Волгоградский государственный технический университет
Кузнецов Сенен Павлович	12.08.1994	