

## Физические модели формирования основных видов контактного взаимодействия при комбинированной электроалмазной обработке

В.Ю. Попов<sup>1a</sup>, А.С. Янышкин<sup>2b</sup>, П.В. Архипов<sup>1c</sup>, Д.А. Рычков<sup>1d</sup>, Д.В. Говорин<sup>1e</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>2</sup>Чувашский государственный университет, пр. Московский 15, Чебоксары, Республика Чувашия

<sup>a</sup>berkutoff@rambler.ru, <sup>b</sup>yanyushkin@brstu.ru, <sup>c</sup>pavded@yandex.ru, <sup>d</sup>dielektrik84@mail.ru, <sup>e</sup>govorindv@tnn.transneft.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-0390-8367>, <sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0002-9323-7693>,

<sup>e</sup><https://orcid.org/0000-0001-5041-826X>

Статья поступила 16.10.2018, принята 10.11.2018

*Известно, что при затачивании металлорежущих инструментов происходит формирование рабочего поверхностного слоя, ответственного за их качество. В процессе шлифования возникает давление, которое обуславливает появление адгезии в зоне контакта таких разнородных материалов, как круг и обрабатываемый материал. Как правило, следствием этого является последующее протекание диффузионных процессов. Операция затачивания инструмента из быстрорежущих сталей, пожалуй, еще более ответственна, чем твердосплавного. Несмотря на то, что наиболее высокое качество достигается при обработке быстрорежущих сталей эльборовыми кругами (на керамических и органических связках), удельный расход абразивного круга, его производительность остаются весьма высокими. Выполнение же операции затачивания кругами на металлических связках ведет к засаливанию их рабочей поверхности. На сегодняшний день существуют технологии, способные объединить в себе возможность рационального и высокоэффективного применения алмазного инструмента на операциях шлифования современных материалов. Всесторонний анализ состояния проблемы обработки различных высокопрочных материалов позволяет говорить о необходимости развития комбинированных методов, которые в ряде случаев являются наиболее эффективными по сравнению с обработкой резанием. В частности, данные технологии востребованы при обработке полупроводников и подобных высокопрочных материалов на основе соединений оксидов кремния, алюминия, диборида циркония и др. Проведенный анализ экспериментальных результатов, полученных отечественными и зарубежными исследователями, показывает, что гибридные и комбинированные технологии обработки во всем многообразии их сочетания позволяют усилить преимущества различных методов и избежать при этом их технические ограничения. Полученные результаты открывают новые направления в развитии методов комбинированного алмазного шлифования, исследовании причин потери режущих свойств алмазного инструмента на металлической связке при обработке различных высокопрочных материалов и позволяют выработать новый научный подход к обоснованию механизма образования засаленного слоя, который накладывает определенные технические ограничения на использование алмазного инструмента.*

**Ключевые слова:** металлорежущий инструмент; алмазная обработка; качество поверхности; комбинированная обработка.

## Physical models of the formation of the main types of contact interaction in combined electric-diamond machining

V.Yu. Popov<sup>1a</sup>, A.S. Yanyushkin<sup>2b</sup>, P.V. Arkhipov<sup>1c</sup>, D.A. Rychkov<sup>1d</sup>, D.V. Govorin<sup>1e</sup>

<sup>1</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup>Chuvash State University; 15, Moskovsky Ave., Cheboksary, Republic of Chuvashia, Russia

<sup>a</sup>berkutoff@rambler.ru, <sup>b</sup>yanyushkin@brstu.ru, <sup>c</sup>pavded@yandex.ru, <sup>d</sup>dielektrik84@mail.ru, <sup>e</sup>govorindv@tnn.transneft.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-0390-8367>, <sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0002-9323-7693>,

<sup>e</sup><https://orcid.org/0000-0001-5041-826X>

Received 16.10.2018, accepted 10.11.2018

*It is known that when sharpening a metal-cutting tool, a working surface layer is formed, responsible for their quality. In the process of grinding a pressure develops, which causes adhesion in the contact zone of such dissimilar materials as the circle and the material to be treated. As a rule, the consequence of this is the subsequent flow of diffusion processes. The operation of sharpening the tool from high-speed steels is perhaps even more important than hard alloys. And despite the fact that the highest quality is achieved by their treatment with elbor circles (on ceramic and organic bonds), but the specific consumption of the abrasive wheel and its productivity remain very high. The execution of the same grinding operation by the circles on metal bonds leads to salting of their working surface. To date, there are technologies that can combine the possibility of rational and highly effective use of diamond tools in grinding operations of modern materials. A comprehensive analysis of the state of the problem of processing various high-strength materials made it possible to point out the need for the development of combined methods, which, in some cases, are most effective compared to machining. In particular, these technologies are in demand when processing semiconductors and similar high-strength materials based on compounds of oxides of silicon, aluminum,*

*zirconium diboride and others. The analysis of the experimental results obtained by domestic and foreign researchers shows that hybrid and combined processing technologies, in the full diversity of their combination, make it possible to enhance the advantages of various methods and avoid their technical limitations. The results obtained, presented in this article, open up new directions in the development of methods of combined diamond grinding, the study of the causes of loss of the cutting properties of diamond tools on a metal bond when processing various high-strength materials. They make it possible to work out a new scientific approach to substantiating the mechanism of the formation of a greasy layer, which imposes certain technical restrictions on the use of diamond tools.*

**Keywords:** metal cutting tools; diamond processing; surface quality; combined processing.

### Введение

Засаливание — это непрерывный процесс адгезивно-диффузионного засорения абразивного слоя шлифовального инструмента элементами обрабатываемого материала, влекущий за собой потерю его режущей способности. На сегодняшний день установлено, что перенос частиц шлама носит адгезивно-диффузионный характер, а для его научного обоснования требуется расширить масштаб исследований от макроуровня, через микро-, к атомному уровню.

Наиболее производительным является использование не абразивных, а алмазных кругов на металлической связке [1; 2; 4–6; 8; 10–13]. Однако и в этом случае из-за интенсивного засаливания область их эффективного применения весьма ограничена, а сам процесс адгезивно-диффузионного взаимодействия, равно как дефектный слой обработанной поверхности, недостаточно исследованы.

Известно, что затачивание режущего инструмента происходит при непосредственном контакте режущей поверхности круга с обрабатываемым материалом и взаимодействии с естественной внешней средой. При этом на границе контакта создаются специфические условия для протекания сложнейших механических, физических, химических процессов и реакций [3; 9; 14–16]. Можно считать, что одним из главных источников энергий при алмазной обработке является высокая температура. Следует также отметить непосредственное влияние температуры на образование таких дефектов, как микро- и макротрещины, прижоги, остаточные напряжения, изменение структуры поверхностного слоя [13; 14; 16; 20; 21]. Роль температуры велика и в процессах пластической деформации поверхностного слоя, процессах усиления или ослабления адгезивно-диффузионных и окислительных явлений. Наши исследования показывают, что именно эти процессы и реакции ответственны за формирование рабочего слоя затачиваемого инструмента, т. е. за его качество, а также за засаливание шлифовального круга. Однако это явление недостаточно исследовано с атомно-молекулярных позиций, и поэтому физико-химический аспект процесса засаливания по-прежнему остается спорным.

В то же время, механическое вскрытие засаленной поверхности показывает, что алмазные зерна находятся в удовлетворительном состоянии. Следовательно, круг теряет режущую способность не из-за естественного засаливания, а в связи с тем, что над ними образовался новый слой, препятствующий

контакту зерен с обрабатываемой поверхностью [2; 14; 20].

Различным аспектам теории и практики технологии шлифования посвящены работы Г.В. Бокучавы, А.С. Васильева, М.Б. Гордона, А.И. Грабченко, И.П. Захаренко, А.Н. Короткова, С.Н. Корчака, Т.Н. Лоладзе, Г.Б. Лурье, Л.Л. Мишнаевского, А.А. Панова, С.И. Петрушина, В.Н. Подураева, Ю.В. Полянскова, С.А. Попова, А.И. Промптова, Х.М. Рахмянова, С.Г. Редько, А.Н. Резникова, В.В. Рыжова, Ф.М. Седыкина, М.Ф. Семко, А.Г. Сулова, И.Х. Чеповецкого, А.В. Якимова, А.С. Ямникова, П.И. Ящерицина и др. Вопросам обеспечения режущей способности алмазных кругов, а также исследованию контактного взаимодействия посвящены работы отечественных ученых С.Н. Корчака, Е.П. Мельниковой [17], А.Ю. Попова [8], Ю.М. Правикова, А.В. Репко [18], А.Н. Унянина [19], Л.В. Худобина [20], С.С. Черепанова, В.С. Шоркина [14], А.С. Янюшкина [21], а также ряда зарубежных авторов — J. Badger, Guo Changsheng, P. Chevrier, R.S. Hahn, M. Hitchiner, I. Inasaki, R.I. King, I.D. Marinescu, S. Murphy, G.E. O'Donnell, P. Padilla, W.B. Rowe, O. Sinot, M. Stephen, Taghi Tawakoli, E. Uhlmann и др.

Существенный вклад в совершенствование теории функционала плотности, исследование электронной структуры вещества с акцентом в области развития резания материалов внесли работы ученых Ю.Г. Кабалдина [22–24], В.Г. Заводинского [25–27], И.В. Матюшкина [28] и др.

**Методология.** Ключевым моментом понимания механизмов адгезивно-диффузионного взаимодействия является четкое разграничение двух процессов, в этом участвующих: схватывание материалов, т. е. момент формирования адгезионного соединения, и последующий процесс его разрушения, если он происходит. При изучении первого процесса требуются результаты энергетических расчетов системы, при изучении второго процесса — признаки, свидетельствующие о разрушении связей между контактирующими атомами.

В исследованиях, проведенных ранее [29], были определены три основных вида формирования адгезионного контакта при нанесении вибрационных химико-механических покрытий:

- за счет воздействия внутренней энергии на химию процесса путем механического сближения материалов и удерживания на поверхности силами Ван-дер-Ваальса;
- в результате электронного взаимодействия атомов в процессе химических преобразований поверхностного слоя;
- за счет подводимой энергии для протекания химических реакций и образования химических соединений.

Эти исследования дополняют разработанную ранее про-

фессором А.С. Янюшкиным теорию контактного взаимодействия при комбинированном электро-алмазном затачивании твердосплавных инструментов. Были установлены семь разных видов контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материала [14; 21].

В связи с этим наибольший интерес вызывают исследование влияния и определение физических моделей контактного взаимодействия при комбинированной обработке.

При выполнении работ задействован широкий спектр современного научного оборудования и методик, в том числе:

1. Оптический металлографический микроскоп Olympus GX-71, оснащенный цифровой камерой, позволяющей получать снимки исследуемой поверхности с предельным увеличением в 2 тыс. раз.

2. Растровый электронный микроскоп Philips SEM 515, оснащенный фотокамерой с разрешением до 8 нм и химическим микроанализатором EDAX Genesis.

3. Растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50, оснащенный цифровой камерой с разрешением до 3 нм и химическим анализатором EDS X-Act.

4. Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000 с детектором X-ray типа NaI и Cu трубкой с длинным LFF фокусом мощностью 2,2 кВт. Интервал сканирования составляет от  $6^\circ$  до  $163^\circ$ .

5. Рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA с энергодисперсионным детектором Si(Li) излучением  $\text{Cu}=1,5406$  ангстрем, мощностью трубки 2,2 кВт и углом сканирования  $164^\circ$ .

6. Комплекс Zygo NewView™ 7300, предназначенный для определения параметров микрорельефа и структуры объектов технического происхождения, с разрешающей способностью 0,1 нм.

Использованные методики позволили провести разносторонний анализ отобранных образцов в соответствии с поставленной целью и задачами.

**Результаты и обсуждение.** На основании анализа экспериментальных исследований нами разработаны и представлены физические модели формирования основных видов контактного взаимодействия при комбинированной электроалмазной обработке (КЭАО), которые не только дополняют, но и углубляют исследования в данной области до атомно-молекулярного уровня.

**Механическая адгезия** (рис. 1 а). В самом начале шлифования, когда алмазное зерно (АЗ) только начинает врезаться в обрабатываемый материал, происходит механическое адгезионное сцепление срезаемой стружки среди других АЗ и связки алмазного шлифовального круга (АШК). При этом возникают сжимающие поверхностные остаточные

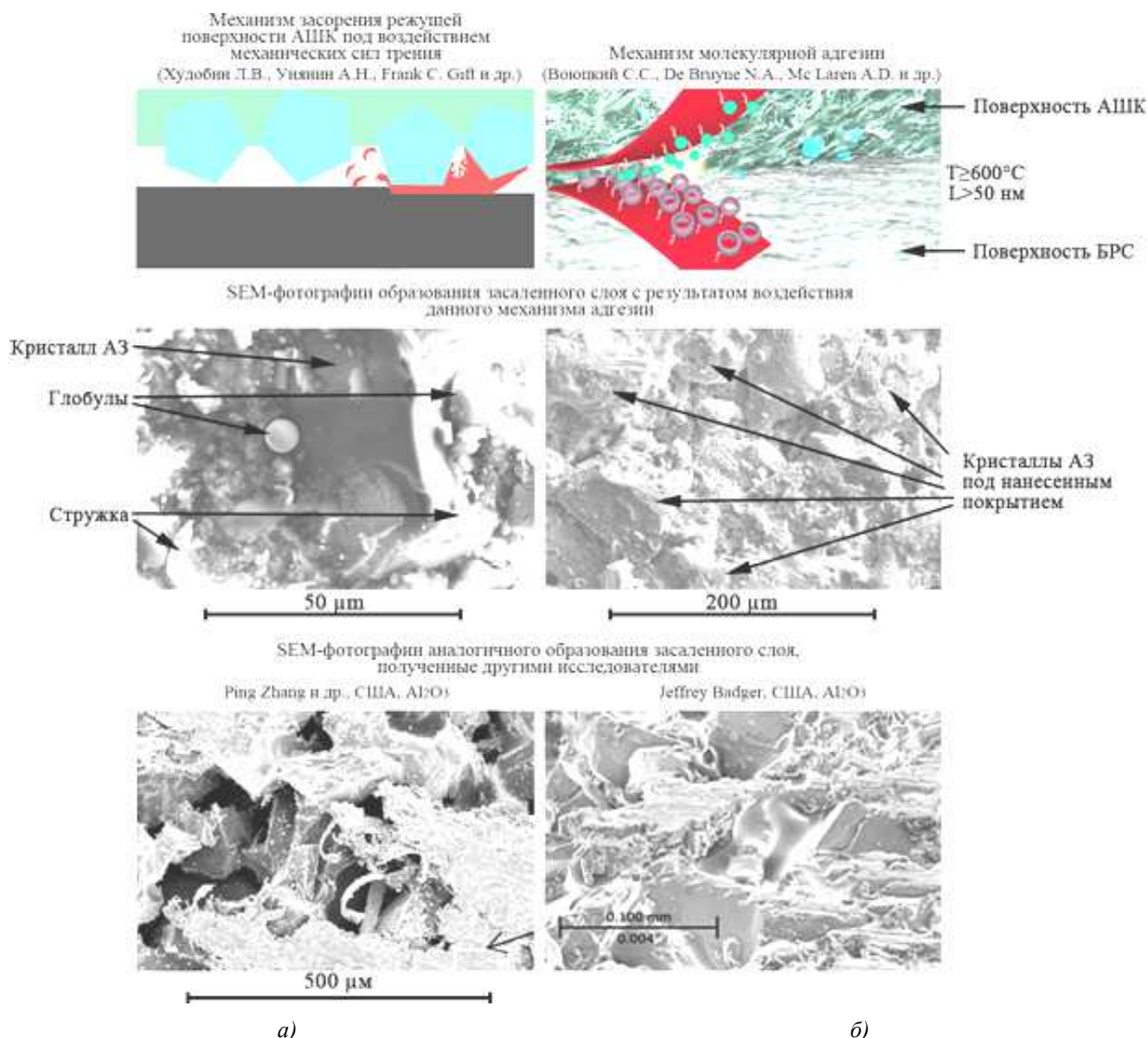
напряжения. Варьированием значениями скорости подачи смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) или глубины резания, а также правильным выбором технических характеристик шлифовального инструмента возможно не только минимизировать процесс образования засаливания АШК, но и сохранить его высокие режущие свойства. За счет периодического отрыва налипающего в результате механической адгезии материала возникает притирочный износ АЗ, который проявляется в локальном микроразрушении и выкрашивании режущих кромок зерен, о чем свидетельствуют ранее проведенные исследования [30; 31]. Как правило, при резании пластичных материалов АЗ больше засаливается, а при резании хрупких — больше истирается, зачастую до уровня связки. Это сказывается на обрабатываемом материале в виде дефектов и изменений в поверхностном слое, являющихся следствием роста сил резания. Увеличивается риск получения термических повреждений поверхности [32; 33].

Следует отметить, что при обработке без СОЖ в процессе формирования засаленного слоя на поверхности (АШК), а также дефектного слоя на обработанной поверхности тепловой фактор играет первостепенную роль, поскольку, в конечном счете, является основным инициатором физико-химических явлений и реакций.

В каждом отдельном случае при обработке разных материалов могут преобладать различные механизмы адгезии, справедливые только для этих термодинамических, фазовых и кинетических характеристик процесса.

**Адсорбционная (молекулярная) адгезия** (рис. 1 б). Постепенное накопление стружки приводит к ее уплотнению среди АЗ и в связке АШК, что вызывает увеличение давления, которое способствует распространению адсорбции одновременно по всей активной поверхности, что, в свою очередь, сопровождается выделением теплоты адсорбции. Генерируются растягивающие поверхностные остаточные напряжения, что создает благоприятную возможность для возникновения физической адсорбции в трещинах пластически деформируемой массы стружки. На поверхности АЗ продолжают разрастаться площадки износа, а постоянное трение дополнительно способствует окислению АЗ кислородом из окружающей технологической среды. В результате микроразрушение режущих кромок зерен сменяется более объемными сколами.

Можно компенсировать процессы молекулярной адгезии использованием эмульсий или масел, созданием инертной атмосферы либо путем добавления в СОЖ специальных ингибиторов или активных добавок. В этом случае для снижения засаливания, согласно рекомендациям, следует сменить алмазный абразив на кубический нитрид бора, карбид кремния или более пористый абразивный инструмент.



**Рис. 1.** Физические модели формирования основных видов контактного взаимодействия при КЭАО: *а* — механическая адгезия; *б* — молекулярная адгезия

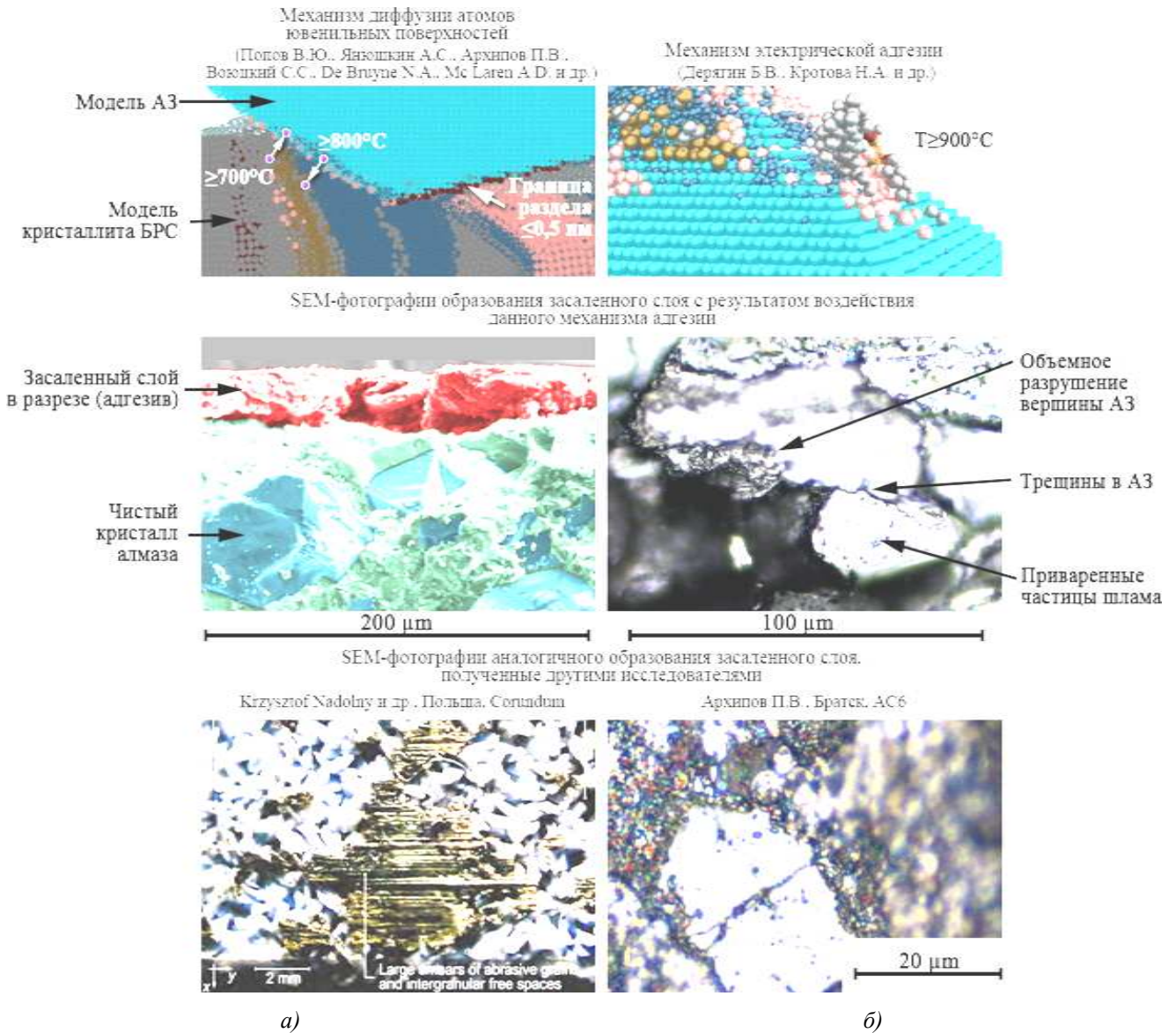
В частности, при обработке твердосплавных режущих элементов процесс молекулярной адгезии вызывает одновременное увеличение силы резания и температуры в зоне контакта, что приводит к появлению прижогов на обрабатываемой поверхности, начинается рост карбидных зерен, увеличивается шероховатость и снижается качество.

**Химическая адгезия** (рис. 2 *а*). Четкую границу между химической и физической адгезией провести затруднительно, однако, как показали исследования, дальнейший рост давления и температуры в результате значительного увеличения площади контакта является причиной формирования межфазного контакта. Таким образом, наличие диффузии подтверждается экспериментально при данном виде контактного взаимодействия.

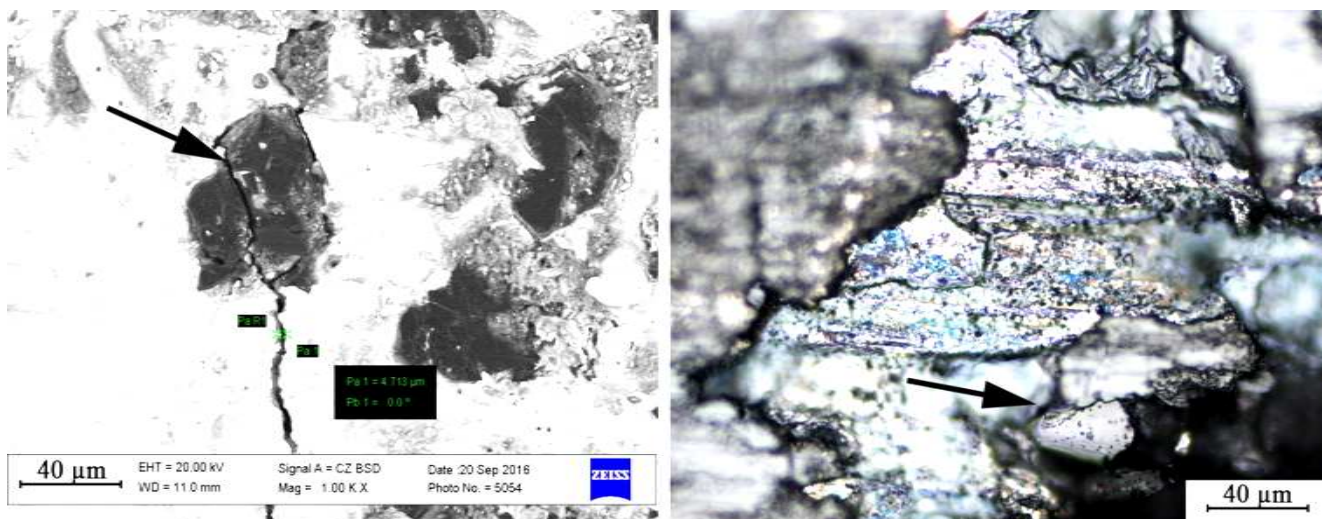
Фазовые превращения приводят к сжимающим или растягивающим поверхностным остаточным

напряжениям, в зависимости от увеличения или уменьшения объема преобразованного материала фазы. К моменту проявления химической адгезии обрабатываемая поверхность и засаленная становятся ювенильными. Возникают термодинамические предпосылки для ван-дер-ваальсового взаимодействия — присоединения химической связи, что наиболее вероятно в тех случаях, когда оба материала имеют химическое сходство. С момента своего образования химическое адгезионное соединение способно сохранять целостность и высокие механические свойства, независимо от внешнего механического воздействия или каких-либо агрессивных сред. С этого момента активно (т. е. в процессе самого шлифования) разрушить созданную связь обычными методами становится затруднительно. Единственным путем удаления засаленного слоя является механический разрыв химических связей разнообразными методами правки АШК либо комбинированными методами обработки.





**Рис. 2.** Физические модели формирования основных видов контактного взаимодействия при КЭАО: а — химическая адгезия; б — электрическая адгезия



**Рис. 3.** Растрескивание алмазного зерна под воздействием теплового удара, протекающее по трещинам (указаны стрелками), заполненным металлическими включениями, оставшимися в результате синтеза алмаза

В результате действия химической адгезии износ АШК увеличивается еще больше, из связки вырываются уже целые АЗ. В обрабатываемом материале происходят необратимые структурные изменения, являющиеся неисправимым браком.

**Электрическая адгезия** (рис. 2 б). Если в процессе обычного шлифования были реализованы вышеупомянутые условия, то и в обрабатываемой поверхности, и в засаленном слое происходит одновременная пластическая деформация, сочетающая в себе предыдущие физические модели формирования основных видов контактного взаимодействия: механического, термического и фазового. Однако если шлифование осуществляется по технологии КЭАО либо другими комбинированными методами обработки с дополнительным введением в зону обработки электрического тока, то засаливание всей поверхности АШК может происходить, в том числе, из-за сварки под давлением частиц шлама и алмазного зерна. В таком случае в связке АШК происходит рост температуры с последующим растрескиванием алмазного зерна под воздействием теплового удара или разрушением, протекающим по трещинам, заполненным металлическими включениями, оставшимися в результате синтеза алмаза (рис. 3).

#### Выводы и заключение

Представленные результаты позволяют дополнить сформировавшееся представление о том, что поры АШК и АЗ всего лишь забиваются компонентами обрабатываемого материала. Проведенный анализ опытных образцов показал наличие в засаленном слое элементов как самой связки круга, так и вторичных соединений, образующихся в результате адгезионно-диффузионных явлений, химических реакций и рекристаллизации.

Химическим анализом обработанной поверхности быстрорежущей стали и образцов шлифовального круга определены элементы, в частности, алюминий, медь, олово, железо и др., которые в результате диффузии и взаимодействия с углеродом и кислородом приводят к образованию новых карбидов и оксидов. Усиление и локализация диффузионных процессов возникают при интенсификации режимов шлифования, когда не только локальные, но и средние температуры в зонах контакта достигают высоких значений (более 1 000 °С).

Исходя из результатов комплексных экспериментальных исследований КЭАО, можно сделать вывод, что для предотвращения процесса засаливания АШК возможно создать такие условия, которые будут способствовать усовершенствованию известных решений технологии комбинированной обработки различных материалов алмазным инструментом на металлической связке за счет возможности управления контактными процессами, а также разработки прогрессивного инструмента и оборудования.

Одним из перспективных направлений предотвращения адгезии при шлифовании и блокирования механизма диффузионного изнашивания АЗ является синтез бездефектных алмазов. Исследования в этом направлении продолжаются.

Нами предложены некоторые рекомендации для минимизации влияния засаленного слоя путем:

- образования на поверхности круга защитных пленок;
- замены стандартных электролитов на альтернативные смазывающе-охлаждающие жидкости;
- разработки и внедрения в эксплуатацию новых, прогрессивных конструкций шлифовальных кругов;
- активной правки шлифовального круга во время шлифования по технологии КЭАО;
- комбинированного сочетания вышеупомянутых методов.

В результате аналитических и экспериментальных исследований предложены новые направления в развитии методов комбинированного алмазного шлифования, исследовании причин потери режущих свойств алмазного инструмента на металлической связке при обработке различных материалов, которые накладывают определенные технические ограничения на использование алмазного инструмента.

Установлено, что вид физической модели [34] формирования контактного взаимодействия при КЭАО зависит от конкретных термодинамических, фазовых и кинетических характеристик процесса шлифования, участвующих в его формировании.

Обоснованно доказано образование засаленного слоя на поверхности АШК под воздействием высоких температур, давления и сил межатомного взаимодействия, что подтверждено методами спектрального, рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии, с помощью которых установлен его химический состав.

Установлена адгезионно-диффузионная направленность процесса засаливания АШК, возникающего при шлифовании инструментальных, железоуглеродистых материалов за счет диффузии углерода, что сопровождается возникновением хрупкой переупрочненной структуры с повышенной микротвердостью и приводит к снижению физико-механических свойств поверхностного слоя.

#### Литература

1. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. К.: Техніка, 1980. 215 с.
2. Лоладзе Т.Н., Бокучаева Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИМАШ. 1965. Вып. 5. С. 30-32.
3. Liu W.Q., Ma H.A., Li X.L., Liang Z.Z., Li R., Jia X. Effects of additive Al on the HPHT diamond synthesis in an Fe-Mn-C system // *Diamond & Related Materials*. 2007. № 16. P. 1486–1489.
4. Tselev A., Luk'yanchuk I.A., Ivanov I.N., Budai J.D., Tischler J.Z., Strelcov E., Kolmakov A., and Kalinin S.V. Symmetry Relationship and Strain-Induced Transitions between Insulating M1 and M2 and Metallic R phases of Vanadium Dioxide. *Nano Lett.*, 2010, Vol. 10 (11). P. 4409–4416.

5. Hegeman J.B.J.W., De Hosson J.Th.M., De With G. Grinding of WC-Co hardmetals, *Wear*, 2001. Vol. 248 (1–2). P. 187–196.
6. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014. 480 p.
7. Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 809-814.
8. Vasil'ev E.V., Popov A.Yu. Renovation of hard-alloy end mills on numerically controlled grinding machines // *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34. P. 466-468.
9. Geng Zhi, Xuekun Li, Zhiqiang Qian, Haitao Liu, Yiming Rong. Experimental study of time-dependent performance in super alloy high-speed grinding with CBN wheels // *Machining Science and Technology*. 2016. Vol. 20. P. 615-633.
10. Strel'chuk P.M., Uzunyan M.D. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKar nanostructural hard alloy // *Journal of Superhard Materials*. 2010. Vol. 32. P. 50-54.
11. Patnaik Durgumahanti U.S., Singh V. Venkateswara Rao P. A. New Model for Grinding Force Prediction and Analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol. 50 (3). P. 231–240.
12. Schöpf M., Beltrami I., Boccadoro M., Kramer D. ECDM (Electro Chemical Discharge Machining), a New Method for Trueing and Dressing of Metal Bonded Diamond Grinding Tools // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 50 (1). P. 125–128.
13. Chang C.C., Szeri A.Z. A thermal analysis of grinding, *Wear*, 1998. Vol. 216 (1), P. 77–86.
14. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение, 2004. 230 с.
15. Фукс М.Я., Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовоой обработки. Киев: Вища школа, 1979. 160 с.
16. Шустов А.И. Обеспечение качества быстрорежущего инструмента при плоском шлифовании высокопористыми нитридборовыми кругами: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2017. 152 с.
17. Мельникова Е.П. Технологические и трибологические основы повышения эффективности абразивной финишной обработки: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д., 2003. 306 с.
18. Репко А.В. Развитие теории технологии шлифования деталей из материалов, склонных к образованию тепловых дефектов: дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2005. 414 с.
19. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов: дис. ... д-ра техн. наук. Ульяновск, 2006. 537 с.
20. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск, 2007. 299 с.
21. Янюшкин А.С. Контактное взаимодействие при комбинированном электроалмазном затачивании твердосплавных инструментов: дис. ... д-ра технических наук. Иркутск, 2004. 397 с.
22. Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М. Квантово-механическое моделирование деформации и разрушения срезаемого слоя при резании // *Вестн. машиностроения*. 2016. № 4. С. 65–71.
23. Kabaldin Y.G. Quantum model of nanostructure assembly // *Russian Engineering Research*. 2014. T. 34, № 12. P. 751–755.
24. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Уткин А.А. Моделирование процессов трения и смазывания при резании на основе квантово-механических расчетов // *Вестн. машиностроения*. 2012. № 2. С. 46–52.
25. Заводинский В.Г. Атомная структура и электронное строение нанометровых систем на основе кремния: дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток, 1997. 254 с.
26. Заводинский В.Г., Каминский О.И. Квантово-механическое исследование трения в наноконтактах // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2017. Т. 23, № 3. С. 310–321.
27. Zavodinsky V.G., Gorkusha O.A. Development of an orbital-free approach for simulation of multi-atomic nanosystems with covalent bonds // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2016. Т. 7, № 3. С. 427–432.
28. Матюшкин И.В. Моделирование и визуализация средствами MATLAB физики наноструктур. М.: Техносфера, 2011. 168 с.
29. Иванов В.В. Процессы и методология создания поверхностных слоев высокоресурсных изделий путем вибрационного формования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук: Воронеж, 2018. 351 с.
30. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 4 (73). С. 16–23.
31. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 5 (74). С. 16–23.
32. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding // *MATEC Web of Conferences*. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017". 2017. P. 01002.
33. Popov V., Rychkov D., Arkhipov P. Defects in diamonds as the basic adhesion grinding // *MATEC Web of Conferences*. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017". 2017. P. 01003.
34. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8, № 1. С. 161–172.

#### References

1. Zaharenko I.P. Diamond tools and machining processes. K.: Tekhnika, 1980. 215 p.
2. Loladze T.N., Bokuchaeva G.V. To the theory of diffusive wear of diamond abrasive tools // *Tr. VNIMASH*. 1965. Vyp. 5. P. 30-32.
3. Liu W.Q., Ma H.A., Li X.L., Liang Z.Z., Li R., Jia X. Effects of additive Al on the HPHT diamond synthesis in an Fe-Mn-C system // *Diamond & Related Materials*. 2007. № 16. P. 1486-1489.
4. Tselev A., Luk'yanchuk I.A., Ivanov I.N., Budai J.D., Tischler J.Z., Strelcov E., Kolmakov A. and Kalinin S.V. Symmetry Relationship and Strain-Induced Transitions between Insulating M1 and M2 and Metallic R phases of Vanadium Dioxide. *Nano Lett.*, 2010, Vol. 10 (11). P. 4409-4416.
5. Hegeman J.B.J.W., De Hosson J.Th.M., De With G. Grinding of WC-Co hardmetals, *Wear*, 2001. Vol. 248 (1–2). P. 187-196.
6. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014. 480 p.

7. Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 809-814.
8. Vasil'ev E.V., Popov A.Yu. Renovation of hard-alloy end mills on numerically controlled grinding machines // *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34. P. 466-468.
9. Geng Zhi, Xuekun Li, Zhiqiang Qian, Haitao Liu, Yiming Rong. Experimental study of time-dependent performance in super alloy high-speed grinding with CBN wheels // *Machining Science and Technology*. 2016. Vol. 20. P. 615-633.
10. Strel'chuk P.M., Uzunyan M.D. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKar nanostructural hard alloy // *Journal of Superhard Materials*. 2010. Vol. 32. P. 50-54.
11. Patnaik Durgumahanti U.S., Singh V. Venkateswara Rao P.A. New Model for Grinding Force Prediction and Analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol. 50 (3). P. 231-240.
12. Schöpf M., Beltrami I., Boccadoro M., Kramer D. ECDM (Electro Chemical Discharge Machining), a New Method for Trueing and Dressing of Metal Bonded Diamond Grinding Tools // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 50 (1). P. 125-128.
13. Chang C.C., Szeri A.Z. A thermal analysis of grinding, *Wear*, 1998. Vol. 216 (1), P. 77-86.
14. Yanyushkin A.S., Shorkin V.S. Contact processes during electrodiamond grinding. M.: Mashinostroenie, 2004. 230 p.
15. Fuks M.YA., Bezzubenko N.K., Sverdlova B.M. The state of the surface layer of materials after diamond and alborovoy processing. Kiev: Vishcha shkola, 1979. 160 p.
16. Shustov A.I. Quality assurance of high-speed tools for flat grinding with highly porous nitride boron wheels: dis. ... kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2017. 152 p.
17. Mel'nikova E.P. Technological and tribological basis for improving the efficiency of abrasive finishing: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Rostov n/D., 2003. 306 p.
18. Repko A.V. The development of the theory of technology grinding parts from materials prone to the formation of thermal defects: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Izhevsk, 2005. 414 p.
19. Unyanin A.N. Scientific and technological support of grinding blanks from plastic steels and alloys to prevent clogging of abrasive wheels: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ul'yanovsk, 2006. 537 p.
20. Hudobin L.V., Unyanin A.N. Minimization of salting of grinding wheels. Ul'yanovsk, 2007. 299 p.
21. Yanyushkin A.S. Contact interaction with the combined electro-diamond sharpening carbide tools: dis. ... d-ra tekhnicheskikh nauk. Irkutsk, 2004. 397 p.
22. Kabaldin Yu.G., Kuz'mishina A.M. Quantum-mechanical modeling of the deformation and fracture of the shear layer during cutting // *Russian Engineering Research*. 2016. № 4. P. 65-71.
23. Kabaldin Y.G. Quantum model of nanostructure assembly // *Russian Engineering Research*. 2014. T. 34, № 12. P. 751-755.
24. Kabaldin Yu.G., Seryj S.V., Utkin A.A. Modeling the processes of friction and lubrication during cutting based on quantum-mechanical calculations // *Russian Engineering Research*. 2012. № 2. P. 46-52.
25. Zavodinskij V.G. The atomic structure and electronic structure of nanometer systems based on silicon: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Vladivostok, 1997. 254 p.
26. Zavodinskij V.G., Kaminskij O.I. Quantum-mechanical study of friction in nanocontacts // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii (Mechanics of composite materials and structures)*. 2017. T. 23, № 3. P. 310-321.
27. Zavodinsky V.G., Gorkusha O.A. Development of an orbital-free approach for simulation of multi-atomic nanosystems with covalent bonds // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2016. T. 7, № 3. P. 427-432.
28. Matyushkin I.V. Modeling and visualization by means of MATLAB physics of nanostructures. M.: Tekhnosfera, 2011. 168 p.
29. Ivanov V.V. Processes and methodology for creating surface layers of high-life products by vibratory formation of coatings by a combined chemical and mechanical effect: dis. ... d-ra tekhn. nauk: Voronezh, 2018. 351 p.
30. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Hlystov A.N. On the destruction of diamond grains during grinding // *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2016. № 4 (73). P. 16-23.
31. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Hlystov A.N. Defects in diamonds - the basis of adhesion when grinding // *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2017. № 5 (74). P. 16-23.
32. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding // *MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017"*. 2017. P. 01002.
33. Popov V., Rychkov D., Arkhipov P. Defects in diamonds as the basic adhesion grinding // *MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017"*. 2017. P. 01003.
34. Popov V.Yu., Hlystov A.N., Bondin A.V. Atomic visualization of diamond cutting // *Computer Research and Modeling*. 2016. T. 8, № 1. P. 161-172.