

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Волгоградский государственный технический университет
Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

ПРОЦЕССЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ, АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ

Шлифабразив-2019

**Сборник статей
XVII Международной научно-технической конференции**

Под общей редакцией В. М. Шумячера



Волгоград

2019

УДК 061.61
ББК 34.637
П 845

Оргкомитет

Председатель:

Колесников В.И. – президент РГУПС, академик РАН

Заместители председателя:

Навроцкий А.В. – ректор ВолгГТУ, доктор химических наук, профессор

Костров С.В. – генеральный директор ОАО «Волжский абразивный завод»
СУМІ

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2019 [Электронный ресурс] : сборник статей XVII Международной научно-технической конференции ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВолгГТУ, ВПИ (филиал) ВолгГТУ ; под общей редакцией В. М. Шумячера. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 181 с.

ISBN 978-5-9948-3537-1

Сборник посвящен проблемам производства и эксплуатации абразивного инструмента, укреплению межотраслевых связей в современных экономических условиях, обмену опытом, результатами научно-исследовательской работы и расширению сотрудничества по вопросам создания абразивных материалов, инструментов и их использования в процессах абразивной обработки. В него вошли работы, отражающие перспективные направления инструментальной и обрабатывающей промышленности.

ISBN 978-5-9948-3537-1

© Волгоградский государственный
технический университет, 2019
© Волжский политехнический
институт, 2019



ШЛИФАБРАЗИВ – 2019

XVII Международная научно-техническая конференция

Организаторы

- Администрация городского округа г. Волжский
- Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ)
- Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ
- ОАО «Волжский абразивный завод» (СУМИ)
- ОАО «ЕПК Волжский»

Оргкомитет

Председатель:

- **Колесников В.И.** – президент РГУПС, академик РАН

Заместители председателя:

- **Навроцкий А.В.** – ректор ВолГГТУ, доктор химических наук, профессор
- **Костров С.В.** – генеральный директор ОАО «Волжский абразивный завод» СУМИ

Организационный комитет

1. *Narasiman Krishna Kumar* – заместитель генерального директора по международному бизнесу компании Carborundum Universal Limited
2. *Блюментейн В.Ю.* – д.т.н., профессор, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
3. *Бочкарев П.Ю.* – д.т.н., профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
4. *Бутов Г.М.* – д.х.н., профессор, зам. директора по НИР, Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ
5. *Веткасов Н.И.* – д.т.н., доцент, зав.кафедрой, Ульяновский государственный технический университет
6. *Воронин И.Н.* – Глава городского округа г. Волжский
7. *Гороховский А.В.* – д.х.н., профессор, зав. кафедрой, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
8. *Емелюшин А.Н.* – д.т.н., профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
9. *Зверовщиков А.Е.* – д.т.н., профессор, зав.кафедрой, Пензенский технический государственный университет
10. *Ильиных А.С.* – д.т.н., профессор, Сибирский государственный технический университет путей сообщения
11. *Копецкий А.А.* – исполнительный директор, ОАО «ЕПК Волжский»
12. *Крюков С.А.* – д.т.н., доцент, Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ
13. *Кузьмин С.В.* – д.т.н., профессор, первый проректор, ВолГГТУ
14. *Кулик О.Г.* – к.т.н., доцент, ученый секретарь конференции, Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ
15. *Курдюков В.И.* – д.т.н., профессор, Курганский государственный технический университет
16. *Лысак В.И.* – академик РАН, научный руководитель, ВолГГТУ
17. *Носов Н.В.* – д.т.н., профессор, Самарский государственный технический университет
18. *Сафонов С. В.* - первый проректор, Воронежский государственный технический университет
19. *Смоленцев В. П.*- д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет
20. *Тамаркин М. А.* – д.т.н., профессор, зав.кафедрой, Донской государственный технический университет
21. *Фетисов А.В.* – к.т.н., доцент, директор, Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ
22. *Шарабаев А.В.* – к.т.н., технический директор ООО «ИНФ»
23. *Шумячер В.М.* – д.т.н., профессор, зав. кафедрой, Волжский политехнический институт (филиал) ВолГГТУ

	Стр.
Актуальность проведения XVII Международной научно-технической конференции. Пути развития производства и эксплуатации абразивного инструмента. Укрепление межотраслевых связей в современных экономических условиях.	
<i>Кузьмин С.В.</i>	6
<i>Krishna Kumar N.</i>	7
<i>Шумячер В. М.</i>	8
Сплав для плазменно-порошковой наплавки композитного износостойкого покрытия	
<i>Емелюшин А.Н., Нефедьев С.П., Шекшеев М.А.</i>	10
Режущая способность абразивных зерен при обработке заготовок из пластичных материалов с наложением ультразвуковых колебаний	
<i>Унянин А.Н., Хазов А.В.</i>	16
Моделирование влияния виброобработки косточковыми органическими средами на качество поверхности	
<i>Лебедев В.А., Шишкина А.П., Крупеня Е.Ю.</i>	22
Роль поверхностно-активных веществ в контактном взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемым материалом	
<i>Бутенко В.И., Давиденко К.В.</i>	28
Плоское шлифование деталей малой жёсткости с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке	
<i>Тышкевич В.Н.</i>	34
Зависимости степени пористости и прочности композиционного материала абразивных инструментов на керамической связке от структурных параметров и наличия порообразователя	
<i>Багайсков Ю.С.</i>	40
Изменение параметров зацепления «абразивный шевёр – зубчатое колесо» при учете упругой деформации	
<i>Багайсков Ю.С.</i>	45
Использование ректификационной колонны для нейтрализации вредных веществ при производстве бакелитового инструмента кругов	
<i>Орлов И.Ю., Орлова Т.Н.</i>	51
Новое в технологии изготовления металлургических брикетов путём использования карбида кремния и аспирационной пыли от дробления легирующих добавок металлургических производств	
<i>Орлов И.Ю., Шумячер В.М., Орлова Т.Н.</i>	55
Повышение теплопроводности рельсошлифовальных кругов – путь достижения высоких эксплуатационных характеристик инструмента	
<i>Орлов И.Ю., Шумячер В.М.</i>	59
Влияние гранулометрического состава абразивного инструмента на эффективность шлифования	
<i>Байдакова Н. В, Крюков С. А., Орлов И.Ю.</i>	64
Универсальная математическая модель для прогнозирования результатов процесса виброклассификации абразивных материалов	
<i>Байдакова Н. В, Шумячер В.М.</i>	69
Мониторинг качественных показателей абразивных материалов	
<i>Савчиц А.В., Шумячер В.М.</i>	74
Контактные взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью при шлифовании металлов	
<i>Шумячер В. М., Кулик О.Г., Кадильников А. В.</i>	79

Представление процесса шлифования в трехфазной граничной системе «металл – смазочно-охлаждающая жидкость – абразивное зерно» <i>Шумячер В. М., Башкирцева И.В.</i>	86
Рационализация системы подачи смазочно-охлаждающей жидкости для повышения эффективности процесса шлифования <i>Шумячер В. М., Башкирцева И.В., Орлов И.Ю.</i>	90
Повышение эффективности процесса шлифования посредством изменения структурных характеристик абразивного инструмента <i>Крюков С. А., Байдакова Н. В.</i>	96
Совершенствование физико-механических свойств высокопористых абразивных инструментов <i>Крюков С.А., Байдакова Н.В., Гребенникова Н.Н.</i>	102
Повышение эксплуатационных характеристик шлифинструмента за счёт количественной меры оценки формы частиц шлифовальных материалов <i>Гребенникова Н.Н.</i>	106
Данные для моделирования параметров качества абразивного инструмента в зависимости от его твердости и макрогеометрических характеристик зерна <i>Шепелев И.В., Крюков С. А.</i>	113
Теоретический анализ эксплуатационных характеристик абразивного инструмента на основе информационных технологий <i>Шумячер В. М., Кулик О.Г.</i>	118
Совершенствование финишной абразивной обработки путём рационального подбора состава смазочно-охлаждающей жидкости <i>Башкирцева И.В., Орлова Т.Н.</i>	124
Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на динамику изменения физико-механических характеристик тел трения <i>Башкирцева И.В., Орлова Т.Н.</i>	129
Технология изготовления хонинговального инструмента с использованием гранулированной смеси <i>Гузев В. В., Шумячер В. М.</i>	135
Сущность процесса хонингования и применение гранулированного абразивного инструмента <i>Гузев В. В., Шумячер В. М.</i>	139
Мониторинг качества шлифовальных материалов в процессах абразивной обработки <i>Пушкарев О.И., Кулик О.Г., Пузырькова В.Е.</i>	144
Исследование кинетики окислительных процессов керамических материалов на основе карбида кремния <i>Пушкарев О. И., Кулик О.Г., Башкирцева И.В.</i>	150
Исследование эксплуатационных характеристик шлифматериалов при абразивной обработке нержавеющей стали <i>Пушкарёв О.И., Башкирцева И. В., Пузырькова В.Е.</i>	157
Методология исследования сил резания при алмазно-абразивной обработке шлифовальных кругов с применением экспериментального оборудования <i>Пушкарев О.И., Кулик О.Г., Башкирцева И.В.</i>	161
Получение композиционных бетонов на основе карбида кремния <i>Пушкарев О.И., Горин Н.И., Рябчун С.А.</i>	168
Характеристики прочности и трещиностойкости режущих зёрен при алмазно-абразивной обработке материалов <i>Пушкарев О. И., Кулик О.Г., Башкирцева И.В.</i>	173

Актуальность проведения XVII Международной научно-технической конференции. Пути развития производства и эксплуатации абразивного инструмента. Укрепление межотраслевых связей в современных экономических условиях.

Кузьмин Сергей Викторович*

Первый проректор, «Волгоградский государственный технический университет»,
профессор кафедры "Оборудование и технология сварочного производства",
г. Волгоград, Россия

Международная научно-практическая конференция «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» ШЛИФАБРАЗИВ вот уже 17 раз проводится в целях укрепления взаимосвязи между производителями современных абразивных технологий и конечными потребителями (промышленной отраслью), освещения и решения проблем межотраслевых связей в современных экономических условиях, обмена опытом, результатами научно-исследовательской работы и расширения сотрудничества по вопросам создания абразивных материалов, инструментов и их использования в процессах абразивной обработки.

История конференции берёт свое начало в 1996 году, когда к Волгоградскому государственному архитектурно-строительному университету (ВолгГАСУ) был присоединен Волжский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института абразивов и шлифования (Волжск-ВНИИАШ), что обеспечило сохранение материально-технической базы, научного коллектива. Это создало условия для выполнения перспективных исследований в области производства, эксплуатации абразивного инструмента для современных высокотехнологичных производств.

Учеными и инженерами в период 1996 по н.в. созданы новейшие абразивные материалы и инструменты, не имеющие аналогов в мире и получившие награды на Международных инновационных выставках в Швейцарии, Франции, Корее, Малайзии и др.

Организаторами конференции сегодня являются Волгоградский государственный технический университет совместно с ОАО «Волжский абразивный завод» (СУМИ) и ЕПК Волжский.

Конференция ШЛИФАБРАЗИВ призвана решить задачи тесного взаимодействия и корреляции таких классических понятий, как:

«требования потребителя – наука – технология»,

«технология – продукт»,

«продукт – массовое производство – удовлетворение потребителя».

На конференции будут рассмотрены следующие вопросы:

– разработка высокоэффективных технологий производства абразивных материалов и инструментов, отвечающих требованиям энергосбережения и экологической безопасности;

– разработка абразивных материалов и инструментов с показателями, превышающими лучшие мировые образцы;

– разработка перспективных абразивных кругов для высокоскоростного шлифования (до 150 м/с), в том числе для обработки заготовок из сложнолегированных сталей и сплавов, жаропрочных, титановых, твердых сплавов, керамики, композиционных материалов на органических связующих;

* E-mail: weld@vstu.ru (Кузьмин С.В.)

- разработка технологических процессов абразивной обработки деталей подшипниковой, металлургической, химической, сельскохозяйственной, кораблестроительной, авиационной, аэрокосмической промышленности;
- изучение и распространение достижений отечественной и зарубежной науки и передового опыта в области производства и эксплуатации абразивных материалов.

Narasiman Krishna Kumar *

Заместитель генерального директора по международному бизнесу компании Carborundum Universal Limited, ОАО «Волжский абразивный завод» (CUMI),
Thiruvottiyur, Chennai, India

В настоящее время Волжский абразивный завод занимает одно из ведущих мест по производству шлифматериалов и абразивного инструмента. Это крупнейшее предприятие отрасли по производству куска карбида кремния черного, зеленого и электротехнического, выпуску шлифзерна, шлифпорошков, абразивного инструмента на керамической и бакелитовой связке, обладающее высоким уровнем автоматизации, механизации и компьютеризации.

Основная деятельность предприятия развернута на рынках абразивного инструмента, шлифовальных материалов и огнеупорных изделий. Технологической основой производства является плавка и переработка карбида кремния черного и зеленого собственного изготовления, используемого в абразивной, огнеупорной и металлургической областях.

В части производства шлифовального инструмента на керамической связке и огнеупорных изделий из карбида кремния предприятие не только занимает ведущее место в отрасли, но и является одним из немногих обладателей технологии производства шлифовальных материалов из карбида кремния.

С 2007 года ОАО "Волжский Абразивный Завод" является частью CUMI International Ltd - дочерней фирмы CARBORUNDUM UNIVERSAL LTD (CUMI), которая в свою очередь входит в конгломерат Murugappa Group, созданный в начале 20-го века. В сферу деятельности Murugappa входит производство промышленного оборудования, абразивных материалов, сантехники, удобрений и биологической продукции; а также финансовые операции на Бомбейской и Национальной Фондовой Бирже. Основным направлением деятельности CUMI является производство абразивного инструмента в том числе на гибкой основе, формованных и неформованных огнеупоров, промышленной керамики и электроминералов. Производственные мощности компании находятся в Индии, Австралии, Канаде, Китае, странах Ближнего Востока, Европе и США.

Представители компании CUMI вошли в состав Совета директоров ОАО «Волжский абразивный завод». В 2007 г. был создан филиал ОАО «Волжский Абразивный Завод» в г. Москве, ориентированный на внедрение и развитие международного маркетинга как элемента организационной культуры предприятия. Международный маркетинг в противовес чистому экспорту позволит предприятию выполнять заказы потребителей с различной степенью кастомизации, что позволит предприятию не только усилить свою позицию на традиционных рынках, но и выйти на совершенно новые географические и товарные рынки.

Приход компании CUMI на ОАО «Волжский Абразивный Завод» благотворно сказался на развитии предприятия, увеличении выпуска и повышения качества продукции.

Заручившись технической поддержкой компаньонов, CUMI взяла на себя амбициозный проект по производству первых индийских покрытых и связанных абразивов. Также CUMI первой в Индии приступила к производству материалов высшей

огнеупорности, электроминералов, промышленной керамики и керамического волокна. В настоящий момент CUMI лидирует в производстве абразивных материалов в Индии и обладает широчайшим ассортиментом связанных абразивов.

Российские технологии плюс индийские инвестиции. Эта связка, которая оправдывает себя даже в условиях кризиса.

На Волжском абразивном заводе с гордостью говорят, что в Европе нет такой страны, куда не поставлялась бы местная продукция. Несмотря на то, что выпуск карбида кремния, основного вида продукции на заводе, упал на семь процентов, завод все равно работает с прибылью. Так как, сократив количество, улучшили качество. Кроме того, снизили себестоимость за счет повторного использования абразивных отходов, раньше их просто складировали на территории.

ВАЗ совместно с CUMI разработали технологию использования абразивных отходов для их повторного запуска в производство. Кризис заставил на некоторые вещи взглянуть по-новому. Это бизнес. Конкуренты не дремлют.

Под руководством CUMI сегодня успешно усовершенствованы технологии и модернизировано оборудование. За недолгое сотрудничество на заводе уменьшили вредные выбросы, потребление электроэнергии и увеличили ассортимент продукции, увеличились также и суммы налоговых отчислений. Сейчас по инициативе индийцев начата разработка нового проекта - выпуск огнеупорных материалов по совершенно новым технологиям. Для этого будет построено новое производство.

Для осуществления намеченных целей сегодня были разработаны новые бизнес-планы по уникальным инновационным направлениям производства. В их основу положены маркетинговый анализ рынка, дальнейшая модернизация производства, приобретение промышленного оборудования нового поколения, освоение новых технологий, решение экологических проблем.

Международная научно-практическая конференция «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» ШЛИФАБРАЗИВ-2019 позволит нам в тесной взаимосвязи потребителей и производителей абразивного инструмента выявить насущные проблемы, чтобы в дальнейшем, с помощью последних Российских достижений и передового опыта зарубежной науки в области производства и эксплуатации абразивных материалов, приносить максимальную пользу для роста благосостояния наших государств.

Шумячер Вячеслав Михайлович*

Профессор, заведующий кафедрой "Строительство. Технологические процессы и машины", руководитель НТЦ "ВНИИАШ", Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский Волгоградской области, Россия

Повышение качества выпускаемой продукции на предприятиях машиностроительной отрасли связано с постоянным ростом требований к точности геометрии и размеров деталей, качеству их рабочих поверхностей.

Рост номенклатуры обрабатываемых материалов, в том числе композиционных, увеличение объема производства деталей из них в различных отраслях промышленности, необходимость повышения качества и эксплуатационной надежности машин, механизмов требуют постоянного совершенствования технологий механической обработки. Увеличение доли абразивной обработки деталей в технологии машиностроения становится достижимым при применении нового оборудования, на котором реализуются высокоэффективные процессы высокоскоростного, глубинного, прецизионного

* E-mail: yms22@yandex.ru (Шумячер В.М.)

шлифования, хонингования, суперфиниширования, доводки, что инициирует создание и выпуск принципиально новых видов абразивных инструментов.

Проведение XVII Международной научно-практической конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» обусловлено необходимостью дальнейшего укрепления связей между производителями абразивного инструмента, его потребителями и наукой. Консолидировать усилия ученых и промышленных предприятий в области совершенствования, повышения эффективности технологий производства и эксплуатации абразивного инструмента – первоочередная задача сегодняшнего дня. Так же, вполне очевидно, что в создавшейся обстановке необходимо консолидировать и усилия ученых конструкторов для создания новых абразивных инструментов, материалов, технологий, оборудования предприятий абразивной отрасли. Ведь отечественными и зарубежными учеными выполнено уже значительнейшее число исследований в области абразивной обработки, которые позволили сформировать научные основы шлифования, разработать модели управления этими процессами.

Но перед наукой стоит еще много нерешенных задач, таких как, например, разработка методологии проектирования абразивного инструмента, позволяющая вести целенаправленный выбор характеристик шлифовального круга (твердость, структура, пористость материала, форма абразивных зерен, связки), обеспечивающего требуемые технологические показатели: режущая способность, стойкость, шероховатость абразивной поверхности. В отсутствие обоснованной методологии проектирования абразивного инструмента с требуемыми показателями потребители вынуждены применять универсальные шлифовальные круги, выпускаемые отечественными предприятиями, которые не позволяют достигнуть нужного результата.

При выборе импортного абразивного инструмента отечественные потребители сталкиваются с серьезной проблемой, сущность которой заключается в том, что ведущие мировые производители практикуют специализацию под конкретную операцию, выполняемую на заданном оборудовании.

Вследствие этого резко возрастают издержки на предприятиях, эксплуатирующих абразивный инструмент, снижается производительность и качество обработки. Предприятия абразивной отрасли при выполнении заказа на выпуск шлифовальных кругов имеют минимум информации об условиях его эксплуатации и ориентируются на рекомендации по изготовлению универсальной продукции.

Нормирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов является сложной задачей вследствие широкого спектра видов шлифования, реализуемых на различных станках.

Для решения этой проблемы необходимо разработать надежный метод и средства мониторинга процесса шлифования в реальном производстве. Информация, полученная при мониторинге реального процесса, должна позволить назначить требуемые характеристики инструмента, обеспечивающие производительность и качество шлифования, что невозможно без разработки научных основ проектирования абразивного инструмента с заданными эксплуатационными показателями.

На основании изложенного можно констатировать, что наша Международная научно-практическая конференция «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» – это арена для возможности совместного выявления актуальных задач и проблем отрасли, требующих решения в короткие сроки.

Сплав для плазменно-порошковой наплавки композитного износостойкого покрытия

Емелюшин А.Н.^{1*}, Нефедьев С.П.¹, Шекшеев М.А.¹

¹Профессор, Докторант, Доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Аннотация

Разработан новый сплав на основе железа для плазменного нанесения износостойкого и коррозионно-стойкого покрытия. Приведено сравнение структуры и свойств покрытия, полученного с применением разработанного порошка, со структурой и свойствами покрытий, получаемых с использованием порошков известных аналогов.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, износостойкость, структура, композитное строение

Alloy for plasma-powder surfacing of composite wear-resistant coating

Emelushin A. N.^{1}, Nefedev S. P.¹, Sheksheyev M. A.¹*

*¹ Professor, Doctoral student, Assistant Professor, Magnitogorsk state technical University.
G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia*

Abstract

A new iron-based alloy has been developed for plasma application of wear-resistant and corrosion-resistant coatings. The structure and properties of the coating obtained using the developed powder are compared with the structure and properties of coatings obtained using powders of known analogues.

Keywords: *plasma-powder surfacing, wear resistance, structure, composite structure*

Введение

Экономическая потребность в повышении долговечности деталей машин приводит к необходимости разработки новых материалов, которые обладают повышенными эксплуатационными свойствами, и в первую очередь – высокой износостойкостью. В связи с этим в последние годы активно применяют плазменную и лазерную наплавку для изготовления деталей, обладающих повышенной износостойкостью [1...3]. При этом происходит экономия материальных ресурсов, т.к. основу таких деталей изготавливают из углеродистых или малолегированных конструкционных сталей, а дорогостоящие износостойкие материалы применяют только для нанесения на поверхность. Однако традиционно известные износостойкие материалы обладают такими технологическими недостатками при плазменно-порошковой наплавке, как склонность к трещинообразованию, хрупкость и т.д. Эти обстоятельства не позволяют активно применять их при плазменной или лазерной наплавке для формирования износостойких покрытий.

В работе описаны исследования по разработке порошкового сплава, предназначенного для формирования износостойкого покрытия при плазменно-

порошковой наплавке, обладающего повышенной абразивной и ударно-абразивной износостойкостью. Наплавочный порошок разработан компанией ООО «ПлазмоТех-МГТУ» (г. Магнитогорск, Россия) и внедрен в производство под торговой маркой PLASMOTEC 19 [4]. Разработанный сплав обладает повышенными по сравнению с известными аналогами эксплуатационными свойствами.

1. Материалы и методика проведения исследований.

Образцы изготавливали из стали 45, на которые производили однослойную плазменно-порошковую наплавку с использованием в одном случае традиционных наплавочных порошков, в другом – разработанного наплавочного порошка. Химический состав исследованных присадочных материалов приведён в таблице. Далее проводили металлографические исследования сформированных покрытий по известным методикам. Для оценки стойкости покрытий к абразивному и ударно-абразивному изнашиванию производили испытание специально подготовленных образцов на испытательных стендах.

Испытания на абразивную износостойкость проводили по ГОСТ 23.208-79 а испытания на ударно-абразивный износ проводили по методике, описанной в ГОСТ 23.207-79.

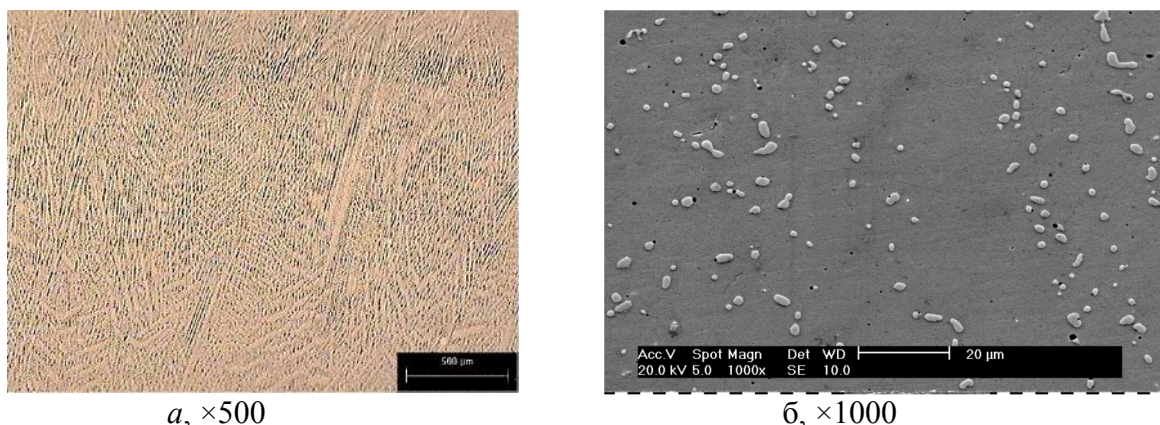
Табл. 1. Химический состав исследуемых наплавочных порошков

Наименование наплавочного порошка	Fe	Ni	C	Si	Mn	W	Mo	V	Cr	Al	B
Nistelle C (Delloro Stellite Ltd. Германия)	5,5	Осн.	0,12	0,9	0,9	4,5	17,5	-	16,4	-	-
Сормайт № 2 (Полема, Россия)	Осн.	-	2,9	1,88	0,73	-	-	-	24,1	0,7	2,3
PLASMOTEC 19 (ПТ, Россия)	Осн.	-	3,1	0,8	0,8	-	-	3,91	19,3	0,74	-

Плазменно-порошковую наплавку порошком Nistelle C (Delloro Stellite Ltd, Германия) производили на режимах, рекомендованных производителем [5]. Ток наплавки поддерживали на уровне 150 А, производительность наплавки по присадочному порошку составила 24 г/мин (1,44 кг/ч) при скорости наплавки 10 см/мин.

2. Результаты исследования

Сформированное покрытие не имело поверхностных дефектов в виде трещин или отслоений от подложки и характеризовалось лёгкостью наплавки и отсутствием склонности к трещинообразованию. Твёрдость покрытия после наплавки составила 28 HRC. Микроструктура средней части покрытия Nistelle C, показанная на рисунке 1, в наплавленном состоянии характеризуется мультимодальным распределением упрочняющей фазы в объёме металлической основы – легированного никелевого аустенита. Упрочняющей фазой, по видимости, являются хромомолибденовые карбиды. Такая микроструктура не обеспечивает достаточную технологическую пластичность и вязкость наплавленного покрытия и не позволяет осуществлять лёгкую наплавку толстых покрытий. Для придания необходимых эксплуатационных характеристик (абразивной и ударно-абразивной износостойкости) это покрытие необходимо подвергнуть дополнительной термической обработке – нормализации при температуре от 1000 °С (рис. 1б).



а – в состоянии после наплавки, б – после термической обработки [6]

Рис. 1. Микроструктура покрытия Nistelle C

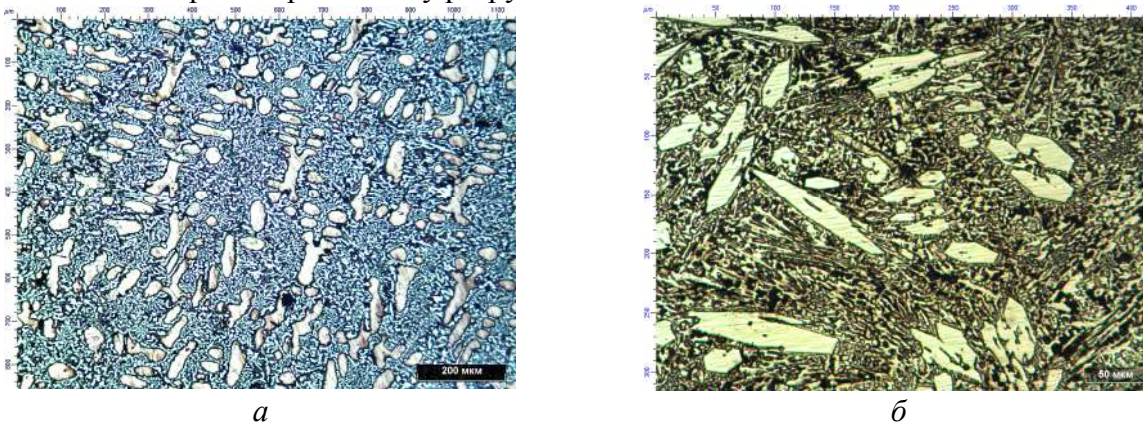
Проведение нормализации приводит к перекристаллизации микроструктуры, в результате чего карбиды растворяются в аустените, приводя к гомогенизации его химического состава и, в первую очередь, перераспределяя хром и молибден между металлической матрицей и карбидной фазой. Происходит коалесценция и сфероидизация карбидной фазы. По металлографическим признакам эти карбиды можно идентифицировать как карбиды молибдена и вольфрама типа $(Mo-W)_2C$. Твёрдость покрытия после термической обработки повысилась до 62 HRC, что можно объяснить изменением химического состава металлической основы, вызванным растворением в ней карбидной фазы, и повышением её легирования такими элементами как хром, железо и, возможно, углерод. Кроме того, выделение при охлаждении вторичных карбидов, имеющих округлое строение, должно приводить к повышению ударно-абразивной износостойкости, одновременно с повышением пластичности за счёт меньшего выкрашивания таких карбидов.

К недостаткам наплавочного порошка Nistelle C относится сложная и дорогостоящая технология нанесения покрытия, включающая операции наплавки и последующей термообработки, а также дороговизна исходного порошка из-за высокого содержания никеля, вольфрама и молибдена. Кроме того, на практике, в большинстве случаев, отсутствует возможность проводить нормализацию с использованием термического оборудования, в результате чего её приходится проводить, используя имеющиеся в наличии средства термического воздействия – плазменный или газопламенный нагрев. Это, в свою очередь, приводит к невозможности получения однородного гомогенизированного аустенита и, как следствие, к неравномерному по химическому составу и свойствам сформированному покрытию в разных частях деталей.

Покрытие, полученное при плазменной наплавке порошком Сормайт 2 [7] обладает твёрдостью 62 HRC непосредственно после наплавки. При этом образовалось незначительное количество разгрузочных трещин в верхних слоях наплавленного металла, что свидетельствует о недостаточной пластичности металлической основы покрытия. Микроструктура покрытия приведена на рисунке 2.

Очевидно, что образование разгрузочных трещин в наплавленном металле произошло из-за того, что данный сплав способен формировать не только доэвтектическую структуру, но и заэвтектическую структуру в зависимости от скорости охлаждения. Таким образом, ускоренно охлаждающиеся слои валика наплавленного металла, находящиеся ближе к поверхности, приобретают заэвтектическую структуру, склонную к лёгкому образованию трещин. Кроме того, как показывает производственный опыт, в ряде случаев, например, при наплавке деталей, подвергаемых при эксплуатации наряду с абразивным и ударному

воздействию, происходит преждевременное, хрупкое разрушение покрытия наплавленного Сормайтом № 2 путём образования микросколов и выкрашивания. Также, при наплавке указанным сплавом, трудно обеспечить стабильное качество и постоянные свойства формируемых покрытий, т.к. большой допустимый разброс в содержании углерода и хрома обеспечивают формирование структуры как доэвтектического, так и заэвтектического типа, что не позволяет обеспечить стабильные значения твёрдости и износостойкости. Наличие бора в составе сплава обеспечивает образование твёрдых боридов хрома и железа, что в условиях ударного нагружения приводит к их хрупкому разрушению и выкрашиванию, а следовательно – преждевременному разрушению наплавленного слоя.



a – средняя часть покрытия, $\times 100$; *б* – верхняя часть покрытия, $\times 500$

Рис. 2. Микроструктура покрытия Сормайт № 2

Для исключения описанных выше недостатков был разработан и запатентован порошковый сплав под торговой маркой PLASMOTEC 19, предназначенный для плазменной и лазерной наплавки [4]. Однослойная плазменная наплавка этим порошком приводит к формированию композитной структуры наплавленного металла, состоящей из мелкодисперсной тройной эвтектики легированного аустенита карбида хрома типа Cr_7C_3 и карбида ванадия, а также округлых карбидов типа $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}$ (рис. 3). Такая структура имеет веерообразное строение эвтектических колоний с направлением роста главных осей карбидной фазы перпендикулярно подложке и вдоль главного направления теплоотвода.

Из литературы известно [5], что на абразивную износостойкость высокоуглеродистых хромистых сплавов, при прочих равных условиях, значительное влияние оказывает ориентировка карбидной фазы. При перпендикулярной ориентации главных осей карбидов по отношению к направлению действия абразивных частиц износостойкость оказывается выше, чем при ином расположении карбидов. Благодаря наличию в составе описываемого наплавочного порошка хрома, ванадия и углерода в заданном соотношении при наплавке формируется инвертированная структура покрытия, в результате чего хрупкие карбиды типа Fe_3C замещаются более твёрдыми и прочными карбидами типа M_7C_3 . А одновременное воздействие бора, находящегося в составе присадочного порошка, приводит к модифицирующему воздействию, выражающемуся в резком измельчении и диспергировании структуры, а также большем переохлаждении карбидной фазы по сравнению с металлической основой. Это приводит к ориентации дисперсных эвтектических карбидов типа M_7C_3 в направлении теплоотвода, т.е. перпендикулярно наплаваемой подложке. В результате формируются покрытия с твёрдостью не менее 55 HRC, обладающие высокой стойкостью к абразивному и ударно-абразивному изнашиванию.

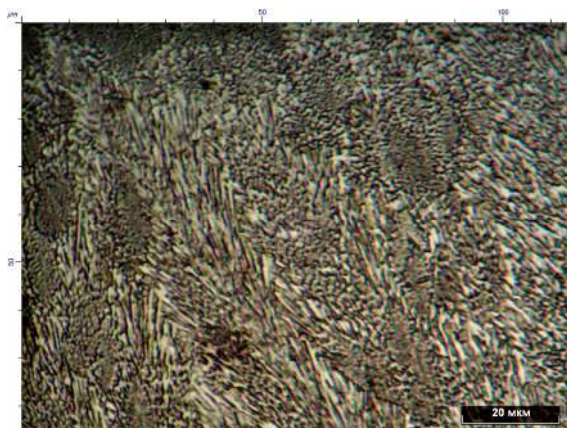
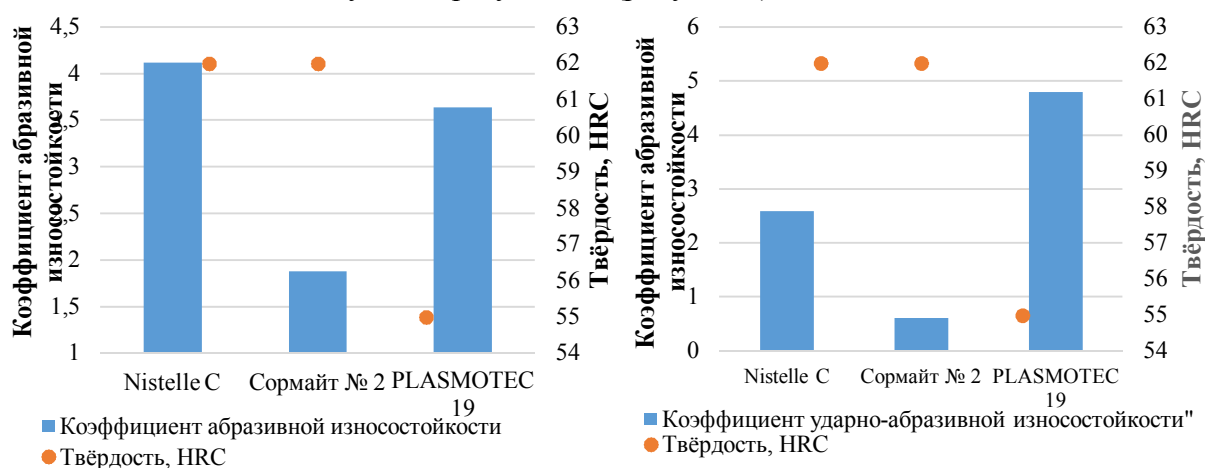


Рис. 3. Микроструктура покрытия PLASMOTEC 19, $\times 1000$

Присадка ванадия приводит к формированию тройной аустенито-хромованадиевой эвтектики в структуре взамен хромо-аустенитной эвтектики. Это способствует повышению ударной стойкости за счёт диспергирования карбидной фазы эвтектики. Кроме того, совместное действие хрома в количестве более 17 % и ванадия приводит к инверсии структуры, заключающейся в полном исчезновении избыточных карбидов цементитного типа, и появлении взамен их карбидов типа $(V, Cr)C$. Это также повышает ударную и ударно-абразивную износостойкость покрытий, т.к. указанные карбиды обладают более высокой твёрдостью по сравнению с карбидами цементитного типа и округлой формой, что и обеспечивает высокую ударно-абразивную износостойкость таких покрытий.

Наличие в составе порошка алюминия в количестве 0,74 % приводит к снижению порообразования при наплавке за счёт повышения жидкотекучести наплавленного металла, а также снижения сродства с кислородом. Вследствие этого металл, находящийся в сварочной ванне, претерпевает меньшее окисление.

Испытания на абразивную и ударно-абразивную износостойкость по описанным выше методикам дали следующие результаты (рисунок 4).



а

б

а – абразивная износостойкость, б – ударно-абразивная износостойкость

Рис. 4. Результаты испытаний износостойкости

Оценка склонности покрытия PLASMOTEC 19 к образованию холодных трещин, проведенная по методике [7,8], показала, что данный сплав имеет гораздо меньшую склонность к образованию холодных трещин, чем Nistelle C и Сормайт №2.

Заключение

Все типы наплавочных порошков обладают относительно высокой абразивной износостойкостью и твердостью. Покрытие PLASMOTEC 19 обладает наилучшим комплексом свойств (абразивной и ударно-абразивной износостойкостью) из исследованных. Пониженная твердость этого покрытия до 55 HRC позволяет обеспечить необходимые эксплуатационные свойства, а также способность покрытия к обработке резанием, что не могут обеспечить высокотвердые покрытия.

Для достижения наивысших свойств наплавленного металла рекомендуется использовать такие способы нанесения, которые обеспечивают минимальное термическое воздействие на металл основы, а также незначительную глубину зоны проплавления, например, плазменно-порошковую наплавку или лазерную наплавку.

Использование наплавочного порошка PLASMOTEC 19 обеспечивает формирование покрытий, обладающих наилучшим комплексом эксплуатационных свойств из испытанных. Кроме того, это покрытие не нуждается в последующей термической обработке, и при необходимости может быть обработано резанием.

Список литературы

1. Шевченко О.И. Управление структурой, составом и свойствами покрытий при плазменной наплавке. Нижний Тагил: НТИ(ф) УГТУ-УПИ. 2006. 290 с.
2. Гладкий П.В., Переплётчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. К.: Экотехнология. 2007. 292 с.
3. Сом А.И., Кривцун И.В. Лазер + плазма: поиск новых возможностей в наплавке /Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 36-41.
4. Порошковый сплав на основе железа для износостойкой наплавки и напыления: патент на изобретение RUS 2607066 11.03.2015/Нефедьев С.П., Дема Р.Р., Горбунов А.В., Тютюряков Н.Ш., Вдовин К.Н., Емелюшин А.Н.
5. Емелюшин А.Н., Мирзаева Н.М., Мирзаев Д.А. Влияние ориентировки и дисперсности карбидов на износостойкость литого инструмента из хромистых чугунов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1983. № 4. с.72-75.
6. Емелюшин А.Н. Литой инструмент из хромистых чугунов. Структура и свойства/А.Н.Емелюшин, Д.А. Мирзаев, Н.М. Мирзаева, Е.В. Петроченко, К.Ю. Окишев, О.С. Молочкова. Магнитогорск. Издательский центр ФГБОУ ВПО МГТУ, 2016.-186 С.
7. Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности К56. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3(39). с. 26-30.
8. Емелюшин А.Н., Шекшеев М.А. Исследование влияния термических циклов на структуру основного металла при сварке стали категории прочности К56. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. Т. 1. № 69. С. 150-153.

Режущая способность абразивных зерен при обработке заготовок из пластичных материалов с наложением ультразвуковых колебаний

Унянин А.Н.^{1*}, Хазов А.В.²

¹Профессор, Ульяновский государственный технический университет»,
г. Ульяновск, Россия

²Гл. инженер, АО «Ульяновский механический завод», г. Ульяновск, Россия

Аннотация

Исследования выполнены с целью выявления связи интенсивности налипания частиц материала заготовки на абразивные зерна (АЗ) шлифовального круга с физико-механическими свойствами зерен и ультразвуковыми колебаниями (УЗК), используемыми в процессе обработки. Выполнено численное моделирование локальных температур при микрорезании (царапании) образцов из стали 3Х3М3Ф абразивными зернами из различных материалов, в том числе с наложением УЗК. Рассчитаны деформация налива и напряжения, являющиеся следствием этой деформации, действующие на соединение налива с зернами из материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения без наложения и с наложением УЗК. Установлено, что с увеличением разности коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и АЗ увеличиваются напряжения, способствующие отрыву налива от поверхности АЗ. В процессе экспериментальных исследований осуществляли микрорезание образцов единичными абразивными зернами. Установлено, что в меньшей степени изнашиваются и засаливаются АЗ из эльбора при микрорезании с наложением на заготовку УЗК.

Ключевые слова: абразивное зерно, ультразвуковые колебания, налипание, заготовка, шлифование, температура, коэффициент линейного расширения

Cutting ability of abrasive grains in the processing of billets of plastic materials with the applying of ultrasonic vibrations

Unyanin A.N.^{1}, Khazov A.V.²*

¹*Professor, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation*

²*Head engineer, JSC "Ulyanovsk mechanical plant», Ulyanovsk, Russian Federation*

Abstract

Researches were carried out to identify the relationship between the intensity of adhesion of the workpiece material particles to abrasive grains (AG) of the grinding wheel with the physical and mechanical properties of grains and ultrasonic vibrations (UV) used in the processing. Numerical simulation of local temperature when microreserve (scratched) samples of steel 3KH3M3F abrasive grains of various materials, among them with the applying of ultrasonic vibrations. The deformation of the excrescence and the stresses resulting from this deformation acting on the connection of the excrescence with grains from materials having different coefficients of linear expansion without applying of ultrasonic vibrations and with applying of ultrasonic vibrations are calculated. It is established that with the increase of the difference of coefficients of linear expansion of the workpiece materials and AZ, the stresses that contribute to separation of the excrescence from the surface AG increase. During the experimental researches, micro-cutting of samples by single abrasive grains was carried out. It is established that AG from elbor during grinding wear out and are blunting to a lesser extent.

Key words: *abrasive grain, ultrasonic vibrations, adhesion, workpiece, grinding, temperature, coefficient of linear expansion*

Введение

При шлифовании заготовок из пластичных и адгезионно-активных материалов потеря режущей способности шлифовального круга связана, главным образом, с засаливанием, причиной которого в большинстве случаев является налипание частиц материала заготовки на абразивные зерна (АЗ). Установлено [1], что налипание интенсифицируется с увеличением локальной температуры, которая зависит от теплофизических характеристик материала АЗ [2, 3]. Налипы удерживаются на поверхности зерна за счет механических и адгезионных сил, причем наиболее прочно – во впадине субмикروпрофиля АЗ [4]. После выхода АЗ из контакта с заготовкой в объемах налипа и АЗ появляются напряжения, являющиеся следствием их остывания. Чтобы выявить условия, влияющие на прочность соединения налипа с АЗ, необходимо оценить эти напряжения.

Одним из путей повышения эффективности процесса шлифования является рациональное использование ультразвуковых колебаний (УЗК). Однако исследования, связанные с оценкой напряжений, возникающих в налипе и АЗ при шлифовании с УЗК, до сих пор не выполнены.

1. Аналитические исследования

Размеры налипа определяются конфигурацией микронеровностей на АЗ [4], т.е. исчисляются размерами порядка микрометра. При рассмотрении свойств объектов, имеющих такие размеры, правомерно использование механики сплошных сред. Поскольку ориентация отдельных кристаллов налипа – вероятностное событие, а сам налип может состоять из нескольких различно ориентированных друг к другу зерен, будем считать, что свойства налипа одинаковы во всех направлениях. Полагаем, что физико-механические свойства налипа совпадают с соответствующими свойствами материала заготовки (образца).

После выхода АЗ из контакта с заготовкой прекращает действовать внешнее давление, вызвавшее деформацию материала налипа, а остаточные деформации в объеме последнего порождают силы, действующие со стороны налипа на поверхность впадины субмикропрофиля АЗ.

Для расчета напряжения на площадке контакта налипа с АЗ, возникающего в процессе остывания налипа от температуры, при которой произошло адгезионное взаимодействие налипа с зерном, получена зависимость

$$\sigma_{\text{нт}} = \frac{2 \cdot E_T (\Delta \ell_n - \Delta \ell_{1T}) \cdot \cos^2 \alpha_v}{d_1 + d_2}, \quad (1)$$

где E_T – модуль упругости материала налипа при температуре T , до которой налип остывает, Па; $\Delta \ell_n$ – начальная упругая деформация налипа во впадине субмикропрофиля АЗ, м; $\Delta \ell_{1T}$ – изменение деформации налипа в процессе остывания до температуры T , м; α_v – угол при вершине микровпадины, град; d_1 и d_2 – диаметры усеченного конуса, в виде которого представлен налип во впадине, м.

$$\Delta \ell_n = \frac{(d_1 + d_2) \cdot \sigma_{\text{нтн}}}{2E_{Tн}}; \quad (2)$$

$$\Delta \ell_{1T} = (\alpha_n - \alpha_{a.з}) \cdot (T_n - T) \cdot \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (3)$$

где E_{T_n} – модуль упругости материала налива при температуре T_n , Па; T_n – локальная температура, при которой произошло адгезионное взаимодействие налива с зерном, К; T – температура, до которой остывают АЗ и налип, К; α_n и $\alpha_{a.з}$ – коэффициенты линейного расширения материала соответственно налива и АЗ в диапазоне температуры $T \dots T_n$, K^{-1} ; $\sigma_{пт_n}$ – наибольшие напряжения в материале налива, до которых справедлив закон Гука, при температуре T_n , Па.

Если $\Delta l_T = \Delta l_n - \Delta l_{1T} > 0$, то после остывания на площадке контакта налива с АЗ будут действовать сжимающие напряжения. Когда $\Delta l_T < 0$, на площадке контакта налива с АЗ появятся напряжения, способствующие отрыву налива от этой поверхности, а вероятность отрыва налива от поверхности АЗ будет выше. Из зависимостей (1) – (3) следует, что для получения растягивающих напряжений $\sigma_{нт}$ и снижения за счет этого интенсивности налипания следует использовать АЗ из материалов, коэффициенты линейного расширения которых значительно отличаются от коэффициентов линейного расширения материала заготовки.

Величина напряжений $\sigma_{нт}$ зависит также от локальной температуры T_n , при которой произошло взаимодействие налива с зерном. Локальные температуры в процессе царапания материала образца единичным АЗ рассчитывали, используя методику и программное обеспечение, описанные в работах [2, 3, 5]. Эта методика учитывает наличие источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта стружки с АЗ и АЗ с образцом, зависимости теплофизических свойств материалов объектов от температуры, относительное перемещение объектов (АЗ относительно образца и стружки относительно АЗ). Модели учитывают изменение кинематики микрорезания абразивными зёрнами и механических характеристик материала заготовки при наложении УЗК. Моделировали наложение на заготовку УЗК частотой 22000 Гц с амплитудой $A_y = 2$ мкм (в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности) и различной фазой φ . Фиксировали локальные температуры в зоне контакта АЗ с заготовкой. Силы микрорезания и мощности источников тепловыделения рассчитывали по полученным аналитическим путем зависимостям [2, 3, 5, 6].

Численное моделирование локальных температур и экспериментальные исследования выполняли для АЗ из нормального электрокорунда (материал № 1), циркониевых электрокорундов: материал № 2 изготовлен в Австрии ($ZrO_2 - 40\%$, $Al_2O_3 - 60\%$), материал № 3 – в ОАО «УралНИИАШ» ($ZrO_2 - 39,6\%$, $Al_2O_3 - 59,4\%$, $C - 0,49\%$), материал № 4 также изготовлен в ОАО «УралНИИАШ» ($ZrO_2 - 42,6\%$, $Al_2O_3 - 56,5\%$, $C - 0,48\%$), а также из эльбора ЛКВ 50 (материал № 5). Эти материалы имеют различные теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость и плотность), а также коэффициент трения в зоне контакта с образцом.

В качестве материала образцов использовали сталь 3Х3М3Ф, обладающую достаточно высокими пластическими свойствами и вязкостью. В процессе моделирования локальных температур варьировали максимальной глубиной внедрения АЗ в материал образца a_z , принимая ее равной 3 и 6 мкм.

При микрорезании без и с наложением УЗК максимальные температуры зафиксированы при царапании образца зёрнами из материала № 4, имеющего минимальное значение коэффициента теплопроводности, минимальные температуры – при царапании АЗ из эльбора (материал № 5), имеющего максимальный коэффициент теплопроводности [7, 8] и минимальный коэффициент трения по стали (табл. 1). Температура от зерен, осуществляющих микрорезание ($a_z = 6$ мкм), в среднем на 70 – 80 % выше, чем от зерен, осуществляющих пластическое деформирование материала образца ($a_z = 3$ мкм), в том числе при наложении УЗК.

По зависимостям (1) – (3) рассчитали деформацию налива и напряжения, являющиеся следствием этой деформации и действующие на соединение налива с зернами из абразивных материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения $\alpha_{a.з}$ (см. табл. 1). Электрокорунд имеет значение коэффициента линейного расширения, наиболее близкое к соответствующему коэффициенту материала налива [7], поэтому выполняется условие $\Delta l_{IT} < \Delta l_n$, а на площадке контакта налива с АЗ действуют сжимающие напряжения. Величина этих напряжений значительно ниже, чем предел прочности материала налива (для стали 3Х3М3Ф $\sigma_B = 1500$ МПа), поэтому вероятность разрушения налива мала. Максимальную разницу с коэффициентом линейного расширения налива имеет соответствующий коэффициент эльбора. Деформация налива, находящегося во впадине субмикроспрофиля зерна из этого материала, в процессе остывания превышает его начальную деформацию, поэтому на площадке контакта налива с АЗ возникают напряжения $\sigma_{нт}$, способствующие отрыву налива от поверхности АЗ (см. табл. 1). Поэтому можно прогнозировать менее интенсивное налипание частиц материала заготовки на АЗ из эльбора в сравнении с зернами из других материалов. Таким образом, интенсивность налипания частиц материала заготовки на АЗ должна уменьшиться с увеличением разницы коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и АЗ ($\alpha_n - \alpha_{a.з}$).

Таблица 1

Результаты численного моделирования локальных температур на площадке контакта АЗ с образцом и напряжений $\sigma_{нт}$ в налипе: размер площадки затупления на АЗ $l_2 = 20$ мкм

Номер материала АЗ	Глубина внедрения АЗ в материал образца a_z , мкм	Средняя локальная температура, К	Напряжения $\sigma_{нт}$, МПа
1	3	710 / 610*	380 / 720*
	6	1250 / 1075	60 / 115
2	3	750 / 650	150 / 285
	6	1340 / 1150	-530 / -280
3	3	790 / 680	110 / 210
	6	1380 / 1190	-580 / -310
4	3	790 / 680	90 / 170
	6	1380 / 1190	-585 / -310
5	3	670 / 580	-60 / -30
	6	1150 / 1000	-650 / -340

*) Примечание: в числителе приведены результаты, полученные без наложения УЗК; в знаменателе – с наложением УЗК на образец

При наложении УЗК локальная температура в зоне контакта АЗ с образцом оказалась ниже в среднем на 14%. С уменьшением температуры значения напряжения $\sigma_{нт}$ увеличиваются в большей степени, чем модуля упругости $E_{тн}$, поэтому при наложении УЗК начальная упругая деформация налива Δl_n увеличивается в среднем на 9%. Вследствие меньшей температуры T_n при наложении УЗК деформация налива в процессе остывания Δl_{IT} изменяется в меньшей степени (на 14%). В результате напряжения на площадке контакта налива с АЗ оказались выше на 90%.

2. Экспериментальные исследования

В процессе экспериментальных исследований осуществляли микрорезание образца единичными абразивными зёрнами из вышеперечисленных материалов. Контролировали следующие параметры: площадь налипов металла образца на АЗ F_n , m^2 ; коэффициент засаливания АЗ K_3 , равный отношению площади налипа F_n к площади площадки износа на АЗ, m^2 ; линейный износ АЗ h_n , м. Площадь F_n , количество налипов и размеры площадки износа на АЗ определяли с помощью микроскопа РМЕ. Глубиной внедрения зёрна в образец a_z варьировали. При $a_z = 3$ мкм АЗ осуществляет пластическое деформирование материала образца, при $a_z = 6$ мкм – микрорезание [9]. Для наложения на заготовку УЗК использовали устройство, в котором она являлась одним из звеньев колебательной системы [10].

Максимальные значения K_3 и h_n без наложения и с наложением УЗК получены при царапании образцов зёрнами из электрокорунда нормального (материал № 1), имеющего минимальную твердость и теплоустойчивость. АЗ из эльбора изнашиваются и засаливаются в меньшей степени, чем зёрна из других исследованных материалов (рис. 1).

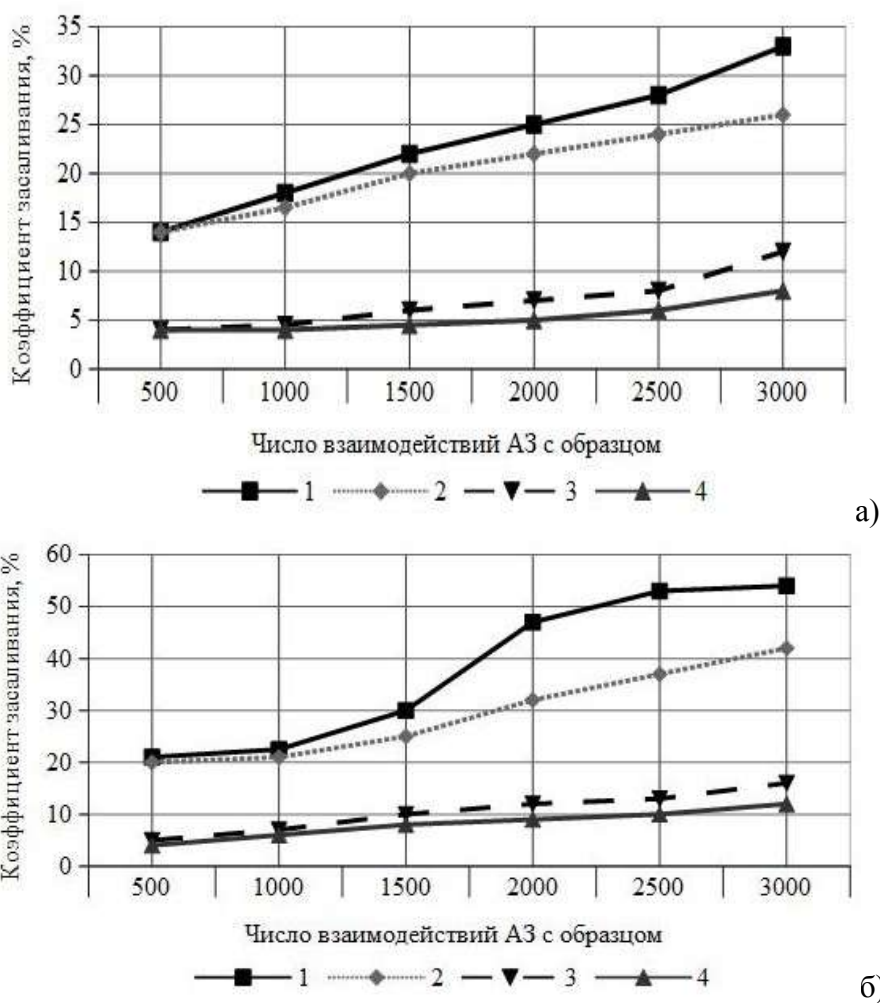


Рис. 1. Зависимость коэффициента засаливания зёрна K_3 от числа взаимодействий АЗ с образцом: а – $a_z = 3$ мкм; б – $a_z = 6$ мкм

Значения коэффициента K_3 коррелируются с напряжениями $\sigma_{нт}$ в налипе. Материал АЗ № 1 (электрокорунд нормальный), для которого зафиксировано максимальное значение K_3 , обеспечивает и максимальные значения сжимающих напряжений при микрорезании без наложения и с наложением УЗК. Материал № 5 (эльбор), на площадке

контакта которого с налипом возникают напряжения $\sigma_{нт}$, способствующие отрыву налипа от этой поверхности, имеет минимальное значение K_3 . Коэффициенты засаливания АЗ из циркониевых электрокорундов (материалы № 2 – 4), как и значения напряжений, занимают промежуточное значение. При наложении УЗК коэффициент засаливания K_3 оказался ниже на 15 ... 20%, что связано с уменьшением локальной температуры.

3. Выводы

1. Выполнено ранжирование АЗ из различных материалов по критериям, характеризующим их износ и засаливание.
2. Подтверждена выявленная аналитическим путем взаимосвязь интенсивности засаливания зерна с коэффициентами линейного расширения и теплофизическими характеристиками материалов АЗ.
3. Установлено, что наложение УЗК на заготовку приводит к снижению локальных температур на 14% и коэффициента засаливания на 15 ... 20%.

Список литературы

1. **Худобин, Л.В.** Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин // СТИН. – 2008. – № 6. – С. 26 – 31.
2. **Унянин, А.Н.** Аналитическое исследование локальных температур при шлифовании / А.Н. Унянин // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 41 – 50.
3. **Унянин, А.Н.** Численное моделирование локальных температур при шлифовании / А.Н. Унянин // СТИН. – 2006. – № 8. – С. 27 – 33.
4. **Худобин, Л.В.** О сущности процесса засаливания и смазочном действии СОЖ при шлифовании / Л.В. Худобин // Вестник машиностроения. – 1970. – № 6. – С. 52 – 55.
5. **Унянин, А.Н.** Исследование температур шлифования с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 2 (32 - 2). – С. 191 – 195.
6. **Корчак, С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. **Бокучава, Г.В.** Трибология процесса шлифования / Г.В. Бокучава. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. – 238 с.
8. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
9. **Худобин, Л.В.** Исследование процесса микрорезания заготовок из пластичных материалов единичным абразивным зерном / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин // Сборник трудов МНТК «Шлифабразив – 2002». – Волжский: ВолжскИСИ, 2002. – С. 108 – 111.
10. **Патент RU 2418670 РФ**, МПК В 24 В 1 / 04, В 24 В 5 / 04. Способ плоского шлифования с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин, И.Ю. Терехин. – № 2008142342/02. – Заявл. 24.10.2008. – Опубликовано. 20.05.2011. – Бюл. № 14.

Моделирование влияния виброобработки косточковыми органическими средами на качество поверхности

Лебедев В.А.¹, Шишкина А.П.^{2*}, Крупеня Е.Ю.²

¹Профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

²Старший преподаватель, Доцент, Технологический институт (филиал) Донского государственного технологического университета, г. Азов, Ростовская область, Россия

Аннотация

На основании анализа подходов к моделированию процессов виброобработки гранулированными средами для описания процесса обработки средами органического происхождения предложен подход, рассматривающий влияние виброобработки косточковыми органическими средами на отражательную способность поверхности деталей. Разработана модель отражения света шероховатой поверхностью, формируемой в процессе виброобработки косточковыми органическими средами. В статье указаны методы прямой количественной оценки блеска, основанные на регистрации шероховатости и косвенные интегральные методы, в которых используются физические явления, связанные с состоянием микропрофиля контролируемой поверхности.

По результатам исследования дан сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений блеска поверхностей деталей, виброобработанных косточковыми органическими средами.

Предложены расчётные зависимости для оценки блеска поверхности, которые позволили установить наиболее предпочтительный диапазон среднеарифметического отклонения микронеровностей поверхностей с наилучшей отражательной способностью.

Ключевые слова: отражательная способность, микрогеометрия, блескомер, падающий световой поток, отраженный световой поток.

Simulation of the impact of vibration treatment with stone organic media on the surface quality

Lebedev V.A.¹, Shishkina A.P.^{2}, Krupenya E.Yu.²*

¹Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²Head Lecturer, Assistant Professor, Technological Institute (branch) of the Don State Technological University, Azov, Rostov Region, Russia

Abstract.

Based on the analysis of approaches to modeling the processes of vibration processing by granular media to describe the process of processing by organic media, an approach is proposed that considers the effect of vibration processing by stone organic media on the reflectivity of the surface of the parts. The model of light reflection by rough surface formed in the process of vibration treatment by stone organic media is developed. The article describes the methods of direct quantitative estimation of gloss, based on the registration of roughness and indirect integral methods, which use physical phenomena associated with the state of the microprofile of the controlled surface.

According to the results of the study, a comparative analysis of the experimental and calculated values of the gloss of the surfaces of parts vibro-treated with stone organic media is given.

The calculated dependences for estimating the surface gloss are proposed, which allowed us to establish the most preferred range of the arithmetic mean height of the microroughnesses, at which the surfaces have the best reflectivity.

Key words: *reflectivity, microgeometry, gloss meter, incident light flux, reflected light flux.*

Введение

Большинство исследователей, изучавших отражение света от технических поверхностей представляют структуру шероховатых поверхностей в виде большого числа элементарных площадок, неровности которых составляют меньше половины длины световой волны; размеры же самих площадок по сравнению с ней относительно велики. При хаотичном расположении элементарных площадок падающий на поверхность свет отражается диффузно. Оптическое состояние такой поверхности характеризуется понятием матовая. Если в расположении площадок наблюдается некоторое преобладающее направление, то появляется и преобладающее направление отражения. Причем доля отраженного в главном направлении света тем больше, чем больше площадок расположено в плоскости главной ориентации. Это поверхности, обладающие способностью к блеску. Когда все элементарные площадки лежат в одной плоскости, поверхность зеркально отражает свет.

Способность к отражению характеризуется количественным отношением между интенсивностями отраженного и падающего на плоский участок поверхности света. Способность к отражению зависит от наличия на поверхности микронеровностей, оптических свойств, прозрачности и цвета материала. Качество отражения характеризуется четкостью отражения испытываемой поверхностью контуров светящихся объектов и зависит только от микрогеометрии поверхности.

Сложность оценки оптических свойств поверхности по коэффициенту отражения связана с тем, что при падении света на границу раздела воздух – поверхность происходит его преобразование на три основные категории: отражение и (или) рассеяние; пропускание и (или) преломление света покрытием; частичное или полное поглощение света поверхностью. Сформулированный Г. Кирхгофом закон требует, чтобы сумма интенсивностей света, участвующих в упомянутых явлениях, равнялась интенсивности падающего света. Первые два процесса зависят от поверхностных характеристик, состава света и природы вещества. Третий процесс непосредственно связан с непрозрачностью и цветом предмета.

Методы оценки блеска контролируемых поверхностей условно можно разделить на качественные и количественные. Качественные методы оценки основываются на использовании органов чувств и по сути являются субъективными.

Количественные методы оценки блеска технических поверхностей используют объективные показатели. При оценке блеска контролируемой поверхности объективные показатели количественного метода должны согласовываться со зрительным впечатлением, т.е. с визуальной оценкой. Различают методы прямой количественной оценки, основанные на регистрации шероховатости, и косвенные интегральные методы, в которых используются физические явления, связанные с состоянием микропрофиля контролируемой поверхности.

1. Математическая модель отражения света шероховатой поверхностью

Свет, зеркально отраженный поверхностью I_r , зависит от показателя преломления и от угла падения и отражения света. Наряду с зеркальным на поверхности может наблюдаться диффузное (рассеянное) отражение I_1 , возникающее из-за наличия неровностей с высотой больше половины длины волны видимого света. Часть света поглощается поверхностным слоем I_2 .

Таким образом, отражение света поверхностью обусловлено рядом факторов, зависящих от состояния поверхности. Наибольшее влияние оказывает микрорельеф поверхности, сформированный в результате механической обработки металла и состоящий из микрогребешков и субмикронеровностей различной формы. На поверхности

могут наблюдаться макронеровности в виде волнистости и коробления. Образование этого вида неровностей может быть результатом механической обработки и коробления деталей. Влияние их на блеск контролируемых поверхностей выражается в изменении углов падения – отражения света, что приводит к изменению показаний по приборам, а при визуальной оценке к искажению наблюдаемых поверхностей.

На отражательную способность поверхности различных металлов может оказывать влияние изменения показателя преломления света. Показатель преломления характеризует оптическую плотность металла (табл.1). Изменения его влияют на интенсивность отражения света от поверхности.

Табл. 1. Показатели преломления света для различных металлов

Металл	Cu	Al	Fe	Ti	Ni
n	1,06	1,50	1,46	2,13	1,54

В соответствии с классификацией по отражательной и пропускной способности света металлические поверхности со следами механической обработки можно характеризовать как поверхности с направленно-рассеянным отражением и пропусканием.

Используя закон Г. Кирхгофа и основные положения фотометрии, исходное выражение для определения светового потока, отраженного металлической поверхностью, запишем в следующем виде.

$$I_r = I_e \cdot r \cdot \exp^k + I_e \cdot d, \quad (1)$$

где $I_e \cdot r \cdot e^k$ - световой поток, зеркально отраженный поверхностью; I_e - падающий световой поток; r - коэффициент зеркального отражения света полированной поверхности, образованной из того же материала, что и контролируемая поверхность, величина которого определяется по формуле О. Френеля.

$$r = 0,5 \left[\frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} + \frac{\tan^2(\varphi - \psi)}{\tan^2(\varphi + \psi)} \right];$$

где φ - угол падения света; ψ - угол преломления света, равный $\psi = \arcsin \frac{\sin \varphi}{n}$; n - показатель преломления света; I_e - световой поток диффузно отраженный поверхностью; d - коэффициент диффузного отражения; $k = -9,7\sigma^2 \frac{\cos^2 \varphi}{\lambda}$; σ - среднее квадратическое отклонение высоты микронеровностей профиля; λ - длина волны падающего света.

Если в уравнении (1) принять $R_a = 0$, $d=0$ получим формулу, позволяющую оценить световой поток, отраженный от поверхности с зеркальным блеском.

$$I_r = I_e \cdot r \quad (2)$$

Из (2) вытекает формула для определения падающего светового потока.

$$I_e = \frac{I_r}{0,5 \left[\frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} + \frac{\tan^2(\varphi - \psi)}{\tan^2(\varphi + \psi)} \right]} \quad (3)$$

Определяя световой поток I_e по (3), считается, что только поверхность отражает падающие лучи света (т.е. лучи света, прошедшие в материал полностью поглощаются). В качестве такого материала может быть использована черная полированная пластинка

инфракрасного стекла ИКС-6, являющаяся эталоном настройки блескомера. При показателе преломления стекла 1,567 и $\varphi=60^\circ$, $I_r = 9,998I_e$.

При настройке блескомера на $I_r = 65$ усл. ед., $I_e = 65/9,998=649,587$ усл. ед.

Табл. 2. Световые потоки, отраженные зеркальной поверхностью металлов

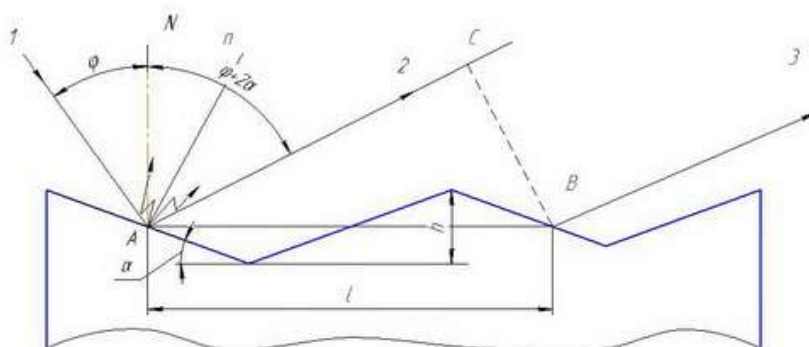
Материал поверхности	Показатель преломления n	Угол падения света, φ , град	Падающий световой поток I_e , усл. ед.	Отраженный световой поток I , усл. ед.
Al	1,50	60	649,587	57,939
Fe	1,46	60	649,587	53,566
Cu	1,06	60	649,587	3,833

Доказано, что для шероховатой поверхности существует предельный угол падения-отражения света, больше которого поверхность отражает световой поток только зеркально. Этот угол может служить показателем шероховатости поверхности.

$$i = \arccos \frac{\lambda}{16R_a} . \quad (4)$$

Установлено, что у шероховатой поверхности может быть два типа зеркального отражения: обычное френелевское и отражение дифракционно-интерференционной природы. Природу зеркального отражения света от шероховатой поверхности определяет отношение средней глубины микронеровностей R_a к длине волны λ света. Если при $\frac{R_a}{\lambda} \leq 1$ имеет место дифракция падающего света на микрограни, то при $\frac{R_a}{\lambda} \geq 1$ можно считать, что свет от каждой микроплощадки отражается по законам геометрической оптики.

На рисунке 1 показано отражение лучей света от шероховатой поверхности. Если свет, падающий на шероховатую поверхность, является монохроматическим, то, отражаясь от каждой микрограни, он испытывает дифракцию.



1 – падающий луч света; 2 и 3 – отраженные лучи света; N – нормаль к поверхности; n – нормаль к микрограни; φ – угол падения света на поверхность; α – угол наклона микрограней; h и l – соответственно высота и шаг микрограней

Рис. 1. Схема отражения лучей света шероховатой поверхностью

При этом имеется в виду, что волны, исходящие от соответствующих микрограней поверхности когерентны и имеют с первоначальным направлением (поз.2) разность хода.

$$AC = l \cdot \sin(\varphi + 2\alpha) \quad (5)$$

где l – шаг микронеровностей; α – угол наклона микронеровностей.

Если разность хода AC равна целому числу волн, т.е. $AC = K \cdot \lambda$, то при интерференции они усиливают друг друга. Определив шаг микронеровностей по формуле

$l = 2R_a \frac{1}{\tan \alpha}$, а также приняв, что при малом угле наклона микронеровностей $\tan \alpha = \sin \alpha$, выражение (5) запишем в виде.

$$2R_a \frac{1}{\sin \alpha} \sin(\varphi + 2\alpha) = K \cdot \lambda. \quad (6)$$

Так как углы α имеют малое значение и, приняв $\varphi = 0$, получим наибольшую высоту микронеровностей, при которой наблюдается интерференция лучей света, дифрагированных микрогранями.

$$R_a = \frac{\lambda}{4}$$

При $\lambda=0,55$ мкм наибольшая высота микронеровностей $R_a=0,1375$ мкм. Из этого следует, что для шероховатых поверхностей с большей высотой неровностей не будет наблюдаться увеличение интенсивности зеркального отражения светового потока за счет интерференции лучей света, дифрагированных микрогранями. Поэтому зеркальное отражение на таких поверхностях будет обусловлено френелевским отражением.

Для оценки светового потока, отраженного шероховатой поверхностью, предложена зависимость (7)

$$I_r = I_e \cdot r \cdot \exp^{-9,7R_a^2 \frac{\pi \cos^2 \varphi}{2\lambda}} + I_e \cdot d \quad (7)$$

Световой поток, зеркально отраженный от шероховатой поверхности I ,

$$I = I_{max} - I_{min} = 0,5 \cdot I_e \cdot \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} \cdot \exp^{-9,7R_a^2 \frac{\pi \cos^2 \varphi}{2\lambda}}, \quad (8)$$

где I_{max} и I_{min} – максимальный и минимальный световые потоки, отраженные от контролируемой поверхности

Выражение (8) характеризует блеск шероховатой поверхности с высотой микронеровностей более половины длины волны видимого света. Угол падения света φ при такой методике определения блеска равен углу Брюстера, т.е. $\varphi = 60^\circ$.

2. Исследование влияния виброобработки косточковыми органическими средами на отражательную способность поверхности деталей

Исследование блеска поверхности проводилось на блескомере ФБ-2 путем измерения измерения фототока, возникающего под действием пучка света, падающего на поверхность покрытия под углом 45° и отраженного от нее.

Установлено, что на отражательную способность поверхности различных металлов наиболее существенное влияние оказывает изменение показателя преломления света, зависящий от элементарного химического состава поверхностного слоя и его физико-механических свойств и микрорельеф поверхности, сформированный в результате механической обработки металла и состоящий из микрогребешков и субмикронеровностей различной формы.

В таблице 3 и на рисунке 2 дан сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений блеска поверхности образцов, виброобработанных косточковыми органическими средами.

Табл. 3. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений блеска

Материал образцов	Вид среды	Режимы обработки	Экспериментальный блеск, усл. ед	Расчётный блеск, усл. ед.	Погрешность %
В95	орех	$A=2,5\text{мм}$, $f=35\text{Гц}$ 120мин	224,1408	215,52	4
Д16	орех	$A=3\text{мм}$, $f=25\text{Гц}$ 90мин	215,66813	201,559	7
М1	орех	$A=3\text{мм}$, $f=25\text{Гц}$ 180мин	$8,03 \times 10^{-6}$	$7,58 \times 10^{-6}$	6
Сталь 20	вишня	$A=3\text{мм}$, $f=25\text{Гц}$ 180мин	$3,13 \times 10^{-13}$	$2,924 \times 10^{-13}$	7

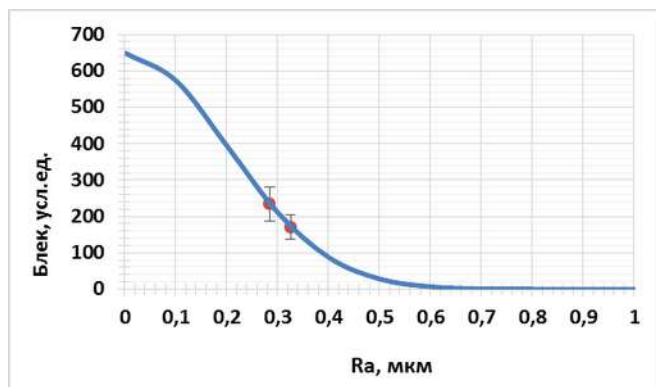


Рис. 2. Изменение блеска поверхности образцов из сплава Д16 в зависимости от её шероховатости, среда - орех

Заключение

Проведённые исследования свидетельствуют о приемлемости предложенных расчётных зависимостей для оценки блеска поверхности с погрешностью 10-15%, а также позволили установить наиболее предпочтительный диапазон среднеарифметической высоты микронеровностей, при котором поверхности обладают наилучшей отражательной способностью. Знание этого диапазона является исходной предпосылкой для обоснования исходной высоты микронеровностей при проектировании отделочных операций, обеспечивающих получение поверхности с улучшенным блеском, исходя из технологических возможностей обрабатываемых среды.

Список литературы

1. **Лебедев, В.А.** Коллективная монография. Раздел 7. Повышение эффективности вибрационной отделочной обработки деталей на основе применения сред органического происхождения / В.А. Лебедев, А.П. Шишкина, Е.Ю. Крупеня // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VI, г. Москва, 2015 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2015. - 268-319.
2. **Городинский, Г.М.** Исследование отражения света от матовых стеклянных поверхностей при больших углах падения: Дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1953. – 159 с.
3. **Войшвило, Н.А.** Отражение света шероховатой поверхностью стекла при больших углах падения освещающего пучка// Оптика и спектроскопия. – 1967. – т.22 – вып. 6. – с. 956-961.
4. **Топорец, А.С.** Зеркальное отражение света от шероховатой поверхности// Оптика и спектроскопия. – 1968. – т. 24. – вып. 1. – с. 126-131.

Роль поверхностно-активных веществ в контактном взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемым материалом

Бутенко В.И.^{1*}, Давиденко К.В.¹

¹Профессор, студент, Донской государственной технической университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом и приняты допущения, при которых возможно проведение аналитического исследования влияния поверхностно-активных веществ на процесс абразивной обработки поверхностного слоя детали. Разработана схема действия сил на плоскости, касательной к рабочему профилю абразивного зерна и равноудалённой от его характерных точек контакта со сходящей стружкой. Получена формула для определения коэффициента трения между рабочим профилем зерна и стружкой, учитывающая плёнкообразующее действие поверхностно-активных веществ в зоне резания. Исследовано напряжённое состояние материала в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом, в результате которого выведены зависимости величин максимального напряжения на рабочем профиле зерна и напряжения сдвига. Показано, что изменение условий трения при абразивной обработке деталей с использованием поверхностно-активных веществ приводит к изменению контактной температуры в зоне резания, от которой зависят число и площадь прижогов на обработанной поверхности детали и другие показатели качества. Приведены результаты экспериментальных исследований абразивной обработки деталей, подтвердившие достоверность полученных в статье формул и зависимостей и целесообразность использования поверхностно-активных веществ не зависимо от способа подачи их в зону резания. Даны рекомендации по эффективному использованию при абразивной обработке поверхностей деталей в качестве поверхностно-активных веществ кристаллического йода и диоксида хрома.

Ключевые слова: деталь, поверхность, абразивное зерно, коэффициент трения, напряжения, температура.

The role of surfactants in the contact interaction of the abrasive tool with the material being processed

Butenko V.I.^{1}, Davidenko K.V.¹*

¹Professor, Student, Don State Technical University University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. *The features of the contact interaction of an abrasive grain with the material being processed are considered and assumptions are made under which it is possible to conduct an analytical study of the effect of surface-active substances on the process of abrasive machining of the surface layer of the part. A scheme has been developed for the action of forces on a plane tangent to the working profile of an abrasive grain and equidistant from its characteristic points of contact with the descending chips. The formula for determining the coefficient of friction between the working profile of the grain and the chips, taking into account the film-forming effect of surface-active substances in the cutting zone. The stress state of the material in the zone of contact of the abrasive grain with the material being processed was investigated, as a result of which the dependences of the maximum stress values on the working grain profile and the shear stress were derived. It is shown that a change in friction conditions during abrasive machining of parts using surfactants leads to a change in the contact temperature in the cutting zone, on which the number and area of burns on the machined surface of the part and other quality indicators depend. The results of experimental studies of abrasive machining of parts, which confirmed the validity of the formulas and dependencies obtained in the article and the expediency of using surfactants regardless of the method of feeding them to the cutting zone, are presented. Recommendations on the effective use of abrasive surface treatment of parts as surface-active substances of crystalline iodine and chromium diiodide are given.*

* Автор корреспонденции: butenkowiktor@yandex.ru (Бутенко В.И.)

Key words: *part, surface, abrasive grain, coefficient of friction, stress, temperature.*

ВВЕДЕНИЕ

28

Научно-технический прогресс в современном машиностроении неразрывно связан с развитием и совершенствованием процессов абразивной обработки, во многом определяющих трудоёмкость изготовления и качество обрабатываемых деталей. Высокие температуры и давления в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом обуславливают сложные процессы резания, влияющие на формирование эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя деталей. Вследствие этого разработка и исследование технологических мер по изменению условий контакта абразивных зёрен с обрабатываемым материалом путём введения в зону резания плёнкообразующих веществ, обладающих низким коэффициентом трения, является актуальным направлением совершенствования финишной обработки поверхностей деталей машин. Такие плёнки могут быть созданы на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала, например, за счёт использования поверхностно-активных веществ (ПАВ), среди которых весьма перспективными являются кристаллический йод и его соединения [1, 2].

1. Постановка задачи исследования

Учитывая актуальность рассмотрения вопросов, связанных с использованием ПАВ при шлифовании поверхностей деталей машин, задачей настоящих исследований явилось определение температурно-силовых характеристик контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом и на их основе выбор наиболее эффективных ПАВ и способов их подачи в зону резания для конкретных условий шлифования.

2. Аналитическое исследование условий шлифования при использовании поверхностно-активных веществ

При выполнении исследований контактного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом были приняты следующие допущения:

- зёрна абразивного инструмента считались одинакового размера и формы;
- предполагалось, что рабочие абразивные зёрна равномерно распределены по поверхности инструмента и одинаково выступают из связки;
- пористость абразивного инструмента и насыщенность его зёрнами по объёму постоянная;
- плёнкообразующий материал, созданный в результате применения ПАВ, имеет постоянную толщину, но неравномерно распределён по контактирующим поверхностям в зоне резания: на отдельных участках он может отсутствовать вследствие высокоскоростного режима обработки;
- коэффициент трения плёнки на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала одинаков и зависит от применяемого ПАВ;
- вследствие малых размеров срезаемого слоя считалось, что возникающие на рабочих поверхностях абразивного зерна напряжения равномерно распределены.

Для принятых допущений в работе [1] приведена следующая формула определения температуры в зоне шлифования Θ при подаче в неё ПАВ:

$$\Theta = \frac{0,427 \cdot L_n \cdot \Theta_n \cdot (1 + f \cdot f_{nl})}{H_v \cdot f_{nl} \cdot (1 - f^2)}, \quad (1)$$

где L_n – скрытая теплота плавления на единичной площадке контакта; Θ_n – температура плавления обрабатываемого материала; f – обобщённый коэффициент трения, учитывающий неравномерность распределения плёнки по контактирующим поверхностям в зоне резания; f_{nl} – коэффициент трения плёнки на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала; H_v – начальная твёрдость обрабатываемого материала.

При обработке шлифованием деталей из железоуглеродистых сплавов постоянными принимаются следующие величины [1, 3]: $L_n = 22,3$ ккал/см²; $\Theta_n = 1539^\circ\text{C}$; $H_v = 220$.

Анализ формулы (1) свидетельствует о том, что температура в зоне шлифования Θ при подаче в неё ПАВ находится в сложной зависимости от коэффициента трения f_{nl} , так как обобщённый коэффициент трения f также зависит от коэффициента f_{nl} [1]. В связи с этим выполнено аналитическое исследование сил, образующихся на рабочей поверхности абразивного зерна, схема которых приведена на рис. 1. При этом считалось, что сила N формирует максимальные напряжения σ_{max} на рабочей поверхности абразивного зерна, сила, противоположно направленная составляющей N_1 , формирует в материале поверхностного слоя технологические остаточные напряжения $\sigma_{ост}$, сила F вызывает в срезаемом слое обрабатываемого материала напряжения сдвига $\tau_{сдв}$, а составляющая сила F_1 определяет элементарную мощность p_z , затрачиваемую на процесс резания единичным абразивным зерном, которая может быть рассчитана по формуле:

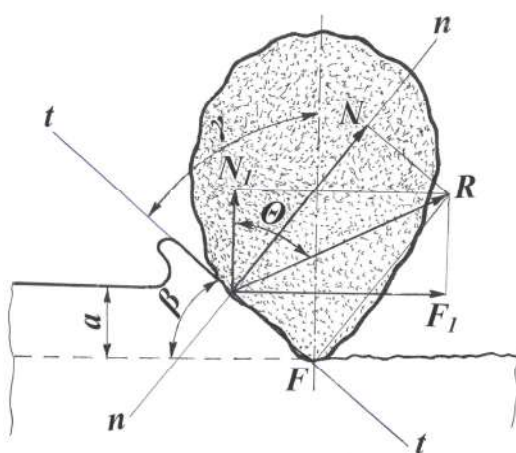


Рис. 1. Схема сил, действующих на рабочую поверхность абразивного зерна

$$p_z = \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot F_1}{6 \cdot 10^4}, \quad (2)$$

где $D_{кр}$ – наружный диаметр абразивного круга, мм; $n_{кр}$ – частота вращения круга, об/мин.

Так как $F_1 = R \cdot \sin \Theta$, то

$$F_1 = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot p_z}{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot \sin \Theta}. \quad (3)$$

Тогда из схемы на рис. 1 при условии, что $\Theta = \gamma$ силы N , N_1 и F определяются по формулам:

$$N = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot p_3 \cdot \sin(\gamma + \beta)}{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot \sin \gamma}; \quad N_1 = F = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot p_3 \cdot ctg \gamma}{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр}}. \quad (4)$$

Значения напряжений σ_{max} , $\tau_{сд}$ для единичного абразивного зерна определяются по формулам:

$$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot p_3 \cdot \sin(\gamma + \beta)}{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot \sin \gamma \cdot s_3}; \quad \tau_{сд} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot p_3 \cdot ctg \gamma}{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot s_3}, \quad (5)$$

где s_c – площадь рабочей поверхности единичного зерна абразивного инструмента.

Формула для расчёта обобщённого коэффициента трения f может быть представлена зависимостью

$$f = \frac{\tau_{сд}}{\sigma_{max}} = \frac{cos \gamma}{\sin(\gamma + \beta)}. \quad (6)$$

Анализ литературных данных [3 – 5] и выполненные исследования по изучению зоны резания свидетельствуют о том, что передний угол абразивного зерна γ и угол β изменяются в следующем диапазоне: $\gamma = (55 - 75)^\circ$, $\beta = (15 - 35)^\circ$. В соответствии с этими углами коэффициент трения f может изменяться в диапазоне $f = 0,42 - 0,65$, что совпадает с данными, приведёнными, например, в работах [1, 3].

Для определения величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя $\sigma_{ост}$ необходимо знать среднее число одновременно участвующих в процессе резания абразивных зёрен Z_3 , которое в соответствии с принятыми допущениями и исследованиями проф. А.В. Королёва [6] может быть вычислено по формуле:

$$Z_3 = \frac{4 \cdot B \cdot S_{np} \cdot v \cdot a}{\pi \cdot d_3^2}, \quad (7)$$

где B – высота используемого шлифовального круга; S_{np} – продольная подача круга (детали); d_3 – средний диаметральный размер абразивных зёрен инструмента; v – относительный объём абразивного материала в инструменте; a – пористость абразивного инструмента.

Тогда величина технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя обработанной детали $\sigma_{ост}$ определится по формуле:

$$\sigma_{ост} = \frac{1,5 \cdot 10^3 \cdot P \cdot d_3 \cdot S_{non} \cdot ctg \gamma}{D_{кр} \cdot n_{кр} \cdot B^2 \cdot S_{np}^2 \cdot v \cdot a}, \quad (8)$$

где P – мощность шлифования.

Формулы (5), (6) и (8) через обобщённый коэффициент трения f , учитывающий коэффициент трения плёнки на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала $f_{пл}$, определяют температурно-силовое состояние в зоне резания при шлифовании и могут быть использованы для выбора наиболее эффективных видов ПАВ и способов их подачи в зону резания для конкретных условий обработки.

3. Экспериментальные исследования процесса шлифования с использованием поверхностно-активных веществ

Для подтверждения достоверности зависимостей (1), (8) и возможности использования их на практике проведены экспериментальные исследования процесса шлифования обычными кругами и кругами, импрегнированными дийодидом хрома по технологии, описанной в работе [7]. Обработка поверхностей деталей из сталей 12ХНЗФ и 35ХГСА, выполненных в виде брусков с размерами 50×20×150 мм, осуществлялась на плоскошлифовальном станке мод. ЗБ724 кругами ПП 400×60×127 14AF60Л7V 35 м/с ГОСТ Р 52781-2007 с продольной подачей $S_{np} = 0,02$ м/с, подачей врезания $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход и числом проходов $m = 3$. Предварительно поверхности брусков подвергались чистовому фрезерованию с обеспечением шероховатости в диапазоне $Ra = (10,5 - 15,6)$ мкм. В качестве смазочно-охлаждающих сред использовались:

- при шлифовании обычными кругами – 5-процентный водный раствор эмульсола «Укринол-1»;
- при шлифовании импрегнированными кругами – суспензия, состоящая из 5-процентного водного раствора эмульсола «Укринол-1» с добавкой 5 г на литр измельченного дийодида хрома.

Определялись следующие показатели шлифования:

- температура Θ в зоне резания путём установки внутри исследуемых образцов на глубине 0,5 мм от обрабатываемой поверхности термопар «хромель-алюмель»;
- величина технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, рассчитанная по методике, изложенной в работе [1].

Мощность шлифования P определялась с помощью ваттметра, подключённого к электродвигателю шлифовальной бабки, с учётом к.п.д. коробки скоростей. Используя литературные данные и результаты проведённых измерений, были приняты следующие значения углов γ , β и коэффициента трения t_{nl} : $\gamma = 60^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $t_{nl} = 0,08$.

Экспериментально определённые показатели температуры Θ и технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ сравнивались с их расчётными значениями, полученными с использованием зависимостей (1) и (8) путём вычисления отклонений $\Delta\Theta$ и $\Delta\sigma_{ост}$ (табл. 1).

Табл. 1. Расчётные и экспериментальные значения показателей шлифования Θ и $\sigma_{ост}$

Обрабатываемая сталь	Используемый шлифовальный круг	Расчётные показатели		Экспериментальные показатели		Отклонения показателей	
		Θ , град. С	$\sigma_{ост}$, МПа	Θ , град. С	$\sigma_{ост}$, МПа	$\Delta\Theta$	$\Delta\sigma_{ост}$
12ХНЗА	обычный	793,5	379,0	750	340	5,5	10,0
	импрегнированный	658,4	326,5	600	290	8,6	11,5
35ХГСА	обычный	872,7	435,6	800	380	8,3	12,5
	импрегнированный	719,6	363,1	650	310	9,7	14,6

Анализ приведённых в табл. 1 результатов исследований свидетельствует о том, что расчётные значения температуры Θ и технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ на (5,5 – 14,6)% выше, чем экспериментально полученные, что обусловлено, по-видимому, принятыми допущениями и релаксационными процессами. Создание на контактных поверхностях абразивных зёрен и обрабатываемого материала плёнок с низкими коэффициентами трения за счёт использования импрегнированных кругов и суспензии с дийодидом хрома позволяет на 15 – 20% снизить температуру в зоне резания и более чем на 15% уменьшить величину технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя детали. Потребляемая мощность при шлифовании при шлифовании деталей с применением ПАВ на 25 – 30% меньше, чем при шлифовании без ПАВ.

Результаты экспериментальных исследований контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом позволили выявить особенности выбора вида и способа подачи в зону резания ПАВ. Установлено, что эффект от использования ПАВ при шлифовании достигается в тех случаях, когда подаваемые в зону резания ПАВ сохраняют свои свойства при температурах 600 – 800°С. Поэтому ПАВ на органической основе не могут быть использованы при шлифовании. Исследования также показали, что наибольший эффект от использования ПАВ достигается в тех случаях, когда последние образуют на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала структуры чешуйчатого строения [1, 8]. Максимальная эффективность от использования ПАВ при шлифовании достигается в тех случаях, когда учитывается технологическая совместимость контактных материалов, вследствие чего рекомендуется использовать одни и те же ПАВ как в составе инструмента путём внесения их в абразивную массу или импрегнированием, так и при создании смазочно-охлаждающей среды, содержащей ПАВ.

Выводы

Полученные зависимости для определения температуры в зоне резания и величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя обработанной детали позволяют на стадии технологической подготовки производства назначать наиболее эффективные ПАВ и способы их подачи в зону шлифования для конкретных условий обработки. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что использование при шлифовании деталей ПАВ обеспечивает снижение температуры резания и величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя, что благоприятно сказывается на повышении эксплуатационных свойств обработанных деталей машин. Выявлены особенности использования видов ПАВ и способов подачи их в зону резания при шлифовании поверхностей деталей с учётом технологической совместимости и максимальной эффективности.

Список литературы

1. **Бутенко, В.И.** Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей машин / В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – 176 с.
2. **Латышев, В.Н.** Применение йода как компонента СОТС при резании металлов: (статья) / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.С. Раднюк // *Металлообработка*. – 2008. - №3(45). – С. 9 – 14.
3. **Якимов, А.В.** Обеспечение качества поверхности путём выбора глубины шлифования: (статья) / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, А.М. Скляр // *Вестник машиностроения*. – 1988. – №2. – С. 48 – 50.
4. **Шумячер, В.М.** Физико-химические процессы при финишной абразивной обработке / В.М. Шумячер. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2004. – 161 с.
5. **Редько, С.Г.** Процессы теплообразования при шлифовании / С.Г. Редько. – Саратов: Изд-во СГУ, 1982. – 231 с.
6. **Королёв, А.В.** Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королёв, Ю.К. Новосёлов. – Саратов: Изд-во СГУ, 1989. – 320 с.
7. Патент РФ №2532660 Способ импрегнирования абразивного инструмента / В.И. Бутенко. – Бюлл. №31, 2014.
8. **Кужаров, А.С.** Триботехнические возможности нанокластеров Cu, Zn, Sn, Ag и их смеси в составах препаратов современной автохимии: (тезисы доклада) / А.С. Кужаров, А.А. Рыжкин, А.А. Кужаров // *Проблемы машиноведения: Трибология – машиностроению: сб. тезисов конф.* – М.: ИМАШ РАН, 2014. – С. 269.

Плоское шлифование деталей малой жёсткости с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке

Тышкевич В.Н.^{1*}

Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Исследовано плоское шлифование периферией круга деталей малой жёсткости типа колец и призматических стержней с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке. Предложены алгоритм и методика определения оптимальных условий шлифования деталей малой жёсткости, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности Ra , отсутствие шлифовочных прижогов, допуск плоскостности поверхности и т.д.) при максимальной производительности процесса. Параметрами оптимизации процесса шлифования являются твердость шлифовального круга, глубина шлифования, скорость подачи стола, наработка и т.д. Математические модели выходных факторов предназначены для ограничения области допустимых значений параметров оптимизации. Целевая функция - производительность процесса шлифования. Оптимизацию параметров в области допустимых значений осуществляют из условия обеспечения максимальной производительности процесса. Допуск плоскостности поверхности обработанной детали обеспечивается управлением упругим деформированием заготовки на втором этапе оптимизации режимов шлифования. Для управления величиной максимальной упругой деформации заготовки варьируются силы резания, притяжения магнитного поля стола станка и жёсткость заготовки при изгибе. Определяются условия обеспечения требуемого допуска плоскостности поверхности детали учитывающие упругое деформирование заготовки малой жёсткости при закреплении и шлифовании.

Ключевые слова: плоское шлифование; детали малой жёсткости; упругие деформации; качество обработанной поверхности; оптимизация процесса.

Flat grinding of small-rigidity details with controlling elastic deformations when fastening and processing

Tyshkevich V.N.^{1}*

Associate Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

Flat peripheral grinding of small-rigidity details such as rings and prismatic rods with controlling elastic deformations when fastening and processing is studied. The authors propose the algorithm and method of determining optimal conditions for grinding end surfaces of small-rigidity details that guarantees obtaining predefined quality requirements to the machined surface (surface roughness parameter Ra , absence of grinding burns, required flatness tolerance of end surface, etc.) while ensuring the maximum efficiency of the process. The input factors (grinding wheel hardness, depth of grinding, table feed speed and run, etc.) are considered as the grinding process optimization parameters. Mathematical models of the output factors are used to limit the range of optimization parameters allowable values. The optimization of parameters in the range of allowable values is carried out with the view of ensuring the maximum process efficiency. The required flatness admission is provided at the second optimization stage of the workpieces by controlling the elastic deformation extent. The varied parameters at controlling the maximum elastic deformation are cutting forces, the attraction of the magnetic field of the machine table and rigidity of workpiece at a bend. The terms for providing of the required side surface flatness tolerance are determined for workpieces taking into account elastic deformation of the small-rigid workpieces under the magnetic field effect on the machine table and the radial component of the grinding force.

* Автор корреспонденции: tubem@mail.ru (Тышкевич В.Н.)

Key words: flat grinding; small-rigidity details; elastic deformations; quality of machined surface; process optimization.

Введение

Шлифование - основной метод механической обработки, определяющий геометрическую точность деталей, поэтому повышение эффективности данных операций относится к приоритетным задачам машиностроения. Особенность механической обработки деталей малой жёсткости – возникновение при закреплении и обработке упругих деформаций, величина которых может превышать требуемый допуск отклонения формы обработанной поверхности. Упругие деформации в направлении перпендикулярном поверхности стола станка при закреплении и шлифовании торцов заготовок колец, боковых граней призматических заготовок усложняют обеспечение заданного допуска плоскостности обработанной поверхности. Определенные отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности заготовки возвращаются в результате упругого деформирования заготовки после шлифования и снятия магнитного поля стола станка. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время и стоимость операции шлифования [1-2]. Опыт изготовления колец крупногабаритных подшипников малой осевой жёсткости, направляющих линейных подшипников малой жёсткости показывает, что современная технология шлифовальной обработки не может разрабатываться без управления упругим деформированием заготовки при закреплении и обработке [2-5]. Цель исследований: обеспечение максимальной производительности обработки и заданных требований к качеству обработанной поверхности при плоском шлифовании деталей малой жёсткости типа колец и призматических стержней путем управления их упругим деформированием при закреплении и обработке.

1. Алгоритм и методика оптимизации процесса плоского шлифования деталей малой жёсткости

Алгоритм выбора оптимальных режимов и условий плоского шлифования заготовок малой жёсткости предполагает выделение двух этапов. На первом этапе (рис. 1) заготовку рассматриваем как абсолютно жёсткую и оптимизацию осуществляем из условия выполнения требований ко всем параметрам: шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., кроме допуска плоскостности [3-6].

С использованием математических моделей составляющих силы резания, параметра шероховатости и т.д. ($P_y = P_y(x_1, x_2, \dots, x_k)$; $P_z = P_z(x_1, x_2, \dots, x_k)$; $Ra = Ra(x_1, x_2, \dots, x_k)$; ...) определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов x_1, x_2, \dots, x_k , обеспечивающих выполнение требований к качеству поверхности. Целевая функция оптимизации – максимум производительности обработки при условии расположения в области допустимых значений параметров $[x_i]$. Полученные оптимальные параметры определяют первый режим шлифования – режим 1. Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе управлением величиной упругой деформации (рис. 2). Варьируемыми параметрами здесь являются силы резания и притяжения магнитного поля стола, жёсткость заготовки при изгибе, условия закрепления. Управление осуществляется по условию обеспечения допускаемого значения максимальной упругой деформации $[\Delta]$: $[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_r$, где λ - коэффициент точности при проектировании, принимаемый равным 0,75; Δ - допуск плоскостности поверхности на операции шлифования; Δ_r – достижимое отклонение от плоскостности поверхности при шлифовании жёсткой заготовки.

На рисунке 2 показан алгоритм для колец малой осевой жёсткости, для

призматических заготовок в алгоритме имеются особенности, связанные с использованием компенсаторов для повышения жёсткости при изгибе заготовок описанные в [6].

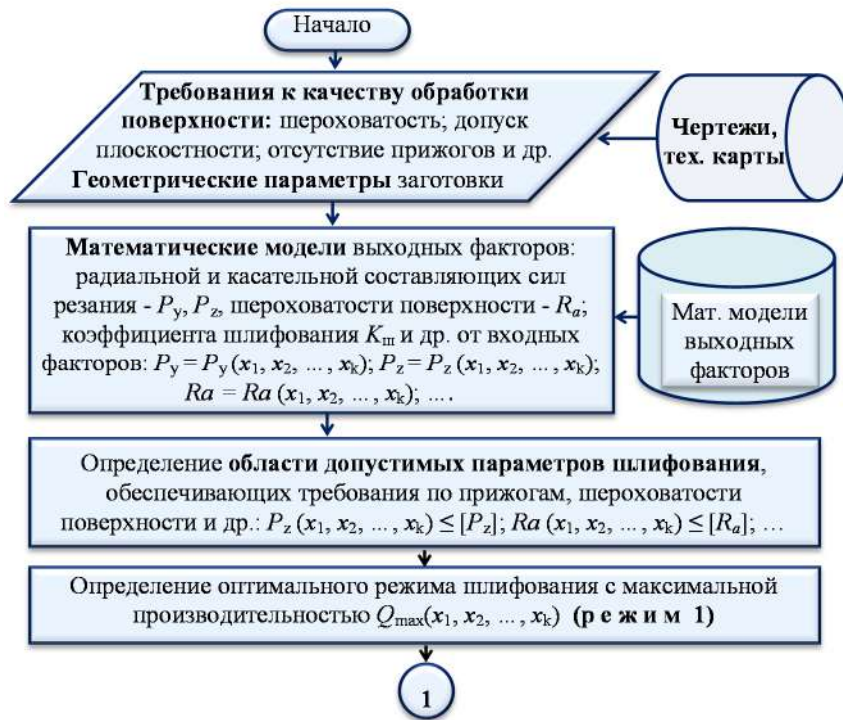


Рис. 1. Первый этап оптимизации плоского шлифования деталей малой жёсткости

Упругое деформирование заготовок при закреплении и шлифовании обусловлено начальными отклонениями от плоскостности торцов заготовок колец, боковых граней призматических заготовок направляющих, соприкасающихся с поверхностью стола станка. А начальные отклонения от плоскостности, в свою очередь, обусловлены деформацией заготовки в процессе её термообработки и предшествующей механической обработки.

При определении контактных деформаций макроотклонения поверхности заготовки (изогнутость) моделируются регулярными волнами цилиндрической поверхности с параметрами волнистости и шероховатости поверхности, определяемыми экспериментально [3-6]. Для определения максимальных деформаций используется теория изгиба стержней малой кривизны. Нагружение заготовки моделируется равномерно распределённой нагрузкой интенсивностью q от действия усилия притяжения магнитного поля и собственного веса, при шлифовании добавляется сосредоточенная сила P_y – радиальная составляющая усилия резания. Максимальная деформация при закреплении заготовки магнитным полем стола будет равна [3-6]: $w_{qmax} = w_m + w_q + w_{kq}$, где w_m , w_q – максимальное упругое перемещение заготовки при изгибе, соответственно под действием массы заготовки и магнитного поля стола; w_{kq} – контактная деформация поверхности заготовки с плоскостью стола.

При шлифовании заготовки добавляется максимальная деформация заготовки при изгибе w_{pmax} под действием радиальной составляющей силы резания – w_p , и контактная деформация поверхности заготовки с плоскостью стола $w_{кр}$.

Максимальная деформация при закреплении заготовки магнитным полем стола и шлифовании будет равна [3-6]: $w_{max} = w_{qmax} + w_{pmax} = w_m + w_q + w_p + w_k$, где $w_k = w_{kq} + w_{кр}$. При шлифовании без применения магнитного поля стола станка при закреплении заготовки упорами максимальная деформация будет равна [6, 7]: $w_{pmax} = w_m + w_p + w_{кр}$.

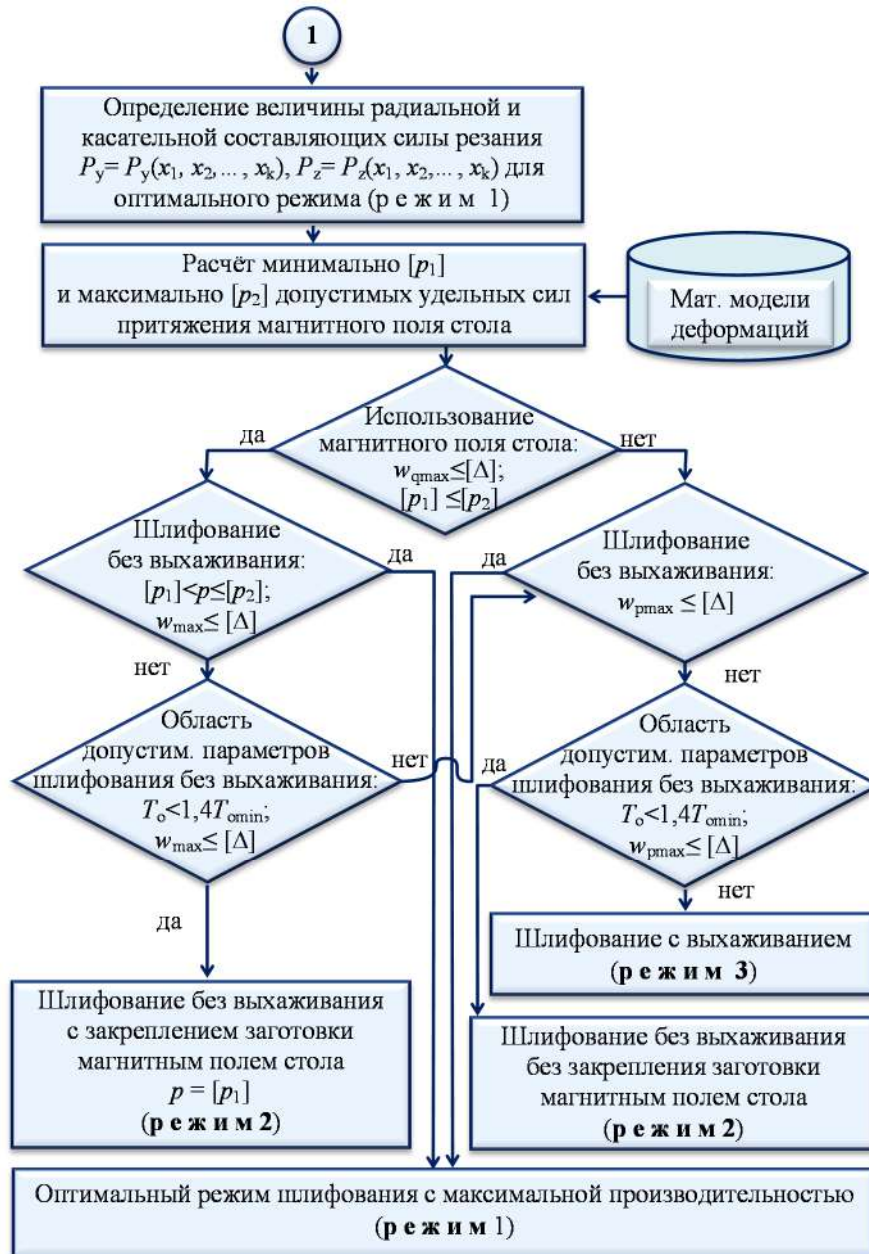


Рис. 2. Второй этап оптимизации плоского шлифования деталей малой жёсткости

Алгоритмы и математические модели для определения максимальных деформаций заготовок колец приведены в [6], для призматических заготовок направляющих – в [6].

Применимость магнитного поля стола для закрепления заготовки определяется условием:

$$w_{qmax} \leq [\Delta]. \quad (1)$$

При $w_{qmax} > [\Delta]$ заготовка на столе станка закрепляется с помощью упоров.

Условие (1) дополняется неравенством [5]:

$$[p_1] \leq p \leq [p_2], \quad (2)$$

где p - удельная сила притяжения магнитного поля стола станка; $[p_1]$ - минимально допустимая удельная сила притяжения из условий отсутствия сдвига, проворота, опрокидывания заготовки [7]; $[p_2]$ - максимально допустимая удельная сила притяжения

магнитного поля стола станка, определяемая из условия обеспечения заданного допуска плоскостности (1).

Условие обеспечения требуемого допуска плоскостности поверхности заготовки без выхаживания при закреплении заготовки магнитным полем стола определяется неравенством [3-6]:

$$w_{\max} \leq [\Delta]. \quad (3)$$

Как показывает практика, выполнение требований к шероховатости, волнистости, отсутствию шлифовочных прижогов, трещин поверхности заготовки возможно без использования выхаживания. Выхаживание применяют для обеспечения допуска плоскостности [3, 7, 8]. Основное время обработки с выхаживанием увеличивается в среднем на 40%. Шлифование без выхаживания с закреплением заготовки магнитным полем стола при $p = [p_1]$ возможно в результате снижения величины P_y за счет соответствующего снижения режимных факторов в ранее определенной области и поиском в этой же области допустимых значений параметров процесса, при которых возможно выполнение следующих условий [3-6]:

$$w_{\max} \leq [\Delta]; T_o < 1,4T_{\text{omin}}, \quad (4)$$

где T_o - основное время шлифования, T_{omin} – основное время шлифования без выхаживания при максимальной производительности обработки, параметры реализации которой определяются ранее (режим 1). При существовании в области допустимых значений параметров процесса, удовлетворяющих условиям (4), дальнейшая оптимизация осуществляется по критерию максимальной производительности. При невыполнении условий (1, 4) шлифование первого торца заготовки производится без закрепления магнитным полем стола, заготовку закрепляют с помощью упоров.

Условие обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности заготовки без выхаживания и без закрепления заготовки магнитным полем стола определяется неравенством [3-6]:

$$w_{\text{pmax}} \leq [\Delta]. \quad (5)$$

При выполнении условия (5) шлифование первого торца производится с параметрами режима 1. Реализация режима 2 без закрепления магнитным полем стола возможна при выполнении условий [3-6]:

$$w_{\text{pmax}} \leq [\Delta]; T_o < 1,4T_{\text{omin}}. \quad (6)$$

Если условия (6) не выполняются, шлифование первого торца заготовки производится с выхаживанием (режим 3).

2. Результаты и обсуждение

В рассмотренных примерах реализации первого этапа оптимизации [4, 5, 9, 10] математические модели приведенных к ширине образца составляющих силы резания, коэффициента шлифования и параметра шероховатости обработанной поверхности Ra получены для сталей ШХ15, 20Х методом полного факторного эксперимента типа 2^4 , где 4 – число факторов. Входными параметрами моделей являются характеристики абразивного инструмента (твердость круга), режимные факторы (скорость подачи стола, глубина шлифования) и наработка (объем удаляемого металла).

В результате специально проведенных исследований установлено, что шлифовочные прижоги образуются при $p_z > 6$ Н/мм [4-6]. Получены оптимальные режимы шлифования, позволяющие получить наибольшую приведенную производительность Q_{\max} для конкретных производственных условий. В [4-6, 11] рассмотрены примеры реализации

второго этапа оптимизации для конкретных производственных условий и типов колец крупногабаритных подшипников и призматической направляющей линейного подшипника.

Заключение

Разработаны алгоритм и методика выбора оптимальных режимов обработки и условий закрепления заготовок при плоском шлифовании деталей малой жёсткости.

Оптимальные режимы и условия закрепления заготовок обеспечивают получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса плоского шлифования.

Список литературы

1. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. ред. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение-1, 2001. 912 с.
2. Коротков Б.И., Коротков С.Б., Тышкевич В.Н., Орлов С.В. Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец. Волгоград, ВолГТУ, 2007. 133 с.
3. Тышкевич, В.Н. Повышение эффективности плоского шлифования деталей подшипников малой жёсткости / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2019. - Т. 6, № 1-4. - С. 97-103.
4. Тышкевич, В.Н. Повышение эффективности плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жёсткости / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко, А.В. Саразов // Известия ВолГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Волгоград, 2017. № 9 (204). С. 105-108.
5. Управление осевыми упругими деформациями нежёстких колец подшипников при плоском шлифовании торцов / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Известия вузов. Машиностроение. 2017. № 1 (682). С. 63-70.
6. Тышкевич, В.Н. Определение упругих деформаций при плоском шлифовании заготовок малой жёсткости направляющих линейных подшипников/В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов//XIV межрегион. научно-практич. конференция «Взаимодействие предприятий и вузов – наука, кадры, новые технологии» (г. Волжский, 18.10.2018 г.): сб. докл. конф.-Волгоград; Волжский, 2018. С. 42-50.
7. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. ред. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение-1, 2003. 944 с.
8. Солер, Я.И. Прогнозирование режимов чистового шлифования быстрорежущих пластин переменной податливости при многопараметрической оптимизации шероховатости/ Я.И. Солер, В.К. Нгуен, Н.А. Хоанг//Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 4 (685). С. 35-46.
9. Тышкевич, В.Н. Determination of Optimal Conditions for Flat Grinding of 20 Kh Steel Workpieces [Электрон. ресурс] / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко, А.В. Саразов // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018): Springer, 2019. P. 1279-1285. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-95630-5>.
10. Тышкевич, В.Н. Повышение эффективности плоского шлифования заготовок направляющих линейных подшипников малой жёсткости / В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов//XIV межрег. научно-практич. конф. «Взаимодействие предприятий и вузов – наука, кадры, новые технологии» (г. Волжский, 18 октября 2018 г.): сб. докл. конф. - Волгоград; Волжский, 2018. С. 28-42

Зависимости степени пористости и прочности композиционного материала абразивных инструментов на керамической связке от структурных параметров и наличия порообразователя

Багайсков Ю.С.^{1*}

Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет,
г. Волжский Волгоградской области, Россия

Аннотация

Одним из показателей работоспособности абразивных инструментов является прочность их материала. Особенно это важно для шлифовальных кругов, работающих со скоростями от 35 до 60 м/с. Дополнительное негативное влияние имеет наличие дисбаланса кругов, вследствие неточности геометрии и неравномерности распределения массы по объему. При этом перспективой повышения эффективности шлифования является применение высокопористых кругов с низкой твердостью, что несомненно приводит к уменьшению прочности. Исследования показывают, что уменьшение прочности шлифкругов происходит с увеличением номера их структуры, повышением содержания выгорающих порообразователей, причем в большей степени для инструментов из карбида кремния, чем из электрокорунда. Размер частиц порообразователей влияет на прочность материала кругов незначительно. Следует применять более адгезионноактивные керамические связки, упрочнять конструкции инструментов абразив.

Ключевые слова: абразив, керамическая связка, структура, пористость, прочность

Porosity and Strength of a Ceramic Bond Grinding Tool as a Function of Its Structural Parameters and Availability of a Pore Forming Agent

Bagayskov Yu. S.^{1}*

*Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (Branch) of Volgograd State Technical University,
Volzhskiy, Volgograd Region, Russia*

Abstract

One of the main parameters to measure a grinding tool performance is the material strength. This is especially true for grinding wheels operating at speeds of 35 to 60 m/sec. The grinding wheel performance can also be impaired by its imbalance due to defects in its geometry and nonuniform distribution of weight over the volume. However, a way to improve the grinding efficiency is to use high-porosity low-hardness grinding wheels with lower strength properties. Research shows that the lower the grinding wheel's strength – the bigger its structure number, the higher the content of burnable pore forming agents. This is especially applicable to tools made from silicon carbide rather than from alundum (electric corundum). The particle size of the pore forming agent has no major effect on the grinding wheel strength. Ceramic bonds with better adhesive capacity should be used together with overall improvement of the grinding tool structure.

Key words: grinding material, ceramic bond, structure, porosity, strength

Введение

Работоспособность абразивных инструментов определяется степенью прочности его композиционного материала. Проявляется это в величине срока службы инструмента как

по степени размерного износа, так и в связи с разрушением. Это особенно важно для шлифовальных кругов на керамической связке, так как они работают при вращении со скоростями выше 35 м/с, имеют определенный дисбаланс массы по центру тяжести [1]. В результате могут возникать разрывные напряжения выше предела прочности материала. Кроме того, как известно, прочность связана с твердостью, менее прочные инструменты быстрее изнашиваются в процессе шлифования. С другой стороны, современные тенденции повышения эффективности применения такого инструмента связаны с увеличением степени пористости структуры его материала при одновременном снижении твердости. Это особенно важно при скоростной обработке (более 60 м/с) труднообрабатываемых материалов без прижогов. Понятно, что с увеличением пористости и снижении твердости будет уменьшаться и прочность композиционного материала инструментов [2].

1. Экспериментальная часть

Повысить пористость материала в достаточно широких пределах можно за счет введения в формовочную массу при изготовлении инструментов искусственных порообразователей выгорающего [3], расплавляющего или растворяющего действия.

Проведены исследования степени пористости и прочности материала абразивных инструментов на керамической связке различных характеристик по виду абразивного материала и связки, номеру структуры, зернистости и содержанию порообразователя [4].

Номер структуры определяет, по сути, соотношение абразива и связки в общей структуре материала инструмента, чем больше номер, тем меньше абразива и больше связки при одинаковом количестве пор.

Исследованию подвергались образцы следующих характеристик: абразивные материалы электрокорунд белый марки 25А и карбид кремния зеленый марки 64С зернистостью F60, исходная структура № 6 и 8. Использовались, соответственно, для электрокорунда плавящаяся связка К5, для карбида кремния - спекающаяся связка К33. В качестве выгорающего в обжиге при 1220 – 1250°С порообразователя вводились дробленые фруктовые косточки различной крупности (№25, 40 и 80) в различном количестве (7, 10 и 15 % от объема абразивных зерен).

2. Результаты исследований

Оценивались основные структурно-механические свойства (плотность и пористость) и прочность при сжатии материала инструментов на образцах после обжига. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Результаты показывают, что плотность образцов с введением порообразователя, выгорающего после обжига, уменьшается на 13 – 20 %, причем для карбида кремния – в большей степени. Это уменьшение происходит пропорционально увеличению номера структуры, зернистости и количества порообразователя. Пористость образцов возрастает примерно на 30 % с увеличением структуры, зернистости и количества порообразователя. Однако при низкой зернистости порообразователя (№25 – 250 мкм) пористость образцов может быть не выше, чем у образцов 6-й структуры без порообразователя (для электрокорунда).

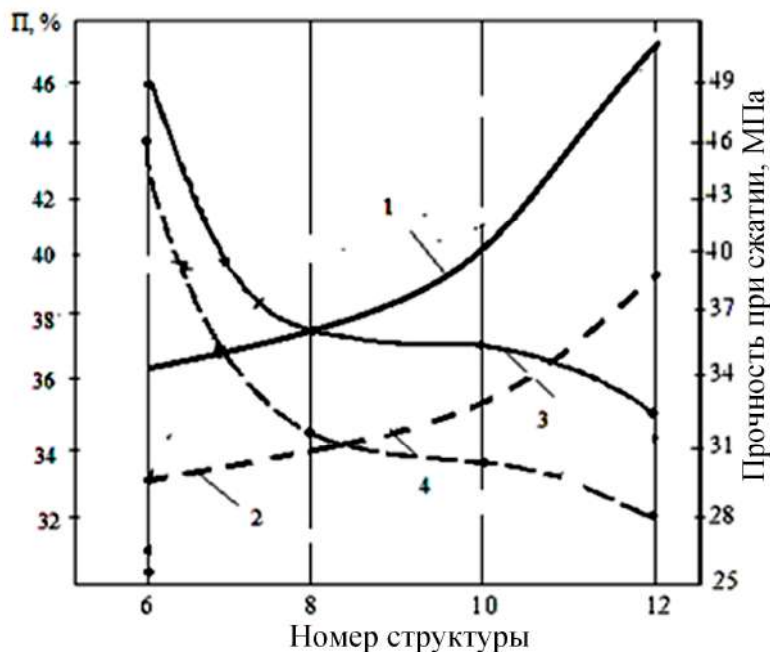
Прочностные свойства снижаются при переходе от 6 до 8 номера структуры с введением порообразователя на 27 – 40 %, затем уровень в основном стабилизируется, почти независимо от фракционного и количественного содержания порообразователя (колебание результатов не более 15 %).

Более наглядно результаты исследований иллюстрированы графиками.

Табл. 1. Характеристики, структурно-механические свойства и прочность обожженных образцов, в том числе с порообразователем.

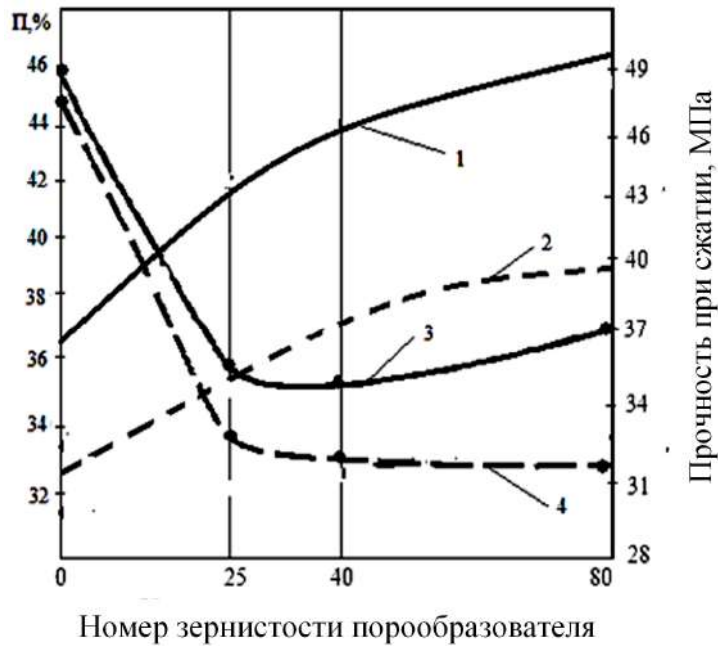
Абразивный материал		Номер структуры	Порообразователь		Показатели		
Вид и марка	Зернистость		Зернистость	Содержание в % от массы абразива	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Прочность при сжатии, МПа
Электрокорунд 25А	F60	6	-	-	2,16	39	49
		8	80	10	2,02	40	36
		10	25	10	2,01	33	35
		10	40	10	1,95	39	35
		10	80	7	1,96	41	39
		10	80	10	1,93	43	37
		10	80	15	1,90	46	33
		12	80	10	1,88	48	34
Карбид кремния 64С	F60	6	-	-	1,93	32	48
		8	80	10	1,74	37	32
		10	25	10	1,77	35	33
		10	40	10	1,71	37	32
		10	80	7	1,68	38	32
		10	80	10	1,62	39	31,5
		10	80	15	1,59	41	29
		12	80	10	1,55	42	28

На рис.1 приведены зависимости пористости и прочности при сжатии материала инструмента, в том числе при введении порообразователя, от номера структуры. На рис. 2 показаны зависимости пористости и прочности при сжатии высокопористого материала от зернистости порообразователя, а на рис. 3 – от содержания порообразователя.



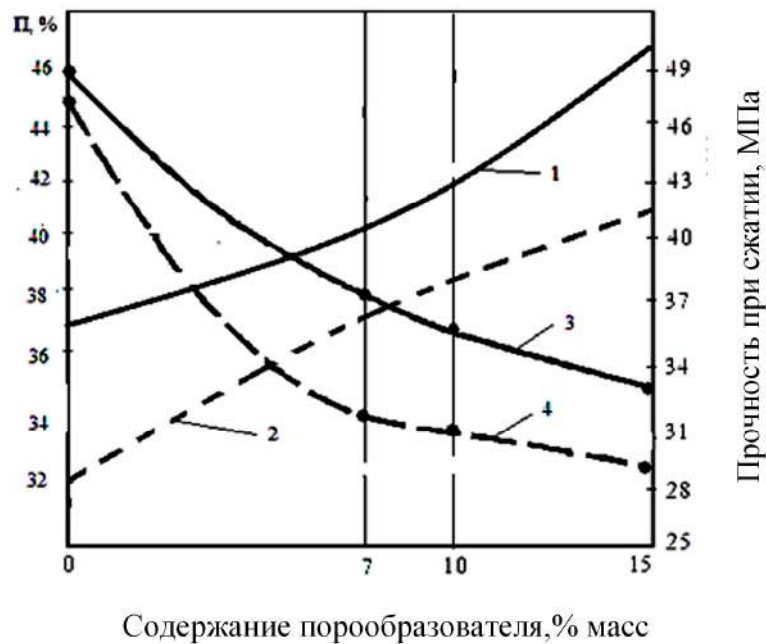
1,3 – электрокорунд 25А; 2,4 – карбид кремния 64С (зернистость порообразователя № 80, количество 10% от массы абразива)

Рис. 1. Зависимость пористости (1,2) и прочности при сжатии (3,4) высокопористого материала инструмента от номера структуры



1, 3 – электрокорунд 25А; 2, 4 – карбид кремния 64С (номер структуры № 10, количество 10% от массы абразива)

Рис. 2. Зависимость пористости (1, 2) и прочности при сжатии (3, 4) высокопористого материала от зернистости порообразователя



1, 3 – электрокорунд 25А; 2, 4 – карбид кремния 64С (номер структуры №10, зернистость порообразователя № 80)

Рис. 3. Зависимость пористости (1,2) и прочности при сжатии (3,4) высокопористого материала от содержания порообразователя

Выводы

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы. Даже при исходной структуре (номер 6) пористость и прочность кругов из карбида кремния на 5-10 % ниже, чем из электрокорунда, при введении порообразователя – на 10-20 %. Таким образом, при меньшей пористости инструмент из карбида кремния менее прочный, чем из электрокорунда. Как известно, это объясняется низким уровнем адгезионных свойств связки для карбида кремния.

При этом резкое снижение прочности как для электрокорунда, так и для карбида кремния наблюдается при изменении номера структуры до номера 8, то есть при начале введения порообразователя. Влияние увеличения номера зернистости порообразователя больше проявляется на пористости, почти не сказывается на прочности, особенно для электрокорунда. А вот повышение содержания порообразователя почти пропорционально влияет на увеличение пористости и на снижение прочности обоих видов инструмента.

Рекомендации – применение более прочных, адгезионноспособных керамических связок, конструкций кругов с упрочняющими элементами [5], более широкое введение технологий изготовления кругов с вращающейся прессформой.

Список литературы

1. **Гаршин А.П.** Абразивные материалы и инструменты. Технология производства: Учеб.пособие / А.П. Гаршин, С.М. Федотова / Под общ. ред.проф. А.П. Гаршина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.
2. **Багайсков Ю.С.** Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов : (монография) / Ю. С. Багайсков, В. М. Шумячер ; Федеральное агентство по образованию, ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ. - Волгоград :ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ, 2005. - 200с.
3. А.с. 1812087. МКИ В24D 3/14. Масса для изготовления пористого абразивного инструмента / В.П. Манунин, Ю.С. Багайсков, А.В. Лежнева, Т.Н. Дуличенко. – Оpubл. 30.04.93. Бюл. №16
4. **Багайсков Ю. С.** Анализ особенностей формирования пористой структуры абразивных инструментов / Ю. С. Багайсков // Сборник статей конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». – Волжский. – 1999. – С. 67 – 69.
5. Патент № 2539254 Россия. Шлифовальный круг на керамической связке/ Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер, А.В., Лыков// Б.И. – 2015. - № 2.
6. **Тарамыкин Ю. П.** Форма и площадь мгновенного пятна контакта при зубохонинговании / Ю. П. Тарамыкин. // Сб. работ аспирантов ЭНИМС. – М., 1966. – С. 188 – 197. Багайсков, Ю.С. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: (монография) / Ю. С
7. Багайсков, Ю.С., Шумячер, В.М. Федеральное агентство по образованию, ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ. - Волгоград: ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ, 2005. - 200с.
8. Айрапетов Э. Л. Податливость прямозубчатого зацепления / Э. Л. Айрапетов, М. Д. Генкин Д. И. Колин // Виброакустическая активность механизмов с зубчатыми передачами. – М.: Наука. – 1971. – С. 13 – 59.
9. Старжинский В.Е., Мажаровский В.В. Расчет податливости металлополимерного зубчатого зацепления // Динамические процессы в механизмах с зубчатыми передачами. – М.: Наука, 1976. – С. 139 – 145.

Изменение параметров зацепления «абразивный шевер – зубчатое колесо» при учете упругой деформации

Багайсков Ю.С.^{1*}

Профессор, Волжского политехнического института (филиал) Волгоградского государственного технического университета,
г. Волжский Волгоградской области, Россия

Аннотация

Для отделочной обработки боковых поверхностей зубьев закаленных колес по методу обката применяется инструмент - абразивный шевер. В процессе эксплуатации из-за внедрения абразивных зерен в металл, износа и приработки материала инструмента, наличия контактной и изгибной деформации зуба шевера, особенно при эластичном связующем, контакт зубьев происходит не в точке, а по эллипсной площадке. Предложена модель зацепления зубьев шевера и детали, позволяющая имитировать подвижность зубьев шевера относительно зубьев колеса в результате деформирования, учесть изменения кинематических параметров. На основе этой модели можно составить методику расчета всех составляющих упругой деформации зуба шевера, определить изменение удельных скольжений и размеров пятна контакта в зацеплении. Это позволит учесть влияние упругих деформаций при расчете геометрических параметров шеверов, при эксплуатации влиять на интенсивность съема металла, качество и точность обработки деталей.

Ключевые слова: абразив, шевер, связка, зацепление, упругая деформация, модель

Changes in Gear-Hone Meshing Due to Elastic Deformation

Bagayskov Yu. S.^{1}*

Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (Branch) of Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd Region, Russia

Abstract

Gear hone is a special tool used for roll finishing of lateral faces of hardened gear teeth. Over time, penetration of abrasive grains into the metal, wear and breaking in of the hone material, contact and bending deformation of the hone teeth, especially if an elastic binding agent is used, lead to changing the tooth contact geometry, i.e. a point contact turns into an elliptical contact. This work offers a model to simulate the meshing between the hone and the workpiece as affected by the tooth deformation, to account for any changes in their kinematic parameters. The model can be used as a basis for the calculation of all aspects of the hone tooth deformations, specific sliding variations, and the tooth contact pattern. That would allow for taking the elastic deformations into account in calculating the geometry of gear hones, in adjusting the metal removal rates in operation, and improving the quality and preciseness of the workpiece processing.

Key words: grinding material, gear hone, bond, meshing, elastic deformation, model

Введение

Особенностью композиционного материала абразивных инструментов на полимерных связках, в отличие, например, от классической керамической связки, является наличие упругости, оцениваемой параметром «модуль упругости». При этом степень упругости может быть в достаточно широких пределах, вплоть до уровня эластичности. В конечном итоге, в зависимости от приложенных рабочих нагрузок материал инструмента

* Автор корреспонденции: instra-ysb@rambler.ru (Багайсков Ю.С.)

на полимерных связках деформируется, что оказывает влияние на работоспособность и эффективность инструмента.

1. Теоретическая часть

Теоретически контакт поверхностей инструмента и обрабатываемой детали происходит в точке или по линии. Практически же в процессе эксплуатации из-за внедрения абразивных зерен в металл, износа и приработки материала инструмента, даже при его абсолютной жесткости, тем более при определенной упругости, контакт происходит по площадке небольших размеров в форме прямоугольника или эллипса [1]. Это обеспечивает лучшую полноту обработки и меньшую шероховатость обработанной поверхности при уменьшенной глубине резания.

Наиболее сложным и показательным объектом с точки зрения присутствия упругости является абразивный шевёр, применяемый для отделочной обработки боковых сторон зубьев закаленных зубчатых колес по методу обката с реверсом, упругим нагружением и осцилляцией [2].

Использовать известные закономерности деформирования пары зубчатых колес к эластичному абразивному шеверу без учета ряда его особенностей нельзя по следующим причинам:

–Модуль упругости материала шеверов ($E_0 = 0,1 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$ МПа) в 30 – 2000 раз меньше модуля упругости материала обрабатываемых ими деталей ($E_1 = 2,15 \cdot 10^5$ МПа). Вследствие этого принимается допущение о деформировании в зацеплении «шевер – колесо» при нагружении усилиями $P_n = 10 - 30$ Н/мм только зубьев шевера.

–Шевёр в процессе эксплуатации изнашивается, изменяются размеры его зубьев.

–Зацепление зубьев шевера и колеса является в общем случае винтовым.

–Шевёр является режущим инструментом, размеры режущих кромок абразивных зерен и глубины их внедрения в металл не постоянны.

Размеры зоны контакта зубьев шевера и детали, величины контактных усилий в этом случае не постоянны и не могут быть оценены с достаточной точностью. Задача расчета деформаций зубьев шеверов не требует большой точности, поэтому использован приближенный, довольно простой и проверенный в практике метод, в общем виде приведенный в [3, 4]. В настоящем исследовании он применен с корректировкой для учета изменения коэффициента коррекции профиля зубьев шевера, что позволяет оценить влияние степени размерного износа шеверов в процессе их эксплуатации.

Суммарную деформацию ω_Σ зуба шевера в точке контакта его с зубом детали, как и любого зубчатого колеса, можно разложить в направлении действия нормальной нагрузки (N_0N_1) на следующие составляющие:

$$\omega_\Sigma = \omega_K + \omega_{\Sigma II} + \omega_{об},$$

где ω_K и $\omega_{\Sigma II}$ - контактная и изгибная деформация зуба;

$\omega_{об}$ - деформация обода шевера.

Изгибная деформация $\omega_{\Sigma II}$ состоит из собственно изгибной деформации зуба как консоль (ω_{II}), при допущении абсолютно жесткого закрепления основания зуба, и деформации, характеризующей перемещение его основания в ободу шевера (ω_{OC}):

$$\omega_{\Sigma II} = \omega_{II} + \omega_{OC}.$$

2. Упругая модель зуба шевера для аналитического определения значений геометрических параметров зацепления

На рисунке 1 приведена упругая модель зуба шевера. A и B – условные оси поворота зуба в результате изгибной деформации и относительно обода шевера.

Модель позволяет оценить все составляющие суммарной деформации зуба шевера (кроме деформации обода) в точке контакта K за счет жесткости соответствующих пружин. Перемещением пружины 1 моделируется контактная деформация (ω_K), круглой пружины 2 – поворот оси симметрии зуба, пропорциональной изгибной деформации (ω_H), круглой пружины 3 – поворот основания зуба относительно обода (ω'_{OC}), пружин 4 и 5 – сдвиги основания зуба в направлениях, нормальном и параллельном его оси симметрии ($\omega''_{OC}, \omega'''_{OC}$).

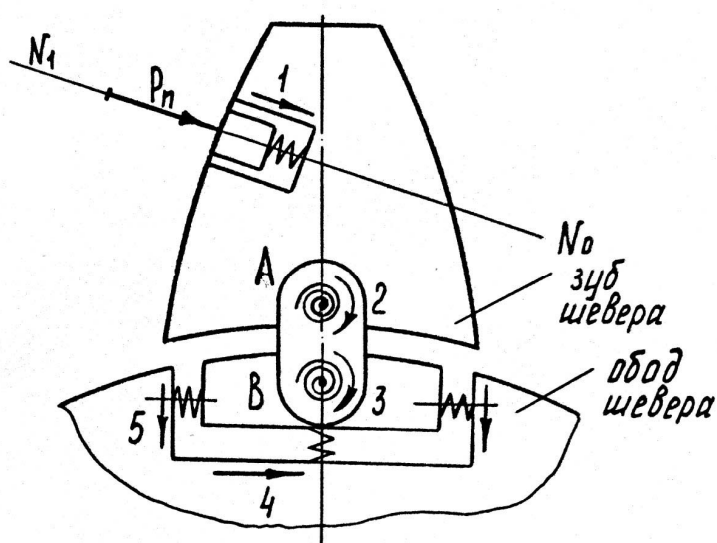


Рис.1. Схема упругой модели зуба шевера

При применении абразивных шеверов повышенной степени упругости в результате упругого деформирования их зубьев изменяются условия работы шеверов, скорость скольжения и размеры пятна контакта их зубьев с обрабатываемыми поверхностями колес. При этом надо учитывать, что снятие металла с заготовки колеса при зубохонинговании происходит вследствие относительного скольжения зубьев шевера и колеса при скрещивании осей их вращения под углом $\Sigma = \beta_1 + \beta_0$.

Определить параметры интенсивности скольжения: удельные скольжения (\mathcal{G}_0 и \mathcal{G}_1) и скорость скольжения (V_s) в зацеплении зубьев шевера и обрабатываемого колеса с учетом упругих деформаций зубьев абразивного шевера по известным рекомендациям для зубчатых колес и шеверов нельзя. Поэтому в настоящей работе определяются величины параметров зацепления зубьев шевера и колеса, влияющие на характер интенсивности их скольжения и зависящие от величин упругой деформации зубьев шеверов.

Для проведения аналитических исследований применена модель зацепления зубьев шевера и обрабатываемой детали (рис. 2). Модель позволяет имитировать подвижность зубьев шевера относительно зубьев колеса в результате упругого деформирования первых.

При нагружении зуб шевера изгибается: ось симметрии зуба модели поворачивается вокруг условного центра P на угол, пропорциональный его изгибной деформации. Деформированный профиль зуба шевера показан на рисунке пунктиром. Вследствие

одновременной контактной (ω_K) и изгибающей ($\omega_{\Sigma u}$) деформации, при $\omega_K + \omega_{\Sigma u} = \omega_{\Sigma}$ смещается точка контакта, условный рычаг зуба поворачивается.

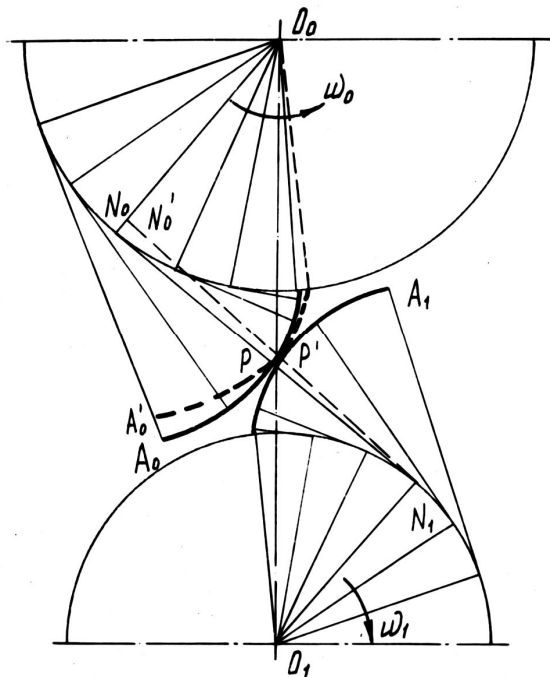


Рис. 2. Схема к определению значений параметров зацепления «шеввер – колесо» при учете упругих деформаций материала шеввера

Вследствие наличия деформации зубьев шеввера, неравномерной по их высоте, и смещения точки контакта передаточное число зацепления «шеввер – колесо» становится переменным в пределах шага зацепления. Поэтому для возможности применения в исследованиях общих закономерностей зубчатого зацепления в точке контакта P зубьев шеввера и колеса принято следующее: рычаг зуба шеввера совмещен с осью симметрии деформированного зуба; через контактную точку P' проведена новая линия зацепления $N_0'N_1'$. В этом случае, учитывая, что отношение радиусов основных окружностей колеса и шеввера r_{b1}/r_{b0} остается неизменным, и для расчета параметров скольжения величину передаточного числа можно принять постоянной.

При наличии упругой деформации зубьев шевверов, вследствие смещения точки контакта зубьев шеввера и колеса, изменяются величины радиусов кривизны ρ_0 и ρ_1 , углов давления α_0 и α_1 в текущей точке контакта по высоте профилей и торцовых углов зацепления α_{iW0} и α_{iW1} . Изменяются также значения диаметров начальных окружностей шеввера и колеса, межосевое расстояние $O_0^1O_1 = a_w$, длина линии зацепления $N_0'N_1'$.

Выводы

Таким образом, на основе предложенной модели разработана схема аналитического определения значений геометрических параметров ($\rho'_{0K}, \rho'_{1K}, \alpha'_{iW0K}, \alpha'_{iW1K}, \alpha'_{0K}, \alpha'_{1K}$) зацепления «шеввер – колесо», изменившихся вследствие упругого деформирования зубьев шеввера под действием нагрузки. Использование этих значений в известных формулах расчета параметров скольжения позволяет оценить влияние как геометрических

параметров, так и упругих характеристик материала шевера, нагрузки, парности контактов на величину и характер изменения по высоте зубьев шевера и детали абсолютных значений параметров скольжения [5].

Контакт зубьев и колеса в процессе обработки, вследствие упругой деформации материала шевера, происходит по площадке, имеющей форму эллипса (рис. 3), площадь которого по аналогии с металлическими зубчатыми колесами:

$$S = \pi ab ,$$

где, a и b – величины полуосей эллипса,

$$a = \nu_1 \Delta, \quad b = \nu_2 \Delta ,$$

$$\Delta = \left[\frac{3}{8} \frac{P_n}{\Sigma \rho} (\lambda_0 + \lambda_1) \right]^{1/3} ,$$

где ν_1 и ν_2 - коэффициенты, учитывающие кривизну профилей в теоретической точке их касания.

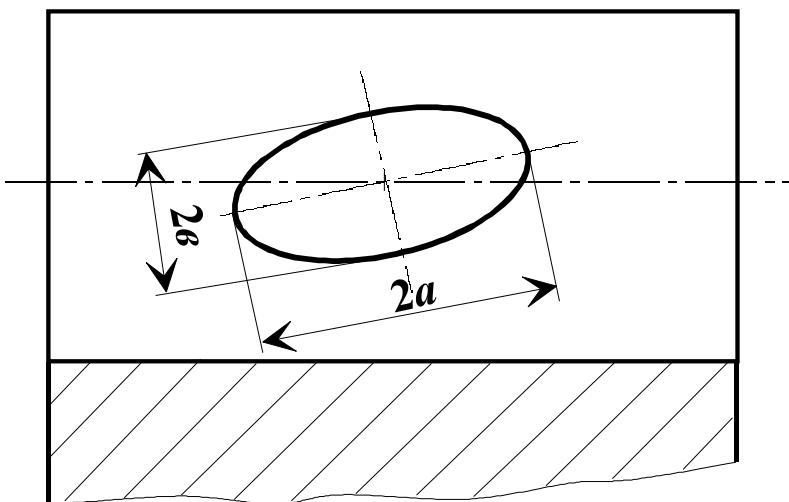


Рис. 3. Форма и размеры пятна контакта поверхностей зубьев шевера и колеса

Коэффициенты ν_1 и ν_2 определяются в зависимости от угла γ между нормальными сечениями двух контактирующих тел. $\Sigma \rho$ - сумма главных кривизн профилей зубьев шевера и колеса в каждой рассматриваемой точке. λ_0 и λ_1 - коэффициенты эластичности.

Использование этих рекомендаций дает возможность определить размеры и площадь пятна контакта зубьев шевера и колеса в зависимости от геометрических параметров шевера и его зацепления с деталью, а также величин модуля упругости шевера E_0 . Новым в расчете удельных скольжений и размеров пятна контакта в приведенной методике на основе модели зуба шевера является учет суммарной упругой деформации ω_Σ , равной сумме изгибной $\omega_{\Sigma u}$ и контактной $\omega_{\Sigma x}$ составляющих и изменения ее значений по высоте зуба шевера, а также парности контактов. Это осуществлено за счет использования при определении радиусов r_{w0} , r_{w1} и r_{0K} значений углов α'_{w0K} , α'_{w1K} и α'_{0K} , изменяющихся при упругом деформировании зуба, что позволяет скорректировать расчет геометрии и рецептуру композиционного материала шеверов, в результате повысить интенсивность

съёма металла, качество и точность обработки эвольвентных поверхностей закаленных зубчатых колес.

Список литературы

1. **Тарамыкин Ю. П.** Форма и площадь мгновенного пятна контакта при зубохонинговании / Ю. П. Тарамыкин. // Сб. работ аспирантов ЭНИМС. – М., 1966. – С. 188 – 197. Багайсков, Ю.С. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: (монография) / Ю. С
2. **Багайсков В. М., Шумячер** ; Федеральное агентство по образованию, ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ. - Волгоград: ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ, 2005. - 200с.
3. Айрапетов Э. Л. Податливость прямозубого зубчатого зацепления / Э. Л. Айрапетов, М. Д. Генкин Д. И. Колин // Виброакустическая активность механизмов с зубчатыми передачами. – М.: Наука. – 1971. – С. 13 – 59.
4. **Старжинский В.Е., Мажаровский В.В.** Расчет податливости металлополимерного зубчатого зацепления // Динамические процессы в механизмах с зубчатыми передачами. – М.: Наука, 1976. – С. 139 – 145.
5. **Багайсков Ю.С.** Исследование суммарной упругой деформации зубьев абразивных шестерев / Ю.С. Багайсков //Фундаментальные основы механики: материалы междунар. научн.-практ. конф. - Новокузнецк: НИЦ МС, № 3, 2018.-С.92-96.
Гаршин А.П. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства: Учеб.пособие / А.П. Гаршин, С.М. Федотова / Под общ. ред.проф. А.П. Гаршина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.
6. **Багайсков Ю.С.** Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов : (монография) / Ю. С. Багайсков, В. М. Шумячер ; Федеральное агентство по образованию, ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ. - Волгоград :ВолгГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолгГАСУ, 2005. - 200с.
7. А.с. 1812087. МКИ В24Д 3/14. Масса для изготовления пористого абразивного инструмента / В.П. Манунин, Ю.С. Багайсков, А.В. Лежнева, Т.Н. Дуличенко. – Оpubл. 30.04.93. Бюл. №16
8. **Багайсков Ю. С.** Анализ особенностей формирования пористой структуры абразивных инструментов / Ю. С. Багайсков // Сборник статей конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». – Волжский. – 1999. – С. 67 – 69.
9. **Багайсков, Ю.С.** Структурно-механические свойства глино-графитовых огнеупоров с содержанием карбида кремния/ Ю.С. Багайсков // Взаимодействие предприятий и вузов - наука, кадры, новые технологии / Сборник докладов XV межрегиональной научно-практической конференции: Волжский, 2019. С. 144-148.
10. **Bagaiskov, Yu.S.** Flexural strength of porous ceramic-bonded composites for abrasive tools / Yu.S. Bagaiskov// MATEC WEB OF CONFERENCES The proceedings International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019). 2019. С. 00108

Использование ректификационной колонны для нейтрализации вредных веществ при производстве бакелитового инструмента кругов

Орлов И.Ю.^{1*}, Орлова Т.Н.¹

¹Аспирант, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Производство абразивного инструмента на бакелитовой связке связано с выделением вредных веществ, которые при отсутствии операции по их нейтрализации наносят вред здоровью людей. При производстве торцешлифовальных кругов используется фенолоформальдегидная смола и, следовательно, при бакелизации абразивного инструмента происходит выделение фенола, формальдегида, аммиака. Выделение летучих веществ происходит, в основном, на операции термообработке (бакелизации). Для регенерации газов предлагаем использовать ректификационные колонны, в которых происходит регенерация вредных летучих веществ. Была разработана методика расчета удельного количества летучих веществ при термообработке абразивного инструмента.

Ключевые слова: бакелиновый инструмент, экология, летучие вещества, операция термообработки, аммиак.

The use of distillation columns to neutralize harmful substances in the production of bakelite tool circles

Orlov I. Yu.^{1}, Orlova T. N.¹*

¹ *Graduate Student, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

The production of an abrasive tool on a bakelite bond is associated with the release of harmful substances, which, in the absence of an operation to neutralize them, harm human health. In the manufacture of face grinding wheels, phenol-formaldehyde resin is used and, therefore, during the Bakelization of an abrasive tool, phenol, formaldehyde, and ammonia are released. The release of volatile substances occurs mainly in the operation of heat treatment (bakelization). For gas regeneration, we propose using distillation columns in which the regeneration of harmful volatile substances occurs. A methodology was developed for calculating the specific amount of volatile substances during heat treatment of an abrasive tool.

Key words: *Bakelite tool, ecology, volatiles, heat treatment operation, ammonia.*

Введение

Загрязнение природной среды достигло невиданных за последние годы масштабов. Только убытки экономического характера, не принимая во внимание вред экологии и здоровью людей, по подсчетам специалистов, ежегодно составляют в России сумму, равную половине национального дохода страны. Но в последнее время ситуация стала меняться к лучшему, так как предприятия стали рассматривать включение экологической составляющей в свою деятельность уже не как помеху развитию и неизбежные издержки, а все больше как сферу дополнительных возможностей.

Учет экологической составляющей может повысить конкурентоспособность государства и отдельных компаний. В условиях ужесточения конкуренции кардинально изменилось отношение к экологии бизнеса (играющего ключевую роль в реализации экологической политики, поскольку через его практическую деятельность в первую очередь и реализуются взаимоотношения людей и природной среды). Бизнес постепенно стал рассматривать экологически ориентированное производство как сферу перспективного развития, а в ряде случаев как единственную альтернативу своего выживания.

1. Теоретическая часть

Загрязнение природной среды достигло невиданных за последние годы масштабов. Только убытки экономического характера, не принимая во внимание вред экологии и здоровью людей, по подсчетам специалистов, ежегодно составляют в России сумму, равную половине национального дохода страны. Но в последнее время ситуация стала меняться к лучшему, так как предприятия стали рассматривать включение экологической составляющей в свою деятельность уже не как помеху развитию и неизбежные издержки, а все больше как сферу дополнительных возможностей.

Учет экологической составляющей может повысить конкурентоспособность государства и отдельных компаний. В условиях ужесточения конкуренции кардинально изменилось отношение к экологии бизнеса (играющего ключевую роль в реализации экологической политики, поскольку через его практическую деятельность в первую очередь и реализуются взаимоотношения людей и природной среды). Бизнес постепенно стал рассматривать экологически ориентированное производство как сферу перспективного развития, а в ряде случаев как единственную альтернативу своего выживания.

При производстве рельсошлифовальных кругов используется фенолоформальдегидная смола и, следовательно, при бакелизации абразивного инструмента происходит выделение фенола, формальдегида, аммиака. Выделение летучих веществ происходит в основном на операции термообработке (бакелизации).

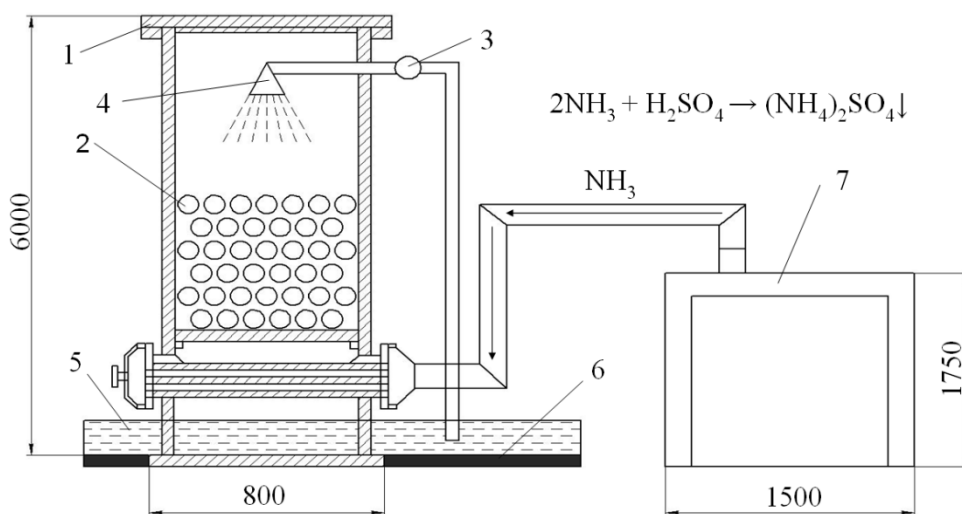
Расчет количества выделяемых летучих веществ необходим при проектировании нового производства, составлении производственных планов, экологических проверках производства, наладке, регулировании и расчётах тепловых агрегатов и приточно-вытяжной вентиляции, при выборе способа очистки воздуха в цехе. Для решения всех выше перечисленных проблем была разработана методика расчета удельного количества летучих веществ при термообработке абразивного инструмента на бакелитовой связке, при использовании которой было рассчитано количество выделяемых веществ (табл. 1).

Табл. 1. Количество вредных веществ, выделяющихся при производстве бакелитового инструмента в объёме Р т/год, при годовом фонде времени Ф

Вещества	Расчёт количества вредных веществ			
	кг/т	м ³ /т	кг/год	кг/ч
Фенол	$74 \times 10^{-5} \times C + 9 \times 10^{-2} \times B + 1 \times 10^{-3} \times CC$	$0,238 \times (74 \times 10^{-5} \times C + 9 \times 10^{-2} \times B + 1 \times 10^{-3} \times CC)$	$P \times (74 \times 10^{-5} \times C + 9 \times 10^{-2} \times B + 1 \times 10^{-3} \times CC)$	$P \times (74 \times 10^{-5} \times C + 9 \times 10^{-2} \times B + 1 \times 10^{-3} \times CC) : \Phi$
Формальдегид	$2 \times 10^{-4} \times C$	$0,747 \times 2 \times 10^{-4} \times C$	$P \times 2 \times 10^{-4} \times C$	$(P \times 2 \times 10^{-4} \times C) : \Phi$
Аммиак	$19 \times 10^{-3} \times C$	$3,318 \times 19 \times 10^{-3} \times C$	$P \times 19 \times 10^{-3} \times C$	$(P \times 19 \times 10^{-3} \times C) : \Phi$

Из табл.1 видно, что максимальное количество вредных выделений (95 %) приходится на долю аммиака, который и представляет наибольшую опасность. Таким образом, нейтрализация аммиака и является главной задачей при решении экологической проблемы в производстве абразивного инструмента на бакелитовой связке.

Для регенерации газов предлагаем использовать специальные аппараты, которые называются ректификационными колоннами (рис. 1). Колонна представляет собой вертикально стоящий полый цилиндр, внутрь которого помещен фигурный кусковой материал – насадки. Назначение насадок – развитие межфазной поверхности и улучшение контакта между жидкостью и паром. В качестве насадки ректификационных колонн обычно используются кольца, наружный диаметр которых равен их высоте. Наиболее распространены кольца Рашига (рис.2).



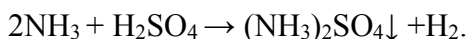
- 1 – крышка; 2 – насадки; 3 – насос; 4 – душ;
5 – ванна с серной кислотой H₂SO₄ 32 %;
6 – осадок – сульфат аммония (NH₃)₂SO₄;
7 – бакелизатор

Рис. 1. Схема регенерации отходящих газов



Рис. 2. Типы насадок

Принцип работы ректификационной колонны заключается в том, что образующиеся в процессе термообработки газы по трубе поступают в нижнюю часть ректификационной колонны. Сверху насосом газы орошаются серной кислотой концентрацией 32 %. Аммиак, вступая в реакцию с серной кислотой, образует сульфат аммония (NH₃)₂SO₄, который выпадает в виде осадка на дне ванны:



После окончания процесса ректификации осадок собирают и утилизируют на специальных полигонах.

Применение ректификационной колонны позволяет повысить конкурентоспособность предприятия в целом путём улучшения среды обитания.

Выводы

Разработанная методика расчета количества выделяемых летучих веществ позволяет выбрать способ очистки воздуха в производственном помещении, производить все виды расчётов вентиляционного оборудования. Применение ректификационной колонны позволяет повысить конкурентоспособность предприятия в целом путём улучшения среды обитания.

Список литературы

1. **Олейник, С. П.** Технологии утилизации пластмассовой продукции // Промышленное и гражданское строительство № 1. 2006.
2. Лейкин А. Е., Родин Б. И. *Материаловедение. Учебник для машиностроительных специальностей вузов.* М.: «Высшая школа», 1971
3. **Белобородов, И. И.** Влияние гидрофобизации порошков наполнителей на свойства композиционных материалов на полимерной основе / И. И. Белобородов, С. В. Сухостаец // Порошковая металлургия. – 2006. - №9/10. – С. 31-34.
4. Орлов И. Ю. Исследование процессов, происходящих при реакции поликонденсации феноло-формальдегидных смол // Теория, технология и оборудование для производства абразивного инструмента : сборник научных трудов / Уральский научно-исслед. ин-т абразивов и шлифования ; [редкол.: Б. А. Чаплыгин (отв. ред.), А. Г. Морозова, В. Г. Шеркунов], Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 115 – 118.
5. **Орлов, И. Ю.** Исследование влияния динамической вязкости жидкого бакелита БЖ-3 на механическую прочность отрезных кругов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2003: Международная научно-техническая конференция, 8 – 14 сентября 2003 г. : сборник статей конференции / Волжский инженерно-строит. ин-т филиал ВолгГАСА [и др.], Волгоград ; Волжский, 2003. – С. 45 – 49
6. **Орлов, И. Ю.** Исследование влияния двухстадийного смешивания компонентов формовочной смеси на технологичность смеси (получение свободно-текучих формовочных смесей) и физико-механические свойства абразивного инструмента на бакелитовой связке./ Орлова Т. Н. // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2004 : Международная научно-техническая конференция, 6 – 12 сентября 2004 г. : сборник статей конференции / Волжский инженерно-строит. ин-т (фил.) ВолгГАСУ [и др.], Волгоград ; Волжский, 2004. – С. 91 – 94.
7. **Орлов, И. Ю.** Методика расчета удельного количества летучих веществ при термообработке абразивного бакелитового инструмента // *Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки* : сборник статей Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов / Волжский ин-т строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ [и др.], Волгоград ; Волжский, 2007. – С. 52 – 55.

Новое в технологии изготовления металлургических брикетов путём использования карбида кремния и аспирационной пыли от дробления легирующих добавок металлургических производств

Орлов И.Ю.^{1*}, Шумячер В.М.¹, Орлова Т. Н.¹

¹Аспирант, Профессор, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

В настоящее время металлургические брикеты применяются недостаточно, особенно в производстве высококачественной стали при их прямом легировании из оксидных материалов. Поэтому расширение применения металлургических брикетов, частично заменяющих шихтовые материалы, особенно самые дорогие – ферросплавы, является актуальным. Была разработана технология, по которой металлургические брикеты должны представлять собой кусковой материал размером 80–50 мм, состоящий из заполнителя (легирующего компонента), углерода и связки, изготовленные прессованием. Исходный материал в своём составе содержит 35 % углерода в виде тонкомолотой пыли. Данный материал относится к низкотехнологичным и, как правило, уходит в неизбежные технологичные отходы. Формообразование затруднено тем, что при прессовании заготовки наблюдается упругая деформация, которая приводит к разрушению заготовки, поэтому в качестве «каркаса» брикета использовался карбид кремния, который увлажняется жидким техническим упаренным щелоком.

Ключевые слова: аспирационная пыль, ферросплавы, карбид кремния, термический коэффициент линейного расширения, закись железа.

New in the technology for the manufacture of metallurgical briquettes by using silicon carbide and suction dust from crushing alloying additives of metallurgical industries

Orlov I. Yu.^{1}, Shumyacher V. M.¹, Orlova T. N.¹*

¹Graduate Student, Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

At present, metallurgical briquettes are not used enough, especially in the production of high-quality steel with direct alloying of oxide materials. Therefore, the expansion of the use of metallurgical briquettes, partially replacing charge materials, especially the most expensive - ferroalloys, is relevant. A technology was developed by which metallurgical briquettes should be a piece material of 80–50 mm in size, consisting of a filler (alloying component), carbon and binder made by pressing. The starting material in its composition contains 35% carbon in the form of fine dust. This material is low-tech, and, as a rule, goes into inevitable technological waste. Forming is hindered by the fact that during the pressing of the workpiece, elastic deformation is observed, which leads to the destruction of the workpiece, therefore, silicon carbide was used as a “frame” of the briquette, which is moistened with technical evaporated liquor.

Key words: *dust, ferroalloys, silicon carbide, thermal coefficient of linear expansion, iron oxide.*

Введение

ОАО «Волжский трубный завод» ежемесячно вывозит на промышленный отвал 100 – 150 тонн аспирационной пыли, образующейся при дроблении ферросплавов, каменного

угля и других легирующих добавок для металлургической печи для выплавки стали. Что негативно сказывается на состоянии окружающей среды. Решить данную проблему можно путем организации производства металлургических брикетов состоящих из концентрата с добавками карбида кремния и аспирационной пыли дробления ферросплавов при экономической заинтересованности ОАО «Волжский трубный завод» и ОАО «Волжский абразивный завод».

Применение металлургических брикетов обусловлено необходимостью постоянного улучшения качества стали при наименьших затратах на её производство. При этом проблемы замены дорогостоящих легирующих добавок и ферросплавов с одновременной утилизацией образующихся и накопленных технологических отходов приобретает важное значение.

1. Теоретическая часть

Было найдено новое техническое решение. Техническое решение заключается в создании при изготовлении формовочной смеси «каркаса» из карбида кремния, который увлажняется жидким щелоком с добавлением аспирационной пыли. Для создания «каркаса» был использован карбид кремния.

На металлургических производствах при дроблении ферросплавов, каменного угля и других легирующих добавок для печи при выплавке стали образуется большое количество циклонной пыли, поэтому изготовление и использование металлургических брикетов – это повышение эффективности производства путем возврата в производство вторичных ресурсов, переход на экологически чистую и полностью безотходную технологию.

Была разработана технология, по которой металлургические брикеты должны представлять собой кусковой материал размером 80–50 мм, состоящий из заполнителя (легирующего компонента), углерода и связки, изготовленные прессованием. Исходный материал в своём составе содержит 35 % углерода в виде тонкомолотой пыли. Данный материал относится к низкотехнологичным и, как правило, уходит в неизбежные технологичные отходы. Формообразование затруднено тем, что при прессовании заготовки наблюдается упругая деформация, которая приводит к разрушению заготовки, поэтому в качестве «каркаса» брикета использовался карбида кремния, который увлажняется жидким техническим упаренным щелоком.

Карбид кремния – это материал, обладающий чрезвычайно широким комплексом полезных свойств: электротехнических, антикоррозионных, прочностных. Благодаря этому он все шире внедряется в технику. Высокая твердость позволяет использовать его как абразив, а жаростойкость и химическая инертность определяют его применение в качестве огнеупорного конструкционного и защитного материала в металлургии, машиностроении, химическом аппаратостроении.

В последние годы карбид кремния находит все большее применение в технике. Термодинамические и теплофизические свойства карбида кремния приведены в табл. 1 – 2.

Высокая теплопроводность и низкий термический коэффициент линейного расширения обеспечивают высокую термостойкость карбида кремния (способность сопротивляться термическим напряжениям при многократных теплосменах).

При нормальном давлении карбид кремния не имеет температуры плавления. Температура его диссоциации зависит в основном от чистоты продукта, а также от степени совершенства кристаллов и может быть указана в пределах от 2350 до 2700°С.

Газовая фаза над карбидом кремния при высоких температурах содержит в основном атомы кремния, а также молекулы SiC₂ и Si₂C.

Скорость испарения карбида кремния в вакууме может быть оценена по ниже приведенным данным (табл. 3).

Был использован карбид кремния следующего физико-химического состава (табл. 4).

Карбид кремния, который входит в состав металлургических брикетов, взаимодействует с железом и реагирует с образованием ферросилиция по реакции:



начинающейся при температуре 1500 °С. Разрушение карбида кремния идёт до тех пор, пока концентрация кремния в Fe_mSi_n не достигнет 33 %, то есть до образования моносилцида железа состава FeSi .

Карбид кремния реагирует также с закисью железа по реакции:



начинающейся при 1400 °С и при 1500 °С идущей до конца.

Карбид кремния с закисью железа реагирует с образованием кремнезёма по реакции:



Причём образование SiO_2 идёт через SiO .

Примерный состав аспирационной пыли представлен в табл. 5.

Табл. 1. Термодинамические характеристики карбида кремния

Температура, °К	Теплота образования ΔH^0_{298} , кДж/моль	Энтропия S_{298} , Дж/моль×град	Свободная энергия образования ΔG , кДж/моль	Мольная теплоемкость C_p , Дж/моль×град
298	-69,03	16,61	-66,65	27
1000	–	–	-61,25	48
2000	–	–	-44,60	56
3000	–	–	-8,66	64

Табл. 2. Теплофизические свойства карбида кремния

Температура, °К	Относительное расширение при нагреве от 300°К, %	Коэффициент теплопроводности образцов, Вт/м×град	
		рекристаллизованных	Плотных горячепрессованных
300	–	~ 42	~ 260
1000	0,31	~ 20	~ 50
1500	0,60	~ 13	~ 30
2000	0,80	–	–
2500	1,20	–	–

Примечание: Средний термический коэффициент линейного расширения в интервале 300–2000 °К составляет $4,7 \times 10^{-6}$.

Табл. 3. Скорость испарения карбида кремния в вакууме

Температура, °С	1450	1600	1750	1900	2100
Скорость испарения, кг/м ² с	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	19^{-2}

Был разработан режим термообработки с температурой от 50 °С до 130 °С.

Химический состав металлургических брикетов из карбида кремния должен соответствовать табл. 6.

Табл. 4. Физико-химический состав карбида кремния черного F10 – 14 (магнитная фракция)

Показатели	Карбид кремния черный F10 – 14 (магнитная фракция)
Насыпная плотность, г/см ³	1,22
Содержание магнитной фракции, %, не более	3
Минеральный состав, об. %: - карбид кремния (SiC)	3
- аморф	97

Табл. 5. Зерновой состав аспирационной пыли

Наименование показателей	Состав, масс. %, зерновой	Остаток на сетке,					Проходит, %
		100 мкм	80 мкм	63 мкм	50 мкм	40 мкм	
Насыпной вес, г/см ³	0,79	7	4	9	18	30	-40 мкм
Магнитная фракция, %	0,4	7	4	9	18	30	32

Табл. 6. Химический состав металлургических брикетов

SiC, %, не менее	Al ₂ O ₃ , %, не более	Fe ₂ O ₃ , %, не более
75	3,0	2,0

Массовая доля влаги в металлургических брикетах из карбида кремния должен быть не более 0,5 %.

Выводы

Расширение применения металлургических брикетов, частично заменяющих шихтовые материалы, особенно самые дорогие – ферросплавы, является актуальным.

Применение металлургических брикетов обусловлено необходимостью постоянного улучшения качества стали при наименьших затратах на её производство. При этом проблемы замены дорогостоящих легирующих добавок и ферросплавов с одновременной утилизацией образующихся и накопленных технологических отходов приобретает важное значение. В настоящее время данные материалы вывозятся в пром. отвал, что приводит к прямым материальным затратам и к загрязнению окружающей среды промышленными отходами.

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. - Введ. 1988-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. 10с.
2. **Батаев, А. А.** Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев; Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384с.
3. Современные композиционные материалы: Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Пер. с англ. под ред. И.Л. Светлова. – М.: Мир, 1970. – 672 с.
4. **Братчиков, Ю.А.** Теплотехника окусковывания железорудного сырья. – М.: Металлургия, 1970. – 344с.
5. **Гаршин, А. П.** Абразивные материалы и инструменты : технология производства : учебное пособие / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. - Санкт-Петербург: 2008. - 1009 с.
6. **Варенков, А. Н.** Химическая экология и инженерная безопасность металлургических производств; учебное пособие/ А. Н. Варенков, В. И. Костиков. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 382 с.

Повышение теплопроводности рельсошлифовальных кругов – путь достижения высоких эксплуатационных характеристик инструмента

Орлов И.Ю.^{1*}, Шумячер В. М.¹

¹Аспирант, Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Абразивный инструмент, используемый в настоящее время для обдирочного шлифования с высокими скоростями, при эксплуатации обнаруживает недостаточно высокую теплопроводность. Это определяется возникающими при работе круга термическими напряжениями. При этом увеличивается сила трения, которая отрицательно влияет на коэффициент шлифования, период стойкости, наличие прижогов. Ряд факторов оказывает определённое и закономерное влияние на процесс теплообразования. Знание этих законов позволяет управлять ими, подбирая наиболее благоприятные условия для уменьшения вероятности появления прижогов, что приобретает особое значение при освоении современных прогрессивных методов обработки. Подбор наполнителей осуществлялся на основе анализа физико-химических явлений, протекающих в зоне контакта инструмента и детали, результатов исследований теплонапряжённости процесса шлифования. Регенерированный материал содержит оксид железа.

Ключевые слова: обдирочное шлифование, теплопроводность, оксид железа, торцшлифование.

Improving the thermal conductivity of rail grinding wheels - a way to achieve high tool performance

Orlov I. Yu.^{1}, Shumacher V. M.¹*

¹*Graduate Student, Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

The abrasive tool, which is currently used for rough grinding with high speeds, during operation detects insufficiently high thermal conductivity, this is determined by the thermal stresses that occur during operation of the wheel. In this case, the friction force increases, which negatively affects the grinding coefficient, the durability period, and the presence of burns. A number of factors have a definite and regular effect on the process of heat generation. Knowledge of these laws allows you to manage them, choosing the most favorable conditions to reduce the likelihood of burning, which is of particular importance in the development of modern progressive processing methods. The selection of fillers was carried out on the basis of the analysis of physicochemical phenomena occurring in the contact zone of the tool and the part, the results of studies of the heat stress of the grinding process. The regenerated material contains iron oxide.

Key words: rough grinding, thermal conductivity, iron oxide, face grinding.

Введение

Образование прижогов связано с тепловыми явлениями, возникающими в процессе шлифования металлов. Как известно, процесс шлифования характеризуется повышенным тепловыделением, образованием значительных контактных температур в зоне резания, мгновенностью нагрева и высокой концентрацией теплоты в тончайших поверхностных слоях шлифуемых деталей. Температура в зоне резания колеблется в широких пределах,

от 250 до 1600 °С, при этом нагрев металла достигает критических точек аллотропических изменений. Нагретый металл, взаимодействуя с охлаждающей средой, приобретает повышенную или пониженную твёрдость поверхностного слоя.

При обработке рельсов в пути применяется силовое обдирочное шлифование, которое обеспечивает высокие усилия прижима к рельсу, поэтому уделяется большое внимание созданию нового абразивного материала на основе эвтектического сплава глинозёма и оксида циркония. Основой технологии изготовления кругов является создание рецепта, обеспечивающего высокие эксплуатационные показатели.

Известно, что абразивный инструмент, используемый в настоящее время для обдирочного шлифования с высокими скоростями, при эксплуатации обнаруживает недостаточно высокую теплопроводность. По литературным данным [1], для повышения теплостойкости абразивного инструмента на органической связке используются различные наполнители: пирит, частицы серебра, соли сернокислого аммония, фторбората калия. Известно, что возникающие при работе круга термические напряжения обусловлены его низкой теплопроводностью.

Результаты экспериментальных исследований

На кафедре ВСТПМ ВПИ были проведены работы по исследованию влияния различных наполнителей на теплопроводность рельсошлифовальных кругов, в том числе отходов производства. В данном случае были исследованы шламы подшипникового завода ВПЗ.

Состав шламов определяется характеристикой абразивного инструмента, технологической жидкостью, маркой обрабатываемого материала. Шламы загрязняют биосферу, причём доза маслосодержащих вод (отработанные водосмешиваемые СОЖ, утечки из смазочных систем и т.д.) составляет до 60 % общезаводского стока. Разлив, разбрызгивание, закачивание СОЖ в подземные горизонты приводят к загрязнению почвы, водоёмов и воздуха. Кроме того, при этом безвозвратно теряется и та часть компонентов (включая воду), которую можно было бы извлечь и использовать повторно для приготовления новой партии СОЖ либо для других целей.

Для решения проблем использования отходов на кафедре ВСТПМ ВПИ были проведены следующие экспериментальные работы:

- 1) решение вопроса использования отходов производства ВПЗ в виде шламов путем извлечения абразивной составляющей ранее безвозвратно теряемой, с целью снижения себестоимости торцешлифовальных кругов;
- 2) изучение теплопроводности различных материалов, для использования их в качестве наполнителя, увеличивающего прочностные характеристики торцешлифовальных кругов (круги типа ПН и рельсошлифовальные круги).

Для решения вопроса переработки образующихся шламов была разработана технологическая цепочка, позволяющая получить материал, имеющий следующие качественные показатели (табл. 1, табл. 2).

Табл. 1. Состав шламов ВПЗ

Состав материала	Содержание, %
1. Абразивное зерно (25А, 14А, минимальная доля 54С и 63С)	5 %
2. Металлическая стружка (Fe ₂ O ₃)	93%
3. Сколотые абразивные зёрна (обточка)	2 %

Для исследования теплопроводности изготавливались цилиндрические образцы с наружным диаметром 60 мм, внутренним 18 мм и высотой 60 мм с различными добавками и термообрабатывались по режиму с максимальной температурой 180°С.

В перечень материалов для составления рецептов был включен регенированный материал, являющийся переработанным шламом с химическим составом согласно табл.3.

Табл. 2. Химический состав шламов ВПЗ

Наименование показателя	Значение показателя
1. Внешний вид	Сыпучий порошок
2. Содержание сульфидной серы, %	2,0
3. Содержание Fe ₂ O ₃ , %	93
4. Содержание влаги, %	2,0

Табл.3. Рецептуры образцов для определения теплопроводности

Наименование материала	Рецептура, % об.						
	Образец №						
	1	2	3	4	5	6	7
	Плотность образцов, кгс/м ³						
	3270	3220	3210	3220	3330	3340	3590
Циркониевый электрокорунд	62	62	62	62	62	60	60
Увлажнитель – жидкий бакелит	1	1	1	1	1	1	1
Связующее – СФП-0119А	24	24	24	24	24	25	25
Пирит	9	7	7	7	7	–	–
Регенированный материал	–	–	–	–	1	–	10
Железный порошок	–	–	–	–	–	9	–
Фторборат калия	–	1	–	–	–	–	–
Хлористый натрий	–	–	1	–	–	–	–
Сернокислый аммоний	–	–	–	1	–	–	–
Негашеная известь	2	3	3	3	3	3	2
Криолит	2	2	2	2	2	2	2

Теплопроводность определялась по методике, разработанной ВолжскВНИИАШ на специальной установке с симметричным потоком тепла (рис. 1).

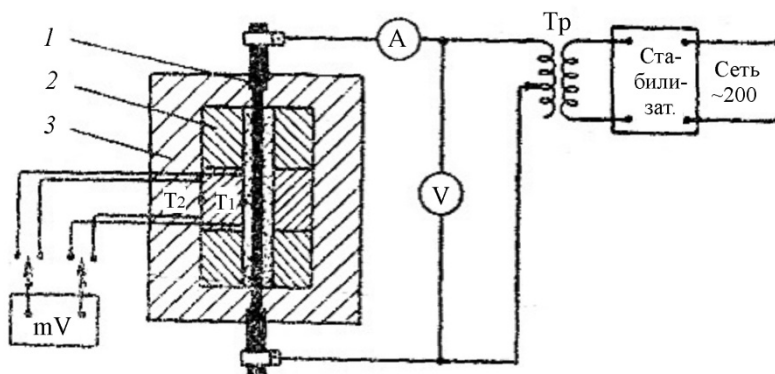


Рис. 1. Установка для определения теплопроводности

В установке тепловой поток создаётся силитовым или нихромовым нагревателем 1, расположенным внутри образца 2. Образец с нагревателем размещают в теплоизоляционном кожухе 3, выполненном из ультралегковеса марки БЛ-04.

Пространство между внутренней поверхностью образца и нагревателем, а также небольшие зазоры между образцом и кожухом заполняли кварцевым песком. Испытуемый образец состоял из трёх одинаковых по своим свойствам и размерам цилиндров, плотно притертых друг к другу. В среднем цилиндре пропиливали канавки глубиной 1 – 1,5 мм, в них закладывали платино-родиевые термпары толщиной 0,3 мм, после чего канавки замазывали.

Для обеспечения симметричности теплового потока нагреватель устанавливали строго по оси цилиндров.

Нагрев образцов осуществлялся через стабилизатор и автотрансформатор. Величину теплового потока определяли измерением мощности тока посредством амперметра и вольтметра класса точности 1,0. Перепад температур между внутренней и внешней поверхностью образцов измеряли посредством вмонтированных термопар, потенциометра типа ППТН и зеркального гальванометра М-17/4.

Температура на горячей и холодной поверхностях цилиндров в течение 30 мин. поддерживалась постоянной: отклонения результатов трёх измерений, приводимых через каждые 10 мин. от средней величины, не превышали 1 – 1,5 %. Затем температуру повышали и после установления стационарного потока производили измерения.

Расчет коэффициента теплопроводности проводили по формуле (1):

$$\lambda_{t_{\text{ср}}} = \frac{0,864IV \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l(t_1 - t_2)} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}} \right], \quad (1)$$

где I – сила тока, А; V – напряжение, В; r_1 и r_2 – расстояние горячих спаев термопар от оси цилиндра, м; l – длина рабочей части нагревателя, м; t_1 и t_2 – температура образцов на расстояниях r_1 и r_2 .

Теплопроводность образцов, рассчитанная по методу двух температурно-временных интервалов, была занесена в табл.4.

По данным рецептам были изготовлены опытные образцы в виде восьмёрок и испытаны на определение предела прочности при разрушении. Данные представлены в табл. 5.

Табл. 4. Теплопроводность образцов, по методу двух температурно-временных интервалов

№ рецептуры (состав рецепта в табл. 3)	λ , Вт / М. град	λ , ккал / м.ч.град
1	0,57	0,47
2	1,89	1,69
3	1,65	1,46
4	1,51	1,41
5	1,87	1,68
6	2,67	2,22
7	3,11	2,52

Табл. 5. Физико-механические характеристики опытных образцов

Наименование показателя	Единицы измерения	Номер рецепта						
		1	2	3	4	5	6	7
Разрушающее напряжение при растяжении	кгс/см ²	121	115	129	129	131	139	138

Вывод

Наибольшей механической прочностью и теплопроводностью обладают образцы, изготовленные по рецептам № 6, 7, где наполнителем является железный порошок либо регенерированный материал.

Для изготовления торцешлифовальных кругов в качестве наполнителя был выбран регенерированный материал, позволяющий снизить себестоимость круга на 15%, а также сделать шаг к решению экологической проблемы.

Список литературы

1. Патент Нидерландов № 133839. Опубликовано 17.04.72.
2. Патент США № 3.547.609 (NortonCo). Опубликовано 15.12.70.
3. Масса для изготовления абразивного инструмента / А. К. Цокур [и др.] // Авторское свидетельство № 595738. «Бюллетень изобретений». 1978. № 8.
4. Патент США №2. 468. 319. Опубликовано 18.11.67
5. Альтшулер Л.В., Сперанская М.П. Структурные превращения в поверхностных слоях заклённой стали под влиянием шлифования, Вестник металлопромышленности, 1940, №1
6. Островский В.И. Режущие свойства шлифовальных кругов на бакелитовой связке со специальными наполнителями // Абразивы. Экспресс-информ. – М.: НИИМАШ, 1969. – № 3. – С. 29 – 36.
7. Райт В.В. Работоспособность торцевых высокопористых кругов на бакелитовой связке // Абразивы. Экспресс-информ. – М.: НИИМАШ, 1981, – № 1. –С. 13 – 16.
8. **Орлов, И.Ю.** Повышение эффективности операции торцешлифования сталей бакелитовым инструментом путем подбора наполнителей, снижающих теплонапряженность процесса (статья) Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2015. - № 6 (219) с.7-10.
9. **Орлов И. Ю.** Исследование процессов, происходящих при реакции поликонденсации феноло-формальдегидных смол/ И. Ю. Орлов, Т.Н. Орлова //Теория, технология и оборудование для производства абразивного инструмента : сб. науч. тр. - Челябинск : Изд- во ЮУрГУ, 2003. с.115-118.
10. **Орлов, И. Ю.** Нейтрализация вредных выделений при производстве инструмента на фенолоформальдегидном связующем // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009 : сборник статей Международной научно-технической конференции / Волгоградский гос. архитектурно-строит. ун-т, Волжский ин-т строительства и технологий [фил.] ВолгГАСУ , Волгоград, 2010 – С. 123 – 125.
11. **Орлов, И.Ю.** Исследование влияния двухстадийного смешивания компонентов формовочной смеси на технологичность смеси (получение свободно-текучих формовочных смесей) и физико-механические свойства абразивного инструмента на бакелитовой связке. Абразивное производство : сборник научных трудов / И. Ю. Орлов, Т.Н. Орлова // Уральский научно-исслед. ин-т абразивов и шлифования ; [редкол.: Б. А. Чаплыгин (отв. ред.), В. Г. Шеркунов, А. Г. Морозова], Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004, С. 49-51.
12. Крюков С.А., Шумячер В.М. Повышение стабильности и эффективности абразивных инструментов: монография // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 180 с.
13. Шумячер В. М., Славин А. В., Крюков С. А. Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов : монография / ВолгГАСУ. – 2015. – 134 с.
14. Орлов, И.Ю., Орлова Т.Н. Методика расчёта удельного количества летучих веществ при термообработке абразивного бакелитового инструмента Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки: сб. ст. Всерос. совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов. / Волжский ин-т строит. и технол. филиал ВолгГАСУ – Волгоград, Волжский, 2007.

Влияние гранулометрического состава абразивного инструмента на эффективность шлифования

Байдакова Н. В.^{1*}, Крюков С. А.², Орлов И.Ю.²

¹Доцент, Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Волжском
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

²Профессор, Аспирант, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский
государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

На основе экспериментальных и аналитических исследований установлено, что эффективность процесса шлифования в целом зависит от эффективности резания каждым единичным зерном. Для этого необходимо, чтобы единичное зерно обладало благоприятной, для данного случая резания, геометрией. Форма зерна подразделяется на изометричную, промежуточную и пластинчатую. Исследования различных способов помола абразивных частиц показывают, что изменение характера воздействия на измельчаемый материал существенно сказывается на форме частиц. От формы зерна зависит ряд параметров: сила его сцепления со связкой, абразивная способность и механическая прочность зерна. Повысить режущие свойства и износостойкость круга можно за счет классификации по форме, применяя определенную форму на разных операциях. Оценка свойств шлифовальных зёрен только по параметрам «марка абразива» и «зернистость» (ГОСТ 3647–80) не гарантируют получение качественных, конкурентоспособных отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке.

Ключевые слова: абразивное зерно, форма зерна, шлифование, измельчение, эффективность.

The effect of particle size distribution of an abrasive tool on grinding efficiency

Baydakova N. V.^{1}, Krukov S. A.², Orlov I. Yu.²*

¹Assistant Professor, Volzhsky Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education National Research University Moscow Power Engineering Institute; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

²Professor, Graduate Student, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

Based on experimental and analytical studies, it is established that the efficiency of the grinding process as a whole depends on the cutting efficiency of each individual grain. To do this, it is necessary that a single grain has a favorable geometry for this case of cutting. The grain shape is divided into isometric, intermediate, and lamellar. Studies of various methods of grinding abrasive particles show that changing the nature of the impact on the material being crushed significantly affects the shape of the particles. A number of parameters depend on the shape of the grain: the strength of its adhesion to the bundle, the abrasive ability and the mechanical strength of the grain. You can improve the cutting properties and wear resistance of a circle by classifying it by shape, using a specific shape for different operations. Evaluation of the properties of grinding grains only by the parameters "abrasive grade" and "grit" (GOST 3647-80) does not guarantee the production of high-quality, competitive cut-off grinding wheels on a bakelite bundle.

Key words: *the abrasive grains, the shape of the grain, grinding, crushing, efficiency.*

Введение

В машиностроительной промышленности шлифование в большинстве случаев является конечной операцией, которая должна обеспечить необходимое качество поверхности, точность размеров и геометрической формы, что оказывает большое влияние на долговечность работы узлов и машины в целом. Поэтому вопросы достижения необходимого качества поверхности и точности обработки изделия имеют большой практический и теоретический интерес.

Основная часть

Анализируя эффективность применения шлифовальных кругов, мы пришли к выводу, что, несмотря на широкое распространение, они лишь частично используют свой потенциал. Одной из основных причин такого положения является неупорядоченность формы абразивных зерен в теле шлифкругов. Произвольная форма зерен формирует произвольную и неблагоприятную геометрию их режущих микроклиньев. Как следствие, часть зерен не участвует в совокупном процессе микрорезания вообще, либо принимает слабое участие (рисунок 1). Неупорядоченная форма зерен формирует также дефекты структуры шлифовальных кругов и, в результате, снижает их физико-механические и режущие свойства.

Эффективность процесса шлифования в целом зависит от эффективности резания каждым единичным зерном: чем лучше работает каждое отдельное зерно, тем выше интегральный показатель – работоспособность инструмента в целом. Однако, для того чтобы любое зерно работало с полной отдачей, необходимо чтобы оно обладало благоприятной геометрией для конкретного случая резания. В свою очередь, геометрия зерна определяется двумя главными факторами – формой и расположением в теле инструмента. Но анализ показывает, что эти факторы в практике изготовления отрезных кругов, как правило, остаются бесконтрольными и незадействованными. Решение проблемы по упорядочению формы зерен открывает перспективу более полного использования их потенциальных возможностей и повышения на этой основе эксплуатационных показателей инструментов в целом и эффективность процесса шлифования.

От формы зерна зависят как сила его сцепления со связкой, так и абразивная способность и механическая прочность. Повысить режущие свойства и износостойкость круга можно за счет классификации по форме, применяя определенную форму на разных операциях.

В соответствии с требованиями ГОСТ 3647-80, 28818-90 зерно подразделяется после отсева с учетом размеров сторон ячеек сит. При отсеве в соответствии с ГОСТ имеет место большой (от 25 до 28%) разброс размеров зерен одной зернистости.

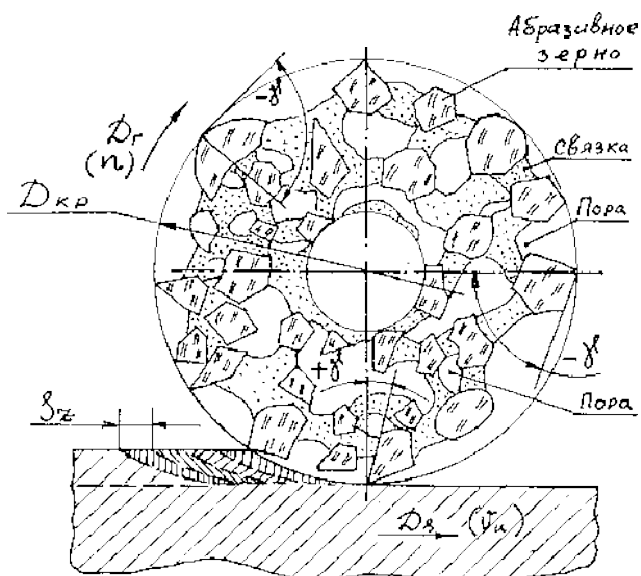


Рис. 1. Схема резания и расположения абразивных зерен, пор и связки в абразивном инструменте при шлифовании

Форма частиц, образующихся при измельчении абразивного материала, помимо свойств материала зависит от типа измельчающего устройства и технологии измельчения [1]. Исследования различных способов помола абразивных частиц показали, что изменение характера воздействия на измельчаемый материал (удар, истирание, скалывание и др.) существенно сказывается на форме частиц.

Например, в электрокорунде белом среднезернистые фракции (от 200 до 800 мкм) содержат 50 – 65% изометричных частиц, а мелкозернистые (от 50 до 160 мкм) 25 – 45%. Подобная картина наблюдается и для других видов абразивных материалов. Следует также отметить, что механическая прочность частиц различных форм и их режущая способность в инструменте будут значительно отличаться друг от друга.

Серийно изготовленный шлифовальный круг включает хаотично расположенные в его связке абразивные зерна изометричной, промежуточной, пластинчатой форм конфигурации.

Количественная оценка формы зерна, предусмотренная ГОСТ 9206–70 и используемая многими авторами, производится определением общепринятого параметра – «коэффициента формы» зерна. Наиболее объективными способами его определения являются следующие: Г. М. Гаврилов [2], рассматривая зерно как эллипсоид вращения, под коэффициентом формы понимает соотношение его меньшей и большей осей; А.Н. Коротков [3] предлагает определять коэффициенты формы как отношение диаметра описанной окружности вокруг проекции зерна к диаметру вписанной окружности:

$$K_{\phi} = d_{\text{оп}} / d_{\text{вп}}. \quad (1)$$

Изометричная форма зерна при этом соответствует $K_{\phi} = 1,0 \div 1,4$, промежуточная $K_{\phi} = 1,4 \div 2,2$ и пластинчатая – $K_{\phi} = 2,2 \div 3,0$

Следует также отметить, что все изометричные частицы, удовлетворяющие условию $K_{\phi} = 1,0 \div 1,4$, по форме относительно близки друг к другу и имеют объемную фигуру. Неизометричная часть материала представляет набор многообразных форм частиц: пластин, имеющих заметную толщину, тонких пластин, игольчатых и т.д. Очевидно, что механическая прочность частиц указанных форм и их режущая способность в

инструменте будут значительно отличаться друг от друга.

Результаты анализа по этому параметру нормального (13А и НК), белого (ЕК), хромотитанистого (92А) электрокорундов производства Юргинского абразивного завода и Германии (таблица 1) убедительно подтверждают факт значительного различия по форме зерен одного номера зернистости.

Табл. 1. Распределение зерен электрокорундов по форме

Марка	Коэффициент формы зерна, K_ϕ				
	1,0 ÷ 1,4	1,4 ÷ 1,8	1,8 ÷ 2,2	2,2 ÷ 2,6	2,6 ÷ 3,0
	Количество зерен в %				
13 А 80	14	49	31	5	1
13 А 40	8	56	23	5	8
92 А 40	3	44	41	7	5
НК (80)	0	25	31	25	19
ЕК (80)	1	30	37	22	10
НК (40)	4	12	21	31	32
ЕК (40)	5	18	19	17	41

Для всех электрокорундов характерно распределение по форме, описываемое кривой Гаусса. Основная масса зерен соответствует диапазону $K_\phi = 1,4 \div 2,6$.

Специфической особенностью абразивных зерен как микрорежущих элементов является случайный, вероятностный характер их геометрических угловых параметров. Причина этого кроется в неупорядоченном, случайном пространственном положении зерен в абразивном инструменте. Поэтому для получения объективной информации требуется получить максимально возможные массивы данных по геометрическим параметрам режущих кромок, используя свободное шлифовальное зерно.

Результаты таких объемных измерений, проведенных по специальным методикам, приведены в работе [3]. Выполненные измерения на режущих кромках всех выступов, расположенных по периметру зерна, позволили построить кривые распределения значений переднего γ и заднего χ углов. Наибольшие значения относительной частоты m наблюдаются для передних углов зерен электрокорунда 13 А при $\gamma = (72 - 69)^\circ$, а заднего угла - $\chi = 12^\circ$.

Табл. 2. Характеристика зерен нормального электрокорунда

Марка	Длина контура, мм		γ , град	Количество дефектов		
	теоретическая	фактическая		трещины	раковины	выступы
13А125	4,49	9,63	72	4	3	8
13А80	2,83	4,60	71	3	5	6
13А40	1,41	3,15	69	2	6	5

Из данных таблицы 2 следует, что фактическая длина контура зерна в 1,62 – 2,23 раза превышает теоретическую. Это свидетельствует, прежде всего, о весьма развитой поверхности зерен, возрастающей с повышением зернистости. Изучение шлифов зерен электрокорунда 13 А под растровым электронным микроскопом РЭМ-200 [4] при увеличении до 300 раз позволило получить данные о микродефектах, разупрочняющих зерно. В частности, выступы включают в себя пластинчатые микрообъекты размером 50 – 80 мкм, чешуйчатые наложения (15 – 20 мкм), иглообразные выступы (4 – 8 мкм).

Заключение (Выводы)

Оценка свойств шлифовальных зёрен только по параметрам «марка абразива» и «зернистость» (ГОСТ 3647–80) не гарантирует получение качественных, конкурентоспособных отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке, так как зёрна даже одного номера зернистости имеют различную конфигурацию, изменяющуюся от изометрической до игольчатых разновидностей. Развёрнутых и полных исследований по вопросу влияния формы зерна на эксплуатационные характеристики шлифовальных кругов до настоящего времени нет.

Список литературы

1. **А. С. Полубелова** Производство абразивных материалов./ А. С. Полубелова, В. Н. Крылов, В. В. Карлин и др. ; под ред. В. Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1968. – 128 с.
2. **А. Н. Резников** Абразивная и алмазная обработка материалов / А. Н. Резников, Г. М. Гаврилов и др. ; под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 222 с.
3. **Коротков, А. Н.** Эксплуатационные свойства абразивных материалов : Монография / А. Н. Коротков. – Красноярск: изд-во Красноярского университета, 1992. – 129 с.
4. **Байдакова, Н.В.** Получение шлифматериалов и других сыпучих материалов с заданной формой зёрен [Электронный ресурс] / Н.В. Байдакова, С.А. Крюков // 16-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 23-27 января 2017 г.). В 2 ч. Ч. 2 / под ред. С.И. Благинина ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2017. - С. 195-199. – Режим доступа : http://www.volpi.ru/files/science/science_conference/16npkpps/16npkpps_pt2.pdf.
5. **Крюков, С.А.** Dependence of Roughness Parameters of Workpiece Surface on Structural Characteristics of Grinding Discs [Электронный ресурс] / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer, 2019. – P. 1421-1426. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-95630-5> . – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME).
6. **Крюков, С.А.** State of Problem of Technological Support of Workpiece Surface Quality During Grinding [Электронный ресурс] / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова, П.Ю. Бочкарев // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer, 2019. – P. 1427-1433. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-95630-5> . – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME).
7. **Шумячер, В.М.** Теория, технология и практика совершенствования абразивных инструментов: учеб. пособие / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова. - Санкт-Петербург, 2019. - 212 с.
8. **Байдакова, Н.В.** Закономерность формирования геометрических параметров зёрен в шлифзерне и других измельчённых материалах / Н.В. Байдакова, С.А. Крюков, В.М. Шумячер // Тяжёлое машиностроение. - 2017. - № 11-12 (ноябрь – декабрь). - С. 35-37.

Универсальная математическая модель для прогнозирования результатов процесса виброклассификации абразивных материалов

Байдакова Н. В.^{1*}, Шумячер В.М.²

¹Доцент, Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г.Волжском
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

²Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

На основе решения задачи о движении слоя частиц материала по вибрирующей шероховатой поверхности в режиме непрерывного подбрасывания нами рассмотрена теория классификаторов с плоской декой при постоянном и переменном углах вибрации вдоль рабочей поверхности. Предложена методика определения набора значений реального параметра вибросепарации для виброклассификатора типа ВДК. Полученная универсальная математическая модель для расчета траекторий перемещения условных частиц по поверхности вибротехники в реальных условиях многослойного движения позволила решать вопросы повышения производительности вибросепараторов при классификации абразивных материалов по размеру частиц, а также прогнозировать результаты процесса виброклассификации. На базе математической модели разработана автоматизированная система, которая дает возможность обоснованно прогнозировать и определять номера сходов для получения номеров зернистости требуемого зернового состава и управлять этим процессом в зависимости от зернового состава исходного материала.

Ключевые слова: сепарация, классификация, моделирование, виброклассификатор, абразивные частицы.

Mathematical modeling of the process of vibration separation of abrasive grain by particle size

Baydakova N. V.^{1}, Shumyacher V.M.²*

¹ Assistant Professor, Volzhsky Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education National Research University Moscow Power Engineering Institute; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

² Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

Based on the solution of the problem of the movement of a layer of material particles on a vibrating rough surface in the mode of continuous tossing, we consider the theory of classifiers with a flat deck at constant and variable vibration angles along the working surface. A method is proposed for determining the set of values of the real parameter of vibration separation for a vibroclassifier of the VDC type. Received universal mathematical model to calculate the path of the conditional particle surface vibrotech in real conditions, multi-layered movement helped to solve the issues of improving the performance of vibroseparators in the classification of abrasives particle size and predict the results of the process of fibroblastami. On the basis of the mathematical model, an automated system has been developed that makes it possible to reasonably predict and determine the numbers of gatherings to obtain the grain size numbers of the required grain composition and manage this process depending on the grain composition of the source material.

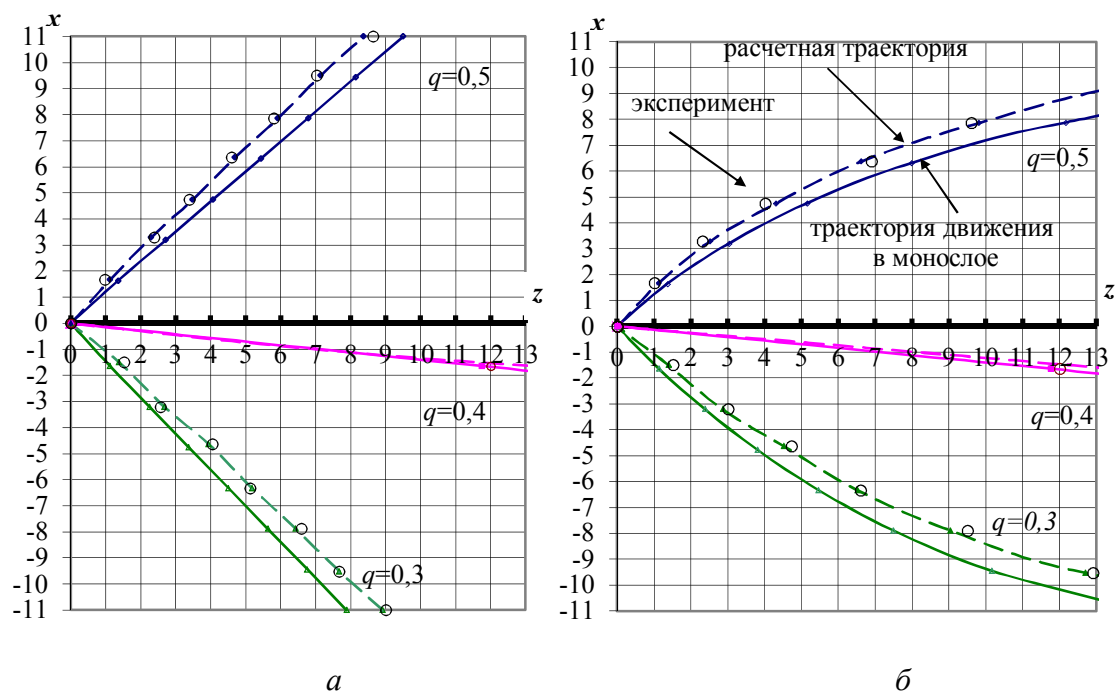
Key words: *separation, classification, modeling, vibration classifier, abrasive particles.*

Введение

В настоящее время достигнуты заметные успехи в разработке аппаратуры и технологии безситовой виброклассификации сухих мелкодисперсных сыпучих моносмесей, в том числе абразивных шлифпорошков и шлифзерна. Также достаточно полно разработана теория классификации сыпучих материалов при режимах с непрерывным подбрасыванием с постоянным и переменным углом вибрации и производительностях, при которых движение частиц по деке осуществляется в монослое.

В то же время теория вибросепарации, отражающая не только качественно, но и количественно реальный процесс разделения по крупности частиц на промышленных вибросепараторах до настоящего времени не нашла должного развития.

Одним из таких вопросов является вопрос классификации сыпучих материалов в режиме с непрерывным подбрасыванием на вибрирующих поверхностях с постоянным и переменным углом вибрации при реальной производительности [1], соответствующей требованиям промышленной классификации (рисунок 1). Решение данного вопроса позволит проводить классификацию частиц различной крупности в оптимальных режимах и, соответственно, повысить эффективность процесса разделения, а также увеличить выход готового продукта, соответствующего ГОСТ 3674-80.



a – постоянный угол вибрации; *б* – переменный угол вибрации

Рис.1. Траектории движения частиц по вибрирующей поверхности

Д. А. Плиссе [2] выделяет два типа классификаторов. Процесс разделения по крупности частиц на двух указанных конструкциях классификации протекает практически одинаково.

Основная часть

На основе решения задачи о движении слоя частиц материала по вибрирующей шероховатой поверхности в режиме непрерывного подбрасывания нами рассмотрена

теория классификаторов второго типа с плоской декой при постоянном и переменном углах вибрации вдоль рабочей поверхности.

Частицы предполагаются относительно тяжелыми, так что влиянием воздуха на их перемещение можно пренебречь.

Проведенные эксперименты по определению траекторий частиц при производительности оборудования, соответствующей требованиям промышленной классификации, когда частицы значительную часть пути движутся стесненно, показали их значительное отличие от траекторий, полученных при использовании $q_{0i} = \text{const}$ – движение частиц в монослое (рисунок 1), где q_{0i} – параметр вибросепарации.

При повышении производительности по исходному питанию частица значительную часть пути по деке движется в стесненном состоянии, что приводит к увеличению классического параметра вибросепарации q_{0i} для изолированной частицы. При этом параметр вибросепарации q_{pi} , назовем его реальным, является не постоянной величиной, а переменной вдоль траектории перемещения частиц по поверхности деки.

В зонах *A*, *B* и *B* (рисунок 2) q_{pi} оказывается по величине большим, чем параметр вибросепарации q_{0i} , определенный классическим способом, постепенно уменьшаясь от зоны *A* к зоне *Г*. И в зоне *Г* реальный параметр вибросепарации оказывается равным q_{0i} .

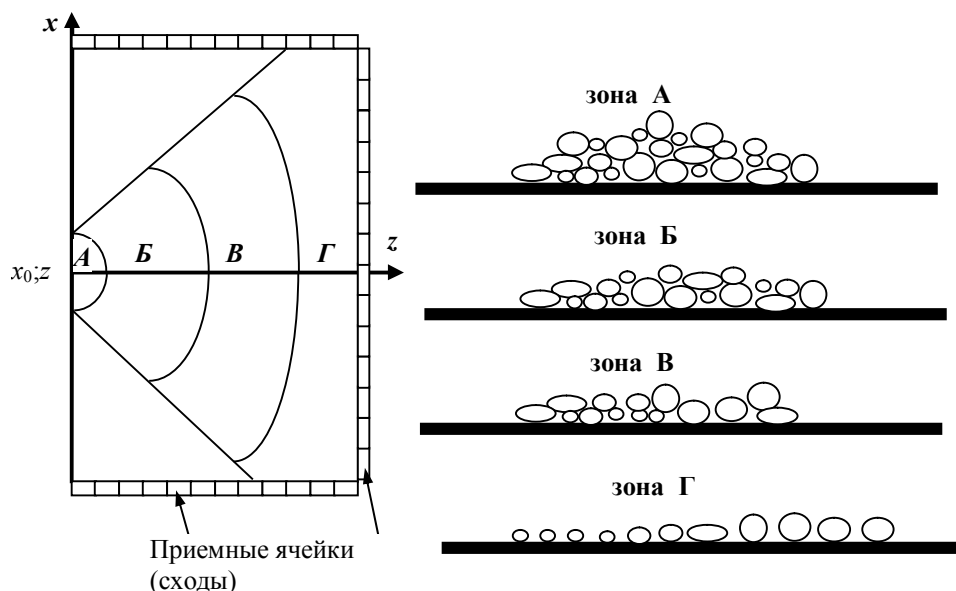


Рис. 2. Зоны изменения условного параметра вибросепарации вдоль траектории перемещения частиц по поверхности деки

Нами предложена новая методика определения набора значений реального параметра вибросепарации. После математической обработки результатов экспериментов были получены новые зависимости. Сравнение экспериментальных и расчетных значений для реального параметра вибросепарации показали хорошую корреляцию. Имея дифференциальное уравнение «осредненной» траектории движения частицы по вибрирующей поверхности сепаратора при движении с переменным углом вибрации и с постоянным углом вибрации, с учетом полученных зависимостей получены наборы значений реального параметра вибросепарации и новые траектории на примере исходных значений, представленные на рисунке 1.

Полученная универсальная математическая модель для расчета траекторий перемещения условных частиц по поверхности вибродеки в реальных условиях многослойного движения позволила решать вопросы повышения производительности

вибросепараторов при классификации абразивных материалов по размеру частиц, а также прогнозировать результаты процесса виброклассификации.

Используя полученные уравнения, описывающие траектории движения частиц по поверхности деки, находим для каждой фракции координату схода, в котором траектория движения частиц пересекает периметр деки. В этом сходе находится максимум кривой распределения для данной фракции.

Изучено распределение частиц сепарируемого по крупности материала по периметру вибродеки в зависимости от ее параметров.

На основе объединения теоретических основ вибросепарации и эффектов, возникающих на деке при многослойном режиме движения частиц полидисперсной смеси, разработана *Математическая модель суммарного распределения фракций по периметру деки* [3]:

$$\sum_{i=1}^j P_i(z) = P_{0i} \cdot e^{-(Z_1; Z_2)^2}, \quad (1)$$

где P_{0i} – весовое количество фракции подаваемое на деку; $j = 5$ или 6 в зависимости от вида (П; Н; Д) номера зернистости; $Z_1; Z_2$ – из формул, описывающих зависимость суммарного распределения одной фракции по периметру деки.

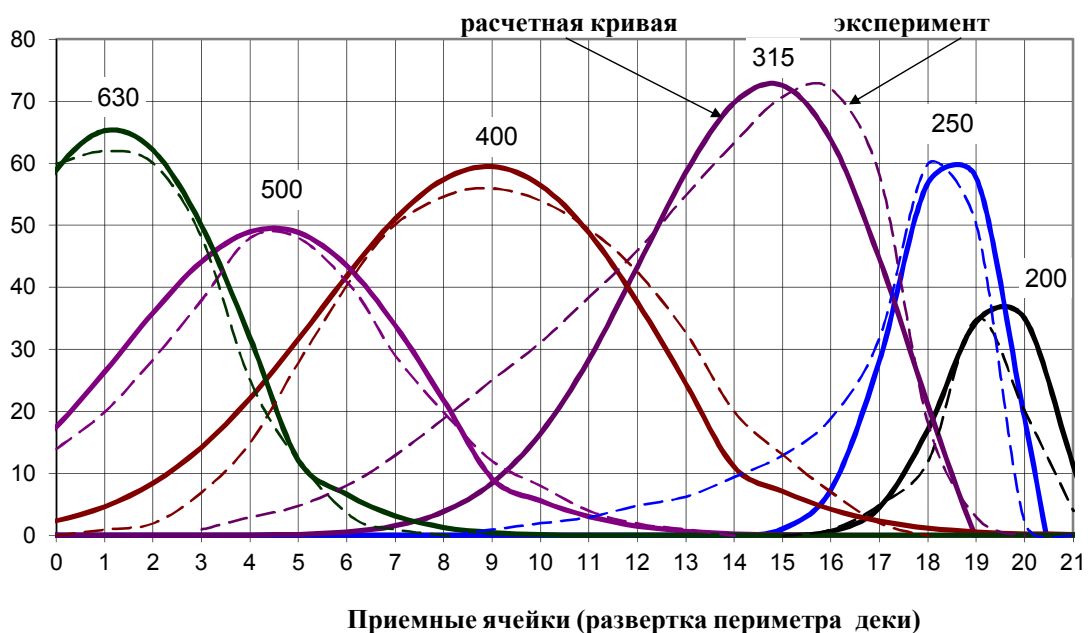


Рис.3. Результаты экспериментальных и аналитических исследований кривых суммарного распределения для многофракционной смеси

Заключение

Полученная математическая модель реального процесса классификации по размеру на виброклассификаторе типа ВДК для многофракционной смеси по периметру деки с учетом корректировки коэффициентов показывает хорошую корреляцию с реальной картиной классификации, представленной в известных работах (рисунок 3), а также позволяет прогнозировать результаты процесса виброклассификации и с наименьшими затратами времени разрабатывать технологические процессы классификации сухих смесей с необходимой производительностью и качеством готовых продуктов в

соответствии с ГОСТ 3647 – 80.

На базе математической модели разработана автоматизированная система, запатентована программа [5], которая дает возможность обоснованно прогнозировать и определять номера сходов для получения номеров зернистости требуемого зернового состава и управлять этим процессом в зависимости от зернового состава исходного материала, позволяя избежать длительного и дорогостоящего экспериментального определения необходимых номеров ячеек (сходов).

Список литературы

1. **В.А. Назаренко**, Исследование и разработка систем автоматизации вибрационных классификаторов : дисс. ... канд. технич. наук/ В. А Назаренко. – Л., 1978.
2. **Д.А. Плис**, Классификация шлифзерна и шлифпорошков на вибрирующей поверхности / Д. А. Плис // Труды ВНИИАШ – М. : Машиностроение, 1966 .– № 3. – С. 6 – 9.
3. **Н.В. Байдакова** Повышение эффективности шлифования путем применения инструмента из классифицированного по размеру и по форме абразивного зерна: дисс. ... канд. технич. наук / Н. В. Байдакова. – Саратов, 2006.
4. **Н.В. Байдакова** Повышение эффективности абразивной обработки за счет применения инструмента с классифицированным по форме зерном / Н.В. Байдакова, В.М. Шумячер // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сб. статей. - Волжский: ВИСТех, 2004.
5. **Н.В. Байдакова** Программа выбора технологических параметров промышленного виброклассификатора типа ВДК / Байдакова Н.В., Назаренко В.А., Крюков С.А. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611257, 26.01.2018. Заявка № 2017662405 от 30.11.2017.
6. **Крюков, С.А.** Анализ способов импрегнирования абразивных инструментов расплавом серы / С.А. Крюков, В.М. Шумячер, Н.В. Байдакова // Тяжёлое машиностроение. - 2019. - № 4. - С. 24-27.
7. **Крюков, С.А.** Определение параметров термообработки абразивных инструментов на керамической связке / С.А. Крюков, В.М. Шумячер, Н.В. Байдакова // Вестник машиностроения. - 2019. - № 8. - С. 49-51.
8. **Шумячер, В.М.** Теория, технология и практика совершенствования абразивных инструментов: учеб. пособие / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова. - Санкт-Петербург, 2019. - 212 с.
9. **Крюков, С.А.** Улучшение функциональных свойств шлифовальных кругов путём их термообработки и импрегнирования / С.А. Крюков, В.М. Шумячер, Н.В. Байдакова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2019. - Т. 15, № 8 (176). - С. 339-341.
10. **Шумячер, В.М.** Шлифование. Теория и практика. Т.1 Повышение эффективности шлифования путем применения инструмента из классифицированного по размеру и по форме абразивного зерна: монография/ В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова, О.Г. Кулик. – Волгоград: ИУНЛ, 2019. – 233с. – ISBN 978-5-9948-3137-3

Мониторинг качественных показателей абразивных материалов

Савчиц А.В.^{1*}, Шумячер В.М.¹

¹Доцент, Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

В статье приведены методы контроля различных эксплуатационных показателей абразивных материалов, применяемых при производстве абразивного инструмента. Рассмотрены современные и давно уже снятые с производства модели приборов, применяемых для контроля эксплуатационных показателей абразивных материалов как в условиях производства, так и в условиях лабораторий. Дана оценка применимости данных приборов в условия современного производства. Предложены варианты модернизации и улучшения работы приборов.

Ключевые слова: абразивные материалы, эксплуатационные показатели, абразивный инструмент, приборы контроля, разрушаемость зерна, режущая способность, прочность зерен.

Monitoring of quality indicators of abrasive material

Savchits A.V.^{1}, Shumyacher V.M.¹*

¹Assistant Professor, Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

It is difficult to imagine modern production without the use of abrasive tools that allow you to process various materials (grind, polish, etc.). The main properties of abrasive tool determined by the material and properties of grains but not only type of bundle, distribution of grains throughout the tool and technology of making. Mostly abrasive tool is made by prescription technology without taking into account source properties abrasive material. And occur frequently rejection of finished products because of violation of technological norms of production tool. The main performance of characteristics that regulated by different state standard is controlled by special methodics and devices. The rest of characteristic of properties abrasive materials stand by the discretion of the manufacturer. The most part of reviewed at the paper devices still can perform tasks assigned to it. Meanwhile it already have moral dated, have overestimated weight and size indicators and in some cases can't provide tests in accordance with modern requirements.

Key words: *abrasive materials, operational indicators, abrasive tools, control devices, destructible grain, cutting ability, wear resistance.*

Введение

Сложно представить современное производство без использования абразивных инструментов, которые позволяют обрабатывать различные материалы (шлифовать, полировать и т.д.). Абразивный инструмент состоит из большого числа абразивных зерен, скрепленных между собой специальной связкой. Поэтому основные свойства абразивного инструмента определяются материалом и свойствами зерен, а не только типом связки, распределением зерен по всему инструменту, а так же технологией изготовления.

В настоящее время абразивный инструмент изготавливается по рецептурной технологии, без учета исходных свойств абразивного материала. Конечно, рецептура предполагает использования абразивных материалов с заданными свойствами, но не всегда эти свойства соответствуют заявленным. Из-за этого часто возникает отбраковка готовых изделий ввиду нарушения технологических норм изготовления инструмента.

Чтобы избежать данной ситуации, необходимо проверять исходные свойства абразивного материала и при отклонении их от заявленных вносить корректировку в рецептуру и технологию изготовления. Но, увы, это не осуществляется и приводит к тому, что при изготовлении абразивного инструмента возникает 30-40% брака среди готовых изделий. И это считается нормой.

Исходя из этого, можно сформулировать основную цель данной статьи: провести анализ методов и технических средств (приборов) для оценки свойств абразивных материалов.

1. Свойства абразивных материалов

К основным показателям свойств абразивного материала относят: зерновой состав, разрушаемость, режущая способность, прочность зерен, износостойкость, полирующая способность. Часть из них регламентирована различными ГОСТами и контролируется с помощью специальных методик и приборов. Остальные показатели свойств абразивных материалов остаются на усмотрении производителя [2].

2. Приборы для контроля свойств абразивных материалов

2.1. Зерновой состав

Контроль зернового состава абразивного материала осуществляют в зависимости от зернистости – ситовым или микроскопическим методом (или совмещая оба метода). В качестве приборов используют сита с контрольными сетками по ГОСТ 6613-86, микроскопы или электронные микроскопы [3].

2.2. Разрушаемость

Разрушаемость абразивных зерен оценивается в шаровых мельницах. Критерием разрушаемости исследуемого зерна принято считать процентное содержание в продуктах его измельчения фракций, прошедших через контрольные сита на номер ниже испытываемых зернистостей. Метод определения разрушаемости абразивных зерен включен в ГОСТ 28924– 91. В качестве одного из примеров приборов, применяемых для оценки разрушаемости абразивных зерен, можно привести прибор ПХЗ (рисунок 1, а), разработанный Волжским ВНИМАШем и лабораторные шаровые мельницы (рисунок 1, б).

2.3. Прочность зерен

Измерение прочности зерен сопряжено с определенными техническими трудностями, обусловленными их малыми размерами, нестабильностью формы и хрупким характером разрушения. В настоящее время используется большое количество методов и устройств, позволяющих с той или иной степенью точности и трудоемкости определить прочность абразивного зерна.

Наибольшей объективностью получаемых результатов обладают методики, позволяющие осуществлять разрушение единичных зерен с регистрацией не только предельных величин разрушающей нагрузки, но и ее характера [3, 5].



а)



б)

Рис. 1. Общий вид прибора ПХЗ (а) и лабораторной мельницы (б)

В таких методах разрушение зерен осуществляется путем сжатия их между двумя достаточно твердыми пластинами. Разница же между ними заключается либо в способах регистрации момента разрушения зерна, либо в способах подачи зерен в зону нагружения, либо по способу нагружения.

Так прибор ППЗР-2 (Рисунок 2), разработанный ВНИИМАШ, предназначен для автоматического определения прочности единичных зерен шлифматериалов размером от 400 до 1250 мкм с выдачей на табло со световой индикацией блока автоматики величины разрушающего усилия каждого отдельного зерна, среднеарифметического значения разрушающего усилия совокупности испытанных зерен и количества зерен этой совокупности [1].

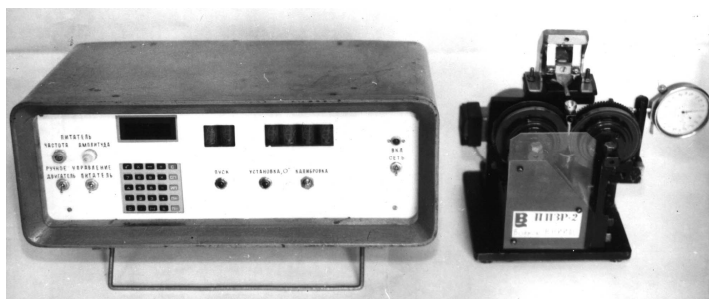


Рис. 2. Прибор ППЗР-2

2.4. Износостойкость

Износостойкость абразивного материала характеризуется уровнем сопротивляемости абразивных зерен их механическому истиранию. Согласно методике [4] этот показатель определяется на стандартном приборе модели АСЗ-4, который уже давно не производится.

Для исследования износостойкости абразивных материалов на малых скоростях, а также определения абразивной и режущей способности шлиф- и микропорошков используется прибор «Шлиф».



Рис. 3. Общий вид прибора «Шлиф»

2.5. Полирующая способность

Метод определения полирующей способности микропорошков, предложенный в работе [2, 5], основан на относительном сравнении шероховатости поверхностей образцов, обработанных контрольным микропорошком при использовании одной общей методики обработки.

Для контроля данной характеристики используются щуповой и оптический метод. Оптические подразделяют на следующие методы: светового свечения, теневой, микроинтерференционный и растровый.

Приборы, реализующие измерение шероховатости по данным методам, выпускаются большим количеством зарубежных и российских производителей.

2.6. Режущая способность

Одну из важнейших характеристик - режущую способность абразивного материала определяют двумя способами. Первый – метод микрорезания единичным зерном, закрепленным на периферии вращающегося диска. В данном случае имитируется работа единичного абразивного зерна в реальных условиях шлифования без учета взаимовлияния других абразивных зерен, но данный способ громоздок, трудоемок и дорог. Второй же позволяет моделировать работу большой совокупности абразивных зерен в шлифовальном круге. При использовании данного способа образец шлифуется уплотненным (под действием центробежных сил) слоем испытуемых абразивных зерен, находящихся в барабане, вращающимся с заданной скоростью.

На таком принципе работает прибор «РСЗ-2», позволяющий моделировать условия работы абразивных зерен в шлифовальном круге.

Прибор «РСЗ-2» (рисунок 5) предназначен для определения режущей способности шлифпорошков и шлифзерна всех шлифовальных материалов зернистостей от 60 мкм до 400 мкм. Определение режущей способности шлифзерна зернистости более 400 мкм на данном приборе возможно при увеличении ширины рабочей камеры барабана и диаметра образца [5].

Современных аналогов данного прибора нет ни в зарубежных странах, ни в России. На текущее время «РСЗ-2» уже морально устарел как по элементной базе, так и по техническим характеристикам. Максимальная скорость вращения его барабана составляет порядка 30-50 м/с, что для современных условий работы абразивных кругов очень мало. Исходя из этого, сейчас ведутся работы по модернизации РСЗ-2. Прибор планируется наделить дополнительными функциями, таким как: регулирование скорости вращения барабана, автоматической регистрацией показаний и формированием отчетов по результатам работы.

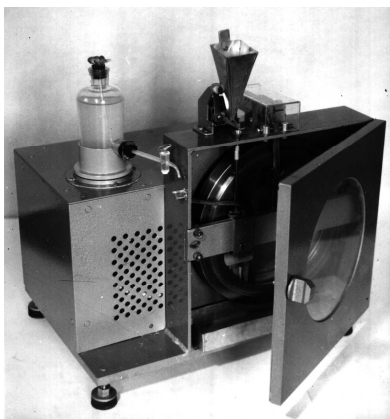


Рис. 4. Общий вид прибора РС3-2

Выводы

Большая часть представленных приборов, производимых Волжским НИИМАШ, до сих пор могут выполнять поставленные перед ними задачи. При этом они уже морально устарели, обладают завышенными массогабаритными показателями и в некоторых случаях не могут обеспечить проведение испытаний в соответствии с современными требованиями. Таким образом, НТЦ «ВНИИМАШ» планирует осуществить модернизацию данных приборов для современных условий.

Список литературы

1. Гаршин, А. П. *Материаловедение в 3 т. Том 2. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты : учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 426 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-02123-3. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/425418> (дата обращения: 12.05.2019).*
2. Гаршин, А. П. *Материаловедение в 3 т. Том 3. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты : учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 385 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-02125-7. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/425419> (дата обращения: 12.05.2019).*
3. Гаршин, А. П. *Материаловедение в 3 т. Том 1. Абразивные материалы : учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общ. ред. А. П. Гаршина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 214 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-9916-8113-1. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/425402> (дата обращения: 12.05.2019).*
4. Ковальчук, Ю.М. *Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин — М.: Машиностроение, 1984. — 288 с.*
5. Пушкарев, О.И. *Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов / О.И. Пушкарев, В.М. Шумячер— Волгоград: ВолгАСУ, 2004. — 144с.*

Контактные взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью при шлифовании металлов

Шумячер В. М.^{1*}, Кулик О.Г.¹, Кадильников А. В.²

¹Профессор, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский
государственный технический университет»,

г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

²Ведущий инженер, ООО «ВНИПИ Тяжпромэлектропроект»,

г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Предложен и описан механизм стружкообразования при шлифовании металла, основанный на представлении проводимости возмущений с фиксированной скоростью в среде, как части пространства. Отделение микростружки является следствием перемещения перед абразивным зерном ударной волны, приводящей к потере сдвиговой устойчивости материала в локальных зонах концентраторов напряжений, развитием ротационного характера деформирования с разворотом фрагментов структуры вокруг оси, перпендикулярной направлению перемещения зоны контакта «круг – заготовка».

Ключевые слова: абразивное зерно, стружкообразование, ударная волна, проводимость возмущений.

Contact interactions of abrasive grains with the treated surface when grinding metals

Schumacher V. M.^{1}, Kulik O.G.¹, Kadilnikov A. V.²*

¹*Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

²*Lead Engineer, LLC "VNIPI Tyazhpromelekroproekt", Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

A mechanism of chip formation during metal grinding is proposed and described, based on the representation of the conductivity of disturbances with a fixed speed in the medium as part of space. The separation of microchips is a consequence of the movement of the shock wave in front of the abrasive grain, which leads to a loss of shear stability of the material in the local zones of stress concentrators, the development of the rotational nature of the deformation with the rotation of fragments of the structure around an axis perpendicular to the direction of movement of the contact zone "circle - workpiece".

Key words: *abrasive grain, chip formation, shock wave, conductivity of disturbances.*

Введение

Взаимодействие абразивного инструмента и обработанной поверхности – сложный физико-химический процесс, в основе которой лежит стружкообразование – результат перемещения абразивного зерна, внедрившегося в поверхность обрабатываемой заготовки.

Сущность трансформации свойств материала при резании заключается в нарушении его текущего равновесного состояния [1]. Резание металла является высокоэнергетическим

методом обработки, сопровождающимся комплексом физико-химических процессов и явлений. Согласно [2, 3], процесс резания на микроуровне имеет характер взрыва.

1. Теоретические предпосылки

Процесс шлифования характеризуется разрушением обрабатываемой поверхности и рабочего профиля инструмента, который протекает в виде износа, микроскалывания, вырыва абразивных зерен из связки. Преобладание одного из приведенных видов износа регламентируется характером физико-химических явлений в контакте «абразивное зерно – металл». Взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемого материала при шлифовании имеет характер пластического удара [4]. По данным [2], в момент врезания абразивного зерна в металл в нем возникают зоны текучести. Источником действующих при шлифовании сил являются волновые ударные импульсы [2]. В работе [2] было показано, что поверхность абразивного зерна испытывает давление, превышающее временное сопротивление обрабатываемого материала. Удельная мощность взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла при шлифовании может быть определена из зависимости

$$N_{y\partial} = K_{P_r} \cdot V \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где K_{P_r} – коэффициент, учитывающий рост давления в контакте «зерно – металл»; σ_B – временное сопротивление разрушению обрабатываемого металла; α – средний угол наклона контакта абразивного зерна к поверхности детали.

После преобразований (1) получим зависимость для расчета удельной энергии шлифования

$$E_{y\partial} = K_{P_r} \cdot \sigma_B. \quad (2)$$

Из (2) следует, что удельная энергия шлифования снижается при уменьшении временного сопротивления разрушению обрабатываемого металла и коэффициента K_{P_r} .

Из (1) и (2) видно, что между K_{P_r} и V существует обратная пропорциональная зависимость.

Для экспериментальной проверки наших теоретических положений шлифовали сталь 65Г ($\sigma_B = 980$ Н/мм²) кругом 24A25CM1K со скоростями 20 и 100 м/с на специальном стенде, обеспечивающем скорость вращения круга от 15 до 150 м/с.

В результате расчетов установлено, что при скорости шлифования 20 м/с $K_{P_r} = 20$, мощность шлифования $N = 235,2$ кВт, а удельная энергия шлифования $E = 19,6$ Дж/мм³. При увеличении скорости шлифования до 100 м/с, $K_{P_r} = 4$; $N = 121,5$ кВт, $E = 3,92$ Дж/мм³.

Ранее авторами [4] исследовалась режущая способность абразивным зерном 24A25 на приборе РСЗ-2 при шлифовании образца из 65Г. Сущность метода заключалась в обработке образца уплотненным центробежными силами слое абразивных зерен, т.е. полностью исключалось влияние связи, структуры инструмента.

Установлено, что удельная энергия шлифования для скорости 20 м/с равна 73,9 Дж/мм³, что $\sim 3,73$ больше, чем при работе шлифовальным кругом. При испытаниях на РСЗ-2 контакта абразивных зерен с образцом характеризуется непрерывностью и стабильностью.

При шлифовании взаимодействие абразивного зерна состоит из трех последовательных стадий: ударного врезания, перемещения, выхода из контакта. Время взаимодействия зерна и металла $\sim 10^{-5}$ с, что соответствует реализации условий, при которых происходит реакция взрыва [4]. Согласно модели стружкоотделения [4] удаление

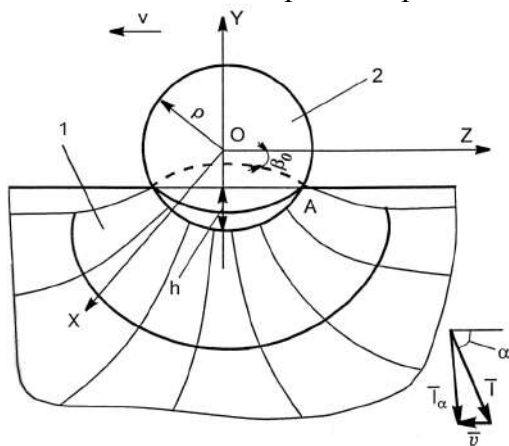
фрагмента обрабатываемого металла регламентируется соотношением h/ρ (h – глубина внедрения абразивного зерна; ρ – радиус закругления зерна) и V/J (скорость взаимодействия пары «зерно – металл»). Большая часть взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла затрачивается на пластическое деформирование обрабатываемого материала, что приводит к его разогреву и соответственно изменению физико-механических свойств.

Сопоставив данные расчетов, выполненных по результатам наших экспериментов при шлифовании стали 65Г, с данными [5], можно отметить, что повышение скорости взаимодействия пары «зерно – металл» приводит к снижению удельной энергии диспергирования обрабатываемого материала. Объяснением этому, на наш взгляд, служит эффект роста плотности энергии в микрообъеме перед зерном, что вызывает изменение (повышение пластичности) физико-химических свойств обрабатываемого металла. Проявление этого эффекта в уменьшении соотношения h/ρ , при котором отделяется микростружка с ростом скорости шлифования.

Проведенные исследования показывают, что процесс стружкоотделения регламентируется интенсивностью взаимодействия пары «зерно – металл» и является результатом накопления энергии перед абразивом, приводящим к развитию в деформируемом объеме зон текучести, имеющим существенно измененные физико-механические характеристики обрабатываемого металла.

2. Теоретическая часть

Ранее нами была разработана математическая модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла, в которой отражен характер контакта и конечность скорости распространения ударной (взрывной) волны в материале [4]. В основу данной модели положен механизм перемещения абразивного зерна, имеющего форму сферы, погруженной в обрабатываемый металл на глубину h , вызывающий возмущение [4]. Основное свойство этой среды – проводимость возмущений с фиксированной скоростью I .



I – обрабатываемый металл; 2 – абразивное зерно; h – глубина внедрения абразивного зерна; β_0 – угол между нормалью к поверхности абразивного зерна в точке контакта A и поверхностью обрабатываемого металла; T – результирующая сила взаимодействия зерна металла

Рис. 1. Модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла (в произвольный момент времени)

Обрабатываемый металл представляет собой среду как часть пространства, ограниченного плоскостью, основным свойством которой является проводимость возмущений с фиксированной скоростью J , которые сообщаются по нормали к поверхности

абразивного зерна (шара) и в дальнейшем передаются вдоль линий, называемых лучами, ортогональных перемещающемуся в пространстве фронту волны возмущений. Геометрия лучей регламентируется параметром δ , определенным как отношения скоростей звука в недеформированном и пластически деформированном состояниях обрабатываемого металла.

При перемещении абразивного зерна (сфера), погруженного на глубину h в обрабатываемый металл, скорость передачи возмущений можно определить из зависимости [4]:

$$J_p = \sqrt{J^2 - 2JV \cos \alpha + V^2}, \quad (3)$$

где J – фиксированная скорость возмущения среды; V – скорость перемещения абразивного зерна.

Изменение подвижности среды приводит к неравномерному отводу энергии, передаваемому абразивным зерном. В каждом элементарном объеме накапливается разное количество энергии:

$$\theta = \frac{dQ}{dt} = \frac{J(X, Y, Z)}{I_p}, \quad (4)$$

где dQ – количество энергии, накопленное в объеме dW ; $J(X, Y, Z)$ – значение плотности потока возмущений в заданной точке пространства.

3. Практическая часть

Проведенный анализ полученных зависимостей в среде для имитационного моделирования MATLAB установил, что с ростом скорости перемещения абразивного зерна изменяется геометрия лучей.

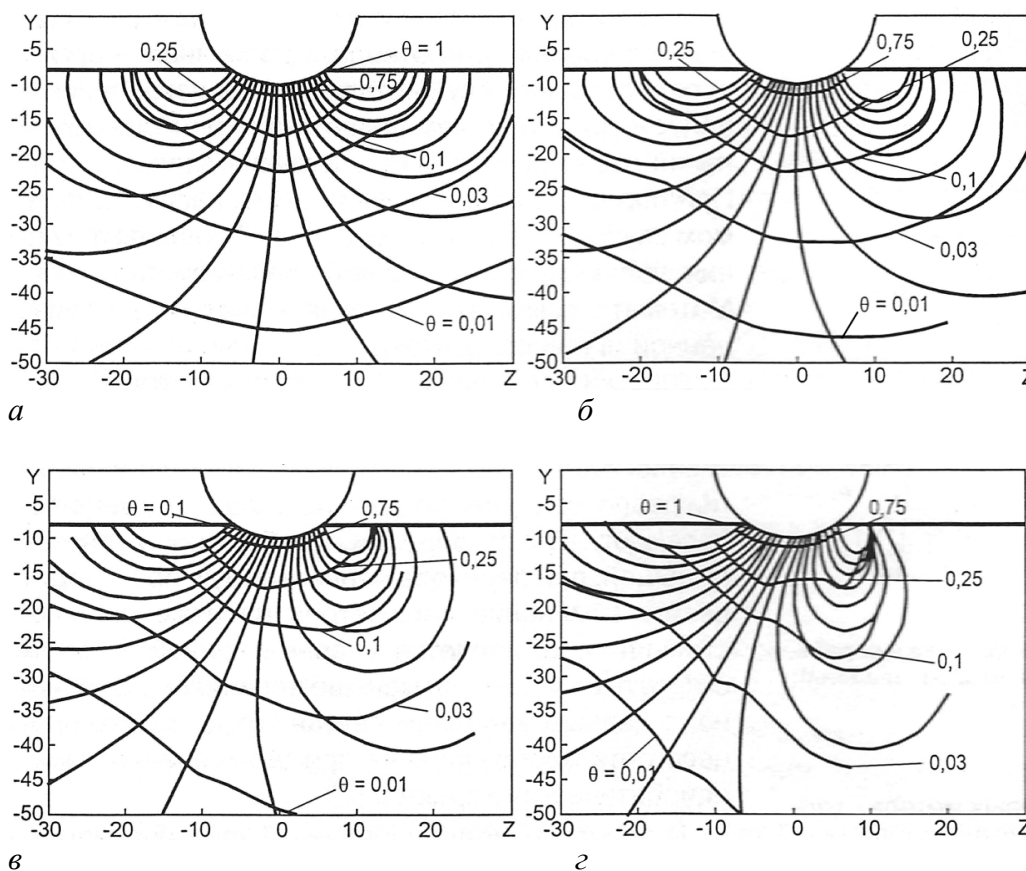
На рис. 2 приведено положение лучей передачи возмущений и линий равнонапряженного состояния для различных соотношений V/J .

При определенном соотношении V/J ($V/J \approx 0,45$) появляется линия, являющаяся огибающей для семейства лучей. Вблизи данной линии концентрируется большое количество энергии, подводимой со стороны абразивного зерна. Огибающая является границей, при переходе через которую происходит резкое изменение параметров напряженного состояния, что соответствует ударной волне. Скорость ударной волны будет меньше значения J , что указывает на адиабатический характер стружкообразования при шлифовании.

Энергия, отводимая из среды вблизи фронтальной части абразивного зерна, суммируется с энергией, передаваемой боковой и нижней частями поверхности. Энергия высвобождается в боковых поверхностях абразивного зерна, что приводит к разупрочнению металла и образованию микростружки. В соответствии с приведенными данными максимальное изменение структуры металла при микрорезании единичным абразивным зерном будет происходить на дне риски. Подтверждением данного положения служат результаты работы Л. Н. Филимонова, который показал, что при микрорезании стали единичным зерном со скоростью 40 м/с при глубине риски 30 мкм глубина наклепанного слоя на ее дне достигает 200 мкм.

Увеличение значения δ приводит к образованию микростружки при низких скоростях микрорезания. Рост размера абразивного зерна приводит к увеличению передаваемой обрабатываемому металлу энергии, которая изменяется пропорционально квадрату диаметра режущего элемента.

Образование микростружки происходит вследствие перехода обрабатываемого металла из твердого состояния в пластическое за счет движения перед абразивным зерном ударной волны.



$a - z - 0; 0,15; 0,3; 0,45.$

Рис. 2. Напряженное состояние в окрестностях абразивного зерна (сфера) $V/J(h/\rho = 0,2; \delta = 1,5)$:

Как показывает анализ результатов выполненных ранее исследований, отделение микростружки при абразивной обработке происходит за счет адиабатического сдвига, приводящего к уменьшению пластической деформации обрабатываемого металла. Развитию такого сценария способствует возникновение ударной волны, движущейся перед абразивным зерном и пластифицирующей металл.

Неустойчивость и локализация пластической деформации объясняется различными гипотезами. Основными гипотезами являются предположения о разупрочнении материала, связанные с влиянием скорости деформации, температуры, вследствие диссипации энергии, приводящими к изменению структуры металла [6, 7, 8, 9, 10].

По данным [11, 12], твердое тело является многоуровневой системой, в которой пластическое течение реализуется как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на разных масштабных уровнях: микро, мезо и макро.

Первые упруго-пластические сдвиги в структурно-однородной среде развиваются в поверхностных слоях нагруженного материала [13, 14, 15], поэтому у реальных материалов нет резко выраженного предела текучести. С позиций физической мезомеханики поверхностный слой заготовки является самостоятельным с мезоскопическим структурным уровнем деформации. Поверхностные концентраторы напряжений инициируют деформационные дефекты, которые с поверхности перемещаются вглубь, способствуя развитию пластического течения в объеме материала [16].

Применительно к процессу абразивного диспергирования отделение частицы обрабатываемого металла (микростружки), по нашему мнению, является следствием перемещения перед абразивным зерном ударной волны, которое приводит к потере сдвиговой устойчивости материала в локальных зонах концентраторов напряжений и к развитию ротационного характера деформирования с разворотом фрагментов структуры вокруг оси, перпендикулярной направлению перемещения зоны контакта «круг – заготовка», что находится в соответствии с результатами исследований [17, 18].

Таким образом, механизм диспергирования металла абразивными зёрнами можно описать следующим образом: движение перед абразивным зерном ударной волны, обладающей значительной энергией ($2 \dots 70$ Дж/мм³), приводит к потере сдвиговой устойчивости металла в локальных зонах концентраторов напряжений с разворотом фрагментов структуры вокруг оси, перпендикулярной вектору перемещения, с формированием навалов по бокам микроцарапины, оставляемой абразивным зерном. Навалы удаляются окончательно при взаимодействии со следующими абразивными зёрнами. При условии, что величина энергии перемещающегося навала достаточно велика, возможно образование сливной стружки или ее фрагментирование на мелкие частицы, которые могут трансформироваться в полые микросферы, что характерно при шлифовании жаропрочных сталей, либо микрочастицы, разлетающиеся в виде искр. Увеличение скорости перемещения абразивного зерна интенсифицирует формирование валиков металла, которые разлетаются в виде микрочастиц металла, наблюдаемых как веерообразный разлет искр.

Выводы

Одним из реальных путей интенсификации диспергирования является использование в шлифовальных кругах абразивных зерен овализированной формы с ориентацией большой оси по радиусу инструмента [19].

Изменение условий в фрикционном контакте «зерно – металл» за счет применения смазочно-охлаждающих жидкостей с поверхностно-активными веществами способствует увеличению числа концентраторов напряжений, инициирующих развитие деформационных дефектов, мигрирующих в глубь обрабатываемой поверхности [20-22].

Список литературы

1. Ярославцев В. М. Нанопроцессы при обработке резанием // Электронный журнал. № 9, сентябрь 2011 г. <http://www.cdl.bmstu.ru/mt/13/nukmt@mx.bmstu.ru>.
2. Yaroslavcev V.M. Nove o processe rezaniya // Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie, 2000. – № 4. – S. 32 – 46.
3. Fizika vzryva / Pod red. L.P. Orlenko. – Izd. 3-e, pererabotannoe. – V 2-h t. T. 2. – M.: FIZMATLIT, 2002. – 656 s.
4. Шумячер В. М., Кадильников А. В. Модель взаимодействия абразивного зерна и материала при шлифовании. Схема стружкообразования // Технология машиностроения, 2007. – № 4. – С. 18 – 21.
5. Пушкарев О. И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов : монография / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер ; ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – 144 с.
6. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burblies A. Adiabatic Shear Failure under Biaxial Dynamic Compression / Shear Loading // Mechanics of Materials. – 1994. – № 17. – P. 175 – 193.

7. **Gilman J.J.** Micromechanics of shear banding // *Mechanics of Materials*. – 1994. – 17. – P. 83 – 96.
8. Frassengeas C., Molinari A. The time development of eulerian / lagrangian perturbations to simple shear and its applications to shear banding // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1992. – Vol. 40. – № 8. – P 1735 – 1756.
9. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1987. – Vol. 35. – № 2. – P. 185 – 211.
10. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of Microstructures and Shearband Formation in α - h_{cp} titanium // *Mechanics of Materials*. – 1994. – № 17. – P. 175 – 193.
11. Локализация пластической деформации при скоростном ударном деформировании алюминия и сплава ММ6 / В. В. Астенин, Г. Н. Надеждин, Ю. Н. Петров [и др.] // *Проблемы прочности*. – 1987. – № 3.
12. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
13. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин, Ю. В. Гриняев, В. И. Данилов [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – 225 с.
14. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. В 2 т. / Под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995.
15. **Панин, В. Е.** Синергетические принципы физической мезомеханики // *Физ. мезомех.* – 2000. – Т. 3. – № 6. – С. 5 – 36.
16. **Панин, В. Е.** Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // *Физ. мезомех.* – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 5 – 22.
17. **Панин, В. Е.** Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // *Физ. мезомех.* – 1999. – Т. 2. – № 6. – С. 5 – 23
18. Neilmann P., Clark W.A., Rigney D. A. Orientation determination of subsurface cells generated by sliding // *Acta Metallurgica*. – 1983. – № 8. – P. 1293 – 1305.
19. **Грабченко, А. И.** Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с.
20. **Кадильников, А.В.** Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного круга в связке на начало процесса стружкообразования / В.М. Шумячер, А.В. Кадильников // *Технология машиностроения*. – 2007. - №5. – С. 29 - 33.
21. **Shumyacher, V. M.** Chip Formation Mechanism at Metal Grinding : (Conference paper) / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin, O. G. Kulik// *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer, 2019. – P. 1443-1448.– DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_153 .*
22. **Kulik, O. G.** Intensification of Technical Grinding Modes by Managing Physical Processes of Chip Formation : (Conference paper) / O. G. Kulik, E. D. Illarionova // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer, 2019. – P. 1457-1465. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630>*

Представление процесса шлифования в трехфазной граничной системе «металл – смазочно-охлаждающая жидкость – абразивное зерно»

Шумячер В. М.^{1*}, Башкирцева И.В.¹

¹Профессор, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Рациональное применение смазочно-охлаждающих жидкостей, которые коренным образом изменяют характер протекания контактных взаимодействий при шлифовании, оказывают, как показывает практика, позитивное влияние на работоспособность шлифовальных кругов, формирование качества поверхностных слоев материала шлифованных деталей. Предпринята попытка изучить физико-химические свойства водных смазочно-охлаждающих жидкостей. На основании проведенных исследований осуществлен подбор компонентов водных смазочно-охлаждающих жидкостей с точки зрения химической активности по отношению к обрабатываемому материалу и импрегнатору инструмента. В работе получены следующие выводы: процесс обработки шлифованием можно рассматривать как непрерывное изменение энергии атомных и молекулярных взаимодействий в трехфазной граничной системе «металл – смазка – абразивное зерно». Одним из путей управления процессом шлифования и изнашивания инструмента является направленное изменение свойств смазочно-охлаждающей технологической среды путем подбора компонентов смазочно-охлаждающих жидкостей и импрегнаторов.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости, шлифование, шлифовальный круг, абразивное зерно.

Representation of the grinding process in the three-phase boundary system "metal - cutting fluid - abrasive grain"

Shumyacher V. M.^{1}, Bashkirtseva I.V.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

Rational use of lubricating and cooling fluids, which radically change the nature of the flow of contact interactions during grinding, have, as practice shows, a positive impact on the performance of grinding wheels, the formation of the quality of the surface layers of the material of the ground parts. An attempt is made to study the physical and chemical properties of water cooling lubricants. On the basis of the conducted research, the selection of components of water-based lubricating and cooling liquids in terms of chemical activity in relation to the processed material and the tool impregnator was carried out. The following conclusions are obtained: the grinding process can be considered as a continuous change in the energy of atomic and molecular interactions in the three-phase boundary system "metal-grease-abrasive grain". One of the ways to control the process of grinding and tool wear is to change the properties of the lubricating and cooling process medium by selecting the components of the lubricating and cooling fluids and impregnators.

Keywords: *lubricants, grinding, grinding wheel, abrasive grain.*

Введение

Рациональное применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), которые

коренным образом изменяют характер протекания контактных взаимодействий при шлифовании, оказывают, как показывает практика, позитивное влияние на работоспособность шлифовальных кругов, формирование качества поверхностных слоев материала шлифованных деталей. В зоне контакта «круг – заготовка» создаются весьма благоприятные условия для протекания химических реакций между средой и обрабатываемым металлом в результате непрерывного образования химически чистых (ювенильных) металлических поверхностей с предельно искаженной решеткой и большой химической активностью, усиливающейся вследствие высоких температур и давлений, имеющих место при шлифовании [1].

Возникновение дефектов обуславливается нарушением электронной плотности. Это приводит к появлению сильно возбужденных участков в окрестностях дефектов, на которых создаются условия для преодоления потенциального барьера и эмиссии электронов как показателя термодинамической нестабильности металлической поверхности, следствием чего является возникновение индуцированного положительного заряда (активного центра) на поверхности твердого тела. Однако химически-активная среда интенсифицирует процесс разрушения твердых тел при условии равенства энергии взаимодействия активных компонентов среды и их свободной поверхностной энергии, что и определяет стремление системы перейти в состояние термодинамической устойчивости.

Экзоэлектронная эмиссия стимулируется самопроизвольным окислением, протекающим при высокой температуре и обилии парогазовой смеси. Наличие электропроводных СОЖ вызывает электрохимические анодные окислительные процессы по всей обрабатываемой поверхности. В свою очередь, воздействие потока энергии на СОЖ обуславливает ионизацию ее атомов (молекул).

В результате взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемой поверхности происходит активация приповерхностного слоя металла, что вызывает рост его энтальпии и энтропии и смещение констант равновесия химических реакций, протекающих на вновь образуемых поверхностях [2].

Основная часть

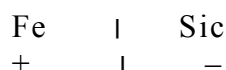
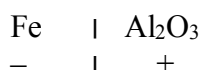
Практика показывает, что применение масляных СОЖ оказывает неблагоприятное влияние на экологические показатели производства. Исходя из этого, целесообразней использовать водные СОЖ. В связи с этим представляет интерес изучить физико-химические свойства водных СОЖ и на основании этого осуществить подбор их компонентов с точки зрения химической активности по отношению к обрабатываемому материалу и импрегнатору инструмента, который способен изменить свойства СОЖ и повлиять на ее активность в контакте «металл – абразивное зерно».

Исследовалось влияние СОЖ на характер контакта круга с обрабатываемым материалом. Для выявления особенностей физико-химических явлений в контакте «абразивное зерно – металл» и их дальнейшего развития при использовании в процессе шлифования СОЖ использован прибор «РСЗ-2», моделирующий условия работы абразивных зерен в шлифовальном круге без учета влияния связки при обработке образца из стали 65Г.

В процессе исследований получены следующие результаты в зависимости от природы шлифматериала:

Al_2O_3 – сталь 65Г
(диэлектрик– проводник)
 $u = - 0,5$ В
 $i = - 25 \cdot 10^{-9}$ А
 $R = 2 \cdot 10^7$ Ом

SiC – сталь 65Г
(полупроводник-проводник)
 $u = + 0,1$ В
 $i = 20 \cdot 10^{-9}$ А
 $R = 5 \cdot 10^6$ Ом



Анализ значений подтверждает возникновение электрических полей на границе полупроводник – проводник. Поверхность полупроводника оказывается хорошим резервуаром для отрицательных зарядов. В случае системы диэлектрик – проводник следует обратить внимание на то, что внутри диэлектриков нет «свободных зарядов», но имеются «связанные заряды» (связанные с атомами и молекулами). При наличии внешнего поля связанные заряды сдвигаются относительно исходных положений, это приводит к появлению у диэлектриков собственного электрического поля, иначе говоря, приводит к поляризации диэлектриков. В данном случае это реализуется за счет непрерывно протекающего в процессе трения обнажения ювенильных поверхностей, образования локальных очагов энергии высокой плотности, эмитирования поверхностями электронов. Поверхность диэлектрика оказывается хорошим резервуаром для положительных зарядов.

На основании этого можно предположить, что вода как основа водных СОЖ подвергается электролизу по реакции



Выделяющийся молекулярный кислород способствует образованию оксидов металлов, понижающих адгезию пары «абразив – металл».

Наряду с этим молекулы воды взаимодействуют с электронами, эмитированными с поверхности металла, согласно следующим уравнениям



где e^- – электрон, эмитируемый ювенильной поверхностью стружки; H_2O^* – возбужденные молекулы воды; $\text{H}\cdot$, $\text{OH}\cdot$ – радикалы; H_2O_2 – перекись водорода.

Развитость поверхности обрабатываемого материала интенсифицирует процесс разложения молекул пероксида водорода при соприкосновении с ней и приводит к образованию атомарного кислорода по реакции



Осуществляемое в результате этого окисление как процесс отражает стремление поверхности перейти в пассивное состояние с образованием защитной экранирующей пленки. Кроме формируемых оксидных пленок в процессе шлифования можно создавать искусственно пленки других химических соединений, исходя из состава применяемых СОЖ и импрегнатора инструмента, способного вступать в реакцию с металлом и компонентами СОЖ с образованием продуктов реакции, выступающих в качестве пленок, предотвращающих металлический контакт, уменьшающих трение, препятствующих дальнейшему локальному повышению температуры.

Заключение

Таким образом, процесс обработки шлифованием можно рассматривать как непрерывное изменение энергии атомных и молекулярных взаимодействий в трехфазной граничной системе «металл – смазка – абразивное зерно». При этом протекает целый комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений: тепловых, сорбционных, электрических [3]. В связи с этим одним из путей управления процессом шлифования и

изнашивания инструмента является направленное изменение свойств смазочно-охлаждающей технологической среды путем подбора компонентов СОЖ и импрегнатора. Это возможно только при условии детального изучения физико-химических реакций с точки зрения механизма их протекания и энергии.

Список литературы

1. **В. М. Шумячер** Физико-химические процессы при финишной абразивной обработке: монография / В. М. Шумячер. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2004. – 161 с.
2. **В. М. Шумячер** Механо-химические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла / В. М. Шумячер, А. В. Славин // Технология машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 29 – 32.
3. **С. Н. Постников** Электрические явления при трении и резании / С. Н. Постников. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.
4. **В.Ф. Бердигов** Об определении относительной износостойкости абразивных материалов/Бердигов В. Ф., Лагунов Ю. В.//Абразивы: научно-технический реферативный сборник/НИИ Информации по машиностроению. -1978. -№ 10. -С. 11-13.
5. **В.Ф. Бердигов** Сравнительная оценка некоторых физико-механических свойств шлифовальных материалов/Бердигов В. Ф., Леонидов Л. Д., Пушкарев О. И.//Абразивы: экспресс информация/Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности, НИИ Информации по машиностроению. - 1981. -№ 8. -С. 11-15.
6. **Башкирцева, И.В.** Change in Microhardness of Metal Depending on Wetting Ability of Lubricating Coolant / И.В. Башкирцева, Т.Н. Орлова // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation Switzerland AG, [2020]. – P. 1019-1026. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; South Ural State University (National Research University), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature.1007/978-3-030-22063-1. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
7. **Орлов, И.Ю.** Study of Physical and Chemical Processes Occurring During Polycondensation of Bakelite Binder in Order to Adjust Technological Process of Abrasive Tool Production / И.Ю. Орлов, Т.Н. Орлова, И.В. Башкирцева // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; South Ural State University (National Research University), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1003-1010. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).

Рационализация системы подачи смазочно-охлаждающей жидкости для повышения эффективности процесса шлифования

Шумячер В. М.^{1*}, Башкирцева И.В.¹, Орлов И.Ю.¹

¹ Профессор, Доцент, Аспирант, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Показана актуальность проблемы рационального применения смазочно-охлаждающих технологических сред при процессе шлифования. Дано описание устройства для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) гидроаэроинерционным напором через поровое пространство шлифовального круга, позволяющего управлять процессом засаливания инструмента с целью минимизации этого явления. Представлены экспериментальные исследования данного устройства. Показаны эпюры распределения жидкости по периферии и высоте шлифовального круга, свидетельствующие о значительном снижении активного ее расхода. В условиях, близких к реальному процессу шлифования, предлагаемое устройство обеспечивает распределение 75% СОЖ от общего ее расхода по длине дуги периферии круга, соответствующей центральному углу в 150 градусов, что позволяет существенно снизить активный расход жидкости. При подаче жидкости с перекрытыми отверстиями для подачи воздуха весь объем жидкости расходуется на участке, составляющем менее трети высоты круга.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости, шлифование, шлифовальный круг.

Streamlining the cutting fluid supply system to increase the efficiency of the grinding process

Schumacher V. M.^{1}, Bashkirtseva I.V.¹, Orlov I.Yu.¹*

¹Professor, Assistant Professor, ¹Graduate Student, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

The relevance of the problem of rational use of lubricating and cooling process media in the grinding process is shown. A description is given of a device for supplying a lubricant-cooling liquid (coolant) with a hydro-Aero inertial head through the pore space of the grinding wheel, which allows controlling the process of salting the tool in order to minimize this phenomenon. Experimental studies of this device are presented. Plots of the liquid distribution along the periphery and the height of the grinding wheel are shown, indicating a significant decrease in its active consumption. In conditions close to the actual grinding process, the proposed device provides a distribution of 75% of the total coolant flow along the length of the arc of the periphery of the circle corresponding to the Central angle of 150 degrees, which significantly reduces the active fluid flow. When the liquid is fed with the air supply holes closed, the entire volume of the liquid is consumed in a section that is less than a third of the height of the circle.

Key words: *lubricating and cooling fluids, grinding, grinding wheel.*

Введение

Решение проблемы качества выпускаемых машин и оборудования неразрывно связано с совершенствованием абразивной обработки. Шлифование как один из видов финишной обработки деталей в значительной степени призвано решить указанную проблему. Учитывая, что формирование геометрических, точностных, физико-

механических, микрогеометрических и топографических показателей обработанных поверхностей заготовок реализуется в процессе шлифования, существует проблема ускорения его прогресса, необходимость проникновения в его физическую сущность и рациональное использование технологических факторов.

Качество шлифованной детали определяется комплексом геометрических показателей (точностью размеров, формы, относительного положения поверхностей, волнистостью, шероховатостью) и физико-механических свойств поверхностного слоя (величиной и знаком остаточных напряжений, глубиной их распространения, микротвердостью, наличием прижогов и микротрещин).

Источником теплоты, выделяющейся при шлифовании, является главным образом работа деформирования обрабатываемого материала и работа внешнего трения инструмента о поверхность заготовки. В связи с чем, термический процесс, протекающий в поверхностном слое детали, обладает одновременно высокой скоростью и мгновенной температурой нагрева, а также кратковременностью выдержки при такой температуре и высокой скоростью охлаждения.

Очевидно, при прочих равных условиях уменьшение контактной температуры в зоне резания приводит к уменьшению величины термических остаточных напряжений и глубины их распространения. Поэтому интенсивность теплового процесса при шлифовании является одним из наиболее важных, оказывающих воздействие на формирование качества шлифованных деталей. С учетом того, что обеспечение заданных показателей качества изделий является фактором, ограничивающим производительность обработки и, следовательно, определяющим себестоимость и конкурентоспособность продукции, вопросы управления тепловым процессом при шлифовании имеют важное практическое значение.

1. Теоретическая часть

Радикальным средством воздействия как на интенсивность теплообразования, так и на теплораспределение в зоне шлифования является своевременная эвакуация стружки из зоны обработки, осуществляемая путем применения высокоэффективных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и рациональных способов их подачи в зону шлифования.

При шлифовании применяют технологические среды, находящиеся в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Наиболее широкое распространение получили жидкости, что обусловлено их более высокими (по сравнению с твердыми и пластичными смазочными веществами) охлаждающей, проникающей и моющей способностями.

Функциональные свойства жидкости зависят не только от ее химического состава, но и от своевременной ее транспортировки в необходимом количестве к обрабатываемой поверхности. Опыт использования технологических сред при шлифовании показывает, что максимальной эффективности процесса можно достичь только при поступлении среды непосредственно в зону контакта шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой.

Способ и техника подачи СОЖ должны обеспечить благоприятные условия контакта подаваемой в зону шлифования жидкости с рабочей поверхностью абразивного круга и поверхностью обрабатываемой детали, то есть гарантировать активное участие СОЖ в процессах резания и трения.

В основе развития техники подачи СОЖ в зону резания лежат три основных принципа:

а) повышение скорости движения СОЖ относительно объектов процесса резания (так называемая динамическая активизация СОЖ);

б) рационализация траектории движения жидкости;

в) оптимизация количества (расхода) СОЖ, активно участвующей в процессе резания. Наиболее часто применяется динамическая активизация СОЖ путем сообщения ей дополнительной энергии, однако перспективным является использование с этой целью энергии двигателя привода шлифовального круга с последующей передачей жидкости в обход генерируемых им воздушных потоков.

Из практики шлифования известно, что, несмотря на существенные недостатки, наибольшее распространение получил способ подачи охлаждающей жидкости в клиновую зону, вероятно из-за простоты техники его реализации. Однако, как показывают экспериментальные исследования, способ подачи жидкости через поровое пространство шлифовального круга имеет значительные преимущества перед предыдущим по мощности шлифования, производительности, качеству обрабатываемой поверхности, расходу абразивного инструмента и другим параметрам.

Через поровое пространство круга СОЖ может перемещаться под действием капиллярных, гравитационных и центробежных сил. Но при подаче СОЖ данным способом жидкость транспортируется к контактной зоне, в основном за счет центробежных сил вращения круга, ввиду значительного их преобладания над остальными. Поэтому при такой подаче частично используется эффективность СОЖ, находящейся в распыленном состоянии. Тем не менее существуют и недостатки этого способа, заключающиеся в следующем:

– возникает необходимость в более тонкой очистке СОЖ, так как в противном случае происходит осаждение шлама на внутренней поверхности круга и, как следствие, снижение расхода через его поры;

– наблюдается вытеснение жидкости из пор вращающегося круга через его торцовые поверхности, в связи с чем в средней части высоты круга ее выделяется больше, чем у кромок, где и происходит наиболее интенсивный съем материала;

– случайный характер расположения пор в теле круга отрицательно влияет на его дисбаланс при заполнении их жидкостью, а также на равномерность вытекания жидкости из поверхностных пор и, как следствие, качество охлаждения.

Кроме того, в научно-технической литературе практически не обращается внимания на то, что при подаче охлаждающей жидкости через поры круга вокруг него образуется аэрозоль, дисперсной фазой которой является СОЖ. В случае использования данного способа подачи одновременно на нескольких шлифовальных станках аэрозоль может распространяться по всему производственному помещению, и с учетом того, что сами СОЖ далеко не всегда экологически безопасны, требуется применение мощных вентиляционных систем и сложных рекуперационных установок, что, с нашей точки зрения, также является существенным недостатком.

Резервом для устранения данного недостатка при круглом наружном и плоском шлифовании может служить разработка устройств, обеспечивающих разбрызгивание жидкости не по всей периферии круга, а лишь по ее участку некоторой длины, превышающей длину дуги контактной зоны и достаточной для смазывания и охлаждения зоны резания, а также эвакуации (реэвакуации) оттуда продуктов диспергирования. При этом зона резания должна находиться в зоне разбрызгивания.

Решение данной проблемы потребовало пересмотра математической модели движения СОЖ в контактную зону по порам круга при подводе ее к его торцам, разработанной В. В. Ефимовым [1]. Ему удалось получить аналитическим путем и проверить экспериментально уравнение траектории относительного (относительно шлифовального круга) движения СОЖ сквозь поры круга.

С нашей точки зрения, с учетом поставленных задач, интерес представляла траектория абсолютного (т.е. относительно системы: «станок – приспособление – инструмент – деталь») движения единичной массы СОЖ в теле шлифовального круга. Уравнения данной траектории получены нами с учетом краевых условий, в качестве которых выступали координаты точек подвода СОЖ к кругу и точек зоны резания.

Данная траектория представляет собой часть пространственной спирали вытянутой вдоль оси вращения шлифовального круга. Анализ ее уравнений показал, что изменяя параметры струи, подводимой к кругу СОЖ, по определенному закону, можно достичь ее разбрызгивания в заданной области периферии шлифовального круга.

2. Экспериментальная часть

На основе полученной модели, с учетом вышерассмотренных основ развития техники подачи жидкости, нами было разработано устройство закрытого типа для врезонной подачи СОЖ гидроаэроинерционным напором через поровое пространство круга при шлифовании его периферией.

Для определения его эффективности был проведен эксперимент. С целью выявления закономерностей истечения СОЖ с периферии круга и попадающей непосредственно в зону резания были изготовлены: экспериментальная модель устройства и специальный стенд. Установка представляла собой смонтированные на жестком каркасе подшипниковый узел, имитирующий шпиндель шлифовального станка, и однофазный электродвигатель, в качестве которого использовалась ручная шлифовальная машина модели Е – 252. «Шпиндель» и электродвигатель соединялись эластичной муфтой. Частота вращения вала определялась визуально с помощью стробоскопического тахометра марки 2 СТ32 – 456, а ее регулирование осуществлялось бесступенчато лабораторным автотрансформатором ЛАТР – 2М.

Время отбора СОЖ с одной из точек периферии регламентировалось временем ее истечения через сопло с диаметром выходного отверстия 2×10^{-3} м и объемом 2×10^{-3} м³ из резервуара, расположенного выше оси вращения круга. Оно было определено экспериментально и составило 470 с. Следовательно, средняя подача СОЖ на лопасти жидкостной крыльчатки устройства равнялась $0,26 \pm 0,04$ л/мин.

Для определения расхода СОЖ в любой точке окружности периферии круга, в том числе и в наивысшей, был изготовлен жидкостный приемник в форме пространственной одновитковой улитки, с шириной приемного отверстия равной высоте круга. «Улитка» устанавливалась с помощью постоянного магнита на плите стенда, расположенной за шлифовальным кругом, что способствовало легкой и быстрой ее перестановке в процессе эксперимента. СОЖ с периферии круга под напором, создаваемым центробежными силами, в распыленном состоянии попадала в приемное отверстие «улитки». Далее, отражаясь внутри от наклонной стенки, стекала в ее «хвост», куда был вмонтирован небольшой штуцер с надетой на него гибкой трубкой, по которой жидкость транспортировалась в мерный сосуд (мензурку). Результаты данных измерений, для круга с типоразмером $1\ 250 \times 20 \times 76$, представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 положение «улитки» на периферии определяется центральным углом, отсчитываемым в направлении вращения от нулевого радиуса, проходящего через точку подвода СОЖ.

Распределение расхода жидкости по высоте круга определялось в плоскости, проходящей через его ось вращения и образующую, совпадающую с точкой предположительного расположения зоны резания (через 15 градусов по длине периферии круга в направлении его вращения от максимального расхода). На рис. 1 эта плоскость обозначена следом *OA*.

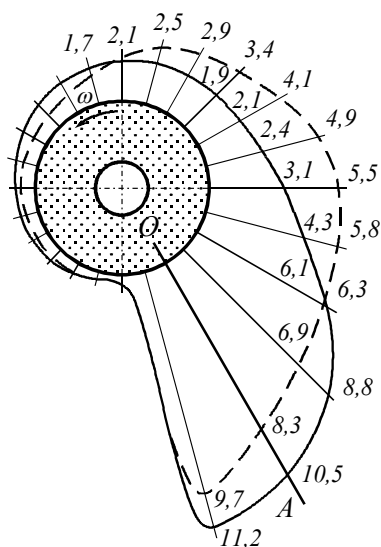
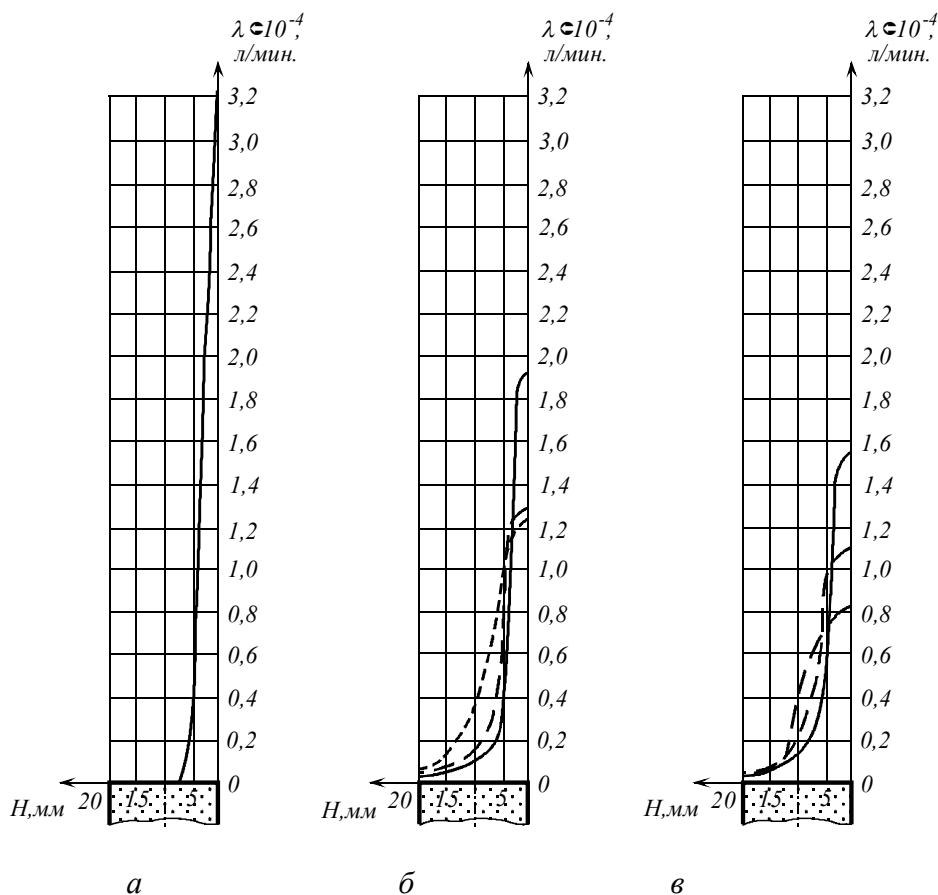


Рис. 1. Эпюра расхода СОЖ по периферии шлифовального круга, $\lambda \times 10^{-4}$ л/мин:

— частота вращения круга 800 об/мин; - - - частота вращения круга 1500 и 2000 об/мин



а – отверстия подачи воздуха полностью перекрыты; *б* – отверстия подачи воздуха полностью открыты; *в* – при уменьшенной площади отверстий воздухоподачи; - - - - частота вращения круга: 800 об/мин; - - - - частота вращения круга: 1500 об/мин; ——— частота вращения круга: 2000 об/мин

Рис. 2. Эпюра расхода СОЖ по высоте шлифовального круга:

Было рассмотрено четыре варианта подачи воздуха:

- 1) при полностью закрытых отверстиях подачи воздуха;
- 2) при полностью открытых отверстиях подачи воздуха;
- 3) при уменьшенной в четыре раза площади отверстий воздухоподачи;

4) при принудительной подаче воздуха во впускные отверстия; при этом выпускные отверстия были полностью открыты, а давление в линии нагнетания компрессора составляло 2,1 атм.

В данном случае СОЖ отбиралась «улиткой» по конструкции, принципу действия, размерам и форме во фронтальной плоскости, идентичной рассмотренной выше, однако ее ширина соответствовала трети высоты круга. Кроме того, этот приемник при установке на стенде имел возможность перемещения вдоль образующей шлифовального круга. Закономерности изменения расхода по высоте вышеуказанного круга, отсчитываемой от торца подачи СОЖ, приведены на рис. 2.

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Эпюра расхода СОЖ по периферии шлифовального круга в плоскости его торцов сильно искажена. В условиях, близких к реальному процессу шлифования (при частоте вращения вала станда равной 2000 об/мин), предлагаемое нами устройство обеспечивает распределение 75% СОЖ от общего ее расхода по длине дуги периферии круга, соответствующей центральному углу в 150 градусов, что позволяет существенно снизить активный расход жидкости (в отличие от подачи СОЖ во внутреннюю полость шлифовального круга, при которой происходит равномерное ее разбрызгивание по всей длине периферии на выходе из круга).

2. При подаче жидкости с перекрытыми отверстиями для подачи воздуха весь объем жидкости расходуется на участке, составляющем менее трети высоты круга. Под влиянием воздуха происходит отклонение жидкости от торца подачи в тело круга и при уменьшенных выпускных отверстиях воздухоподачи 80% общего ее количества распределяется уже по половине его высоты. Дополнительная подача воздуха приводит к смещению того же расхода жидкости по образующей за ее отметку, соответствующую 60 процентам высоты круга.

Список литературы

1. **В. В. Ефимов** Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании./ Ефимов В. В. Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1985.
2. **А.В. Тюхта** Технологическое обоснование и оценка эффективности комбинаторного способа подачи СОЖ / А.В. Тюхта, К.В. Подмастерьев, Ю.В. Василенко // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 5. С. 15-22.
3. **А.В. Tyuhta** Combinatorial method for cooling Lubricating fluid supply at flat grinding with disk periphery / A.V. Tyuhta // 13th Joint China-Russia symposium on advanced materials and processing technology - collection of articles of the international scientific-technical conference. – 2012. – 68 p. – P. 63.
4. **А.Д. Альтшуль** Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. - М.: Издательство литературы по строительству, 1965. - 274 с
5. **Л.Д. Ландау** Теоретическая физика. - Т. 2. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. - М.: Наука, 1988. - 733 с

Повышение эффективности процесса шлифования посредством изменения структурных характеристик абразивного инструмента

Крюков С. А.^{1*}, Байдакова Н. В.²

¹ Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

² Доцент, Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Волжском
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

На основе экспериментальных и аналитических исследований установлено, что эффективность процесса шлифования зависит от зернового состава и содержания в нем основной фракции. Зерновые составы абразивных материалов, выпускаемые отечественными производителями, регламентируются стандартами и нормативными документами. Согласно которым каждый зерновой состав абразивов состоит, как правило, из пяти фракций. Статистическая обработка и анализ более 80 различных зерновых составов абразивных материалов позволили установить закономерности измерения процентного содержания отдельных фракций от гранулометрического индекса. Для проверки этой гипотезы были проведены испытания ряда шлифовальных инструментов с различными зерновыми составами абразивных материалов. Результаты сравнительных испытаний шлифовальных кругов показали, что разработка и применение единого интегрального показателя зерновых составов абразивных материалов в виде гранулометрического индекса обеспечивает объективную и достоверную оценку их разнонаправленного влияния на показатели процесса шлифования.

Ключевые слова: абразивное зерно, форма зерна, шлифование, измельчение, эффективность.

Improving the efficiency of the grinding process by changing the structural characteristics of the abrasive tool

Krukov S. A.¹, Baydakova N. V.²

¹ *Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University;
Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation*

¹ *Assistant Professor, Volzhsky Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education National Research University Moscow Power Engineering Institute;
Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation*

Abstract

Based on experimental and analytical studies, it was found that the efficiency of the grinding process depends on the grain composition and the content of the main fraction in it. Grain compositions of abrasive materials produced by domestic manufacturers are regulated by standards and regulations. According to them, each grain composition of abrasives consists, as a rule, of five fractions. Statistical processing and analysis of more than 80 different grain compositions of abrasive materials allowed us to establish regularities in measuring the percentage of individual fractions from the granulometric index. To test this hypothesis, a number of grinding tools with different grain compositions of abrasive materials were tested. The results of comparative tests of grinding wheels showed that the development and application of a single integral indicator of grain compositions of abrasive materials in the form of a granulometric index provides an objective and reliable assessment of their multidirectional influence on the performance of the grinding process.

Key words: *the abrasive grains, the shape of the grain, grinding, crushing, efficiency.*

Введение

Как в научных, так и производственных источниках информации по вопросам шлифования на сегодняшний день не получено должной оценки значимости влияния зернового состава на функционально-эксплуатационные показатели абразивных инструментов и, кроме того, на этот счет имеются противоречивые выводы. Так, в работе [1] показано, что с повышением содержания в зерновом составе основной фракции с 42% до 80 – 85% существенно улучшаются все показатели процесса шлифования. В тоже время приводятся сведения о том, что зарубежные абразивные инструменты, например фирмы «Нортон», имеющие содержание основной фракции в пределах 27 – 32%, показывали значительно лучшие результаты работы, чем отечественные шлифкруги, содержащие основную фракцию в пределах 42 – 45%.

Одной из причин этого, вероятно, является то, что наличие в абразивном инструменте заданной зернистости различных по размерам зерен (фракций) и по их процентному содержанию, а также отсутствие до сих пор единого интегрального показателя по зерновым составам затрудняют проведение объективного анализа и оценки как структурно-механических характеристик инструментов, так и их показателей в работе.

Основная часть

Зерновые составы абразивных материалов, выпускаемые отечественными производителями, регламентируются соответствующими стандартами и другими нормативными документами. Согласно им каждый зерновой состав абразивов состоит, как правило, из пяти фракций: предельной ($П_\phi$), крупной ($К_{р\phi}$), основной ($О_\phi$), дополнительной к основной ($Д_\phi$) и мелкой ($М_\phi$). Введена и комплексная фракция ($К_{о\phi}$), которая складывается из крупной, основной и дополнительной фракций.

Исходя из того, что съем обрабатываемого материала в основном определяется работой зерен крупной и основной фракций, а шероховатость поверхности – предельной, крупной и мелкой фракций, был разработан интегральный показатель зерновых составов в виде гранулометрического индекса $i_{гр}$, который определяется по следующему выражению:

$$i_{гр} = \frac{O_\phi}{P_\phi + K_{р\phi} + O_\phi + M_\phi} \quad (1)$$

Статистическая обработка и анализ более 80 различных зерновых составов отечественных и зарубежных производителей абразивных материалов позволили установить закономерности измерения процентного содержания отдельных фракций от гранулометрического индекса (рис. 1). Коэффициент корреляции этих зависимостей колебался от 0,685 до 0,80, что свидетельствует о достоверности представленных данных.

Зависимости, показанные на рис. 1, описываются следующими уравнениями:

$$O_\phi = 98,2 \cdot i_{гр}^{1,31}; \quad (2)$$

$$M_\phi = 1,07 \cdot i_{гр}^{-4,03}; \quad (3)$$

$$K_{р\phi} = \begin{cases} 36,2 \cdot i_{гр}^{0,76} & \text{при } 0,40 \leq i_{гр} \leq 0,57 \\ 13,9 \cdot i_{гр}^{-0,76} & \text{при } 0,57 \leq i_{гр} \leq 0,85 \end{cases} \quad (4)$$

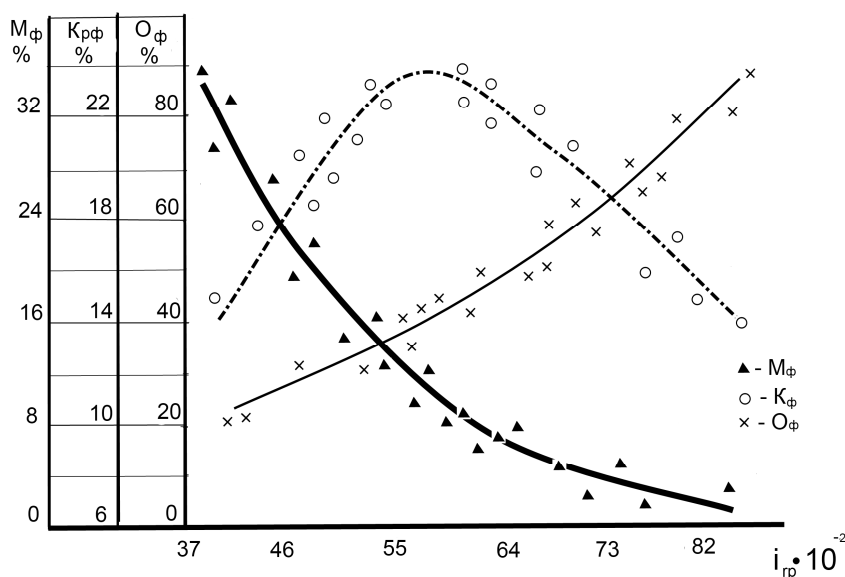


Рис. 1. Зависимости содержания основной, крупной и мелкой фракций зерновых составов от гранулометрического индекса

Как видно из графиков на рис. 1, функция содержания основной фракции $O_{\text{ф}}$ от гранулометрического индекса $i_{\text{гр}}$ носит параболический характер и представляет собой возрастающую кривую. Функция содержания мелкой фракции $M_{\text{ф}}$ имеет гиперболический характер с убывающей кривой. Изменение содержания крупной фракции $K_{\text{ф}}$ от индекса $i_{\text{гр}}$ является сложной функцией, имеющей перегиб при индексе равном 0,57. Такие изменения содержания представленных фракций в зерновых составах абразивных инструментов могут вызывать и неоднозначные характеры влияния их на показатели процесса шлифования.

Для проверки этой гипотезы были проведены испытания ряда шлифовальных инструментов с различными зерновыми составами абразивных материалов. Исходным абразивным материалом являлся белый электрокорунд (24А) зернистостью № 25. Экспериментальные шлифкруги были изготовлены из различных зерновых составов (табл.1). В связи с различным содержанием фракций зерна объемное содержание связки К5 подбиралось в таком соотношении, чтобы получить примерно одинаковую твердость инструментов для исключения влияния твердости на показатели процесса исследования. Твердость экспериментальных шлифкругов отличалась друг от друга на одну степень, что не могло оказывать существенного влияния на результаты исследований. Одновременно испытывались шлифкруг фирмы «Нортон» и серийный инструмент производства Волжского абразивного завода (ВАЗ).

Эксплуатационные показатели опытных шлифкругов испытывались на экспериментальной установке МА-1, созданной на предприятии НПКО «МашТехСервис» [2]. При исследовании использовались образцы из стали ШХ15 твердостью HRC55, размером 50×8×8 мм. В качестве СОЖ применялся 5%-ный раствор кальцинированной соды. Режим шлифования: скорость вращения круга $V_{\text{к}} = 35$ м/с, глубина резания $t = 0,01$ мм. Эксплуатационные показатели кругов оценивались в соответствии с ГОСТ 2424-83.

Результаты сравнительных испытаний шлифовальных кругов представлены на рис. 1. Из графиков зависимостей коэффициента шлифования, стойкости шлифкругов и шероховатости обработанной поверхности видно, что существует неоднозначные области влияния зерновых составов на исследуемые показатели абразивных инструментов. Кривые зависимостей этих показателей от гранулометрического индекса имеют перегиб

при индексе равном 0,57. С левой и правой сторон от этого значения индекса показатели шлифкругов улучшаются, то есть повышается их эффективность. Это можно объяснить следующим образом. С увеличением содержания в зерновом составе мелкой фракции и снижением крупной и основной фракций повышается число режущих зерен на 1 мм² поверхности кругов и уменьшается среднестатистический размер зерен, что способствует снижению сил резания при исследовании и износа инструмента. Кроме того, увеличение содержания мелкой фракции в абразивной смеси ведет к упрочнению черепка круга за счет более плотной упаковки зерен. Это позволяет снизить количество связки на 15 – 30 % без изменения заданной твердости, а за счет этого увеличивается и пористость инструмента. При работе таким инструментом создаются лучшие условия стружкоудаления, устраняется налипание металла на его рабочую поверхность, а также улучшается вентилирующее действие и охлаждение шлифуемой поверхности изделия. Все это приводит к увеличению производительности и качества процесса шлифования инструментами с повышенным содержанием мелкой фракции в зерновом составе. В связи с этим находится объяснение фактам повышения эффективности шлифования при введении в стандартный зерновой состав мелкой фракции в количестве 6 ÷ 10 % [2, 3]. Если взять серийный шлифкруг 24A25CM16K5 с гранулометрическим индексом равным 0,55 (табл. 1), то после дополнительного введения в зерновой состав, например 10 %-ной мелкой фракции, индекс становится равным 0,46. По данным рис. 2, коэффициент шлифования при этом увеличивается в 1,21 раза, стойкость инструмента – в 1,25 раза. В работе [2] при введении в абразивную смесь для изготовления инструмента 24A40CM27K5 шести процентов мелкой фракции получается увеличение съема металла (сталь 40X) на 33,9 %, а при шлифовании стали ШХ15 на 24,8 % по сравнению с серийным шлифкругом. Кроме того, уменьшается линейный износ экспериментального инструмента и снижается шероховатость обработанной поверхности образцов.

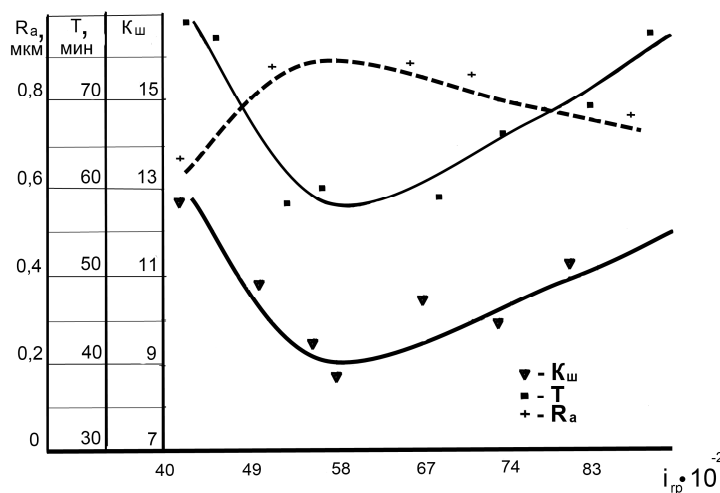


Рис. 2. Зависимость коэффициента шлифования $K_{ш}$, стойкости T и шероховатости обработанной поверхности R_a от гранулометрического индекса

Как видно из рис. 2, при изменении значений гранулометрического индекса с 0,57 до 0,85, то есть при увеличении содержания основной фракции зернового состава с 45,3% до 85% (табл. 1) и одновременным снижением крупной и мелкой фракций, коэффициент шлифования испытанных инструментов увеличивается в 1,28 раза, стойкость – в 1,30 раза, а шероховатость поверхности уменьшается в 1,22 раза по сравнению с серийным инструментом. Это объясняется тем, что с увеличением содержания основной фракции, повышается однородность зернового состава по размерам зерен, приводящая к

равномерному и упорядоченному распределению их на рабочей поверхности инструмента, уменьшению разновысотности и увеличению числа зерен, участвующих в процессе шлифования. Все это способствует повышению производительности и качеству процесса шлифования.

В подтверждение на рис. 3 представлены зависимости отдельных показателей шлифования, полученных по результатам экспериментальных работ других исследователей [1, 4]. Для этих целей, по приведенным в представленных работах зерновым составом абразивов, определялись соответствующие гранулометрические индексы по формуле (1) и строились кривые зависимостей показателей. В работе [4] при обработке стекла К8 свободным абразивом использовался микропорошок М14 с содержанием основной фракции от 50,4% до 74,2%, что соответствовало индексам от 0,60 до 0,75 (рис. 3, а). В работе [1] при обработке стали 45 применялись шлифкруги из шлифзерна 24А40 с содержанием основной фракций от 42% до 85%, что соответствовало индексам от 0,53 до 0,85. Представленные зависимости на рис. 3 по характеру их изменения полностью соответствуют зависимостям на рис. 2 в диапазоне значений индексов от 0,53 до 0,85.

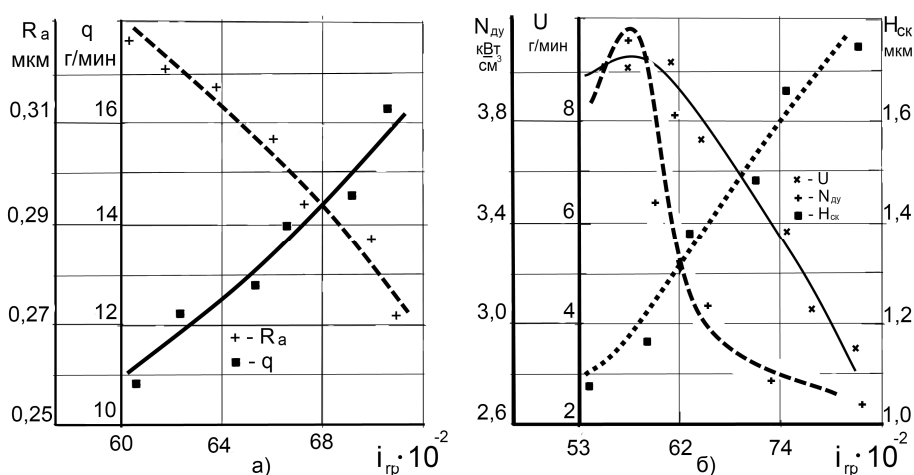


Рис. 3. Зависимость показателей процесса шлифования от гранулометрического индекса по результатам экспериментальных работ: а – [4]; б – [1]; q – интенсивность съема металла; U – удельная производительность; $N_{уд}$ – удельная мощность; R_a и $H_{ск}$ – шероховатость поверхности

Таким образом, разработка и применение единого интегрального показателя зерновых составов абразивных материалов в виде гранулометрического индекса обеспечивает объективную и достоверную оценку их разнонаправленного влияния на показатели процесса шлифования. Отсюда вытекает два способа совершенствования абразивных инструментов. Один из них, требующий высокой степени однородности зернового состава, был впервые апробирован в работе [1]. Однако до сих пор этот способ не нашел широкого применения из-за того, что требует для получения однородного по размерам зернового состава специального оборудования в виде вибрационных столов, которые малопроизводительны и сложны в настройке.

Заключение

Наиболее рациональным и экономичным следует считать второе направление, когда в зерновой состав вводится дополнительно определенное количество мелкой фракции. В этом случае для приготовления необходимого зернового состава можно использовать

обычные стандартные зерновые составы разных зернистостей в определенном объемном соотношении друг с другом и не требуется какого-либо нового технологического оборудования. Кроме этого, можно использовать шлифзерна ограниченного спроса из промежуточных номеров зернистостей № 20, № 32, № 63, № 100, выход которых составляет 30 – 40% от общего объема производства абразивных заводов, а переработка их в другие зернистости довольно трудоемкий и неэкономичный процесс. Имеется определенный опыт использования таких номеров зернистостей при создании аналогов зарубежных шлифкругов для Авто ВАЗа и других машиностроительных предприятий.

Список литературы

1. **Д.Б. Ваксер** Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. М. : Машиностроение, 1964. 124 с.
2. **А.И. Мироседи** Повышение эффективности шлифования путем совершенствования структуры инструмента с учетом результатов стохастического моделирования : дисс. канд. тех. наук. Волжский, 2007. 158 с.
3. **В.П. Сиротин** Исследование влияния строения и конструкции шлифовальных кругов на их режущую способность и качество поверхностного слоя шлифуемых деталей : дисс. канд. тех. наук. Одесса, 1980. 270 с.
4. **М.Н. Голованова** Некоторые причины колебаний рабочих свойств микропорошков / Голованова М. Н., Равикович В. В. // Абразивы. 1972. №4. С. 5 – 7
5. **Байдакова, Н.В.** Закономерность формирования геометрических параметров зёрен в шлифзерне и других измельчённых материалах / Н.В. Байдакова, С.А. Крюков, В.М. Шумячер // Тяжёлое машиностроение. - 2017. - № 11-12 (ноябрь – декабрь). - С. 35-37.
6. **Крюков, С.А.** Использование наполнителей и смесей из абразивов разных зернистостей и формы для совершенствования шлифовальных инструментов: монография / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова, А.И. Мироседи; под общ. ред. В.М. Шумячера. - Москва, 2017. - 160 с.
7. **Байдакова, Н.В.** Получение шлифматериалов и других сыпучих материалов с заданной формой зёрен [Электронный ресурс] / Н.В. Байдакова, С.А. Крюков // 16-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 23-27 января 2017 г.). В 2 ч. Ч. 2 / под ред. С.И. Благинина ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2017. - С. 195-199. – Режим доступа : http://www.volpi.ru/files/science/science_conference/16npkpps/16npkpps_pt2.pdf.
8. **Крюков, С.А.** Dependence of Roughness Parameters of Workpiece Surface on Structural Characteristics of Grinding Discs [Электронный ресурс] / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer, 2019. – P. 1421-1426. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-95630-5> . – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME).
9. **Шумячер, В.М.** Теория, технология и практика совершенствования абразивных инструментов: учеб. пособие / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова. - Санкт-Петербург, 2019. - 212 с.

Совершенствование физико-механических свойств высокопористых абразивных инструментов

Крюков С.А.^{1*}, Байдакова Н.В.², Гребенникова Н.Н.¹

¹ Профессор, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

² Доцент, Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Волжском
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Рассмотрены методические приемы практического применения модели оптимизации для решения технических и технологических задач. Предложено два способа использования инновационно-технологического обеспечения оптимального строения черепка инструмента за счет введения с основной зернистостью более мелкой, а также введение дополнительного порообразователя. Решена задача выбора оптимального высокопористого инструмента для абразивной обработки заданной детали по стратегии принципа сложности. Предлагаемая модель коррелирует с экспериментальными данными и является наиболее подходящей для оптимизации. С помощью предложенной модели можно провести точную сравнительную оценку и выбрать инструмент минимальной сложности, удовлетворяющий требованиям по качеству. Инновационно-технологическое обеспечение структурно-механических свойств абразивных инструментов позволило получить высокопористый инструмент 8-й структуры путем введения в него невыгорающих порообразующих наполнителей и мелкодисперсного наполнителя.

Ключевые слова: абразивный инструмент, модель оптимизации, абразивная обработка, высокопористый шлифовальный инструмент.

Innovative and technological support of structural and strength characteristics of highly porous abrasive tools

Krukov S. A.^{1}, Baydakova N. V.², Grebennikova N.N.¹*

¹ *Professor, Assistant Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation*

² *Assistant Professor, Volzhsky Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education National Research University Moscow Power Engineering Institute; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation*

Abstract

Methodical methods of practical application of the optimization model for solving technical and technological problems are considered. Two ways of using innovative technology to ensure the optimal structure of the tool shard by introducing a smaller main grain, as well as the introduction of an additional pore-forming agent, are proposed. The problem of selecting the optimal high-porosity tool for abrasive processing of a given part according to the strategy of the complexity principle is solved. The proposed model correlates with experimental data and is the most suitable for optimization. Using the proposed model, you can make an accurate comparative assessment and select a tool of minimal complexity that meets the quality requirements. Innovative and technological care of the structural and mechanical properties of abrasive tools allowed us to obtain a highly porous tool of the 8th structure by introducing non-burning pore-forming fillers and a fine filler.

Keywords: *abrasive tools, optimization model, abrasive processing, high-porosity grinding tools.*

Введение

При шлифовании жаропрочных, титановых, цветных сплавов, а также нержавеющей, сложнолегированных конструкционных и инструментальных сталей используются высокопористые инструменты, отличающиеся от обычных тем, что имеют в своей структуре специально полученные крупные поры, превышающие естественные по размеру в 1,5 и более раз, объем которых составляет от 10 до 30 % и более при общей пористости инструмента 54 – 62% .

Существенным недостатком высокопористых инструментов является недостаточная их прочность. Для повышения прочностных свойств используются: специальная связка, пропитка инструмента органическим компаундом, бандажирование центрального отверстия круга, армирование черепка инструмента и ряд других мероприятий.

Однако проблема создания высокопористых инструментов оптимального строения с повышенной прочностью их черепка остается до сих пор до конца нерешенной.

Основная часть

Предлагается инновационно-технологическое обеспечение оптимального строения черепка инструмента решать двумя совместными способами:

-путем введения с основной зернистостью более мелкой, для увеличения числа точечных контактов абразивных зерен между собой;

-введением дополнительного порообразователя, который увеличивает пористость черепка и в момент формования вытесняет связку с поверхности зерен, концентрирует ее в местах контактов. При этом частицы порообразователя остаются в черепке инструмента и только в процессе шлифования удаляются с рабочей поверхности.

Мелкодисперсный абразивный наполнитель, кроме увеличения число контактов между зернами, также армирует мостики связки черепка инструмента. Все это позволяет получать инструменты с заданными твердостью и прочностью при меньшем содержании в них связки.

Известно, что излишки связки, обволакивая поверхность зерен, уменьшают размеры пор, увеличивают трение при шлифовании и тем самым значительно ухудшают эксплуатационные показатели инструмента. Только связка, расположенная в местах контакта зерен, участвует в повышении физико-механических свойств черепка инструмента.

Все это позволяет получать инструмент специального строения 6-8 структуры, отличающийся от серийного, и на 10-15% сократить содержание связки в нем.

Связка в абразивную массу вводится в определенных количествах в зависимости от типа связки, твердости, номера структуры и зернистости инструмента.

Потребное количество связки V_C в рецепте для инновационных инструментов из зерна 24А(25А) на связке К5 и из зерна 63С на связке К10 с учетом введения в абразивную массу наполнителей рекомендуется определять по следующим формулам:

- для 24А:

$$V_C = [(N-2)+1,25K_H] \cdot K_3 \cdot K_C ; \quad (1)$$

- для 63С:

$$V_C = [(N-2)+1,25K_H] \cdot K_3 \cdot K_C , \quad (2)$$

где N – номер структуры инструмента; K_H – коэффициент, зависящий от твердости (таблица 1); K_3 – коэффициент номера зернистости (табл. 2); K_C – коэффициент типа связки (табл. 2).

Табл.1. Числовые значения коэффициента K_H

Твердость	M1	M2	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2	CT3
K_H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Табл. 2. Числовые значения коэффициентов K_3 и K_C

Номер зернистости	50	40– 32	25– 16	12	10– 6
K_3	1	0,9	0,85– 0,80	0,75	0,7
связка	K5			K10	
K_C	0,95			0,8	

Главными показателями рабочей поверхности абразивного инструмента являются размер и количество пор, среднее расстояние между зернами, количество этих зерен на рабочей поверхности, число контактов между зернами (координационное число).

Сравнивая высокопористый инструмент 10-й структуры, изготовленный с применением выгорающих порообразователей, и инструмент 8-й структуры, изготовленный по предлагаемой инновационной технологии, видно, что эти инструменты незначительно отличаются в части среднего расстояния между зернами на рабочей поверхности (до 6%), пористости (до 8%). Однако инструмент 10-й структуры в 1,4 – 1,5 раза менее прочен на разрыв, чем инновационный инструмент 8-й структуры, имеющий на 20 % больше контактов между зернами.

Заключение

Исходя из параметров рабочей поверхности и механической прочности инструментов (табл. 3) можно заключить, что наибольшая производительность может быть достигнута при шлифовании экспериментальным высокопористым инструментом 8-й структуры при равной теплонапряженности процесса шлифования в сравнении с инструментами 10-й структуры. При этом необходимо еще учитывать и тот факт, что с увеличением номера структуры увеличивается и объем связки, приходящийся на одно зерно. Это приводит к увеличению сил резания, затрачиваемых на трение связки об обрабатываемый материал.

Инновационно-технологическое обеспечение структурно-механических свойств абразивных инструментов позволило получить высокопористый инструмент 8-й структуры путем введения в него невыгорающих порообразующих наполнителей для увеличения количества и размера пор, соотносящихся с инструментом 10-ой структуры, а также мелкодисперсного наполнителя для обеспечения требуемой прочности инструмента.

Инновационная разработка исследуемого высокопористого абразивного инструмента защищена двумя патентами на изобретения №2215643 и №2262434 .

Список литературы

1. Пат. 2215643 РФ. Абразивный инструмент / В.М. Шумячер В.М., Назаренко В.А., Крюков С.А., Дуличенко И.В. // Бюл. № 9. – 2001. – 3 с.
2. Пат. 2262434 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента/ Шумячер В.М., Славин А.В., Дуличенко И.В., Крюков С.А. / Бюл. № 29. – 2005. – 3 с.

3. **В.И. Курдюков** Научные основы проектирования абразивных инструментов / Курдюков В. И. : Монография. - В. И. Курдюков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Кург. гос. ун-т. - Курган : Изд-во Кург. гос. ун-та, 2005. - 159 с.
4. **Н.В. Носов** Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей / Носов Н.В.: дис. ... д-ра техн. наук. – Самара, 1997. – 452 с.
5. **В.М. Шумячер** Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов : монография / Шумячер В. М., Славин А. В., Крюков С. А. / под общ. ред. В. М. Шумячера ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т , ВИСТех (филиал) Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. – 135 с.
6. **П.И. Ящерицын** Шлифование с подачей СОЖ через поры круга. / Ящерицын П.И., Караим И.П. – Минск: Наука и техника, 1974. – 256 с.
7. **Крюков, С. А.** Диспергометр для определения поверхностной твёрдости абразивных инструментов / С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 11. - С. 62-65.
8. **Пушкарев, О. И.** Оценка поверхностной прочности и трещиностойкости абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Справочник. Инженерный журнал. - 2017. - № 6 (243). - С. 3-8.
9. **Пушкарев, О. И.** Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 2. - С. 49-52.
10. Анализ влияния состава смазочно-охлаждающей жидкости на качество финишной обработки изделий из высокотвёрдых керамических материалов / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Т. В. Ерещенко, А. А. Чураков // Справочник. Инженерный журнал. - 2016. - № 10. - С. 3-6.
11. **Славин, А. В.** Влияние внешних факторов на износ абразивных зёрен при обработке титановых сплавов / А. В. Славин, С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Тяжёлое машиностроение. - 2016. - № 3-4. - С. 38-39.
12. **Байдакова, Н. В.** Влияние формы и зернистости абразивного зерна на эффективность процесса шлифования / Н. В. Байдакова, С. А. Крюков, А. В. Славин // Тяжёлое машиностроение. - 2016. - № 3-4. - С. 35-37.
13. Байдакова, Н. В. Выбор основных параметров и конструктивных особенностей виброклассификатора типа ВДК для отсева абразивных материалов по форме / Н. В. Байдакова, В. А. Назаренко, С. А. Крюков // Тяжёлое машиностроение. - 2016. - № 10. - С. 18-20.
14. **Крюков, С. А.** Зависимость износостойкости абразивных инструментов от влияния внешней среды и технологических воздействий / С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Справочник. Инженерный журнал. - 2016. - № 8. - С. 28-31.
15. **Kryukov, S.A.** State of problem of technological support of workpiece surface quality during grinding/ Kryukov, S.A., Baidakova, N.V., Bochkarev, P.Y.// (2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, (9783319956299), pp. 1427-1433. - DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_151
16. **Kryukov, S.A.** Dependence of roughness parameters of workpiece surface on structural characteristics of grinding discs/ Kryukov, S.A., Baidakova, N.V.//(2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, (9783319956299), pp. 1421-1426.- DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_150

Повышение эксплуатационных характеристик шлифинструмента за счёт количественной меры оценки формы частиц шлифовальных материалов

Гребенникова Н.Н.^{1*}

¹Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Существующие пути повышения эксплуатационных параметров шлифовального инструмента до настоящего времени в полной мере не охватывают вопросы влияния формы и геометрии шлифовальных зерен, используемых для изготовления этих инструментов, несмотря на то, что от геометрических характеристик абразивных зерен могут зависеть конечные результаты применения тех или иных изделий. В представленном материале делается попытка описания методики количественной оценки формы зерен для наиболее оптимального использования резервов повышения эксплуатационных характеристик шлифинструмента, зависящих, в определенной мере, как от размера, так и от формы зерен. Делается вывод о необходимости отработанной и обоснованной методики этой оценки (в т.ч. для целей разработки промышленного оборудования для получения партий шлифматериалов с заданной формой).

Ключевые слова: геометрия шлифовальных зерен; шлифовальный инструмент; шлифовальный материал; повышение эффективности шлифования.

Improving the performance of a grinding tool due to a quantitative measure of the shape of particles of grinding materials

Grebennikova N.N.^{1}*

¹*Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

The existing ways to increase the operational parameters of the grinding tool to date do not fully cover the impact of the shape and geometry of the grinding grains used for the manufacture of these tools, despite the fact that the final results of the use of certain products may depend on the geometric characteristics of the abrasive grains. In the presented material, an attempt is made to describe a method for quantitative assessment of the shape of grains for the most optimal use of reserves for improving the operational characteristics of a grinding tool, depending, to a certain extent, both on the size and shape of the grains, it is necessary to work out and justified (including for development purposes industrial equipment for receiving batches of grinding materials with a given shape).

Key words: *geometry of grinding grains; grinding tool; grinding material; increased grinding efficiency.*

Введение

Большинство исследователей в области абразивного производства считают, что одним из важнейших факторов, влияющих на качественные показатели изделий из

абразивного материала, является, наряду с размером частиц, также и их геометрическая форма.

Существующие пути повышения эксплуатационных параметров шлифовального инструмента до настоящего времени в полной мере не охватывают вопросы влияния формы и геометрии шлифовальных зерен, используемых для изготовления этих инструментов, несмотря на то, что от геометрических характеристик абразивных зерен могут зависеть конечные результаты применения тех или иных изделий.

1. Гипотеза

Анализ исследований по теме «форма зерна» позволяет сделать вывод о том, что наиболее приемлемой методикой является вычисление коэффициента формы в 3-х координатной системе. Это дает возможность:

- определить геометрические размеры по 3-м координатам;
- вычислить реальный объем зерна;
- определить особенности рельефа поверхности зерна;
- предложить количественную меру классификации всего многообразия форм отдельных зерен с помощью определенного числового ряда.

Последнее особенно важно, т.к. позволяет перейти от грубой качественной оценки форм зерен (изометричные, неизометричные, пластинчатые и игольчатые) к более точной и адекватной сфере применения количественной оценки «Формы» отдельного зерна.

Только имея такую оценку формы зерна, возникает реальная возможность приступить к разработке теории вибросепарации сыпучих сухих материалов по форме зерен.

В шлифматериалах, полученных традиционным путем, содержатся частицы разной формы – близкие к шарообразной, кубической форме (обычно их называют изометричными), по форме напоминающие параллелепипед, утолщенные и утонченные пластинки, игольчатые. Последние часто называют неизометричными. То есть форма частиц в исходном материале плавно и последовательно меняется от сферической до пластинчатой и игольчатой. Деление всех частиц на два класса – изометричные и неизометричные – является достаточно грубым даже с качественной стороны и не может быть оценено количественно и применяться при разработке технологического оборудования и технологических процессов для разделения частиц по их форме, как, например, рассев зерна по номерам зернистости, где определяющим фактором является количественная мера – размер частиц. Это легко увязывается с ситовым способом получения шлифматериала.

2. Теоретическая часть

Известны работы многих авторов по разработке методики количественной оценки формы частиц. В качестве такой оценки был принят коэффициент формы, который мог определяться по одной из следующих формул

$$K_{\phi} = \frac{l}{h}, \quad (1)$$

где l – длина проекции частицы; h – ширина проекции.

$$K_{\phi} = \frac{D_{\text{оп}}}{D_{\text{вп}}} \quad \text{или} \quad K_{\phi} = \frac{S_{\text{о.о}}}{S_{\text{в.о}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{оп}}$ ($S_{\text{о.о}}$) – диаметр (площадь) окружности, описанной вокруг проекции частицы; $D_{\text{вп}}$ ($S_{\text{в.о}}$) – диаметр (площадь) окружности, вписанной в проекцию частицы.

Были получены весьма полезные результаты, позволяющие оценивать количественную составляющую геометрической формы частицы, но учитывающие лишь одну проекцию частицы.

Перспективным методом разделения частиц одновременно по размеру и по форме является вибросепарация сыпучих материалов на наклонной вибрирующей поверхности.

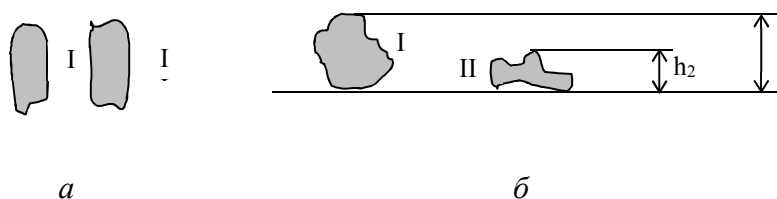
Известно, что при классификации на бесситовом виброклассификаторе шлифматериала по номерам зернистости наблюдается повышенное содержание изометричных зерен в готовом продукте. Для изучения причин этого эффекта было предположено, что наряду с достаточно хорошо изученным процессом разделения зерен по размеру идет и процесс классификации зерен по форме.

3. Экспериментальная часть

Был проведен следующий эксперимент, для чего отобрали частицы, имеющие приблизительно одинаковую проекцию на плоскость, на которой они лежали. Тогда, в соответствии с вышеприведенными формулами, коэффициент формы у них примерно одинаков. Но частицы имели различную высоту.

Одна проба содержала частицы вида *I*, а другая – частицы вида *II*.

При подаче на вибрирующую плоскость частиц указанных проб при одинаковых параметрах настройки вибросепаратора наблюдалась следующая картина. Траектории частиц пробы *II* оказались выше траекторий частиц пробы *I*.



a – вид сверху; *б* – вид сбоку

Рисунок 1 – Примеры проекций частиц, отобранных для эксперимента

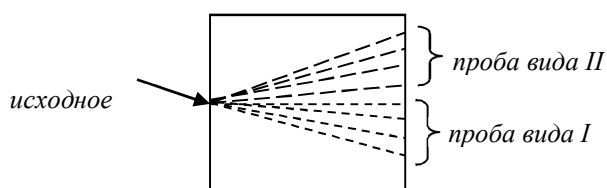


Рисунок 2 – Траектории частиц по поверхности деки

При этом было замечено, что чем больше разница между h_1 и h_2 (рисунок 1), тем дальше расходятся траектории частиц на вибрирующей плоскости.

Этот замеченный эффект позволяет сделать следующие выводы:

– коэффициент формы частиц, определяемый только по одной проекции по формулам (1) или (2), при уточнении теории вибросепарации по размеру частиц, будет малоэффективен, т.к. зерна различной толщины при одном и том же коэффициенте формы, вычисленном по одной проекции, занимают на поверхности деки не строго определенную траекторию, а некоторую зону. Частицы с наименьшей толщиной оказываются на самой

высокой траектории зоны, а частицы, имеющие наибольшую толщину, располагаются ниже частиц, занимающих средние траектории;

– при анализе теории вибросепарации частиц по форме зерен такое определение формы частицы не позволит получить уравнения траекторий частиц на вибрирующей наклонной поверхности, описывающие с достаточной точностью реальный процесс. Это затруднит разработку промышленного технологического процесса, получения (выделения из общей массы) абразивных материалов с заданными геометрическими характеристиками;

– необходимо разработать новую математическую модель (коэффициент формы), учитывающую вышеописанный эффект.

4. Предлагаемая методика оценки формы зерна

Мы предлагаем коэффициент формы, учитывающий особенности поведения частиц на виброплоскости и позволяющий объяснить результаты проведенного эксперимента.

Для разработки количественной меры оценки формы частиц сыпучих материалов и, в частности абразивных зерен, введем коэффициент Φ .

$$\Phi = \frac{d_{\text{вп}}^2}{S} \cdot \frac{\pi}{4}, \quad (3)$$

где S – площадь проекции зерна; $d_{\text{вп}}$ – средний диаметр вписанных окружностей.

Таким образом, $\Phi = 1$ для абсолютно круглой (сферической) частицы. Такие частицы в изолированном режиме на виброплоскости при любых параметрах настройки всегда скатываются вниз. Для зерна в форме куба с ребром единичной длины $\Phi = \pi/4 \approx 0,785$. Игольчатые формы зерен будут иметь $\Phi \rightarrow 0$. Такие частицы движутся вверх.

Учитывая особенности поведения частиц на виброплоскости, нужно вычислять коэффициент формы абразивных зерен в объеме, т.е. используя три проекции. Для более оптимального определения геометрических параметров зерен сначала вычисляются коэффициенты Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 для каждой из проекций. Затем вычисляется итоговое значение – так называемый «технологический» коэффициент формы Φ

$$\Phi = (n_1 \cdot \Phi_1 + n_2 \cdot \Phi_2 + n_3 \cdot \Phi_3) / 3, \quad (4)$$

где n_1, n_2, n_3 – определяются из следующих условий минимальности Φ_1, Φ_2 или Φ_3 :

если $\min = \Phi_1$, то $n_2 = \Phi_1 / \Phi_2, n_3 = \Phi_1 / \Phi_3, n_1 = 3 - n_2 - n_3$,

если $\min = \Phi_2$, то $n_1 = \Phi_2 / \Phi_1, n_3 = \Phi_2 / \Phi_3, n_2 = 3 - n_1 - n_3$,

если $\min = \Phi_3$, то $n_1 = \Phi_3 / \Phi_1, n_2 = \Phi_3 / \Phi_2, n_3 = 3 - n_1 - n_2$.

Чем сильнее различаются коэффициенты Φ_1, Φ_2, Φ_3 , тем ближе будет «технологический» коэффициент формы Φ к меньшему из них.

Наглядно представить физический смысл приведенной модели можно с помощью следующей диаграммы (Рис. 3), где для нахождения коэффициента Φ была взята «идеальная» геометрическая фигура – параллелепипед, стороны которого составляют отрезки единичной длины, а третий размер изменяется от близкого к нулю в сторону увеличения.

Актуальной задачей оставалось практическая оценка значения данного коэффициента. Для ее решения и создания основ САПР процесса виброклассификации абразивных материалов бесситовым способом на виброклассификаторах типа ВДК разработана компьютерная программа для вычисления коэффициента формы шлифзерна.

Эта программа, используя информацию о трех проекциях зерна, на первом этапе определяет «похожесть» зерна на соответствующую «идеальную» геометрическую фигуру

(многогранник или тело вращения) и устанавливает принадлежность частицы к той или иной форме. На 2-м этапе рассчитывается коэффициент формы зерен с использованием изображений 3-х проекций зерна, размер отдельных зерен, процентное содержание фракции. Это позволит перейти от грубой качественной оценки форм зерен (изометричные, неизометричные, пластинчатые и игольчатые) к количественной оценке «формы» отдельного зерна, которая является более точной и адекватной к различным сферам применения этого показателя, и рассчитать количественные характеристики зерен различных геометрических форм с целью уточнения теории вибросепарации, прогнозирования траектории частицы на виброплоскости и, как следствие, для осуществления классификации частиц одновременно и по размеру, и по форме.

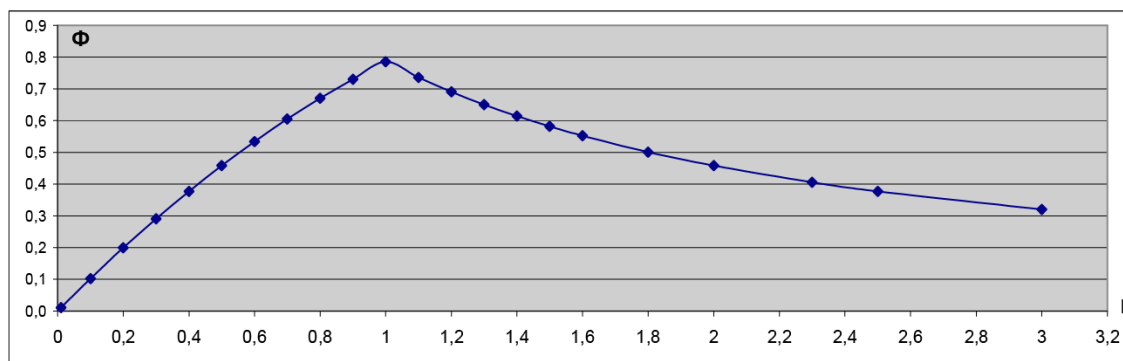


Рисунок 3 – Модификация «технологического» коэффициента формы Φ частицы в форме параллелепипеда в зависимости от изменения размера одной из сторон

5. Активизация физико-химического влияния СОТС на показатели шлифования

Процессы трения и изнашивания при шлифовании развиваются в тонком поверхностном слое, который отличается высокой дефектностью кристаллического строения, высокой химической активностью с внешней средой, формированием поверхностных пленок, высокой концентрацией напряжений, повышенной контактной температурой и интенсивностью диффузионных процессов. Все перечисленные особенности в тонком поверхностном слое приводят к изменению химического и фазового состава материала, то есть приводят к формированию вторичных структур (нередко в виде оксидов и твердых растворов на их основе), отличающихся высокой прочностью, теплостойкостью, низкой теплопроводностью.

При подборе СОТС для шлифования изделий из сталей электрокорундовыми кругами необходимо знать физические особенности взаимодействия абразива с обрабатываемым материалом, влияющие на величину и механизм его износа. Данный показатель определяется взаимодействием механического, физико-химического и термического процессов: явления пластификации и охрупчивания, деформации и разрушения, нагрева, окисления и химического взаимодействия в поверхностном слое.

Установлено, что в начальный период взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемыми и смазочными материалами, газами в контактной зоне при трении формируется тонкопленочная фаза (вторичная структура) толщиной $(2...10) \cdot 10^{-3}$ мкм, которая по составу, строению и свойствам отличается от исходных материалов пар трения [1].

Формирование вторичных структур – термодинамически неизбежный акт пассивации активированных трением поверхностных слоев твердых тел.

Структурные изменения поверхностного слоя металла являются результатом температурных явлений, протекающих в зоне резания и распространяемых вглубь обрабатываемой поверхности. При этом характер и глубина структурных изменений определяются величиной температуры и интенсивностью охлаждения детали за счет применения активных СОЖ на начальных стадиях их разработки и использования твердых смазок в процессе импрегнирования инструмента, что в совокупности определяет свойства смазочно-охлаждающей технологической среды.

Широкое распространение получила пропитка абразивного инструмента расплавом технической серы, так как сера обладает ярко выраженными антифрикционными свойствами и способствует образованию при шлифовании пленки в виде химических соединений с железом, которые препятствуют адгезионному «схватыванию» рабочей части круга с обрабатываемой поверхностью металла. Но процесс пропитки расплавом серы сопряжен с рядом трудностей из-за низкой смачиваемости серой абразивного инструмента на керамической связке. Расплав серы имеет высокую вязкость, из-за чего процесс пропитки производят в вакууме или под давлением, регулирование концентрации серы в пропитанном круге не представляется возможным, уменьшается реальная возможность применения кругов, пропитанных технической серой, при скоростном шлифовании металла из-за наличия дисбаланса шлифкругов.

Присадка каптакса к сере в количестве 0,1–1 % значительно улучшает пропиточные свойства серы с точки зрения ее проникающей способности равномерного распределения серы в теле круга и уменьшения ее количества в круге, обеспечивая адсорбцию серы на всех свободных поверхностях связки и абразивных зерен, оставляя круг пористым. При этом дисбаланс кругов, пропитанных серой с каптаксом, сводится до минимума.

Проведенные испытания пропитанных серой и серой с каптаксом шлифовальных кругов на операциях шлифования деталей подшипников с применением водной СОЖ (раствора нитрита натрия и триэтанолamina в 0,7 %-ной концентрации каждого) указывают на высокое качество обработанной поверхности (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели испытаний

Пропиточный состав	Качество поверхности	
	шероховатость R, мкм	характер прижогов
Без пропитки	0,8–1,0	сильный
Сера	0,63–0,80	штриховой
Сера – 99 %, Каптакс – 1 %	0,50–0,63	отдельные штрихи

Это связано с тем, что шлифовальный круг на керамическом связующем является гидрофильным композитом, взаимодействие которого с водными СОЖ вследствие миграции молекул H₂O в устье микротрещин мостиков связки приводит к понижению его поверхностной энергии. Наличие специфических компонентов водных СОЖ (нитритов) создает условия для поверхностного растворения этой жидкостью керамической связки. Введение в структуру керамической связки круга компонента, обладающего высокой проникающей способностью, одновременно формирует на поверхности керамики слой с гидрофобными свойствами. Пропитка абразивного инструмента расплавом серы способствует минимизации температуры в зоне обработки за счет процесса абляции, что исключает появление прижога на металле и повышение стойкости режущего инструмента [2]. Существует много точек зрения на причину высокой эффективности импрегнирования серой как средством, исключая образование прижогообразования. На основе проведенных нами анализа и расчетов наиболее реалистичен следующий механизм действия. В условиях высоких градиентов температур (10⁶ °C/с) создаются условия для сублимации (возгонки)

серы. Сам переход из твердого в газообразное состояние приводит к ускорению на 3 порядка отвода тепла из точек стружкообразования. Поэтому сера как импрегнатор в момент пропитки круга блокирует его поровое пространство, что предотвращает проникновение жидкости в тело круга. С другой стороны, находясь на поверхности зерен, в мостиках связки сера транспортируется в точки максимального тепловыделения, минимизируя, а часто сводя на нет прижообразование.

Выводы

Высокие местные температуры и давления способствуют химическому взаимодействию активной серы с металлом. Образующаяся малопрочная пленка сернистого железа легко соскабливается абразивным зерном. Обнаженная металлическая поверхность, обладающая повышенной реакционной способностью, вновь вступает во взаимодействие с компонентами СОЖ и серой. Непрерывно протекает процесс разрушения и регенерации сульфидных пленок, покрывающих образованные за счет распада молекул воды под действием возникающего электрического тока на контактных поверхностях оксидные пленки металла.

Таким образом, при шлифовании в зоне контакта обрабатываемой металлической заготовки и абразивного зерна возникает процесс взаимодействия деформации, трения и разрушения, на соотношение величин которых влияют физико-механические и химические свойства контактирующих материалов. Осуществляя подбор компонентов смазочно-охлаждающей технологической среды, возможно повысить эффективность шлифования, снижая экономические затраты на разработку составов, контролируя при этом экологическую сторону процесса обработки, связанную с утилизацией отработанных СОЖ.

Список литературы

1. **Зубарев, Ю. М.** Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учебное пособие / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемывшев. – СПб. : Лань, 2010. – 304 с.
2. **Эльянов, В. Д.** Прижоги при шлифовании : обзор / В. Д. Эльянов, В. Н. Куликов. – М., 1974. – 64 с.
3. **Крюков, С. А.** Диспергометр для определения поверхностной твердости абразивных инструментов / С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 11. - С. 62-65.
4. **Пушкарев, О. И.** Оценка поверхностной прочности и трещиностойкости абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Справочник. Инженерный журнал. - 2017. - № 6 (243). - С. 3-8.
5. **Пушкарев, О. И.** Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 2. - С. 49-52.
6. Анализ влияния состава смазочно-охлаждающей жидкости на качество финишной обработки изделий из высокотвёрдых керамических материалов / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Т. В. Ерещенко, А. А. Чураков // Справочник. Инженерный журнал. - 2016. - № 10. - С. 3-6.

Данные для моделирования параметров качества абразивного инструмента в зависимости от его твердости и макрогеометрических характеристик зерна

Шепелев И.В.^{1*}, Крюков С. А.¹

¹Аспирант, Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Для автоматизации процесса измерения твердости абразивного инструмента в статье предлагается метод обработки полученных данных в системе компьютерной математики MathCAD. Качество абразивного инструмента также напрямую связано с рабочими свойствами шлифовального зерна. То есть, помимо вида абразивного материала, на качество инструмента в целом, прежде всего, влияет его гранулометрический состав: размеры и форма зерен. Поэтому в статье предлагаются математические зависимости для описания макрогеометрических характеристик зерна, которые в значительной мере определяют качество абразивного инструмента.

Ключевые слова: твердость абразивного инструмента; макрогеометрические характеристики зерна; структурно-механические свойства; диспергометр.

Measuring the hardness of an abrasive tool with a pendulum dispersometer

Shepelev I.V.^{1}, Kryukov S. A.¹*

¹Graduate Student, Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

In order to automate the process of measuring the hardness of an abrasive tool, the article proposes a method for processing the obtained data in the computer mathematics system MathCAD. The quality of the abrasive tool is also directly related to the working properties of the grinding grain. That is, in addition to the type of abrasive material, the quality of the tool as a whole is primarily affected by its particle size distribution: the size and shape of the grains. Therefore, the article proposes mathematical dependencies to describe the macrogeometric characteristics of the grain, which largely determine the quality of the abrasive tool.

Key words: *the hardness of the abrasive tool; makrogeometricheskie characteristics of grain; structural and mechanical properties; dispersometer.*

Введение

На сегодняшний день понятие твердости абразивных инструментов по смыслу не совпадает с аналогичным понятием, определяющим свойства металла и других твердых тел. Твердость абразивного инструмента характеризует объемное содержание связки, т.е. под твердостью абразивного инструмента понимается сопротивляемость связки вырыванию абразивных зерен с поверхности инструмента под действием внешних усилий.

Существует большое количество методов для определения твердости абразивного инструмента, но каждый метод имеет свои недостатки и применим в определенных условиях. В большинстве методы основаны на определении прочности удержания зерен в инструменте и не отражают условий реального взаимодействия абразивного инструмента с поверхностью обрабатываемого изделия. В этом аспекте выгодно отличается маятниковый диспергомер, в котором применен цилиндрический индентор в виде ролика из стали Р6М3, как наиболее близко имитирующий истинный контакт поверхности абразивного инструмента с обрабатываемым изделием и моделирующий при колебаниях процесс шлифования.

Основным достоинством маятникового диспергометра является высокая чувствительность к изменению структурно-механических свойств инструмента под влиянием внешней среды. Это объясняется тем, что для проявления влияния среды необходимо, чтобы процесс разрушения поверхности повторялся многократно, периодически, что и обеспечивается индентором маятникового диспергометра при его колебаниях. Подтверждением этому служат работы П.А. Ребиндера, в которых для исследования эффективности действия поверхностно-активных веществ на минералы и кристаллы был использован метод затухающих колебаний маятника.

1. Измерение твердости абразивного инструмента

Схема маятникового диспергометра представлена на рис. 1. Он состоит из рамки 1, в верхней части которой закреплен цилиндрический индентор 2, стержня маятника 4 с грузами 5. Испытуемый образец абразивного инструмента 3 закреплен на площадке 6.

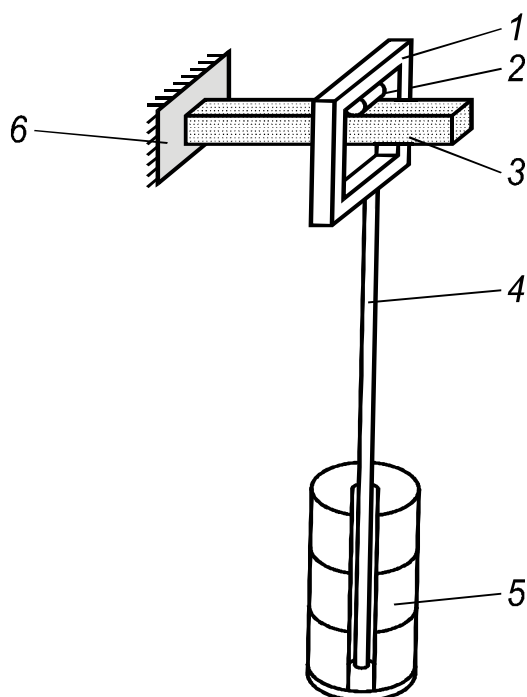


Рис. 1. Схема маятникового диспергометра

При отклонениях и колебаниях маятника диспергометра индентор внедряется в поверхность инструмента, вызывая ее диспергирование. В зависимости от степени разрушения поверхности амплитуда колебаний маятника с течением времени уменьшается с различной интенсивностью, характеризуя затрачиваемую энергию на образование новой поверхности или объема диспергированного материала. Известно, что чем больше твердость или прочность материала, тем большую энергию нужно затратить для его разрушения. Затухание колебаний маятника диспергометра будет зависеть от степени разрушения поверхности инструмента под индентором. Чем меньше твердость (прочность) поверхности инструмента, тем легче происходит разрушение поверхности под индентором, тем глубже проникает индентор и тем быстрее происходит затухание колебаний маятника. Таким образом, маятниковым диспергометром можно определять относительные значения твердости

поверхности абразивных инструментов. Для этих целей при измерениях твердости через равные интервалы времени фиксируются амплитуды затухающих колебаний маятника диспергометра и строятся кривые зависимости амплитуды от времени. Затем проводится

касательная к кривой $A = A(t)$ в начальной точке при $t = 0$ до пересечения с осью t . Величина подкасательной, выражаемая в секундах, берется за меру твердости Hg и определяется по формуле:

$$Hg = \frac{A_0}{\left(\frac{dA}{dt}\right)_0}. \quad (1)$$

2. Автоматизация процесса

С целью автоматизации процесса измерения предлагается оснастить прибор датчиком угла наклона, что позволит передавать информацию об отклонениях маятника непосредственно в компьютер. Обработку полученных данных предлагаем вести в системе компьютерной математики MathCAD. Для получения значений отклонений стержня маятника необходимо умножить синусы полученных углов отклонений на длину маятника. Полученные отклонения будут иметь положительные и отрицательные значения, однако для получения функциональной зависимости амплитуды от времени необходимо перевернуть отрицательные полувольты (рис. 2).

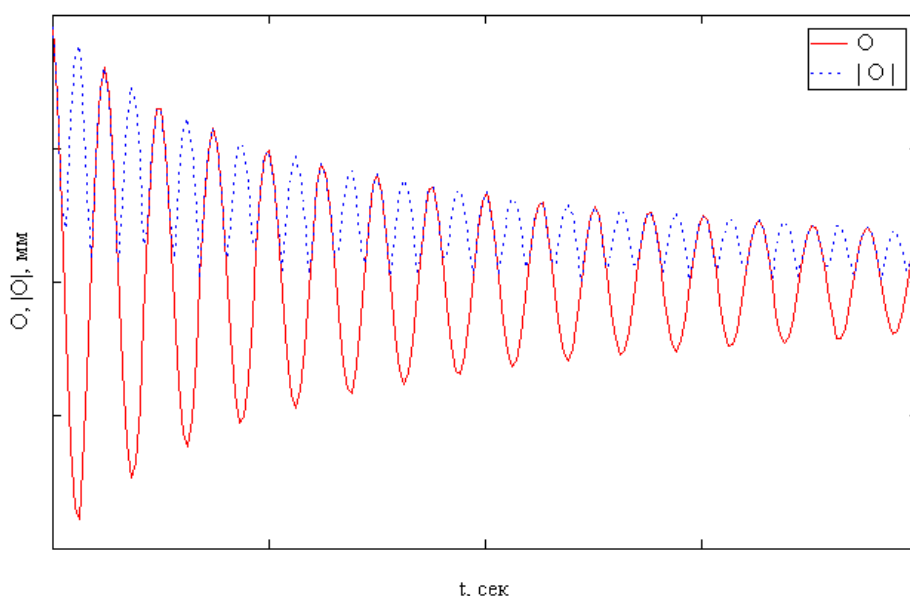


Рис. 2. Отклонения маятника O и модуль отклонений $|O|$

Для отыскания зависимости $A(t)$ необходимо провести линию через вершины полувольт $|O|$. В качестве сглаживающей функции предлагаем использовать полином 5 степени. К полученной функции проводится касательная (рис. 3). Интервал времени от t_0 до точки пересечения касательной и оси OX и есть искомая величина Hg .

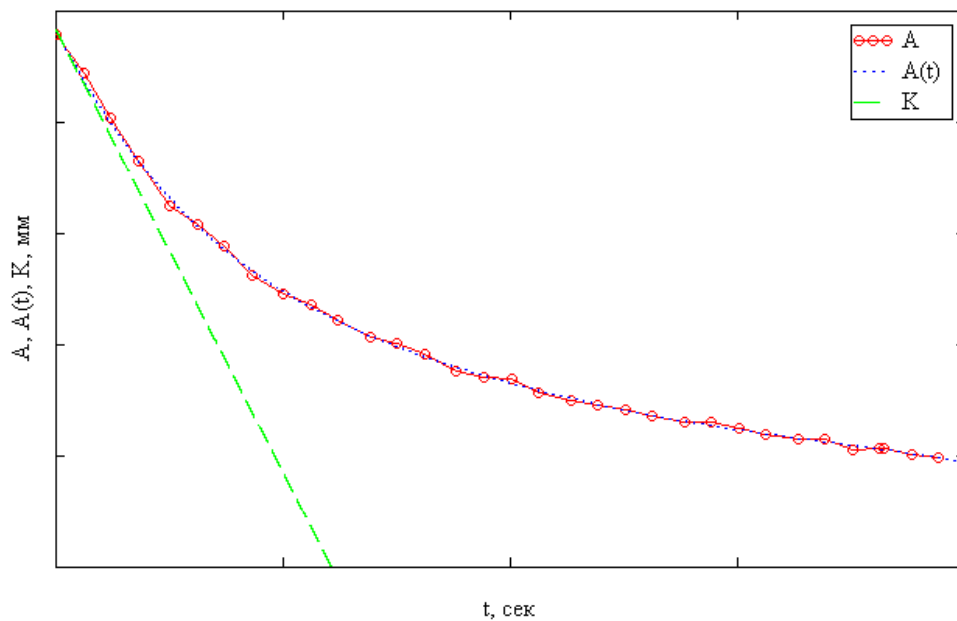


Рис. 3. Амплитуда маятника A , теоретическая кривая $A(t)$ и касательная K

3. Математические зависимости для определения характеристик абразивного зерна

Рабочие качества шлифовального зерна, помимо вида абразивного материала, прежде всего, определяет его гранулометрический состав. Размеры и форма зерна в значительной мере определяют свойства абразивного инструмента. На сегодняшний день существует ряд работ, посвященных вопросу изучения макрогеометрических характеристик абразивного зерна, выполненных такими учеными как Ваксер Д. Б., Хагер, Хиршвальд, Брикс, Лавров И. В. и т.д.

В качестве исходных данных использовались исследования Лаврова И. В. по выявлению законов распределения макрогеометрических характеристик зерна электрокорунда белого. Как показал предварительный анализ, все эти характеристики зависят от номера зернистости, следовательно, возможно установление функциональной взаимосвязи между номером зернистости и изучаемыми характеристиками. Для аппроксимации функции использовалась линейная зависимость.

В результате регрессионного анализа были получены следующие аналитические зависимости параметров распределения длины зерна от номера зернистости:

$$l_{\max} = 35,41 N - 59,99, \quad r = 0,997, \quad (2)$$

$$l_{\min} = 12,62 N - 46,32, \quad r = 0,869, \quad (3)$$

$$a_l = 20,7 N - 28,23, \quad r = 0,998, \quad (4)$$

$$\sigma_l = 3,39 N + 12,46, \quad r = 0,995. \quad (5)$$

Зависимости для параметров распределения ширины зерна:

$$b_{\max} = 20,90 N - 59,99, \quad r = 0,987, \quad (6)$$

$$b_{\min} = 9,34 N - 90,64, \quad r = 0,963, \quad (7)$$

$$a_b = 14,64 N - 59,03, \quad r = 0,993, \quad (8)$$

$$\sigma_b = 1,59 N + 15,95, \quad r = 0,919. \quad (9)$$

Зависимости для параметров распределения высоты зерна:

$$h_{max} = 15,21 N - 13,82, \quad r = 0,993, \quad (10)$$

$$h_{min} = 4,01 N - 32,92, \quad r = 0,954, \quad (11)$$

$$a_h = 10,78 N - 49,10, \quad r = 0,981, \quad (12)$$

$$\sigma_h = 1,78 N + 14,05, \quad r = 0,967, \quad (13)$$

где l , b , h – длина, ширина и высота абразивных зерен; N – номер зернистости; a – математическое ожидание параметров распределения; σ – среднеквадратическое отклонение параметров распределения; r – коэффициент корреляции.

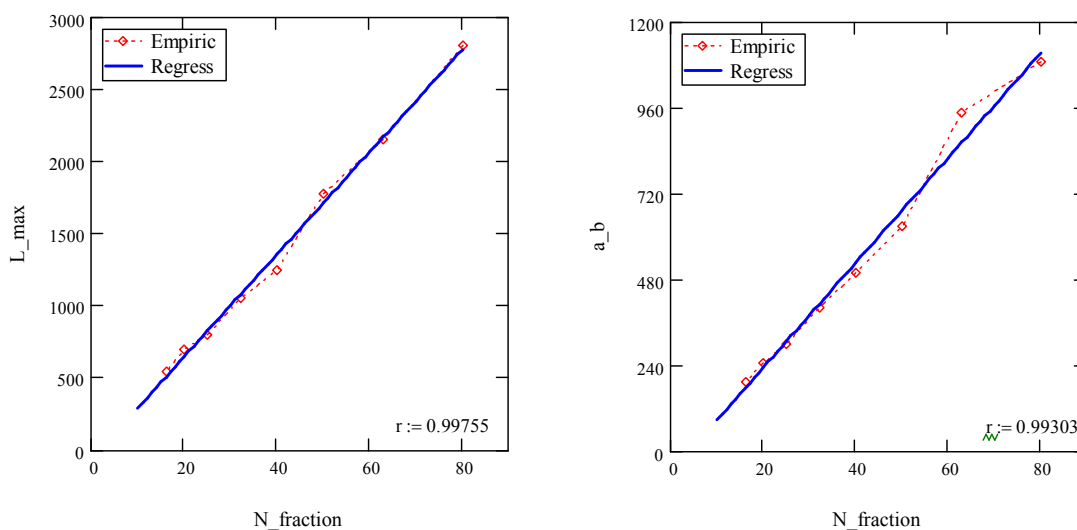


Рис. 4. Зависимости с коэффициентом корреляции $>0,99$

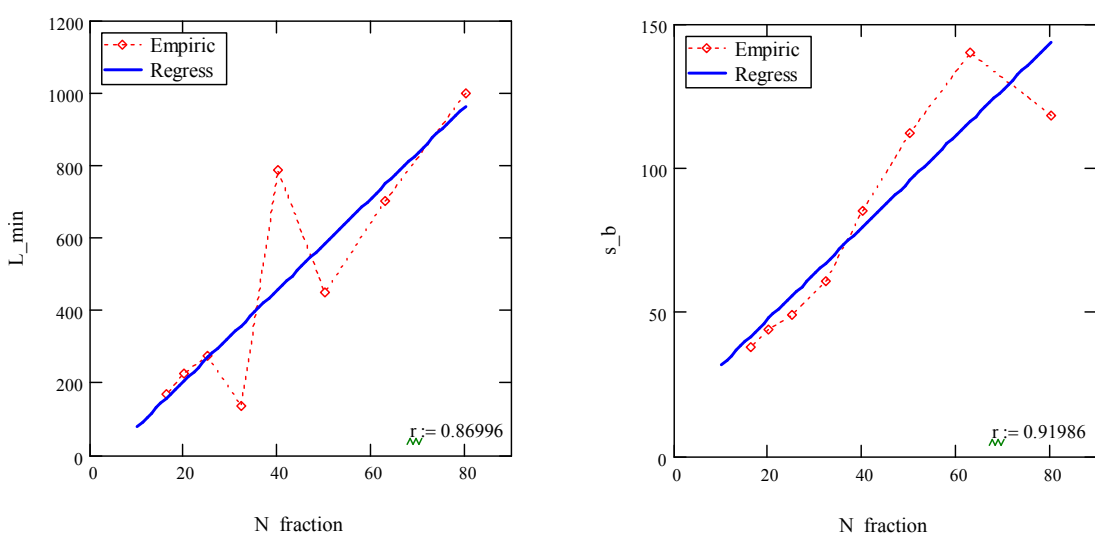


Рис. 5. Зависимости с коэффициентом корреляции $< 0,95$

Анализируя эмпирические ломанные и полученные аналитические выражения можно сделать вывод о соответствии выбранной аппроксимирующей функции и эмпирических данных. Об этом же свидетельствуют коэффициенты корреляции, которые практически во всех случаях имели значения больше 0,95. В ряде случаев коэффициент корреляции имел значения больше 0,99 (рис. 4), что означает практически полное соответствие аналитических выражений экспериментальным данным. И лишь в двух случаях коэффициент корреляции имел значения $< 0,95$ (рис. 5). По рисунку заметны значительные отклонения изучаемых характеристик от теоретической линии. Однако такой разброс параметров может быть обусловлен некоторыми отклонениями в гранулометрическом составе партий изучаемого абразивного зерна.

Список литературы

1. Резников А. Н. и др. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.
2. Ипполитов Г. М. Абразивные инструменты и их эксплуатация. - М.: Машгиз, 1959. - 256 с.
3. Армарего И. Дж. И., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием Пер. с англ. В. А. Пастухова. - М.: Машиностроение, 1977. - 325 с.
4. Бердиков В. Ф., Славин А. В., Крюков С. А. Склерометрическое моделирование основной составляющей процесса абразивной обработки - микрорезание абразивным зерном Точность автоматизированных производств: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. ТАП-97. - Пенза, 1997. С. 156 - 158.
5. **Рибиндер, П. А.** Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. - М.: Наука, 1979. - 384 с.
6. Крюков С. А., Шумячер В. М. Стабилизация и регуляция структурно-механических характеристик абразивных инструментов. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. - 178 с.
7. Падуков В. А., Антоненко В. А., Подозерский Д. С. Разрушение горных пород при ударе и взрыве. - Л.: Наука, 1971. - 160 с.
8. Гаршин А. П., Федотова С. М. Абразивные материалы и инструменты: технология производства: учеб. пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - 1009 с.
9. **Крюков, С. А.** Диспергометр для определения поверхностной твёрдости абразивных инструментов / С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 11. - С. 62-65.
10. **Пушкарев, О. И.** Оценка поверхностной прочности и трещиностойкости абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Справочник. Инженерный журнал. - 2017. - № 6 (243). - С. 3-8.
11. **Пушкарев, О. И.** Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83, № 2. - С. 49-52.
12. **Славин, А. В.** Влияние внешних факторов на износ абразивных зёрен при обработке титановых сплавов / А. В. Славин, С. А. Крюков, Н. В. Байдакова // Тяжёлое машиностроение. - 2016. - № 3-4. - С. 38-39.
13. **Байдакова, Н. В.** Влияние формы и зернистости абразивного зерна на эффективность процесса шлифования / Н. В. Байдакова, С. А. Крюков, А. В. Славин // Тяжёлое машиностроение. - 2016. - № 3-4. - С. 35-37.

Теоретический анализ эксплуатационных характеристик абразивного инструмента на основе информационных технологий

Шумячер В.М.¹, Кулик О.Г.^{1*}

¹Профессор, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Использованный комплексный подход к решению проблемы разрушения абразивного инструмента, представленный в статье, позволяет описать экспериментально спроектированный абразивный инструмент с учетом его структуры, связки, прочности зерен, а также объемом пор. С помощью представленной методики аналитического определения износа абразивного инструмента на основе стереометрической модели можно в дальнейшем решить вопрос образования структуры абразивного инструмента и его работы в реальных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: абразивный инструмент; структура; стереометрическая модель; матрице круга.

Theoretical analysis of the operational characteristics of an abrasive tool based on information technology

Shumyacher V. M.¹, Kulik O. G.^{1}*

Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

The integrated approach used to solve the problem of destruction of an abrasive tool, presented in the article, allows us to describe an experimentally designed abrasive tool taking into account its structure, bond, grain strength, as well as pore volume. Using the presented methodology for the analytical determination of the wear of an abrasive tool based on a stereometric model, it is possible in the future to solve the problem of the formation of the structure of an abrasive tool and its operation in real operating conditions.

Key words: *abrasive tool; structure; stereometric model; matrix of a circle.*

Введение

Одной из особенностей процесса шлифования является то, что при достижении определенной критической нагрузки на круг происходит резкое увеличение интенсивности износа, обусловленное начавшимся осыпанием абразивных зерен с рабочей поверхности круга. Осыпание круга может вызываться двумя причинами: разрушением мостиков связки, удерживающих зерна, и разрушением самих зерен. Преобладание того или иного фактора зависит от соотношения сил, необходимых для разрушения зерна и связки. Знание функциональной зависимости этих сил от характеристик круга позволило бы, не допуская осыпания, вести шлифование с наибольшей производительностью. Решение этого вопроса лежит в плоскости разработки математической модели, отражающей структуру абразивного инструмента.

Существует несколько подходов к решению данной проблемы.

Часть исследователей считает, что зерна соединены между собой мостиками связки, длина которых определяется объемной долей зерен в матрице круга, а центры зерен должны равномерно распределяться в объеме круга и находиться на равных расстояниях друг от друга.

В то же время другие авторы полагают, что абразивные зерна в кругах на керамических связках всегда находятся в контакте. Исходя из этого, структурную модель шлифовального круга на керамической связке можно представить в виде совокупности шаров, скрепленных связкой в точках контакта друг с другом.

На сегодняшний день актуален вопрос описания внутренней и поверхностной структуры абразивного инструмента. В известных работах при моделировании структуры абразивного инструмента для описания формы зерна используются простейшие геометрические фигуры: сферы и эллипсоиды вращения. Однако эти фигуры не в состоянии полно описать сложную структуру абразивного зерна. При разработке модели свободной от недостатков необходимо, чтобы зерна были сориентированы и расположены случайным образом. Таким образом, модель, лишенная выше указанных недостатков, должна состоять из зерен, сформированных, сориентированных и расположенных случайным образом.

В основе рассматриваемой модели лежит последовательное присоединение зерен. Начинается процесс моделирования с расположения начального зерна в произвольной точке в пределах геометрических размеров абразивного инструмента (рис. 1). Далее к нему присоединяются еще два зерна (рис. 2). Расстояния между зернами рассчитываются по формуле:

$$L_i = l_{CP} + \Delta l_i, \quad (1)$$

где l_{CP} – среднее значение длины мостиков связки; Δl_i – отклонение длины мостиков связки, которое принимает случайное значение с учетом нормального распределения.

Следующее зерно присоединяется к трем существующим с образованием треугольной пирамиды, в вершинах которой находятся центры масс зерен (рис. 3). Ребра пирамиды будут являться в модели мостиками связки. Каждое следующее зерно присоединяется к каждой тройке находящихся рядом зерен с образованием тетраэдра. Если при присоединении очередного зерна оказывается, что зерно полностью или частично оказывается за пределами геометрических размеров абразивного инструмента, то оно убирается. Таким образом полностью заполняется весь объем инструмента.

Моделирование отдельных зерен проводится следующим образом. Выбирается некоторая точка. Из нее проводятся отрезки под произвольными углами относительно осей x , y , z . Длина отрезков рассчитывается следующим образом:

$$R_i = D - \Delta r_i, \quad (2)$$

где D – диаметр зерна основной фракции абразивного инструмента, Δr_i – нормально распределенная случайная величина.

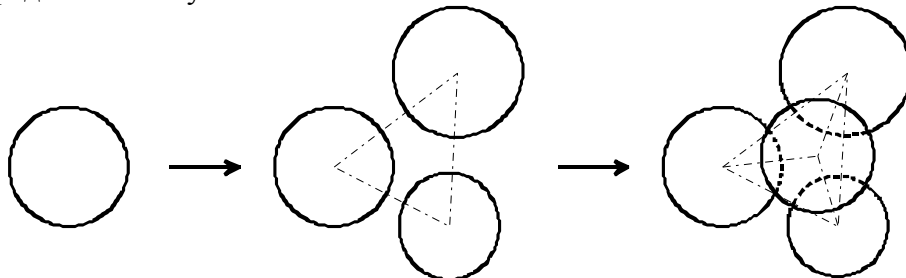


Рис. 1.

Рис. 2.

Рис. 3.

Полученные точки, объединяемые по три, образуют полигон, описывающий поверхность зерна (рис. 4).

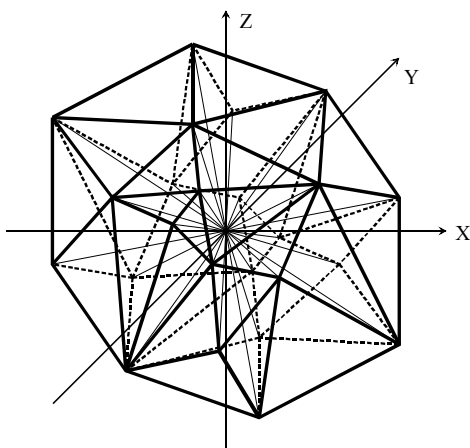


Рис. 4.

Таким образом, модели будут состоять из зерен, имеющих уникальную случайную форму и размеры и связанных мостиками связки случайной длины.

1. Теоретическая часть

Предлагается стереометрическая модель абразивного инструмента, позволяющая выполнить теоретический анализ эксплуатационных характеристик на основе комплексного подхода и современных информационных технологий.

В основу модели были положены следующие параметры: прочностные и геометрические характеристики зерен, прочность связки, структура абразивного инструмента.

Разделим сечение круга, сделанного в произвольно взятом месте, на квадраты со стороной l_v , равной средневероятному расстоянию между зернами в его объеме. В процессе работы круг изнашивается до уровня, ограниченного линией А – А (рис. 5, а).

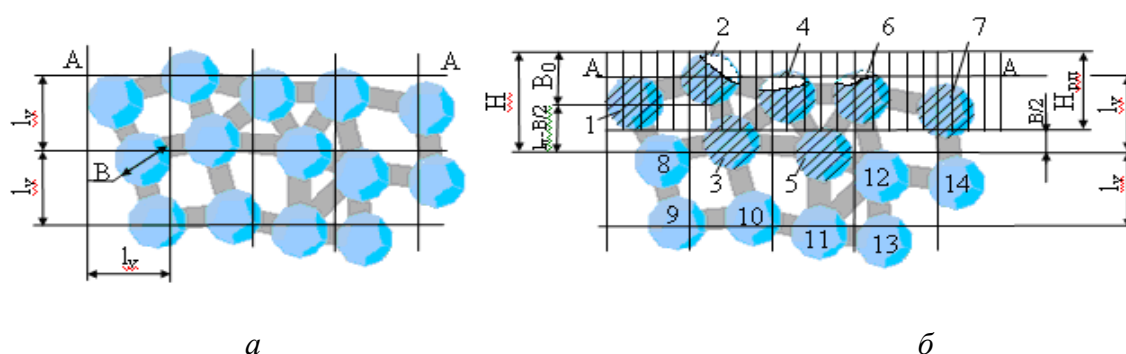


Рис. 5. Анализ структуры абразивного инструмента

Расстояние между зернами в объеме круга l_v можно определить по формуле, предложенной Е. Н. Масловым [1]:

$$l_v = 3 \sqrt{\frac{100000}{(62-2N)yn}}, \quad (3)$$

где N – номер структуры круга, y – удельный вес абразивного материала, n – количество зерен в 1 грамме шлифовального порошка.

Наиболее выступающие зерна круга в процессе его правки и износа за время работы раскалываются, и схема его верхнего слоя будет несколько иной (рис. 5, б).

Зерна расположены в глубине (зерна 8:14), перекрываются более выступающими зернами, которые их окружают, и потому в процессе шлифования участвовать не будут. В связи с этим рабочую поверхность мы должны ограничить размером:

$$H_{pn} = H - \frac{B}{2} = l_v + 0,25B - 0,5B = l_v - 0,25B.$$

В итоге:

$$H_{pn} = 3\sqrt{\frac{100000}{(62-2N)yn}} - 0,25B, \quad (4)$$

где B – размер зерна основной фракции.

Размер H_{pn} показывает высоту зерен, входящих в контакт с деталью. Он рассчитывается, исходя из параметров круга и рабочих условий. На основе этой высоты и случайного распределения зерен по прочности в круге выбираем зерна, входящие в контакт с поверхностью обрабатываемой детали, и рассчитываем, как они будут работать. После их разрушения или вырыва переходить к следующим зернам.

Тогда можно будет оценить степень износа круга, исходя из вышеописанных параметров и режимов работы.

Различают следующие виды разрушения абразивного инструмента: микроразрушение зерна, выкрашивание зерна, вырывание зерна целиком из-за разрушения связки.

Априори при создании модели было принято, что в шлифуемом зерне возникают усилия передаваемые другим зернам через связку. Для определения этих усилий применяем метод Ритора.

Описание механизма разрушения абразивного композита в процессе механической обработки базируется на исследованиях, в которых композит представлен в виде конструкции (неоднородного составного материала), состоящей из отдельных элементов, определённым образом взаимодействующих между собой. При таком подходе представляется возможным получение зависимостей эффективных характеристик разрушения от структурных параметров (свойства армирующего зерна и матрицы, границы раздела между ними, объёмного содержания компонентов, размера армирующей фракции) и использования их при определении рациональных режимов обработки. Построение феноменологической модели, описывающей взаимосвязь энергетических показателей процесса с режимами и структурно-механическими свойствами абразива, может являться основой при разработке технологического процесса изготовления шлифовального круга. Эффективность технологического процесса определяет, как соотношение затраченной полезной мощности электропривода на разрушение единицы объёма, обрабатываемого материалы.

$$\mathcal{E} = K' \frac{N_{\mathcal{E}}}{Q}, \quad (5)$$

где K' – уточняющий коэффициент; $N_{\mathcal{E}}$ – потребляемая мощность электродвигателя главного привода станка, кВт; Q – количество снятого материала, мм³.

Учитывая энергетические затраты на разрушение единицы объёма круга, можно определить экспериментально составляющую силы резания P_z из зависимости:

$$P_z = \frac{9,8 \cdot 75 \cdot N_{\mathcal{E}}}{0,7369 \cdot V_{инструм}} \approx 998 \frac{N_{\mathcal{E}}}{V_{инструм}}, \quad (6)$$

где $V_{инструм}$ - скорость вращения инструмента, м/с.

Для исследования механизма взаимодействия алмазного инструмента со шлифовальным кругом необходимо учесть характер распределения зерен в рабочем слое, методику расчёта числа режущих зёрен из общего их количества $z_{вн}$, а также параметры динамики процесса S , t , $V_{кр}$, $V_{инструм}$. Необходимо учитывать прочность алмазного зерна, соотношения геометрических размеров зёрен инструмента и обрабатываемого круга ξ и режимы технологического процесса обработки. Тогда полезная работа на разрушение единицы объема будет равна:

$$B_M = z_{вн} \left[\frac{V_{кр}}{60V_{инструм} - 2V_{кр}} \right]^{1-\beta} \cdot \frac{t^{\frac{2-\beta}{2}}}{t^{1+\beta}} \cdot \left[\frac{Dd}{D+d} \right]^{\frac{\beta}{2}} \cdot s^{1-\beta} \cdot B^\beta \cdot S \cdot \sigma \cdot \xi \cdot \lambda (U_s Q)^{-1} \quad (7)$$

где β – показатель степени при толщине среза в формуле; B – коэффициент учитывающий свойства обрабатываемого круга; S – продольная подача, мм.об/с; Q – объём снятого материала, мм³; λ - коэффициент учитывающий соотношение зернистостей инструмента и обрабатываемого круга; ξ - поправочный коэффициент; U_s - поверхностная энергия, обрабатываемого материала, Дж.

Данная энергетическая характеристика является моделью технологического процесса обработки шлифовальных кругов.

Вывод

Таким образом, использованный комплексный подход к решению проблемы разрушения абразивного инструмента позволяет описать экспериментально спроектированный абразивный инструмент с учетом его структуры, связки, прочности зерен, а также объемом пор. Данная методика представляется интересной с концептуальной точки зрения и при дальнейшем изучении даст ответ на вопрос образования структуры абразивного инструмента и его работы в реальных эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. **Маслов Е. Н.** Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974.
2. **Г.Б. Лурье** Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969, 172 с.
3. Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев Технологические основы высокопроизводительного шлифования сталей и сплавов. СПб, 1994, 220 с.
4. Kulik, O.G., Illarionova, E.D. Intensification of technical grinding modes by managing physical processes of chip formation/ (2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 1457-1465. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_155
5. Shumyacher, V.M., Slavin, A.V., Kulik, O.G. Chip formation mechanism at metal grinding// (2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 1443-1448. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_153
6. Kulik, O.G., Demenkov, V.A. Management of Kinematic Factors for the Improvement of Deep Grinding Performance// (2017) Procedia Engineering, 206, pp. 216-221. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.463
7. Shumyacher, V.M., Pushkarev, O.I., Slavin, A.V. Energy Efficient Technology of Obtaining Advanced Composite Grinding Materials and Tools in "silicon Carbide - Corundum" System from Aluminium-Containing Residual Products// (2017) Procedia Engineering, 206, pp. 228-231. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.465

Совершенствование финишной абразивной обработки путём рационального подбора состава смазочно-охлаждающей жидкости

Башкирцева И.В.^{1*}, Орлова Т.Н.¹

¹Доцент, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложено новое технологическое направление рационального применения состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) для процессов суперфиниширования, включающее определение физико-химических показателей СОЖ с оценкой их качества по эксплуатационным характеристикам.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, суперфиниширование, абразивное диспергирование, абразивная обработка

Improvement of finishing abrasive processing through proper selection of the cutting fluid

Bashkirtseva I.V.^{1}, Orlova T.N.¹*

¹*Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

On the basis of theoretical and experimental investigations a new technological direction for the rational use of the composition of the lubricant-coolant (coolant) for super-finishing processes, including determination of physico-chemical parameters of the coolant with the assessment of their quality in performance.

Key words: *lubricating-cooling fluid, superfinishing, abrasive dispersion, the abrasive processing.*

Введение

Повышение объёма производства машин и оборудования, улучшение их эксплуатационных характеристик связано с совершенствованием процессов финишной абразивной обработки: хонингования, суперфиниширования, доводки [1].

Решение задач повышения эффективности финишных операций реализовывалось путём выбора рациональных режимов обработки и характеристик абразивного инструмента, подбора состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [2]. Вместе с тем сущность физико-химических процессов, протекающих в зоне контакта инструмента и детали, недостаточно изучена.

1. Теоретическая часть

В процессе абразивного диспергирования металла происходит износ инструмента. Для инструмента на керамической связке зернистостей M28 ÷ M10 характерно изнашивание путем вырывания зерна из связки. Износ шлифовальных брусков протекает

весьма интенсивно и составляет величину в $10 \div 20$ раз большую, чем съём металла. СОЖ в процессе обработки влияет не только на интенсивность диспергирования металла, но и на износ инструмента. Механизм действия СОЖ на износ инструмента представляется нам следующим образом. Высокопористое тело - шлифовальный брусок - пропитывается СОЖ в процессе работы. Вследствие этого на его поверхности адсорбируются молекулы поверхностно-активного вещества (ПАВ). Адсорбция молекул ПАВ стенками микротрещин мостиков связи, удерживающих абразивные зерна, приводит к развитию расклинивающего давления, а, следовательно, разупрочнению черепка инструмента. В условиях циклических (знакопеременных) нагрузок на абразивное зерно процесс разрушения инструмента интенсифицируется. Важное значение имеет антифрикционное действие СОЖ в контакте «абразивное зерно - металл». Жидкость, снижая трение абразива по металлу, уменьшает силу, вырывающую его из связи [3 - 6].

Таким образом, смазочно-охлаждающая жидкость оказывает влияние на прочностные свойства шлифовального бруска, а также на интенсивность силового воздействия на его рабочую поверхность.

При контактировании шлифовального бруска с водными СОЖ происходит взаимодействие ее анионов ОН с катионами связи Al... Mg...Na и др. Это приводит к обмену ионами, диффузии их в микродефекты структуры инструмента. Лиофильная поверхность абразивного инструмента хорошо смачивается водными жидкостями, причем эффективность смачивания возрастает с увеличением их полярности. Измерения твердости шлифовальных брусков показали существенное влияние СОЖ. После контакта с СОЖ шлифовального бруска 63СМ14КЛ коэффициент изменения твердости K_n находился в пределах $1,25 \div 1,92$ (табл. 1).

Табл. 1. Влияние СОЖ на твердость шлифовального бруска

СОЖ	Характеристика инструмента	K_n
НСК-5У – 5%-ной концентрации	63СМ14СМ1КЛ	1,65
Аквол-10 – 3%-ной концентрации		1,25
В25		1,92

Сопоставление данных табл. 1 и табл. 2 показывает, что определяющим в механизме действия СОЖ на износ шлифовального бруска является адсорбционное понижение его твердости. Соотношение K_n (табл. 1) и (табл. 2) указывает на наличие между этими показателями прямой связи.

Диспергирование металла осуществлялось также и алмазным инструментом. Связкой инструмента служит меднобашкелевый сплав, в котором закрепляются алмазные зерна. Прочность закрепления зерен в металле значительно выше, чем в керамике. Связка имеет плотную структуру.

Действие СОЖ на износ брусков выражается в изменении прочности закрепления зерна в связке и фрикционных характеристик «абразив - металл». Как показал анализ продуктов износа алмазного инструмента, определяющий вид разрушения - микроскол алмазных зерен. Выпадение зерен из связки не наблюдалось. Это дает право предположить, что определяющее влияние СОЖ на износ алмазного инструмента заключается в модификации поверхности металла и зерна за счет образования адсорбционных слоев из молекул ПАВ, приводящей к уменьшению адгезионного взаимодействия контактирующих тел.

Из табл. 1 видно, что СОЖ В25 наиболее интенсивно понижает твердость шлифовального бруска. Проникая в микротрещины связки, она образует на их поверхностях прочные адсорбционно-сольватные оболочки, обладающие высокими структурно-механическими свойствами. Высокая упругость этих оболочек обеспечивает создание значительного расклинивающего давления в микротрещинах [7 - 9].

В табл. 2 приведены данные по влиянию СОЖ на износ инструмента при

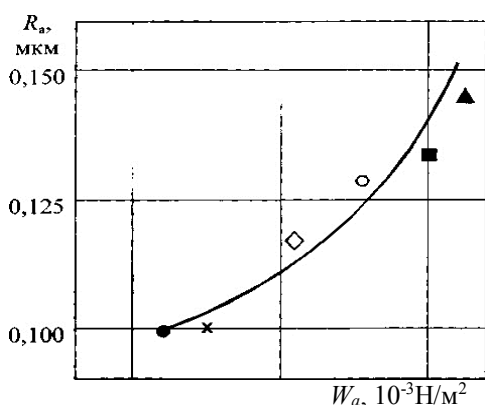
суперфинишировании стали 40Х.

Табл. 2. Влияние СОЖ на износ шлифовального бруска

СОЖ	Характеристика инструмента	Износ инструмента Q_n , мм ³
Керосин – 85 %, масло индустриальное 20 – 15 %	63СМ14КЛ	420
ОСМЗ		460
НСК-5У – 5 %-ной концентрации		580
В25		900
Аквол-10 – 3 %-ной концентрации		120

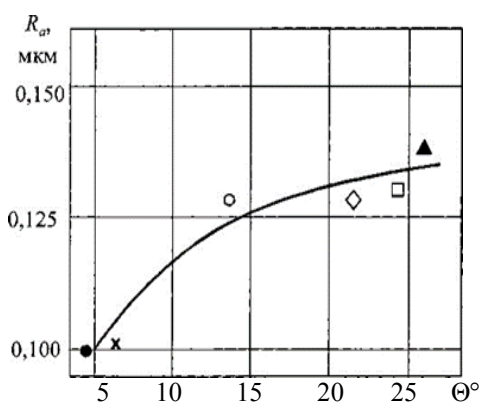
2. Практическая часть

Смазочно-охлаждающие жидкости существенно влияют на качество обработанной поверхности. Эффективность этого влияния обусловлено физико-химическими свойствами СОЖ. Уменьшение адгезии СОЖ к металлу (рис. 1) и улучшение смачивания его поверхности (рис. 2) способствует снижению шероховатости обработанной поверхности. Улучшение качества обработки (снижение шероховатости обработанной поверхности) происходит вследствие образования в зоне обработки пленки СОЖ, препятствующей адгезии абразива и металла.



СОЖ: x - ОСМЗ; • - керосин - 85 %; масло индустриальное 20 - 15%; o - 40К5У, 5%-ой концентрации; ▲ - В25; ◇ - ИХП 175Э; ■ - ИХП 45Э, 5%-ой концентрации

Рис. 1. Влияние адгезии СОЖ к поверхности металла на шероховатость обработанной поверхности (суперфиниширование стали 40Х)



СОЖ: □ - вода дистиллированная; x - ОСМЗ; • - керосин - 85 %; масло индустриальное 20 - 15%; o - 40К5У, 5%-ой концентрации; ▲ - В25; ◇ - ИХП 175Э

Рис. 2. Влияние смачивающих свойств СОЖ на шероховатость обработанной поверхности (суперфиниширование стали 40Х)

3. Результаты исследования

В табл. 3 представлены данные по износу алмазного инструмента при хонинговании чугуна СЧ21.

Табл. 3. Влияние СОЖ на износ алмазного бруска АСР 63/50, 50 %, М1

СОЖ	Износ инструмента $Q_{из}$, мг	Коэффициент трения f алмаза по чугуну СЧ21-40
Керосин – 85%, Масло индустриальное 20 – 15%	3,5	0,07
ИХП 45Э – 5%-ной концентрации	4,2	0,1
НСК-5У – 5%-ной концентрации	4,8	0,12
В25	3,8	0,08

Из данных табл. 3 видно, что износ инструмента возрастает при ухудшении смазывающих свойств СОЖ (увеличение коэффициента трения абразива по металлу).

При диспергировании чугуна (хонингование) наименьшую шероховатость обработанной поверхности обеспечивают углеводородные и эмульсионные СОЖ (рис. 3, а). Плохо смачивающая поверхность металла СОЖ Аквол-10 не способна предотвратить адгезионное схватывание металла (СЧ21) с поверхностью инструмента, что приводит к ухудшению качества обработки и увеличению шероховатости обработанной поверхности.

При применении СОЖ НСК-5У на операции алмазного хонингования чугуна обработанная поверхность характеризуется плавным микрорельефом с углом наклона микровыступов (шероховатостей) $\sim 2,5^\circ$, в то время как СОЖ В25 обеспечивает получение шероховатости с $\alpha \sim 3,8^\circ$ (рис. 1, б). Эмульсионная СОЖ ИХП-45Э обеспечивает получение шероховатости обработанной поверхности с $\alpha \sim 3,8^\circ$, а керосино-масляная смесь - $\alpha \sim 3,1^\circ$.

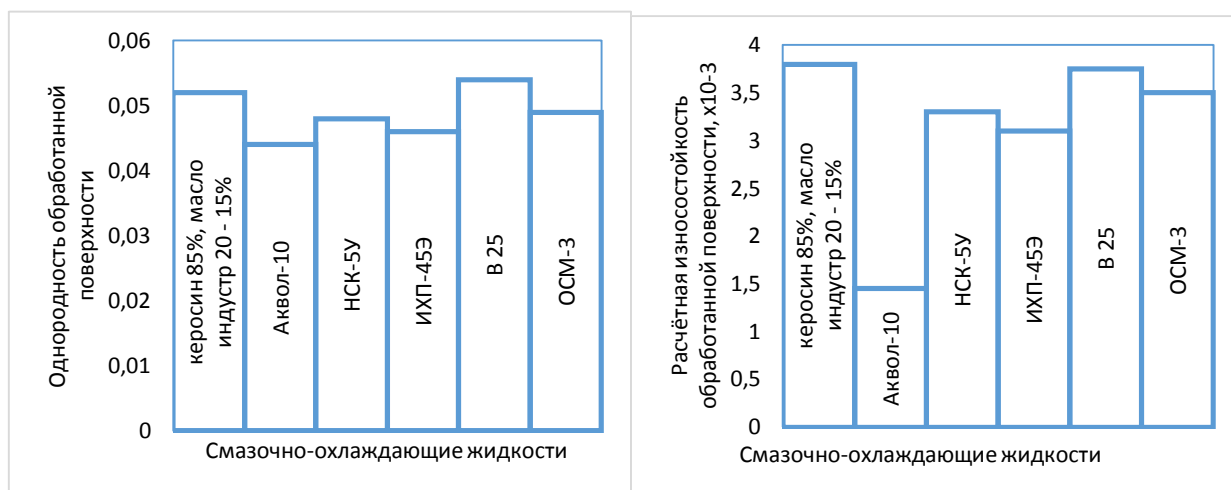


Рис. 3. Влияние состава СОЖ на шероховатость обработанной поверхности (а) и угол наклона микронеровностей (б)

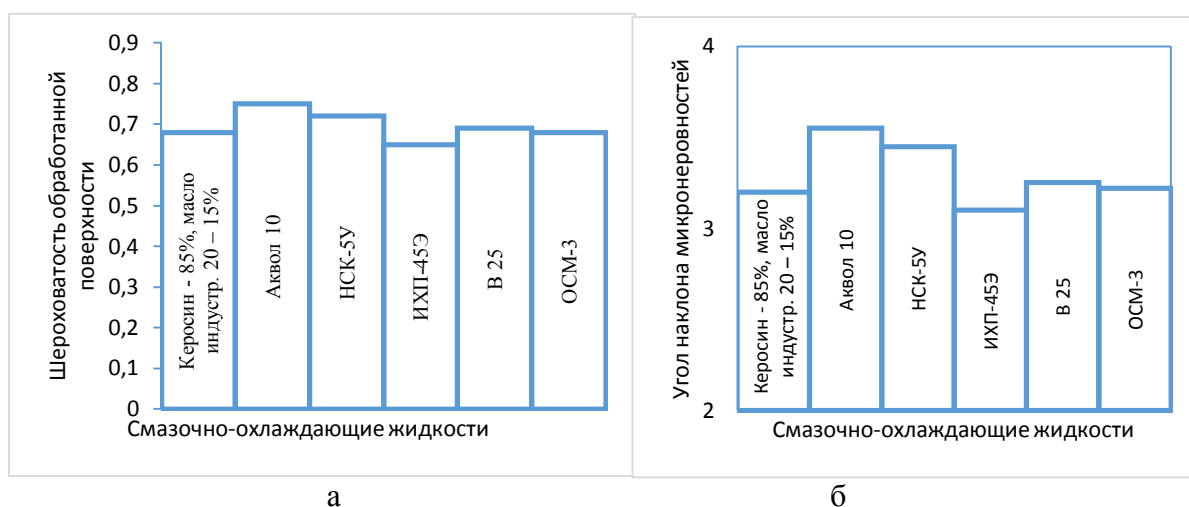


Рис. 4. Влияние состава СОЖ на однородность обработанной поверхности (а) и ее износостойкость (б)

4. Выводы

Водные эмульсии ИХП-45Э, НСК-5У, синтетическая СОЖ В25 позволяют получить качественную поверхность детали с износостойкостью на уровне углеводородных жидкостей (керосин, ОСМ3) (рис. 4, б). Высокая однородность микрорельефа обработанной поверхности (рис. 4, а) также указывает на эффективность водных СОЖ на данной операции.

Список литературы

1. Бердичевский, Е.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов: справочник / Е.Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
2. Берзин, В.Р. Применение СОЖ при внутреннем шлифовании заготовок из легированных сталей / В.Р. Берзин, В.Н. Шумилин // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. Теоретические основы и техника применения. – Саратов: Изд-во СГУ, 1986. – С. 32-35.
3. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш.М. Билик. – М.: Машгиз, 1960. – 198 с.
4. Боуден, Ф. Трение и смазка / Ф. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машгиз, 1960. – 152 с.
5. Волков, М.П. Исследование влияния физико-химических свойств СОЖ на качество и динамику процесса шлифования / М.П. Волков, В.М. Шумячер // Абразивы. – 1977. - № 4. – С. 1-3.
6. Демкин, Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
7. Ещенко, Е.П. Эффективное внедрение СОЖ в металлообрабатывающих производствах / Е.П. Ещенко // Мир техники и технологии. – 2003. - № 10. – С. 64-65.
8. Кашеев, В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В.Н. Кашеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 213 с.
9. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М. : Машиностроение, 1974. – 280 с.

Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на динамику изменения физико-механических характеристик тел трения

Башкирцева И.В.^{1*} Орлова Т.Н.¹

¹Доцент, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложено новое технологическое направление рационального применения состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при контактном взаимодействии СОЖ с металлом, включающее определение физико-химических показателей СОЖ с оценкой их качества по эксплуатационным характеристикам. В условиях значительных нормальных и сдвиговых напряжений возникают предпосылки для активного взаимодействия среды и металла при перемещении по нему абразивного зерна.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, адсорбционное понижение прочности, абразивная обработка, микротвёрдость металлов.

Influence of lubricating and cooling liquids on dynamics of change of physical and mechanical characteristics of friction bodies

Bashkirtseva I.V.^{1} Orlova T.N.¹*

¹*Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

On the basis of theoretical and experimental studies, a new technological direction of rational use of the composition of the coolant (coolant) in the contact interaction of coolant with metal is proposed, including the determination of physical and chemical parameters of coolant with an assessment of their quality by performance characteristics. Under conditions of significant normal and shear stresses, there are prerequisites for the active interaction of the medium and the metal when the abrasive grain moves along it.

Keywords: *lubricant-coolant, the adsorption decrease in strength, abrasion, the hardness of metals.*

Введение

В контактирующих поверхностях твёрдых тел при внешнем трении происходит диссипация энергии. Имеет смысл рассматривать процесс трения двух тел как поверхностную активацию контактирующих тел. При этом изменение физико-механических характеристик тел трения вызывается притоком энергии в приповерхностные слои. На характер реакций в приповерхностных слоях и на динамику процесса оказывает влияние наличие смазки в контакте.

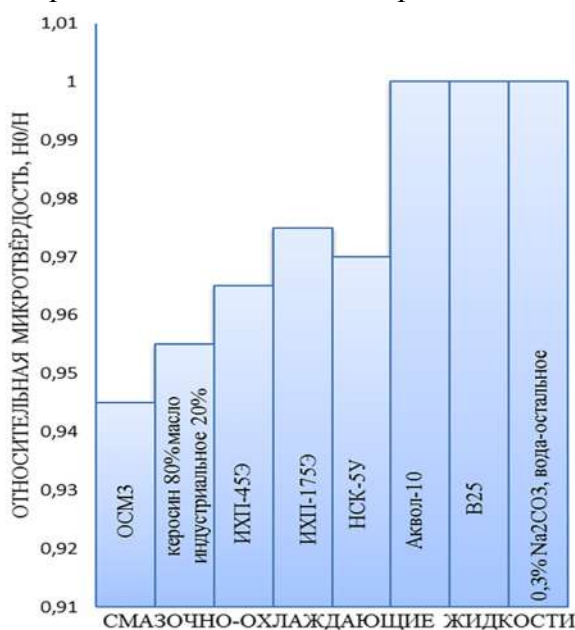
1. Теоретическая часть

Для граничного смазочного слоя в молекулярно-кинетической теории трения вводится понятие «третьего тела», которое сформировано при трении двух тел в месте контакта. При этом физико-механические свойства трущихся поверхностей под влиянием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) определяют характер контактирования двух тел.

Предпосылки для активного взаимодействия среды и металла при перемещении по нему абразивного зерна возникают в условиях значительных нормальных и сдвиговых напряжений. При этом в деформируемых объёмах металла по причине поверхностной активации происходит выход на поверхность трения дислокаций, образование трещин и развитие микродефектов.

2. Практическая часть

Определение показателей изменения микротвёрдости при взаимодействии металла с СОЖ (рис. 1) производилось вдавливанием алмазной пирамиды в металл. Понижение микротвёрдости при использовании углеводородных СОЖ, в условиях эксперимента, составило $5 \div 7 \%$. При контактировании с поверхностью металла эмульсии понизили микротвёрдость металла на $3 \div 5 \%$. Водный раствор $0,3 \%$ карбоната натрия (Na_2CO_3) и синтетическая жидкость Аквол-10 на микротвёрдость металла влияния практически не оказали. Рассмотрим физический смысл микротвёрдости для объяснения причин. Сила, действующая при микроиндентировании, раскладывается на две составляющие (рис.2). Сопротивление пластической деформации металла характеризуется нормальной составляющей силы N . Возникающая на грани пирамиды сила трения при её скольжении характеризуется составляющей T . При создании определённых условий наблюдается эффект адсорбционного понижения прочности твёрдого тела.



H_0 – исходная микротвёрдость (1,0);

H – микротвёрдость, определяемая в присутствии СОЖ

Рис. 1. Влияние состава СОЖ на микротвёрдость стали 40X при их контактировании

Характер и интенсивность действия напряжений в деформируемом объёме приобретает важное значение. В условиях сжатия металла, прилегающего к грани алмазной пирамиды, действие происходит в контактном поверхностном слое, так как молекулы

поверхностно-активных веществ (ПАВ) из среды не могут проникнуть в его объём. Микроиндентирование также сопровождается и перемещением слоёв материала, прилегающих к граням пирамиды, что создаёт условия для проявления адсорбционного эффекта понижения прочности твёрдого тела по причине развития в поверхностном слое значительных сдвиговых напряжений. Уменьшение силы трения происходит из-за падения напряжения сдвига благодаря облегчению перемещения дислокаций в прилегающем к пирамиде слое металла по причине высокой проникающей и смачивающей способности углеводородных смазочно-охлаждающих жидкостей, ОСМЗ и керосина. При этом молекулы ПАВ проникают в зону контакта «грань – металл» и дальше в микродефекты деформируемого слоя металла. Раствор в воде карбоната натрия и синтетическая жидкость Аквол-10 обладают низкими смачивающими способностями, вследствие чего проникновение их в зону предразрушения металла незначительно. Эмульсии обладают несколько лучшими проникающими и смачивающими свойствами по сравнению раствором 0,3 % Na_2CO_3 в воде и жидкостью Аквол-10, в большей мере способны перемещаться в контакте «грань – металл», поэтому оказывают большее влияние на микротвёрдость металла.

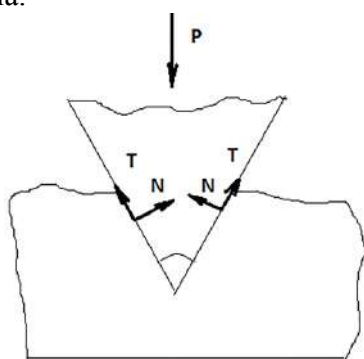


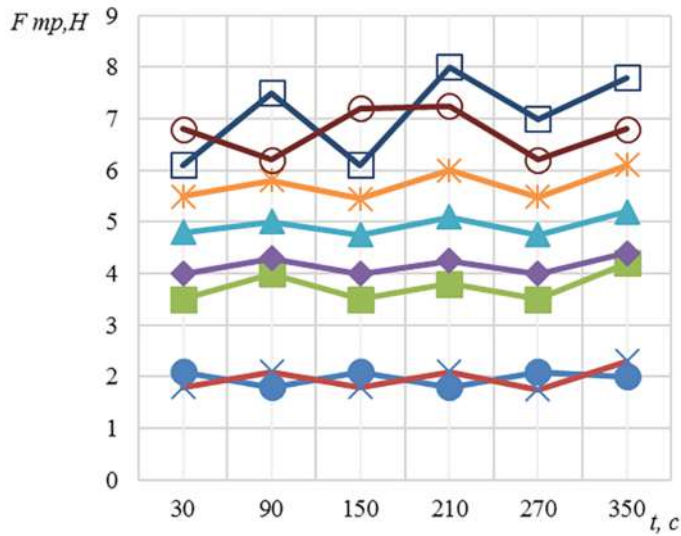
Рис.2. Схема контакта алмазной пирамиды с поверхностью металла при микроиндентировании

Вследствие адсорбционного понижения прочности и облегчения сдвига его поверхностного слоя при микроиндентировании происходит увеличение глубины внедрения пирамиды в металл (снижение микротвёрдости). Как результат, далее происходит уменьшение силы трения скольжения «грань – металл». Полученный результат совпадает с выводами работы академика В.Д. Кузнецова о том, что качество смазки на поверхности металла влияет на глубину внедрения индентора.

Применение в качестве смазки жидкости Аквол-10 при повышении уровня энергетической активации поверхности трения (увеличение скорости скольжения абразива) приводит к нестабильности силы трения, а в среде углеводородных СОЖ и эмульсий процесс трения абразива по металлу отличается стабильностью (рис. 3). Применение углеводородных СОЖ и эмульсий не приводит к росту коэффициента трения при увеличении скорости скольжения из-за того, что адсорбированный поверхностью металла слой молекул поверхностно-активных веществ из углеводородных СОЖ и эмульсий обладает значительной упругостью и прочностью, а также подвижностью и толщиной, а в условиях граничного трения абразивного зерна по металлу в среде СОЖ наряду с протеканием процесса адсорбционного понижения прочности его поверхностного слоя на динамику контактного взаимодействия оказывают влияние реологические свойства слоя смазки.

При применении углеводородных СОЖ и эмульсий субмикрорельеф поверхностей трения абразивного зерна по металлу характеризуется однородностью (рис 4, а, б, в), а для водных смазочно-охлаждающих жидкостей на поверхности трения свойственно наличие дефектов, характерных для процессов адгезионного схватывания (вырывов, наплывов) (рис

4, г, д).



□ – вода дистиллированная; ● - ОСМЗ; х - керосин 85%, масло индустриальное 20-15%; ж - В25; ■ - 40K5У 5% концентрации; ○- Аквол-10, 10%-ой концентрации; ▲ - ИХП 45Э, 5%-ой концентрации; ◆- ИХП 175

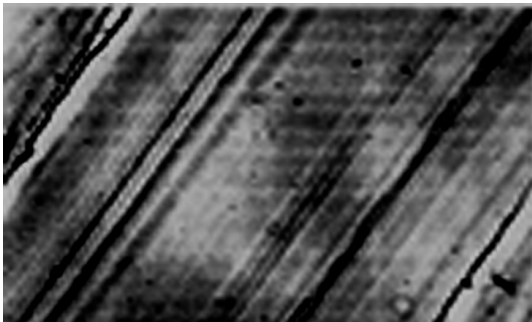
Рис.3. Влияние состава СОЖ на стабильность силы трения абразивного зерна по металлу ($V = 0,15$ м/с, $P=40Н$): СОЖ

Результатом снижения смачивающих свойств смазочно-охлаждающих жидкостей является повышение коэффициента трения абразива по металлу (рис. 5).

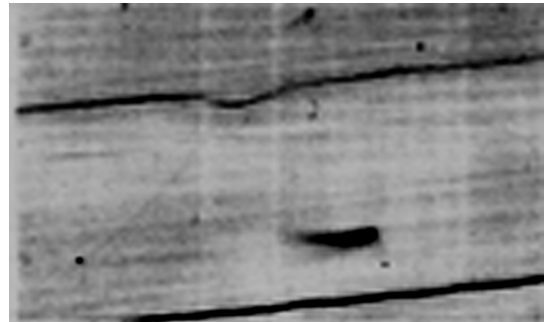
Зависимости коэффициента трения по металлу в зависимости от состава СОЖ, скорости резания V_p и нормальной составляющей силы N представлены в таблице 1.

Увеличение нормального давления абразивного зерна (индентора) приводит к росту коэффициента трения для всех смазочно-охлаждающих жидкостей. Рост молекулярной составляющей силы трения происходит при увеличении фактического давления в контакте в соответствии с биноминальным законом молекулярного трения Б.В. Дерягина. Особенно ярко это видно у водных СОЖ В25, Аквол-10, 0,3 % Na_2CO_3 в воде. Механические свойства граничных смазочных слоёв являются причиной различия во влиянии нормального давления зерна на металл на коэффициент трения в среде разных смазок. При использовании смазочно-охлаждающих жидкостей ОСМЗ, ИХП-45Э, НСК5У меньшая чувствительность коэффициента трения абразива по металлу обусловлена тем, что углеводородные смазочные слои имеют высокий модуль сжатия.

а



б



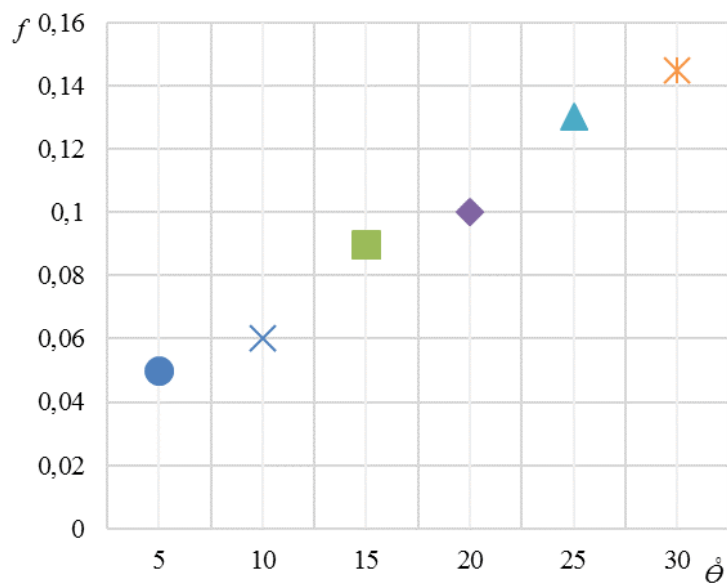
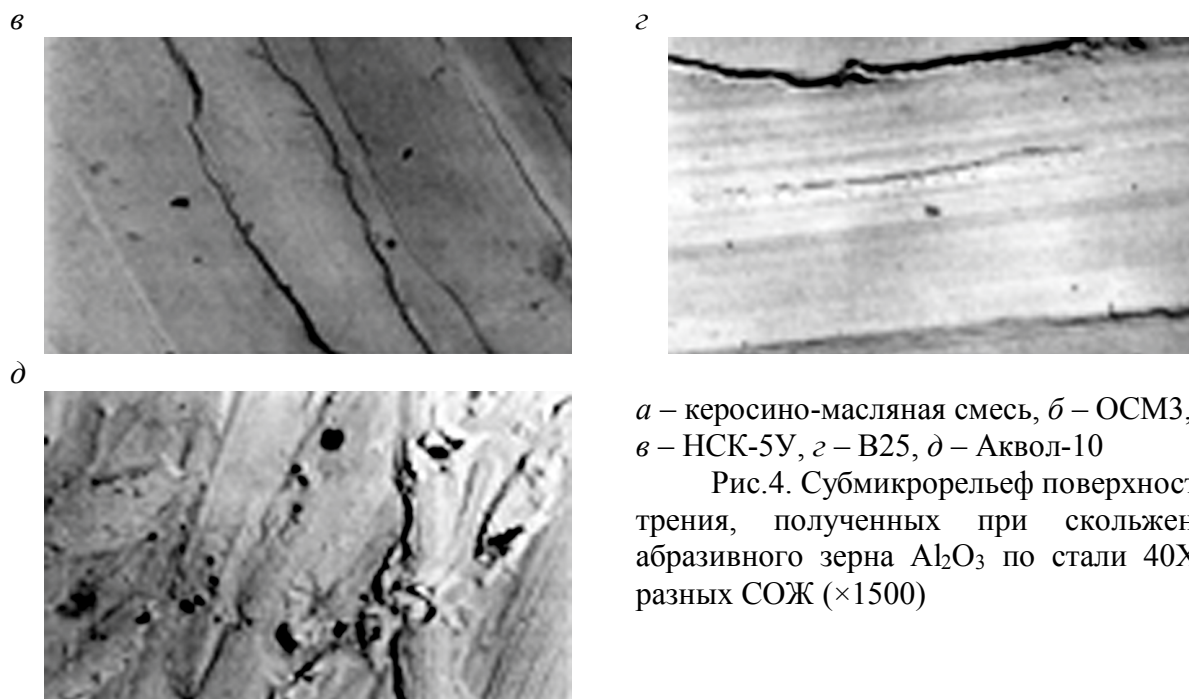


Рис. 5. – Влияние краевого угла смачивания θ^0 СОЖ на коэффициент трения абразивного зерна Al_2O_3 по стали 40X: СОЖ: ж – вода дистиллированная, х – ОСМЗ, ● – керосин-85%, масло промышленное 20 – 15%; ▲ – В25, ○ – 40К5У, 5%-ой концентрации, ◆ - ИХП 175

3. Результаты исследования

Очевидно, что снижение сопротивления сдвигу граничной смазочной плёнки в контакте «зерно-металл», улучшение её подвижности, повышение несущей способности является причиной того, что увеличение скорости скольжения абразива по металлу при

работе с углеводородными и эмульсионными СОЖ приводит к снижению коэффициента трения (табл. 1).

Табл. 1. Функциональные зависимости коэффициента трения Al_2O_3 по стали 40X

СОЖ	Уравнение регрессии	Доверительный интервал
Керосин 85 %, масло промышленное 20 – 15 %	$f=0,054 - 0,036\Gamma_p + 0,011 N$	$\pm 0,003$
ОСМЗ	$f=0,056 - 0,032\Gamma_p + 0,008 N$	$\pm 0,005$
НСК-5У	$f=0,078 - 0,061\Gamma_p + 0,04 N$	$\pm 0,007$
ИХП-45Э	$f=0,1 - 0,087\Gamma_p + 0,095 N$	$\pm 0,006$
Аквол-10	$f=0,12 - 0,1\Gamma_p + 0,12 N$	$\pm 0,004$
B25	$f=0,137 - 0,12\Gamma_p + 0,1 N$	$\pm 0,008$
0,3 % Na_2CO_3 , вода – 99,7 %	$f=0,15 - 0,127\Gamma_p + 0,13 N$	$\pm 0,01$

4. Выводы

При контактном взаимодействии смазочно-охлаждающей жидкости с металлом происходит изменение его микротвёрдости. Чем выше смачивающие свойства смазочно-охлаждающей жидкости и её поверхностная активность, тем эффективнее понижение микротвёрдости металлов; уменьшение трения, то есть сопротивление сдвигу слоёв металла, прилегающих к индентору, происходит из-за возникновения эффекта адсорбционного понижения его прочности, который лежит в основе механизма понижения микротвёрдости металла при его контакте со смазочно-охлаждающей жидкостью; применение водных жидкостей характеризуется нестабильностью возникающих сил, а при трении абразива по металлу в среде углеводородных и эмульсионных жидкостей характерно наблюдается обратная картина; увеличение чувствительности коэффициента трения абразива по металлу в среде водных жидкостей по сравнению с углеводородными есть следствие различий механических свойств граничных плёнок смазки; снижение коэффициента трения абразивного зерна по металлу с увеличением скорости скольжения обусловлено повышением подвижности плёнки адсорбированных углеводородных молекул поверхностно-активных веществ и уменьшением сопротивления их сдвигу; основным недостатком углеводородных смазочно – охлаждающих жидкостей по сравнению с водными жидкостями является их неэкологичность и высокая пожароопасность.

Список литературы

1. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш.М. Билик. – М.:Машгиз, 1960. – 198 с.
2. Душко, О.В. Микромеханика контактного взаимодействия абразива с материалом в присутствии смазочно – охлаждающей жидкости / Душко, О.В., Шумячер В.М., Башкирцева И.В. // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Сборник статей Международной научно - технической конференции «Шлифабразив – 2005». – Волжский, 2005 – С. 198-203.
3. Макушин, В.М. Деформация и напряжённое состояние деталей в местах контакта / В.М. Макушин. – М. : Машиностроение, 1968. Т.2. – 464 с.
4. Шумячер, В.М. Физико – химические процессы при финишной обработке. Монография / ВолГАСУ. Волгоград, 2004. 161 с.
5. Шумячер, В.М. Методика определения удельной поверхности продуктов абразивного диспергирования металла и исследования кинетики седиментации продуктов диспергирования металла в смазочно-охлаждающих жидкостях. / В.М. Шумячер, И.В. Башкирцева / ВолГАСУ, Волгоград, 2005

Технология изготовления хонинговального инструмента с использованием гранулированной смеси

Гузев В. В.^{1*}, Шумячер В. М.²

¹Ведущий инженер-конструктор, ООО «Переход»
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

²Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Отличительной особенностью абразивного инструмента с гранулированной структурой является то, что он сформирован из абразивных гранул округлой формы в узкодисперсном размерном диапазоне, что при формовании и спекании дает возможность получить инструмент с равномерным распределением и прочным соединением гранул между собой, так как точечные контакты гранул развиваются в контактные поверхности, форма гранул из округлой приближается к многогранной, поры, уменьшаясь, принимают идентичную сферическую форму.

Абразивные зерна в бруске скреплены друг с другом мостиками связки. Количество, длина и толщина мостиков связки, а следовательно, и прочность закрепления абразивных зерен зависят от физических свойств связки, процента содержания ее в единице объема бруска, крупности абразивных зерен, плотности их упаковки.

Ключевые слова: пористость, абразивная гранула, абразивный брусок.

Manufacturing technology of honing tools with using a granular mixture

Guzev V. V.^{1}, Shumyacher V. M.²*

¹Lead design engineer, LLC "Perehod", Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

²Professor, Assistant Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

A distinctive feature of an abrasive tool with a granular structure is that it is formed from round abrasive granules in a narrowly dispersed size range, which, when molding and sintering, makes it possible to obtain a tool with uniform distribution and strong connection of granules to each other, since the point contacts of the granules develop into contact surface, the shape of the round granules approaches multifaceted, decreasing pores take an identical spherical shape.

Abrasive grains in a bar are fastened to each other by ligament bridges. The number, length and thickness of the bridges of the binder, and therefore the strength of the abrasive grains, depend on the physical properties of the binder, the percentage of its content per unit volume of the bar, the size of the abrasive grains, and the density of their packaging.

Key words: porosity, abrasive granule, abrasive bar.

Введение

Достижение лучшего физического состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали осуществляется за счет применения качественного инструмента. Изменяя и улучшая характеристики инструмента, происходит существенное влияние на процесс обработки, поэтому изучение и разработка направления совершенствования процесса хонингования заключается в повышении качества применяемого инструмента.

Развитие технологий и прогрессивные направления в отрасли тяжелой промышленности, в частности машиностроения, вынуждают неуклонно повышать надежность и долговечность узлов и механизмов машин

1. Поэтапная технология производства гранулированного инструмента

Для получения композиционных изделий применяют различные способы их формообразования. Не вызывает сомнений тот факт, что большой вклад в обеспечение свойств абразивного инструмента вносят процессы структурообразования.

Задачей является разработка инструмента с заданной пористостью, самозатачиваемостью и высоким качеством поверхности обрабатываемой детали, решением которой должно стать изготовление абразивного инструмента по технологии гранулирования смеси.

Отличительной особенностью абразивного инструмента с гранулированной структурой является то, что он сформирован из абразивных гранул округлой формы в узкодисперсном размерном диапазоне, что при формовании и спекании дает возможность получить инструмент с равномерным распределением и прочным соединением гранул между собой, так как точечные контакты гранул развиваются в контактные поверхности, форма гранул из округлой приближается к многогранной, поры, уменьшаясь, принимают идентичную сферическую форму [1].

Абразивные зерна в бруске скреплены друг с другом мостиками связки. Количество, длина и толщина мостиков связки, а следовательно, и прочность закрепления абразивных зерен зависят от физических свойств связки, процента содержания ее в единице объема бруска, крупности абразивных зерен, плотности их упаковки [2].

Нами предлагается ввести операцию гранулирования формовочной смеси на технологической стадии смешивания. В результате не нарушается (классическая) технология производства абразивного инструмента.

Процессы смешивания и формования при изготовлении хонинговального инструмента (бруска) осуществлялись на оборудовании в лаборатории ВПИ (НТЦ ВНИИАШ).

Используемые материалы: электрокорунд белый 24А зернистости 24А 16; связка керамическая – К-5; временное связующее – декстрин; вода техническая.

Процесс гранулирования разделен на два этапа:

1 этап – протирка формовочной смеси через сито (рис.1);

2 этап – окатывание и формование гранул после протирки (рис.2).

Параллельно изготавливался брусок по классической технологии. Изготавливались бруски-плиты. На рис.3 представлен вид пресс-формы с находящейся в ней формовочной смесью.

На рис. 4, 5, 6 представлены экспериментальные бруски-плиты по рецептам №1 и №2 после формования.

Опытные образцы брусков изготавливались размерной резкой плит и оправлялись на термообработку (спекание). Вид готовых брусков представлен на рис.7, 8.

Твердость определенная пескоструйным методом, соответствует СМ1.

На рис.9 представлена сравнительная фотография абразивного инструмента – хонинговального бруска по классической и предлагаемой экспериментальной технологии.

Технология производства гранулированного абразивного инструмента легко вписывается в обычную схему производства абразивного инструмента, что позволит обойтись без особого изменения классического производства абразивного инструмента.



Рис. 1. Гранулы полученные протиркой



Рис. 2. Гранулы после окатывания



Рис. 3. Формовочная масса в пресс-форме (100×200)



Рис. 4. Брусок-плита № 1



Рис. 5. Брусок-плита № 1



Рис. 6. Расположенные рядом бруски-плиты № 1, № 2



Рис. 7. Бруски из плит № 1, № 2

Рис. 8 Бруски из плит № 1, № 2
(гранулированный инструмент)Рис. 9. Сравнительная фотография
гранулированного абразивного инструмента
(слева) и обычного (справа)

Список литературы

1. **Поляков, А.П.** О модели пористого материала учитывающего геометрию пор / А.П.Поляков – М.: Известия высших учебных заведений. цветная металлургия, 2005. – 35-40с.
2. **Томахин, Г. В.** Хонингование прецизионных отверстий в деталях гидроаппаратуры : методические указания / Г. В. Томахин, И. А. Магдич, Р. А. Марова. – М.: Научно-исследовательский институт информации по машиностроению, 1978. – 28 с.
3. Высокоэффективное алмазное хонингование гильз тракторных двигателей / Бакуль В. Н. [и др.] // Синтетические алмазы. – 1976. – №1. – С. 10–16.
4. Бровченко, Н. И. Алмазное хонингование бронзовых деталей / Н. И. Бровченко // Синтетические алмазы. – 1977. – №4. – С. 54–56.
5. **Чеповецкий, И. Х.** О влиянии величины опорной поверхности на производительность алмазной обработки / И. Х. Чеповецкий, Н. С. Карпович // Синтетические алмазы. – 1975. – №5. – С. 41–42.
6. Хонингование закаленных чугунов брусками из алмазов АСК и АСВ / Чеповецкий И. Х. [и др.] // Синтетические алмазы. – 1975. – №2. – С. 48–49.
7. **Гузев, В.С.** Повышение эффективности алмазного хонингования деталей гидроаппаратуры за счет выбора рациональных режимов обработки / В.С. Гузев, В.М. Шумячер// Технология машиностроения – 2008 - №9 – С. 54-56.

Сущность процесса хонингования и применение гранулированного абразивного инструмента

Гузев В. В.^{1*}, Шумячер В. М.²

¹Ведущий инженер-конструктор, ООО «Переход»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

²Профессор, Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Для операций финишной обработки отверстий в различных деталях, например, деталях гидроаппаратуры, деталях двигателя, применяются хонинговальные головки с алмазным инструментом. Вместе с этим существует целый ряд операций при обработке отверстий больших диаметров, где наиболее распространено применение абразивного инструмента из карбида кремния и электрокорунда на керамической связке. Потеря режущей способности бруска при хонинговании происходит, в основном, вследствие его засаливания.

Одним из решений задачи устранения указанных недостатков является повышение режущей способности хонинговального бруска путём обеспечения заданной пористости, самозатачиваемости и высоким качеством поверхности обрабатываемой детали. Эта задача может быть решена применением абразивного инструмента, изготовленного по специальной технологии. Получение инструмента с заданной пористостью и структурой из высокодисперсных материалов представляется возможным за счет применения технологии гранулирования абразивной смеси.

Отличительной особенностью абразивного инструмента с гранулированной структурой является то, что он сформирован из абразивных гранул округлой формы в узкодисперсном диапазоне, что при формовании и спекании дает возможность получить инструмент с равномерным распределением и прочным соединением гранул между собой, так как точечные контакты гранул развиваются в контактные поверхности, форма гранул из округлой приближается к многогранной, поры, уменьшаясь, принимают идентичную сферическую форму.

Эффективность хонингования деталей гидроаппаратуры: производительность, точность и шероховатость обработанной поверхности может быть повышена не только за счет подобранных режимов обработки, величины перебегов, но и характеристик хонинговальных брусков.

Ключевые слова: гранулированная структура, финишная обработка, пористость.

The essence of the honing process and the use of granular abrasive tools

Guzev V. V.^{1}, Shumyacher V. M.²*

¹Lead design engineer, LLC "Perehod"; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

²Professor, Assistant Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

For finishing operations of holes in various parts, for example, parts of hydraulic equipment, engine parts, honing heads with diamond tools are used. Along with this, there are a number of operations in the processing of holes of large diameters, where the most common use of abrasive tools made of silicon carbide and electrocorundum on a ceramic bond. The loss of the cutting ability of a bar during honing occurs mainly due to its salting.

One solution to the problem of eliminating these disadvantages is to increase the cutting ability of the honing bar by providing a given porosity, self-sharpening and high surface quality of the workpiece. This problem can be solved by using abrasive tools made using special technology. Obtaining a tool with a given porosity and structure from highly dispersed materials seems possible through the use of granulation technology of an abrasive mixture.

A distinctive feature of an abrasive tool with a granular structure is that it is formed from round abrasive granules in a narrowly dispersed range, which, when molding and sintering, makes it possible to obtain a tool with uniform distribution and strong connection of granules to each other, since the point contacts of the granules develop into contact surfaces, the shape of the granules from rounded approaches to multifaceted, pores decreasing take an identical spherical shape.

The efficiency of honing parts of hydraulic equipment: the productivity, accuracy and roughness of the treated surface can be increased not only due to selected processing modes, overruns, but also the characteristics of honing bars.

Key words: granular structure, finishing operations, porosity.

Введение

Одной из важнейших задач технического прогресса в области машиностроения является повышение надежности и долговечности работы машин и механизмов. Ее решение тесным образом связано с усовершенствованием технологических методов и средств отделочной обработки деталей, то есть с технологическим обеспечением высокой точности их геометрической формы, низкой шероховатости и лучшего физического состояния поверхностных слоев металла. Абразивный инструмент должен обладать максимальной режущей способностью для обеспечения наибольшей производительности, иметь высокую механическую прочность и износостойкость, обеспечивать высокое качество обработанной поверхности.

1. Хонингование абразивным гранулированным инструментом

Хонингование – процесс высокоточной размерной обработки, выполняемой с помощью хонинговальных головок различных конструкций, которым сообщается вращательное и возвратно-поступательное движение при одновременной радиальной подаче хонинговальных брусков. При хонинговании происходит процесс суммарного микрорезания металла с участием большого количества абразивных зерен, находящихся в постоянном контакте с обрабатываемой поверхностью, при этом осуществляется большая подача смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания [1, 2].

Хонингование применяется, в основном, как окончательная операция обработки высокоточных отверстий в деталях и является более эффективной технологической операцией, чем притирка, внутренне шлифование и полирование абразивными пастами и суспензиями. Хонингованием обрабатывают сквозные и глухие цилиндрические отверстия с гладкой или прерывистой поверхностью (шпоночные пазы, кольцевые канавки), соосные отверстия.

Процессу хонингования свойственны следующие специфические особенности [2]:

- большая поверхность контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- незначительная величина удельного давления абразивных брусков и малые скорости резания;
- большое количество одновременно работающих зерен;
- образование незначительного количества тепла;
- обилие смазочно-охлаждающей жидкости специального состава;
- особые условия стружкообразования и удаление шлама из зоны резания.

Как правило, хонингованием обрабатывают отверстия после операций шлифования, растачивания, развертывания, протягивания, внутреннего шлифования.

На операциях хонингования широко используются как естественные (природный алмаз, корунд, наждак и кварц), так и искусственные абразивные материалы (синтетический алмаз, электрокорунд, карбид кремния, кубический нитрид бор).

Режущие свойства абразивных брусков зависят от материала абразивных зерен, состава связки, зернистости, твердости, структуры. Абразивный инструмент должен быть не только достаточно прочным, но и износостойким.

При хонинговании используют, в основном, бруски изготовленные методом прессования.

2. Структура абразивного инструмента

Структура абразивного инструмента определяется объемным соотношением 3-х составляющих: абразива, связки и пор. Известно, что с увеличением объемного содержания пор режущая способность абразивного инструмента возрастает. При обработке таким инструментом, имеющим более развитую рабочую поверхность, улучшаются условия внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал, размещение и удаление снимаемой стружки, улучшается процесс проникновения СОЖ через поры в подбрусковое пространство и, как следствие, снижается теплонапряженность процесса резания, повышается качество обработки.

Абразивный инструмент должен обладать максимальной режущей способностью для обеспечения наибольшей производительности, иметь высокую механическую прочность и износостойкость, обеспечивать высокое качество обработанной поверхности.

Абразивный брусок на керамической связке имеет пористую структуру. В единице объема бруска содержится 50–55 % абразивных зерен, 12–15 % связки, 30–35 % занимают поры. Поры служат не только для размещения стружки, но и облегчают внедрение зерен в металл и процесс стружкообразования.

Отличительной особенностью абразивного инструмента с гранулированной структурой является то, что он сформирован из абразивных гранул округлой формы в узкодисперсном разменном диапазоне, что при формовании и спекании дает возможность получить инструмент с равномерным распределением и прочным соединением гранул между собой, так как точечные контакты гранул развиваются в контактные поверхности, форма гранул из округлой приближается к многогранной, поры, уменьшаясь, принимают идентичную сферическую форму.

Абразивная гранула состоит из зерна, связки и пор более малого размера чем поры между гранулами (рис. 1.), таким образом, в инструменте имеются макропоры и микропоры, наличие которых оказывает существенное влияние на протекание процесса микрорезания, стружкообразование и самозатачивание абразивных зерен.

Нами предлагается ввести операцию гранулирования смеси на этапе формования в технологическом процессе производства абразивного инструмента.

В лаборатории специальных инструментов и изделий Волжского института строительства и технологий были изготовлены хонинговальные абразивные бруски по технологии гранулирования смеси (рис. 2).

Проведены испытания опытных хонинговальных абразивных брусков для деталей гидроаппаратуры с прерывистыми отверстиями при диаметрах отверстий 15 – 25 мм, длинах $50 \div 220$ мм.

В результате исследований получены зависимости съема металла, шероховатости и отклонения от цилиндричности.



Рис. 1. Вид гранул после под прессовки



Рис. 2. Опытный абразивный гранулированный инструмент

Интенсивность съема металла растет по мере продолжительности хонингования, но в большей степени в первые 30 с. обработки, так как бруски врезаются и снимают острые вершины шероховатой поверхности, в этот период обработки происходит самозатачивание брусков и повышенный съем металла, затем процесс обработки стабилизируется и происходит затухание.

Геометрические параметры при обработке в значительной степени зависят от величины перебега хонбрусков.

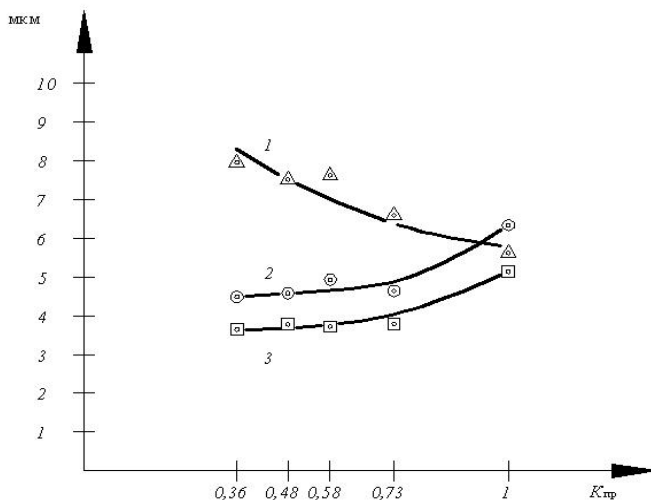
На рисунке 3 видно, что при перебеге, равном $1/3 l_{бр}$, отклонение от цилиндричности гладкого отверстия составляет 5–6 мкм, у прерывистых отверстий при том же перебеге отклонение увеличилось до 8–9 мкм за счет более интенсивного съема металла на краевых участках у торцов отверстия, что приводит к образованию корсетобразной формы отверстия.

С уменьшением перебега до величины $1/4 l_{бр}$, корсетность, при обработке прерывистых отверстий, исчезает, отклонение от цилиндричности 4–6 мкм, в то же время гладкое отверстие стремится к бочкообразной форме, его отклонение от цилиндричности составляет 6–7 мкм.

При использовании абразивного хонинговального бруска, изготовленного по гранулированной технологии, отклонение от цилиндричности составляет 3–5 мкм.

Шероховатость поверхности при хонинговании отверстий с различным коэффициентом прерывистости $K_{пр}$ практически остается неизменной.

Отклонение от
цилиндричности,



1 – перебег $1/3 l_{бр}$ (классический алмазный хонбрусок); 2 – перебег $1/4 l_{бр}$ (классический алмазный хонбрусок); 3 – опытный абразивный хонбрусок

Рисунок 3 – Зависимость точности обработки от коэффициента прерывистости и перебега хон брусков

Вывод

Таким образом, эффективность хонингования деталей гидроаппаратуры: производительность, точность и шероховатость обработанной поверхности может быть повышена не только за счет подобранных режимов обработки, величины перебегов, но и характеристик хонинговальных брусков.

Список литературы

1. **Бабичев, А. П.** Хонингование / А. П. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1965.
2. **Шумячер, В. М.** Физико-химические процессы при финишной абразивной обработке : монография / В. М. Шумячер. – Волгоград : ВолгГАСА, 2003. – 144 с.
3. Хонингование : справочное пособие / Куликов С. И. [и др.] – М.: Машиностроение, 1973. – 168 с.
4. **Фрагин, И. Е.** Новое в хонинговании / И. Е. Фрагин. – М.: Машиностроение, 1980. – 96 с.
5. **Левин, Б. Г.** Алмазное хонингование отверстий / Б. Г. Левин, Я. Л. Пятов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 112 с.
6. **Бабаев, С. Г.** Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий / С. Г. Бабаев, Н. К. Мамедханов, Р. Ф. Гасанов. – М.: Машиностроение, 1978. – 103 с.
7. **Сагарда, А. А.** Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев: Техника, 1974. – 177 с.
8. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / Резников А. Н. [и др.] – М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.
9. **Чеповецкий, И. Х.** Алмазное хонингование термообработанных сталей / И. Х. Чеповецкий, Э. Д. Кизиков, Ю. Э. Рыжов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 136 с.
10. **Гузев, В.С.** Повышение эффективности алмазного хонингования деталей гидроаппаратуры за счет выбора рациональных режимов обработки / В.С. Гузев, В.М. Шумячер// Технология машиностроения – 2008 - №9 – С. 54-56.

Мониторинг качества шлифовальных материалов в процессах абразивной обработки

Пушкарев О.И.^{1*}, Кулик О.Г.¹, Пузырькова В.Е.¹

¹Профессор, доцент, аспирант, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

В материалах статьи приведены результаты исследований абразивных зерен, величины наклонов кривых Вейбулла, индексы и показатели хрупкости. Показано, что эффективные напряжения при разрушении на валковой дробилке, как правило, равны напряжениям, полученным при статических испытаниях. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке стандартов и мониторинге качества шлифовальных материалов в процессах абразивной обработки.

Ключевые слова: мониторинг качества; шлифовальные материалы; разрушение; деформация.

Monitoring the quality of grinding materials in abrasive processes

Pushkarev O. I.^{1}, Kulik O. G.¹, Puzyrkova V. E.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Graduate Student, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

The materials of the article present the results of studies of abrasive grains, the values of the slopes of Weibull curves, indices, and brittleness indices. It is shown that the effective stresses during failure on a roll crusher are, as a rule, equal to the stresses obtained during static tests. The results of the research can be used to develop standards and monitor the quality of grinding materials in abrasive processes.

Key words: *quality monitoring; grinding materials; destruction; deformation.*

Введение

Качество шлифования и его производительность определяются режущими свойствами рабочей поверхности абразива. Если для поверхности характерны острые выступы, можно достигать высоких скоростей съема, не ухудшая структуру поверхностного слоя, тогда как в случае поверхности с притупленными выступами скорости съема металла обычно малы, а возникающий в процессе шлифования нагрев может вызывать повреждение поверхностного слоя обрабатываемой детали. Поскольку режущие свойства шлифовального круга зависят от степени его износа, для каждого конкретного случая нужно знать относительный вклад каждого из них: износ отдельных зёрен истиранием, частичное разрушение отдельных зёрен и разрушение связки или выпадение целых зёрен.

Особенности разрушения абразивных зерен важны для всех видов шлифования, поскольку разрушение зерен абразива обеспечивает повышение режущих свойств шлифовального круга.

1. Теоретическая часть

В промышленности США для оценки склонности абразива к разрушению используют стандартные испытания их зерен на хрупкость в шаровой мельнице [1]. При этом пробу весом $100 \pm 0,1$ г материала с зернистостями 25 и 125 подвергают обработке на шаровой мельнице, в которую загружены 19-ти миллиметровые стальные шары общим весом 2000 ± 15 г. Испытания прекращают после 850 ± 1 оборотов шаровой мельницы, вращающейся со скоростью 77 ± 1 об/мин. По результатам этих испытаний определяют индекс хрупкости, численно равный количеству материала (%), прошедшему после обработки на шаровой мельнице через сито соответственно с ячейками 200 и 1000 мкм.

Для измерения хрупкости зёрен используют также ударные испытания. При этих испытаниях большое число зерен (10 000) размером x_0 (линейный размер отверстий в сите) бросают по одному в футерованную резиной камеру, в которой две плоские лопасти вращаются со скоростью 1500 об/мин. Скорость падения зерен такова, что каждое зерно испытывает только один удар. Просеивая осколки, определяют весовую долю R материала, остающегося на каждом сите. Весовая доля R связана с соответствующими значениями x следующим образом:

$$R = \left(1 - \frac{x}{x_0}\right)^r, \quad (1)$$

где r – показатель хрупкости.

Поскольку абразивные зерна очень хрупки, они гораздо менее прочны при растяжении, чем при сжатии. При шлифовании в зерне одновременно со сжимающими развиваются действующие в поперечном направлении растягивающие напряжения, и именно они вызывают разрушение. Испытание диска на разрушение при сжатии вдоль диаметра можно применить для изучения прочности карбида вольфрама на растяжение при условии правильной интерпретации результатов испытаний. При испытаниях диск (рис. 1) нагружают между двумя параллельными пластинами до тех пор, пока от центра диска (точки 0) не начнет распространяться трещина к точкам нагружения. Было установлено, что эквивалентные напряжения, вычисленные исходя из теории максимальной деформации, хорошо согласуются с пределом прочности при простом нагружении.

Поскольку зерна абразива обычно имеют «глыбообразную» форму, близкую к сферической, потребовалось разработать трехмерный эквивалент подобных испытаний. Если считать форму частицы сферической, то нормальные напряжения в центре сферы (рис. 2) можно найти по уравнениям:

$$\sigma_z = -\frac{-12 + 15\nu}{\pi r_0^2 (14 + 10\nu)}, \quad (2)$$

$$\sigma_x = \frac{P}{\pi r_0^2} \frac{21}{28 + 20\nu}, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона; P – нагрузка при разрушении; r_0 – радиус частицы.

2. Аналитическая часть

Для выяснения влияния формы была сделана попытка найти аналогичное решение для куба, однако оказалось, что оно не существует в замкнутом виде. Эти два решения можно сравнить, приняв, что диаметр сферы равен стороне куба a ; результаты расчета для абразивного материала при $\nu = 0,25$ представлены в табл. 1. Сжимающие напряжения

практически не зависят от формы частицы, тогда как поперечные растягивающие напряжения в частицах сферической и кубической формы существенно различны.

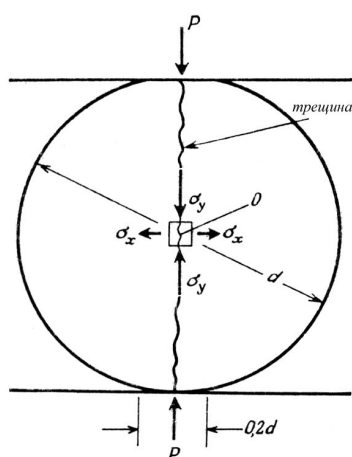


Рис. 1. Напряжения у центра тонкого диска, сжимаемого вдоль диаметра нагрузкой P

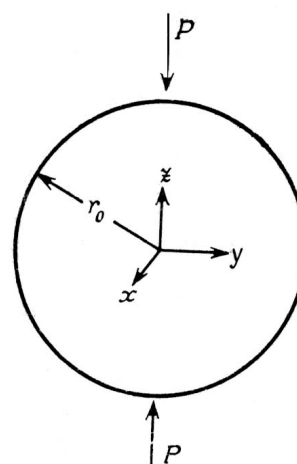


Рис. 2. Сфера, сжимаемая силой P

Табл. 1 Напряжения в центре сферической и кубической моделей абразивного зерна

Модель	Сфера	Куб
σ_z	$-3,52 \frac{P}{a^2}$	$-3,14 \frac{P}{a^2}$
$\sigma_x = \sigma_y$	$0,809 \frac{P}{a^2}$	$0,625 \frac{P}{a^2}$

Согласно теории максимальной деформации, эффективное растягивающее напряжение при разрушении:

$$\sigma_e = \sigma_x - \sqrt{(\sigma_y + \sigma_z)}; \quad (4)$$

– для сферы:

$$\sigma_e = 1,487 \frac{P}{a^2}, \quad (5)$$

– для куба:

$$\sigma_e = 1,254 \frac{P}{a^2}. \quad (6)$$

По-видимому, для зерен промежуточной («средней») формы при вычислении эффективного предела прочности на растяжение следует использовать уравнение, в котором коэффициент имеет некоторое промежуточное значение, например:

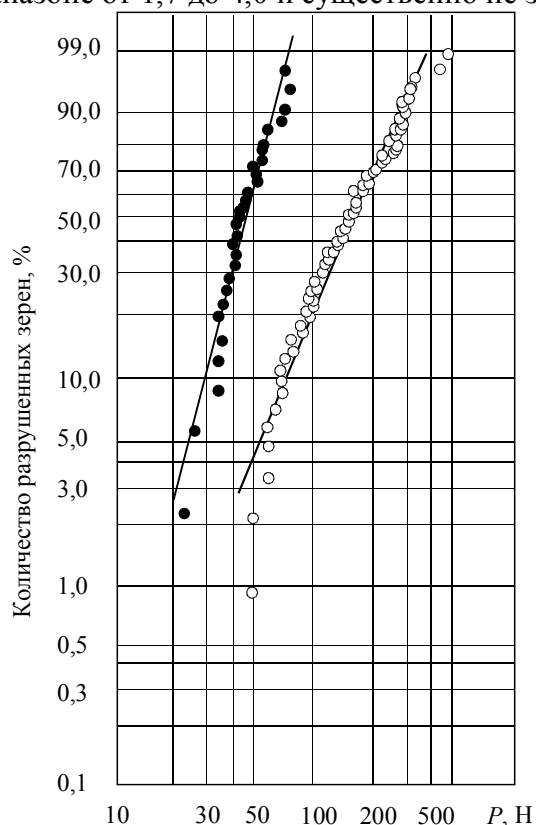
$$\sigma_e = 1,37 \frac{P}{a^2}. \quad (7)$$

Для получения средней нагрузки \bar{P} или среднего напряжения $\bar{\sigma}_e$ для данной пробы абразивных зерен размером a используют статистику Вейбулла.

3. Результаты испытаний

Методом сжатия были определены пределы прочности на растяжение для десяти абразивных материалов. Поскольку различные абразивы имеют разную форму, было решено проводить испытания материалов как в их исходном состоянии, так и с вышлифованными для устранения влияния геометрии поверхности диаметрально противоположными параллельными площадками.

На рис. 3 показаны типичные кривые Вейбулла, а в табл. 2 приведены результаты испытаний для зерен абразивных материалов, величины наклонов кривых Вейбулла (m), индексы и показатели хрупкости. Наклон кривых Вейбулла для различных зерен лежит в диапазоне от 1,7 до 4,0 и существенно не зависит от размера зерен.



- – нешлифованные зерна;
- – зерна с вышлифованными площадками

Рис. 3. Результаты испытаний на разрушение абразивных зерен оксида алюминия зернистостью 12

Эффективный предел прочности на растяжение, как правило, обратно пропорционален индексу хрупкости, хотя эта зависимость несколько различна для нешлифованных образцов и образцов с вышлифованными площадками. Все зерна имели значительно более высокую прочность при нагружении по вышлифованным площадкам, чем при нагружении по заостренным выступам.

Хрупкие разновидности оксида алюминия (модифицированная, белая, монокристаллическая) имели низкие значения прочности и низкие величины отношений пределов прочности на растяжение у образцов с вышлифованными площадками и без них; следовательно, они более пригодны в тех случаях, когда нужна способность к самозатачиванию. Известно, что низкий предел прочности оксида алюминия на растяжение может быть обусловлен его пористой, с большим числом дефектов, структурой. Относительно пластичные зерна, спеченного оксида алюминия, содержащего ZrO_2 , имеют высокий предел прочности на растяжение и высокие значения отношения пределов прочности для шлифованных и нешлифованных зерен, так что их можно применять для силового шлифования.

Микрокристаллический оксид алюминия с промежуточными характеристиками и карбид кремния можно использовать как для чистого, так и для обдирочного шлифования.

В табл. 3 представлены результаты испытаний частиц абразива зернистостью 12, использованных ранее при статических испытаниях. Было найдено, что эффективные напряжения при разрушении на валковой дробилке, как правило, равны напряжениям, полученным при статических испытаниях.

Табл. 2 Результаты статических испытаний абразивных материалов зернистостей 40

Тип абразива	Микро- твердость*, ×10 ⁻² ГПа	Индекс хрупкости	Показатель хрупкости	С вышлифованными площадками		Нешлифованные		Отношение $\frac{\bar{\sigma}_e \text{шлифован}}{\bar{\sigma}_e \text{нешлифован}}$
				$\bar{\sigma}_e$, ×10 ⁻² ГПа	<i>m</i>	$\bar{\sigma}_e$, ×10 ⁻² ГПа	<i>m</i>	
Оксид алюминия								
Модифицированная (3% Cr)	22,58	65	1,6	39,9	3,1	8	3,3	5,0
Белая	21,22	56,6	0,50	37,4	3,0	12,6	3,5	3,0
Монокристаллическая	22,76	47,7	0,28	49,7	3,1	9,5	2,8	5,2
Обычная	20,42	35,6	0,27	44,3	2,6	13,4	4,0	3,3
10 % ZrO ₂	19,65	10,9	0,08	122,5	3,3	18,1	3,2	6,8
40 % ZrO ₂	14,62	7,9	0,11	120,7	3,0	16,0	3,1	7,6
Спеченная	13,72	6,5	0,05	194,6	2,6	30,4	3,2	6,4
Карбид кремния								
Зеленый	(2837)	62,5	1,1	55,7	1,7	5,6	1,9	8,8
Черный	(2679)	57,2	0,81	74,2	2,0	11,0	2,3	6,8

Примечание: * При нагрузке на индентор 0,1 Н

Табл. 3 Сравнение значений предела прочности на растяжение зерен абразива зернистостей 40, найденных при статических испытаниях нешлифованных зерен и при испытаниях на дробление в валках

Тип абразивных зерен	Статические испытания		Дробление в валках	
	$\bar{\sigma}_e \times 10^{-2}$ ГПа	<i>m</i>	$\bar{\sigma}_e \times 10^{-2}$ ГПа	<i>m</i>
Оксид алюминия				
Модифицированный (3% Cr)	8,0	3,3	6,7	1,9
Белый	12,6	3,5	11,9	3,2
Монокристаллический	9,5	2,8	10,1	3,1
10 % ZrO ₂	18,1	3,2	16,0	1,9
40 % ZrO ₂	16,0	3,1	17,3	2,7
Спеченный	30,4	3,2	28,0	2,2
Карбид кремния				
Зеленый	5,6	1,9	7,4	2,0
Черный	11,0	2,3	11,5	1,9

Измерения, проведенные при дроблении частиц оксида алюминия с зернистостью от 125 до 25, показали, что предел прочности на растяжение сильно зависит от размера зерна (рис. 4). Меньшие частицы обладают большей прочностью, вероятно, из-за меньшего числа присутствующих в них дефектов и зародышей трещин.

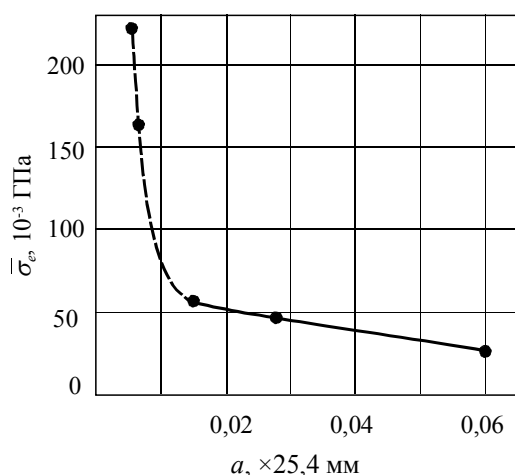


Рис. 4. Зависимость среднего значения напряжений разрушения зерен оксида алюминия от размера зерна

Результаты проведенных исследований могут использоваться при разработке стандартов и мониторинге качества шлифовальных материалов в процессах абразивной обработки.

Выводы

Наблюдаемые при дроблении колебания силы также указывают на зависимость характеристик разрушения от размера частиц. При хрупком разрушении зерна раскалываются на две части вдоль линии нагружения. Большинство частиц с зернистостью 125 и 40 разрушается именно таким образом, тогда как при испытании мелких частиц хрупкое разрушение наблюдается лишь для 10 % общего числа зерен. Подобное различие может быть также обусловлено влиянием величины энергии деформации.

Список литературы

1. Пушкарёв, О. И. Контроль качества шлифовальных материалов по прочностным характеристикам их зерен: (статья) / О. И. Пушкарёв, В.А. Назаренко, А.В. Гончарова // *СТИН*. -2009. -№ 7. -С. 26 -29.
2. Пушкарёв О. И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов : Монография / О. И. Пушкарёв, В. М. Шумячер // ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – 144 с.
3. Пушкарёв, О. И. Мониторинг физико-механических и эксплуатационных характеристик шлифматериалов [Текст] / О. И. Пушкарёв, В. М. Шумячер // *СТИН*. - 2006. - N 10. - С. . 24-27. - Библиогр.: с. 27
4. Пушкарёв О. И., Шумячер В. М. Разработка комплексной технологической системы контроля качества шлифовальных материалов по физико-механическим характеристикам : сб. статей межд. науч.-техн. конф. «Менеджмент качества продукции и услуг». Брянск : Брянский государственный технический университет, 2007. С. 107 – 108.
5. Pushkarev, O. I. Improved diamond tools for high-speed machining of seating holes in grinding-wheel blanks : (статья) / O. I. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // *Russian Engineering Research*. - 2015. - Vol. 35, Is. 2. - Pp. 126-127. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X15020215>.
6. Pushkarev, O. I. Finishing of grinding-wheel blanks by power burnishing : (статья) / O. I. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // *Russian Engineering Research*. - 2015. - Vol. 34, Is. 12. - Pp. 773-774. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X14120211>.

Исследование кинетики окислительных процессов керамических материалов на основе карбида кремния

Пушкарев О. И.^{1*}, Кулик О.Г.¹, Башкирцева И.В.¹

¹Профессор, Доцент, Доцент Волжский политехнический институт (филиал) «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

В статье рассмотрено влияние температурных факторов при абразивной обработке и эксплуатации керамических изделий в коррозиоактивных и абразивных средах. Произведены термодинамические расчёты окисления карбида кремния. Проведено практическое исследование кинетики окислительных процессов при программированном нагреве в заданном диапазоне температур. Определена временная зависимость процесса окисления горячепрессованного карбида кремния от вида и количества добавки. Произведено изучение кинетики окисления в среде кислорода при атмосферном давлении определён состав оксидного слоя. Электронно-микроскопическими исследованиями подтверждено отсутствие оксидной плёнки при температурах нагрева до 1100 °С. Начало существенного процесса окисления при температуре 1300 °С и активный процесс окисления при температуре 1400 °С. При окислении материалов с добавкой алюминия так же, как и в случае горячепрессованных материалов в составе продуктов окисления, кроме диоксида кремния, был обнаружен муллит.

Ключевые слова: абразивная обработка, керамические изделия, кинетика окисления, оксидная плёнка.

Investigation of the kinetics of oxidative processes of ceramic materials based on silicon carbide

Pushkarev O. I.^{1}, Kulik O.G.¹, Bashkirtseva I.V.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

Produced by thermodynamic calculations of the oxidation of silicon carbide. A practical study of the kinetics of oxidative processes under programmed heating in a given temperature range is carried out. The time dependence of the oxidation process of hot-pressed silicon carbide on the type and quantity of the additive was determined. The study of the kinetics of oxidation in an oxygen medium at atmospheric pressure was carried out. The composition of the oxide layer was determined. Electron microscopic studies have confirmed the absence of an oxide film at heating temperatures up to 1100 °C. The beginning of a significant oxidation process at a temperature of 1300 °C and an active oxidation process at a temperature of 1400 °C. When materials with the addition of aluminum were oxidized, as in the case of hot-pressed materials, mullite was found in the composition of oxidation products, except for silicon dioxide.

Key words: *abrasive treatment, ceramic products, oxidation kinetics, oxide film.*

Введение

В процессе обработки и последующей эксплуатации керамики в коррозиоактивных и абразивных средах в зоне контакта абразива и керамического материала возникают высокие температуры. В связи с этим необходимо исследовать влияние физико-химических факторов, в частности температуры на процессы окисления и, в конечном итоге, на качество изделий из керамики.

1. Теоретическая часть

Результаты термодинамических расчетов показывают, что при окислении карбида кремния наиболее вероятно образование SiO_2 в соответствии с реакциями:



Термодинамическая вероятность реакции:

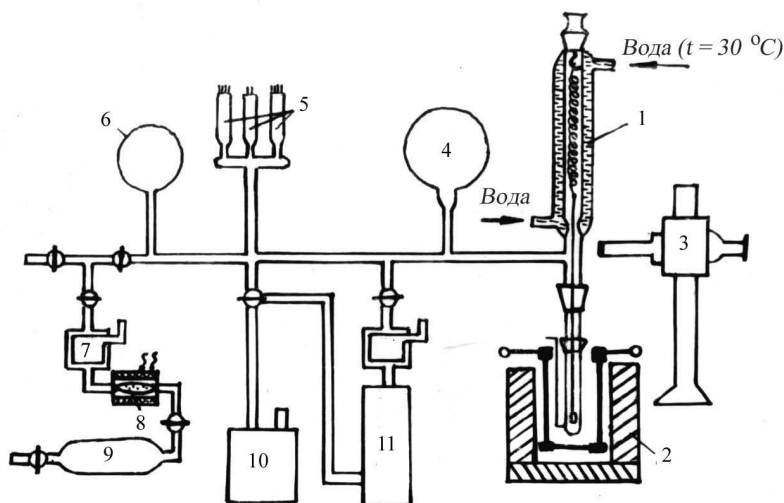


приводящей к образованию SiO , увеличивается с ростом температуры и уменьшением парциального давления кислорода. Образующийся на поверхности образцов слой оксида кремния обладает защитными свойствами до температуры 1630°C . При более высоких температурах начинается взаимодействие материала с оксидным слоем по реакции:



2. Практическая часть

Исследование кинетики окислительных процессов керамических материалов на основе карбида кремния при высоких температурах проводилось в условиях программированного нагрева в интервале температур $20 - 1400^\circ\text{C}$ на воздухе и в среде кислорода.



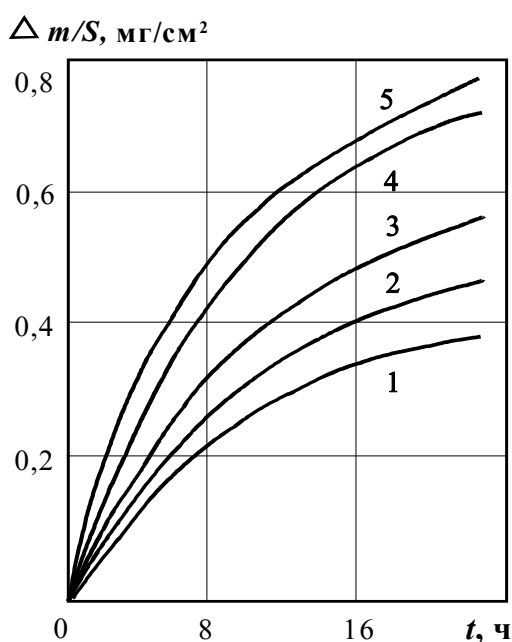
2 – печь; 3 – катетометр; 4 – дополнительный объем; 5 – преобразователи для вакуумметров; 6 – деформационный манометр; 7 – охлаждаемая ловушка; 8 – колонна для сорбента; 9 – баллон с газом; 10 – форвакуумный насос; 11 – диффузионный насос

Рис. 1. Принципиальная схема микровесовой установки: 1 – реакционная труба с кварцевой пружиной

За изменением скорости реакции следили измерением удлинения пружины катетометра. Для обеспечения точности показания прибора с пружиной необходимо поддерживать постоянную температуру, окружив камеру термостойкой водяной рубашкой. В работе использованы кварцевые пружинные весы, показанные на рис. 1. Чувствительность пружины зависит от ее длины, диаметра, толщины нити и составляет $0,015$ мг при массе образца 900 мг. Повысить ее можно, увеличив и диаметр пружины.

Однако при этом возникают трудности, связанные с определением точного удлинения пружины, вибрирующей под действием конвективных потоков.

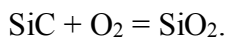
Процесс окисления горячепрессованного карбида кремния подчиняется параболической временной зависимости и во многом определяется видом и количеством введенной для активации спекания добавки. В большинстве случаев используют в качестве активатора спекания карбида кремния Al_2O_3 . В то же время, увеличение содержания в материале Al_2O_3 уменьшает стойкость керамики к окислению (рис. 2). Это связано с диффузией алюминия к поверхности и растворением его в оксидном слое, сопровождающейся уменьшением защитных свойств слоя и увеличением газопроницаемости.



2(1); 6, 1 (2); 9,2 (3); 12, 1 (4) и 15 % Al_2O_3 (5)

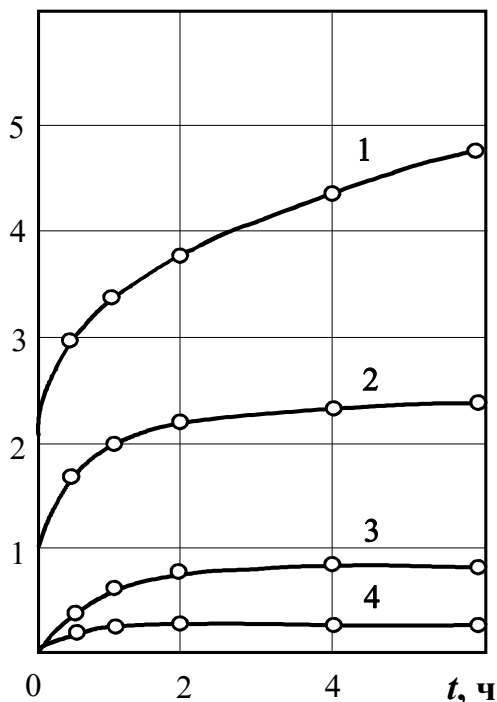
Рис. 2. Кинетические кривые окисления в кислороде при 1370 °С горячепрессованного SiC с добавками

Изучалась кинетика окисления в среде кислорода при атмосферном давлении и температурах 1200 – 1400 °С горячепрессованного карбида кремния с добавкой 4 % Al_2O_3 и содержащего также 4 % WC. Кинетические кривые окисления материала также подчинялись параболической временной зависимости, но только после второго часа нагрева. Из-за образования летучего оксида вольфрама в первые два часа скорость приращения массы была меньше. В составе оксидного слоя обнаружены кристобалит и стеклофаза. Процесс окисления самосвязанного карбида кремния близок к окислению кремния. Самосвязанный SiC является двухфазным материалом, в котором, кроме карбида кремния, содержится примерно 10 % свободного кремния. Окисление самосвязанного карбида кремния (рис. 3) начинается при температуре ~ 1000 °С. В интервале температур от 1000 до 1300 °С наблюдается первый размытый экзотермический пик (рис. 4, кривая 1). Соответствующая кривая 2 показывает, что эффект изменения массы на этом участке очень мал. Второй экзотермический пик на кривой 3 наблюдается при более высоких температурах. В области 1400 – 1500 °С существенно увеличивается прирост массы образцов ввиду того, что SiC активно окисляется до SiO_2 по реакциям (1) и (2), а окисление кремния протекает в соответствии с реакцией:



(5)

$\Delta m/S, \text{ мг/см}^2$



1 – 1400 °C; 2 – 1300 °C; 3 – 1200 °C; 4 – 1100 °C

Рис. 3. Кинетические кривые окисления самосвязанного карбида кремния при температурах

Изменение массы образцов самосвязанного карбида кремния в результате нагрева при 1000 °C не обнаружено. Отсутствие окисления при температурах до 1100 °C подтверждается также электронно-микроскопическими исследованиями. В частности, на образце, выдержанном 3 часа при 1050 °C, оксидный слой отсутствует и четко видна текстура, сформировавшаяся за счет предварительной механической обработки. Существенно протекает процесс окисления, начиная с температуры 1300 °C. При этом на поверхности частиц в течение двух часов образовывается оксидная пленка, которая препятствует дальнейшему проникновению кислорода в материал, и процесс окисления практически прекращается. При температуре 1400 °C окисление самосвязанного SiC протекает очень активно, приращение массы увеличивается во времени, что, по-видимому, объясняется повышением скорости диффузии кислорода и оксидов углерода через слой SiO₂.

По своему характеру образующаяся на поверхности образцов самосвязанного SiC пленка является аморфной. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что после окисления в поверхностном слое резко возрастает содержание кальция и алюминия (рис. 5) из-за диффузии примесей, имеющих высокое сродство к кислороду.

Петрографический анализ продуктов окисления самосвязанного SiC при температуре 1450 °C показал наличие нескольких аморфных фаз переменного состава, показатель преломления которых колеблется от 1,53 до 1,54°. По-видимому, это алюмосиликаты кальция и магния, составляющие 55 – 60 мас. % поверхностного активного слоя. Другим продуктом окисления, обнаруженным кристаллографически, является аморфный диоксид кремния с показателем преломления 1,455.

Выводы

В работе исследовано окисление спеченного карбида кремния с добавками до 0,8 мас. % алюминия и до 1 мас. % бора при температурах 900 – 1600 °С. Введение бора (рис. 7) приводит к убыли массы образцов в начальный период окисления. Кинетические кривые с добавкой алюминия или смеси 0,3 мас. % алюминия и 0,4 мас. % бора подчиняются параболической временной зависимости в начале процесса. При окислении материалов с добавкой бора на их поверхности после окисления при 1200 °С в течение 200 часов формировался оксидный слой из 80 – 90 % SiO_2 и 10 – 20 % B_2O_3 . При окислении материалов с добавкой алюминия так же, как и в случае горячепрессованных материалов в составе продуктов окисления, кроме диоксида кремния, был обнаружен муллит.

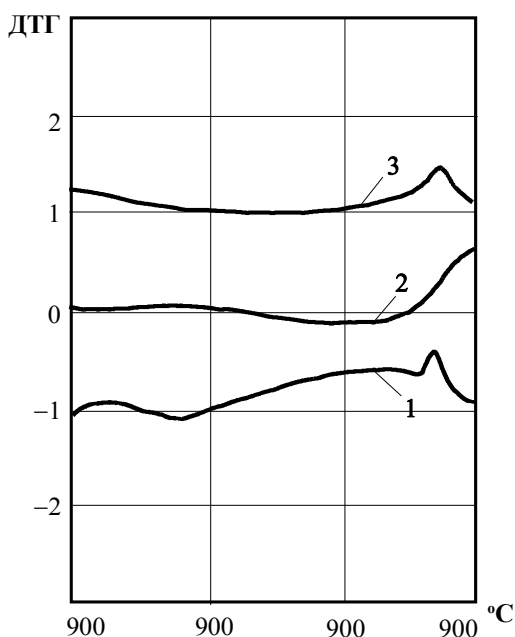


Рис. 4. Термограмма процесса окисления самосвязанного карбида кремния

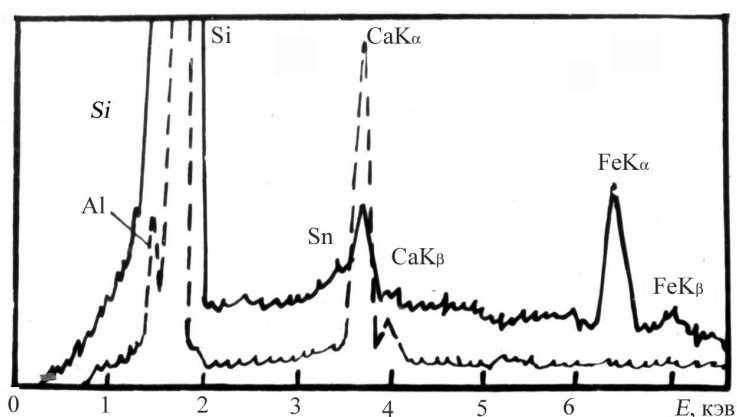


Рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности исходного (сплошные линии) и окисленного при 1350 °С (пунктирные линии) образцов самосвязанного карбида кремния

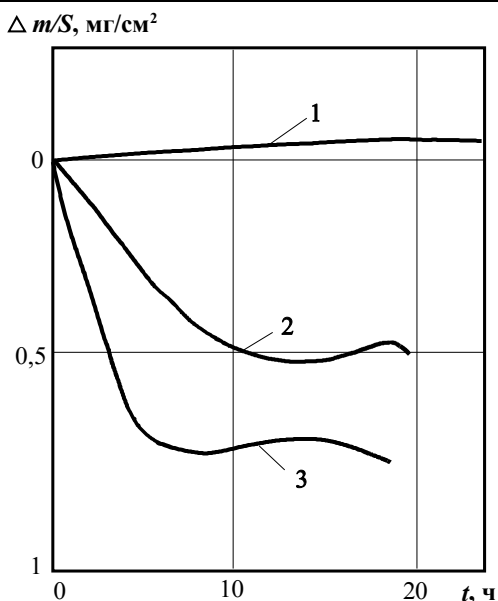


Рис. 6. Кинетические кривые окисления самосвязанного карбида кремния в смеси аргона и кислорода при температурах: 1 – 1150 °С; 2 – 1250 °С; 3 – 1350 °С

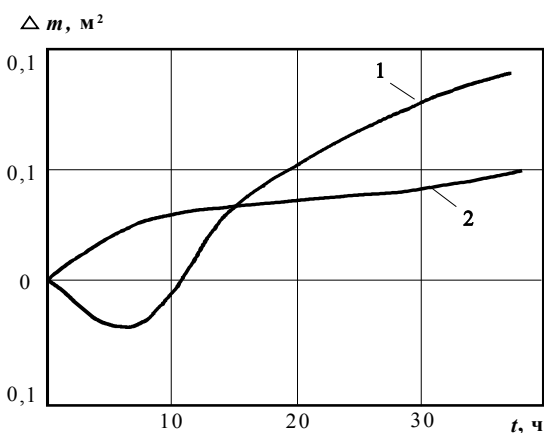


Рис. 7. Кинетические кривые окисления α -SiC с добавками 1 % бора (1) и 0,8 % алюминия (2) при 1200 °С

Список литературы

1. Башкирцева И.В., Орлов И.Ю. Изменение микротвёрдости металла в зависимости от смачивающей способности смазочно-охлаждающей жидкости // сб. мат. междунар. науч.-техн. конф. ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Волжский, 2019.
2. Душко О.В., Шумячер В.М. Башкирцева И.В., Динамика контактного взаимодействия инструмента и детали при абразивном диспергировании // В сборнике: Абразивное производство сборник научных трудов. под редакцией Б.А. Чаплыгина. Челябинск, 2005.
3. Назаренко В.А., Башкирцева И.В., Пушкарев Д.О. Автоматизированный прибор для комплексной оценки структурно-механических характеристик абразивных материалов, СТИН. 2017. № 4.

4. **Пушкарев О. И.,** Бражников Д. Б. Совершенствование процессов механической обработки шлифовальных кругов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2011.
5. **Пушкарев О. И.,** Мальгинова Г. М., Данилова Е. С. Определение модуля упругости абразивных материалов // Сборник статей профессорско-преподавательского состава ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2008. С. 44 – 46.
6. **Пушкарев О. И.,** Шумячер В. М. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов: монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2004. 144 с.
7. **Башкирцева И.В.,** Кулик О.Г., Торшин Д.Д. Повышение эффективности процессов шлифования нержавеющей стали // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2012.
8. **Пушкарев О. И.,** Шумячер В. М., Мальгинова Г. М. Контроль качества абразивных зерен при тепловых ударах // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. Шлифабразив-2004 / ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2004. С. 256 – 259.
9. **Пушкарев О.И.,** Башкирцева И.В., Бражников Д.Б. Совершенствование качества алмазного инструмента для скоростной обработки посадочных отверстий заготовок шлифовальных кругов, СТИН. 2014. № 8.
10. **Пушкарев О.И.,** Башкирцева И.В., Бражников Д.Б. Финишная обработка заготовок шлифовальных кругов методом силовой обкатки, СТИН. 2014. № 5.
11. **Пушкарев О.И.,** Башкирцева И.В., Бражников Д.Б., Эффективные процессы охлаждения инструмента из сверхтвёрдых материалов при финишной обработке заготовок шлифовальных кругов, СТИН. 2014. № 3.
12. **Шумячер В.М.,** Башкирцева И.В., Рациональное применение смазочно-охлаждающей жидкости в процессах суперфиниширования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2014.
13. **Шумячер В.М.,** Душко О.В., Башкирцева И.В., Метод оценки эффективности процессов финишной абразивной обработки материалов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2006.
14. **Башкирцева, И.В.** Change in Microhardness of Metal Depending on Wetting Ability of Lubricating Coolant / И.В. Башкирцева, Т.Н. Орлова // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1019-1026. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>
15. **Орлов, И.Ю.** Study of Physical and Chemical Processes Occurring During Polycondensation of Bakelite Binder in Order to Adjust Technological Process of Abrasive Tool Production / И.Ю. Орлов, Т.Н. Орлова, И.В. Башкирцева // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1003-1010. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>.

Исследование эксплуатационных характеристик шлифматериалов при абразивной обработке нержавеющей стали

Пушкарев О.И.^{1*}, Башкирцева И. В.¹, Пузырькова В.Е.¹

¹Профессор, Доцент, Аспирант, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

В статье отражено проведение комплексных исследований эксплуатационных характеристик различных шлифматериалов при абразивной обработке образцов нержавеющей стали марки 1X1BН9Т. Изучен процесс шлифования образцов уплотненным слоем абразивных зерен, образующимся во вращающемся барабане. Показана зависимость режущей способности уплотненного слоя абразива от зернистости шлифовального материала и зависимость режущей способности шлифовального материала от скорости уплотненного слоя. Отражена зависимость скорости уплотненного слоя абразива на режущую способность шлифовального материала. Выявлена оптимальная скорость обработки нержавеющей стали. Определена наибольшая режущая способность при работе с масляной смазочно-охлаждающей жидкостью на всех исследованных шлифовальных материалах. Показано влияние водных смазочно-охлаждающих жидкостей на обработку материала.

Ключевые слова: абразивная обработка, нержавеющая сталь, уплотнённый слой абразива, смазочно-охлаждающие жидкости.

Study of performance characteristics of grinding materials during abrasive processing of stainless steel

Pushkarev O.I.^{1}, Bashkirtseva I. V.¹, Puzyrkova V. E.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Graduate Student, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

This article presents comprehensive studies of the operational characteristics of the various slip material during abrasive processing of the samples of stainless steel type 1X1BН9Т. Studied the process of grinding samples compacted layer of abrasive grains, formed in a rotating drum. The dependence of the cutting ability of the compacted layer of abrasive grit from the grinding material and the dependence of the cutting ability of the abrasives to speed compacted layer. The dependence of the speed of the compacted layer of abrasive on the cutting capacity of the grinding material is reflected. The optimal speed of processing of stainless steel is revealed. The greatest cutting capacity was determined when working with an oil-based lubricant-cooling liquid on all the studied grinding materials. The effect of water-based cooling fluids on material processing is shown.

Key words: *abrasive treatment, stainless steel, compacted layer of abrasive, lubricating and cooling fluids.*

Введение

Ответственные детали энергетического и химического машиностроения, работающие в условиях высоких температур и агрессивных сред, изготавливаются из высоколегированных сталей и сплавов. Шлифование таких сплавов, отличающихся высокой прочностью и твердостью, связано со значительными трудностями. Наряду с быстрым затуплением абразивных зерен и необходимостью в связи с этим производить частую правку кругов трудности шлифования усугубляются значительным

тепловыделением в процессе обработки с достаточно высокой производительностью резания, что влечет за собой нежелательные структурные изменения в поверхностном слое шлифуемых деталей.

1. Теоретическая часть

Большие остаточные напряжения, вызванные нагревом при шлифовании, ведут к образованию трещин, приводящих в ряде случаев к аварийному выходу из строя ответственных деталей.

Снижением тепловыделения в процессе шлифования при работе с меньшей производительностью резания оказывается экономически не выгодным из-за чрезмерно высокой штучной себестоимости шлифования.

При этом вопрос эффективной абразивной обработки нержавеющей сталей в связи с многообразием рекомендаций выбора абразивного материала, характеристики шлифовальных кругов и СОЖ требует дальнейшего изучения.

2. Практическая часть

В связи с вышеизложенным проведены комплексные исследования эксплуатационных характеристик различных шлифматериалов при абразивной обработке образцов нержавеющей стали марки 1Х1ВН9Т.

Изучен процесс шлифования образцов уплотненным, под действием центробежных сил, слоем абразивных зерен, образующимся во вращающемся барабане [1].

За показатель режущей способности шлифовального материала и эффективности СОЖ принимается съём металла (износ образца) в единицу времени, выраженный в граммах при рабочей скорости уплотненного слоя – 50 м/с; 35 м/с; 16 м/с.

Испытываемый материал – шлифзерно из различных видов электрокорунда (24А; 44А; 91А) и карбида кремния (54С и 63С) с размером зерен основных фракций 100; 160; 250 и 400 мкм.

Шлифуемые образцы диаметром $6,5 \pm 0,1$ мм, длиной 50 – 60 мм.

Смазочно-охлаждающие жидкости:

- а) нитрид натрия – 0,2%; триэтаноламин – 0,8 %, вода – остальное;
- б) укринол-14 (масло);
- в) ИХП45Э – 10 %-ной концентрации;
- г) Аквол-10 – 3 %-ной концентрации;
- д) эмульсол ЭГТ2 – 4 %, сода кальцинированная – 0,3 %, вода – остальное.

Результаты исследований представлены в таблицах 1 – 3.

Табл. 1. Зависимость режущей способности уплотненного слоя абразива от зернистости шлифовального материала (скорость – 35 м/с; СОЖ – нитрит натрия – 0,2 %, триэтанолман – 0,8 %, вода – остальное)

Шлифовальный материал	Режущая способность, г/с			
	Размер зерен основной фракции шлифовального материала, мкм			
	100	160	250	400
24 А	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$11,3 \cdot 10^{-7}$
44 А	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$11,3 \cdot 10^{-7}$
91 А	–	–	$6,6 \cdot 10^{-7}$	–
54 С	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$
63 С	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$

Табл. 2. Зависимость режущей способности шлифовального материала от скорости уплотненного слоя (СОЖ – нитрит натрия – 0,2 %, триэтаноломан – 0,8 %, вода – остальное)

Шлифовальный материал с размером зерен основной фракции 250 мкм	Режущая способность, г/с		
	Скорость шлифования, м/с		
	16	35	50
24 А	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$
44 А	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
91 А	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$
54 С	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$
63 С	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$

Табл. 3. Влияние СОЖ на режущую способность шлифовального материала

СОЖ	Режущая способность, г/с				
	24 А	44 А	91 А	54 С	63 С
Нитрид натрия – 0,2 %	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$
Триэтаноломан – 0,8 %					
Укринол – 14	$15,0 \cdot 10^{-7}$	$15,4 \cdot 10^{-7}$	$13,0 \cdot 10^{-7}$	$14,1 \cdot 10^{-7}$	$14,4 \cdot 10^{-7}$
ИХП 45Э – 10%-ной концентрации	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$10,2 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$
Аквол – 10 3%-ной концентрации	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$10,4 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$
Эмульсол ЭГТ2 5%-ной концентрации	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$10,4 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$

Из таблицы 1 видно, что с увеличением номера зернистости режущая способность шлифовального материала возрастает. Наибольшей режущей способностью обладают зерна монокорунда всех зернистостей.

Выводы

Результаты исследований показали, что увеличение скорости уплотненного слоя абразива позволило повысить режущую способность шлифовального материала. Нужно отметить, что увеличение скорости с 16 м/с до 35 м/с позволило увеличить режущую способность зерен электрокорунда в 1,5–2,5 раза, а зерен карбида кремния в 1,5–1,8 раза.

Дальнейшее увеличение скорости до 50 м/с позволяет повысить режущую способность зерен электрокорунда в 1,1–1,5 раза, а зерен карбида кремния в 1,2 раза.

Наиболее ярко выражено увеличение режущей способности зерен электрокорунда белого при скорости 35 м/с в 2,4 раза. Из проделанной работы можно сделать вывод, что оптимальной скоростью для обработки нержавеющей стали является скорость 35 м/с.

Смазочно-охлаждающие жидкости испытывались при скорости уплотненного слоя 35 м/с. Шлифовальный материал размером зерен основной фракции 250 мкм. Из таблицы 3 видно, что наибольшая режущая способность получена при работе с масляной СОЖ на всех исследованных шлифовальных материалах. Различие водных СОЖ существенного влияния на обработку не оказывает.

Список литературы

1. Башкирцева И.В., Кулик О.Г., Торшин Д.Д. Повышение эффективности процессов шлифования нержавеющей стали // Процессы абразивной обработки,

- абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2012.
2. **Башкирцева И.В.**, Орлов И.Ю. Изменение микротвёрдости металла в зависимости от смачивающей способности смазочно-охлаждающей жидкости // сб. мат. междунар. науч.-техн. конф. ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Волжский, 2019.
 3. **Душко О.В.**, Шумячер В.М., Башкирцева И.В. Динамика контактного взаимодействия инструмента и детали при абразивном диспергировании // В сборнике: Абразивное производство сборник научных трудов. под редакцией Б.А. Чаплыгина. Челябинск, 2005.
 4. **Назаренко В.А.**, Башкирцева И.В., Пушкарёв Д.О. Автоматизированный прибор для комплексной оценки структурно-механических характеристик абразивных материалов, СТИН. 2017. № 4.
 5. **Пушкарёв О. И.**, Бражников Д. Б. Совершенствование процессов механической обработки шлифовальных кругов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2011.
 6. **Пушкарёв, О. И.** Методы и средства контроля физико-механических характеристик обрабатываемых материалов : монография / О. И. Пушкарёв, В. М. Шумячер. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2004. – 144 с.
 7. **Башкирцева, И.В.** Change in Microhardness of Metal Depending on Wetting Ability of Lubricating Coolant / И.В. Башкирцева, Т.Н. Орлова // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1019-1026. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
 8. **Орлов, И.Ю.** Study of Physical and Chemical Processes Occurring During Polycondensation of Bakelite Binder in Order to Adjust Technological Process of Abrasive Tool Production / И.Ю. Орлов, Т.Н. Орлова, И.В. Башкирцева // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1003-1010. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
 9. **Башкирцева, И.В.** Изменение микротвёрдости металла в зависимости от смачивающей способности смазочно-охлаждающей жидкости [Электронный ресурс] / И.В. Башкирцева, И.Ю. Орлов // 18-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 21-25 января 2019 г.) : сб. ст. / ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский гос. техн. ун-т» ; [оргкомитет А. В. Фетисов, Г. М. Бутов]. - Волгоград, 2019. - С. 443-450. – Режим доступа : <http://lib.volpi.ru>.
 10. **Пушкарёв, О.И.** Main Regularities of Elastic-Plastic Deformation and Brittle Failure in Micro Volumes of Abrasive Materials under Micro Pressure [Электронный ресурс] / О.И. Пушкарёв, P.U. Vochkarev, И.В. Башкирцева // Procedia Engineering. Vol. 206 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017) (Saint-Petersburg, Russian Federation, May 16-19, 2017) / ed by A.A. Radionov ; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, South Ural State University (national research university), Platov South-Russian State Polytechnic University and Far Eastern Federal University. – [Published by Elsevier Ltd.], 2017. – P. 222–227. – URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817351470>.

Методология исследования сил резания при алмазно-абразивной обработке шлифовальных кругов с применением экспериментального оборудования

Пушкарев О.И.^{1*}, Кулик О.Г.¹, Башкирцева И.В.¹

¹Профессор, Доцент, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Повышение эффективности процессов обработки в машиностроении в значительной степени связано с обеспечением качества кругов на конечной стадии их изготовления при размерном шлифовании. Механическая обработка заготовок шлифовальных кругов в зависимости от их зернистости, твердости и материала связки характеризуется различными значениями радиальной и тангенциальной составляющей силы резания. Величины силы резания также зависят от режимов обработки и величины дуги контакта обрабатываемого и обрабатывающего шлифовальных кругов. Показаны результаты вычислений длины дуги, площади контакта и составляющих сил резания при механической обработке посадочных отверстий заготовок кругов инструментальными кругами. Исследована работа абразивных кругов различной крупности зерна в широком диапазоне скоростей. Определены режимы самозатачивания абразивного инструмента при разрушении абразивных зёрен.

Ключевые слова: шлифовальный круг, механическая обработка, саморазрушение абразивных зёрен, режим самозатачивания.

The methodology of the research of cutting forces during diamond-abrasive processing, the grinding wheels with the use of experimental equipment

Pushkarev O. I.^{1}, Kulik O. G.¹, Bashkirtseva I. V.¹*

*¹Professor, Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch)
Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia*

Abstract

Improving the efficiency of machining processes in mechanical engineering is largely related to ensuring the quality of the wheels at the final stage of their manufacture during dimensional grinding. Mechanical processing of grinding wheel blanks depending on their grain, hardness and material of the bundle are characterized by different values of the radial and tangential component of the cutting force. The values of the cutting force also depend on the processing modes and the value of the contact arc of the processed and processing grinding wheels. The results of calculations of the arc length, contact area and components of the cutting forces during machining of the landing holes of blanks with tool circles are shown. The work of abrasive wheels of different grain sizes in a wide range of speeds is studied. The modes of self-sharpening of an abrasive tool during the destruction of abrasive grains are determined.

Key words: *grinding wheel, machining, self-destruction of abrasive grains, self-sharpening mode.*

Введение

Современный уровень развития машиностроительной, станкостроительной, подшипниковой отраслей промышленности предопределяется качеством выпускаемой продукции. Технический прогресс характеризуется быстро возрастающими требованиями к точности размеров и геометрической формы деталей и качеству их поверхности. В металлообрабатывающих отраслях промышленности все более весомый удельный вес

приобретает алмазно-абразивная обработка деталей. При обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов применение алмазного и абразивного инструмента зачастую является единственно возможным. Сейчас объем алмазно-абразивной обработки составляет более 25 % всей металлообработки, а в подшипниковой промышленности свыше 70 %. Окончательная (финишная) обработка деталей, определяющая состояние несущих основных нагрузок при эксплуатации поверхностного слоя детали, в основном ведется алмазным или абразивным инструментами. В этих условиях возрастает перспективность и значимость абразивной обработки как основного и наиболее экономичного способа получения высокоточных деталей. Повышение эффективности и качества абразивной обработки в силу этих причин является в настоящее время актуальной научной проблемой, имеющей важное прикладное значение.

1. Теоретическая часть

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых показано, что функциональные свойства абразивного инструмента определяются его характеристиками - зернистостью, пористостью, твердостью и прочностью. Эти свойства определяют область применения данного инструмента, лежат в основе выбора режимов шлифования. Из анализа работ ряда авторов следует, что изыскание путей и способов, обеспечивающих в течение длительного времени высокую стабильность свойств электрокорундового инструмента, является перспективным направлением в технологии абразивной обработки.

2. Практическая часть

Повышение эффективности процессов обработки в машиностроении в значительной степени связано с обеспечением качества кругов на конечной стадии их изготовления при размерном шлифовании [1, 2].

В связи с этим разработано экспериментальное оборудование, спроектированное и изготовленное на базе внутришлифовального станка мод. 3А227 (рис. 1).

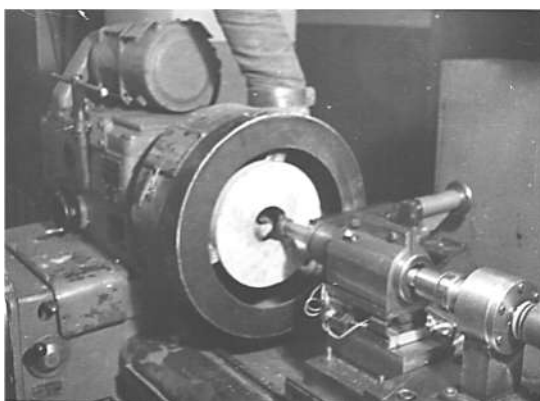


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Шлифовальный суппорт был установлен на 2-х восьмигранных упругих элементах, на гранях которых наклеивались тензодатчики с базой 5 – 10 мм и сопротивлением 100 Ом. Электрические сигналы от соединенных в мостовую схему датчиков усиливались усилителем ТА-5 и регистрировались потенциометром КСП-4.

Расположение датчиков и схема соединения представлены на рис. 2.

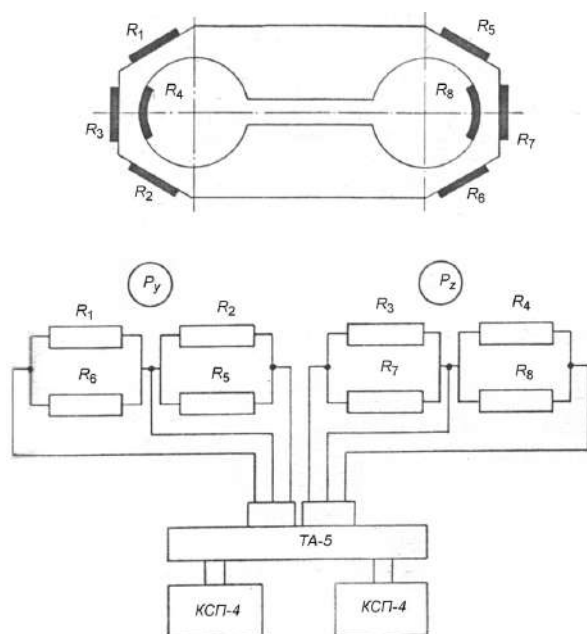


Рис. 2. Электрическая схема динамометра для измерения двух сил

Перед выполнением экспериментов проводилась статическая тарировка динамометра.

Для проведения экспериментов использовались образцы заготовок шлифовальных кругов производства Волжского абразивного завода.

Механическую обработку посадочных отверстий методом многопроходного шлифования производили шлифовальными кругами на керамической и бакелитовой связках, изготовленными в лабораторных условиях ВПИ.

При исследованиях также была применена алмазная обработка образцов изделий. Скорость изделия $n_{изд}$ регулировалась бесступенчато в пределах 0 – 900 об/мин от привода постоянного тока, оснащенный электромагнитным усилителем ПМУ-4-4СП. Привод инструментального шпинделя мощностью 2,8 кВт в зависимости от диаметра шкива электродвигателя имел собственную частоту вращения 4000, 6000, 8000 об/мин (табл. 1).

Табл. 1. Основные параметры обработки

Частота вращения круга, об/мин	150	300	600	900
Величина продольной подачи, мм/мин, при:	750–	1500–	3000–	4500–
$B = 20$ мм;	2250	4500	9000	13500
$B = 10$ мм	1125	2250	4500	6750
Глубина шлифования t , мм	0,05; 0,1; 0,15	0,05; 0,1; 0,15	0,05; 0,1; 0,15	0,05; 0,1; 0,15

Продольную подачу $S_{пр}$ шлифовального круга принимали в зависимости от обрабатываемого материала и характера обработки, равной

$$S_{пр} = (0,25 - 0,75) \cdot B, \text{ мм/об}, \quad (1)$$

где B – высота шлифовального круга, мм.

Процесс механической обработки абразивно-алмазным инструментом оценивали следующими критериями:

- 1) коэффициентом шлифования:

$$K_{ш} = \frac{V_{абр}}{V_{инстр}}, \quad (2)$$

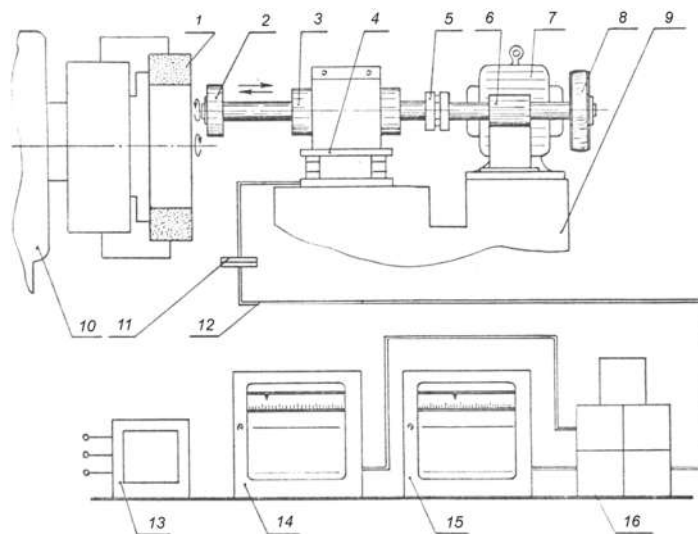
где $V_{абр}$ – объем снятого абразива в изделии, см³; $V_{инстр}$ – объем израсходованного инструмента, см³.

- 2) значениями сил резания:
 - нормальной силой P_y , Н;
 - тангенциальной P_z , Н;
- 3) показателем напряженности процесса резания: a_p , Н;
- 4) температурой в зоне резания, Т°С;
- 5) режущей способностью абразивного инструмента:

$$Q = \frac{V_{абр}}{t}, \text{ см}^3/\text{мин}, \quad (3)$$

где t – продолжительность обработки, мин.

До начала исследований проводились следующие подготовительные работы: подготовка партии образцов изделий с проверкой их твердости и прочности на разрыв, настройка станка и измерительной аппаратуры; замеры геометрических параметров изделия и инструмента; взвешивание алмазных фрез, проверка твердости шлифовальных кругов, прочности на разрыв, замер диаметра обрабатываемого отверстия и высоты круга, а также диаметра инструментального круга. Изделие закреплялось в трехлапчатом патроне станка (рис. 3).



1 – шлифовальный круг (изделие); 2 – инструмент; 3 – инструментальный шпиндель; 4 – динамометр; 5 – муфта; 6 – промежуточная опора; 7 – электродвигатель; 8 – ременный привод; 9 – суппорт станка; 10 – станок 3А227; 11 – колодка подключения; 12 – соединительный кабель; 13 – самопишущий ваттметр Н348; 14, 15 – потенциометр КСП-4; 16 – усилитель ТА-5

Рис. 3. Установка для измерения сил P_y и P_z при обработке посадочных отверстий шлифовальных кругов на станке мод. 3А227

Обработка заготовок кругов проводилась всухую – без смазочно-охлаждающей жидкости, с применением системы вытяжной вентиляции абразивной пыли. Тарирование динамометра проводилось статическим нагружением с помощью гирь и пружинного динамометра в направлениях действия составляющих сил резания. Одновременно в

процессе тарирования устанавливалось количественное взаимовлияние составляющих сил резания.

Как показали лабораторные исследования, механическая обработка заготовок шлифовальных кругов в зависимости от их зернистости, твердости и материала связки характеризуются различными значениями радиальной и тангенциальной составляющей силы резания P_y и P_z .

Величины силы резания также зависят от режимов обработки и величины дуги контакта обрабатываемого и обрабатывающего шлифовальных кругов.

При обработке посадочных отверстий шлифовальных кругов длина дуги контакта определяется по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t}{d - D}}, \text{ мм}, \quad (4)$$

где D – диаметр изделия, мм; d – диаметр инструмента, мм; t – глубина резания, мм.

Как видно из формулы (4), длина дуги контакта зависит от D и d , и при изменении t будет справедливым соотношение:

$$\frac{P_{y1}}{S_1} = \frac{P_{y2}}{S_2}, \quad (5)$$

где P_{y1} , P_{y2} – значения радиальных составляющих сил резания; S_1 , S_2 – площадь контакта, равная:

$$S = \alpha \cdot B, \text{ мм}^2,$$

где α – длина дуги контакта, мм; B – высота круга, мм.

Силы резания зависят от величины контактной площади рельефа режущей поверхности. Чем меньше будет суммарная контактная площадь, тем легче осуществляется внедрение режущих элементов в обрабатываемый материал, тем меньше будут суммарные силы трения на контактные поверхности.

Результаты вычислений длины дуги, площади контакта и составляющих сил резания при механической обработке посадочных отверстий заготовок кругов инструментальными кругами приведены в табл. 2.

Табл. 2. Значения площади контакта сил резания при механической обработке посадочных отверстий шлифовальных кругов различной твердости

Изделие		Инструмент	Длина дуги контакта α , мм	Площадь контакта S , мм ²	Силы резания P_y и P_z , Н
Диаметр посадочного отверстия d , мм	Твердость	Наружный диаметр D , мм			
76	CM1	63	6,06	121,2	25:3
	C2				87,8:14,6
	CT1				100:11,0
127	CM1	100	6,8	217,6	45:5
	C2				157:39,3
	CT1				179:19,8
203	CM1	175	11,26	720,6	148:16,5
	C2				522:130
	CT1				593:65,8
127	CM1	250	11,77	941,6	193:21,7
	C2				682:170
	CT1				774:86

Режимы обработки: $n_{\text{изд.}} = 150$ об/мин; $n_{\text{инстр}} = 8000$ об/мин; $S_{\text{прод}} = 3$ м/мин; $t = 0,1$ м.

Силы резания замерялись при обработке отверстий диаметром 76 мм кругов, и в дальнейшем был сделан пересчет сил для случаев обработки отверстий больших диаметров в зависимости от площади контакта.

Абразивные материалы, хотя и обладают высокой твердостью, но подвержены хрупкому разрушению из-за невысокой прочности на удар. При хрупком разрушении зерен происходит вырывание их из связки в зависимости от критической нагрузки и размеров зерна.

Объемное разрушение зерен для электрокорунда определяется из соотношения [2]:

$$P_{2эл} = 5,6d + 0,58d^2; \tag{6}$$

- для зерен карбида кремния:

$$P_{2экар} = 6,7d + 0,2d^2; \tag{7}$$

- для алмазных зерен:

$$P_{2а} = 10,45d^{1,03}. \tag{8}$$

Зная количество зерен на 1 мм² круга, вычислим критическую нагрузку для абразивных зерен в зависимости от зернистости круга.

Значения данных приведены в табл. 3.

Табл. 3. Значения критических нагрузок для абразивных зерен

Зернистость ГОСТ 3647-71	Расчетные значения нагрузок				Экспериментальные данные			
	Поверхностное выкрашивание зерна электрокорунда, Н	Объемное разрушение зерен			Количество зерен на 1 мм ² круга на керамической связке		Количество зерен на площади контакта δ = 121,2 мм, шт.	Действительная нагрузка на зерно, Н
		электрокорунда, Н	карбида кремния, Н	алмаза, Н	Всего зерен, шт.	Рабочих зерен, шт.		
16	2,47	8,92	10,5	15,4	28	2,8	339	0,29
25	3,04	14,02	16,4	24,5	11,6	1,16	140	0,71
40	3,82	22,8	26,8	39,8	5,6	0,56	68	1,47
50	4,41	28,8	33,3	50,1	2,8	0,28	34	2,94
80	5,49	47,3	53,7	81,4	1,2	0,12	24	4,16
100	6,18	60,6	67,6	102,5	0,6	0,06	7	14,2
125	6,86	77,4	85,1	129	0,45	0,045	5	20

Рассматривая полученные результаты поверхностного и объемного разрушения зерен круга при их механической обработке (табл. 3), замечено следующее: действительная (фактическая) нагрузка на зерно в зависимости от зернистости колеблется в пределах 0,29 – 20,0 Н. При этих нагрузках не происходит объемного разрушения зерен ни электрокорунда, ни карбида кремния, ни алмаза. Начиная с зернистости 80, 100, 125, зерна электрокорунда уже подвергаются поверхностному выкрашиванию, то есть здесь наблюдается процесс самозатачивания инструмента, при этом улучшается процесс резания.

Выводы

Таким образом, инструментальные круги, изготовленные зернистостью более 100, на указанных режимах работают с самозатачиванием с непрерывным поверхностным разрушением, а из смеси зерен крупных фракций в сочетании в определенной

пропорциональности с мелкой, например, 125/50, 160/40 и др., имеют $K_{ш}$ на 20 – 25 % выше, по сравнению с кругами, изготовленными одной зернистости. Это преимущество, очевидно, реализуется за счет прочности удержания крупных зерен в «соседстве» с более мелкими, т.е. наблюдаем конгломератный эффект. Фактическое давление на зерна в этом случае уменьшается и процесс поверхностного выкрашивания снизится, таким образом, в смеси зерен инструмента просматривается управляемый процесс.

Список литературы

1. **Пушкарев, О. И.** Повышение качества микродуговых покрытий при изготовлении деталей машиностроительной техники : (статья) / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, А. И. Лопухов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2018. - № 7. - С. 17-20. - Библиогр.: с. 20 (4 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.07.pp.017-020>
2. **Пушкарев, О. И.** Мониторинг качества регенерированных электрокорундовых шлифовальных материалов в целях их рационального применения в процессах абразивной обработки : (статья) / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, А. М. Андреев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2018. - № 11 (260). - С. 3-6. - Библиогр.: с. 6 (6 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.11.pp.003-006>
3. **Пушкарев, О. И.** Моделирование доводочных процессов микрорезания материалов методами микроиндентирования : (статья) / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, С. А. Рябчун // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2018. - № 8. - С. 39-42. - Библиогр.: с. 20 (4 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.08.pp.039-042>
4. **Пушкарев, О. И.** Эффективность шлифования коррозионностойких сталей композиционными абразивными материалами : (статья) / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Н. С. Антонов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2018. - № 9 (258). - С. 3-6. - Библиогр.: с. 20 (4 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.09.pp.003-006>
5. **Shumyacher, V. M.** Chip Formation Mechanism at Metal Grinding : (Conference paper) / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin, O. G. Kulik // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] : Springer, 2019. – P. 1443-1448. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_153
6. **Kulik, O. G.** Intensification of Technical Grinding Modes by Managing Physical Processes of Chip Formation : (Conference paper) / O. G. Kulik, E. D. Illarionova // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.]: Springer, 2019. – P. 1457-1465. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630>
7. **Pushkarev, O. I.** Improved diamond tools for high-speed machining of seating holes in grinding-wheel blanks : (статья) / О. И. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 35, Is. 2. - Pp. 126-127. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X15020215>.
8. **Pushkarev, O. I.** Finishing of grinding-wheel blanks by power burnishing : (статья) / О. И. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 34, Is. 12. - Pp. 773-774. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X14120211>.

Получение композиционных бетонов на основе карбида кремния

Пушкарев О.И.^{1*}, Горин Н.И.¹, Рябчун С.А.¹

¹Профессор, Доцент, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Рассмотрен процесс производства карбида кремния, требующий значительных затрат электроэнергии, поэтому практическое применение алюмотермического восстановления кремнезема рассматривается при использовании вторичного алюминия или алюмосодержащих шлаков, получающихся при электролизе глинозема. Единовременное образование в одной системе корунда и карбида кремния обеспечивает получение композиции с мелкокристаллической структурой типа эвтектоидной. Абразивное зерно из такого материала представляет собой совокупность множества резцов из карбида кремния в матрице из корунда. Получаемые продукты были подвергнуты всестороннему анализу. Были определены микромеханические характеристики, прочность единичных зерен, разрушаемость, режущая способность зерен, а также эксплуатационные свойства зерна в шлифовальном инструменте. Инструменты из полученного материала при испытаниях показали следующее: шлифующая способность при абразивной обработке чугуна и титановых сплавов на 30 процентов выше, чем у аналогичных заводских.

Ключевые слова: композиционные материалы, карбид кремния, бетон, алюмотермический процесс, шлифовальный инструмент.

Preparation of composite concretes based on silicon carbide

Pushkarev O. I.^{1}, Gorin N.A.¹, Ryabchun S.A.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University; Volzhsky, Volgograd Region, Russian Federation

Abstract

The process of production of silicon carbide, which requires significant energy costs, is considered, therefore, the practical application of aluminothermic reduction of silica is considered when using secondary aluminum or aluminum-containing slags obtained during the electrolysis of alumina. Simultaneous formation of corundum and silicon carbide in the same system provides a composition with a small-crystal structure of the eutectoid type. An abrasive grain made of such a material is a combination of many silicon carbide cutters in a corundum matrix. The resulting products were subjected to a comprehensive analysis. Micromechanical characteristics, strength of individual grains, destructibility, cutting ability of grains, and operational properties of grain in a grinding tool were determined. The tools of their obtained material during testing showed the following: the grinding ability for abrasive processing of cast iron and titanium alloys is 30 percent higher than that of similar factory ones.

Keywords: *composite materials, silicon carbide, concrete, aluminothermic process, grinding tools.*

Введение

Научно-технический прогресс предполагает применение новых и эффективных материалов с различным комплексом свойств, а также различного их назначения.

Разработка и внедрение высокоэффективных композиционных материалов на основе полимерных связующих, надежно работающих в особых экстремальных условиях, представляет собой задачу большой важности, решение которой во многом определяет ускорение темпов научно-технического прогресса. Композиционный материал - это материал, состоящий из двух или нескольких компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, где компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей раздела между структурными составляющими, оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физико-химических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов.

В последние годы широкое применение получили высокотемпературные пористые карбидные и карбидуглеродные материалы благодаря специфическим химическим и физическим свойствам.

Основная часть

Современное производство карбида кремния требует значительных затрат электроэнергии, которые предопределяются тем, что процесс основан на эндотермической реакции восстановления кремнезема углеродом.



на осуществление которой теоретически необходимо 600 кДж, что соответствует затратам электроэнергии 4 кВт·ч на 1 кг карбида кремния.

Если в реакции (1) заменить часть углерода, необходимого для восстановления кремнезема до кремния, на алюминий, то реакция будет протекать по уравнению



с выделением тепла порядка 300 кДж на 1 кг SiC.

Восстановление кремнезема комплексным восстановителем из углерода и алюминия реализует энергетически выгодный металлотермический процесс с получением абразивного материала из карбида кремния и корунда. Известно, что протекание алюмотермического процесса возможно лишь в том случае, когда количество тепла, выделяющееся в реакции, превышает 230 кДж на 1 кг шихты, поэтому следует ожидать, что реакция (2) должна идти самопроизвольно.

Поскольку собственно получение алюминия является энергоемким процессом, практическое применение алюмотермического восстановления кремнезема может рассматриваться только при использовании вторичного алюминия или алюмосодержащих шлаков, получающихся при электролизе глинозема.

Как видно из реакции (2), в ней отсутствует выделение окиси углерода и образуется одновременно с карбидом кремния другой абразивный материал – корунд. Единовременное образование в одной системе корунда и карбида кремния должно обеспечивать получение композиции с мелкокристаллической структурой типа эвтектидной. Абразивное зерно из такого материала – совокупность множества резцов из карбида кремния в матрице из корунда. При работе зерна разрушение отдельных кристаллов – микрорезцов локализуется на границе фаз, составляющих композицию, что обеспечивает повышение прочности зерна. Такое зерно является перспективным для использования при силовом и обдирочном шлифовании, а также при изготовлении ударопрочной минералокерамики [3].

Для проведения алюмотермического процесса приготавливалась шихта из кварцевого песка, порошка алюминия и нефтяного кокса по принятому стехиометрическому соотношению. Использовался кварцевый песок Орловского

месторождения, с содержанием SiO_2 не менее 99,1 %, Fe_2O_3 не более 0,25 %. Порошок алюминиевый марки АПВ, отвечающий ТУ 48-5-152-78. Нефтяной кокс малосернистый (ГОСТ 22898-78) с содержанием активного углерода 80 – 85 %. В качестве материала для устройства нагревателя (керн) применялся возвратный керновый хорошо прографитированный материал (с производственных печей) крупностью 0 – 30 мм.

Процесс осуществляли в крупнолабораторной печи сопротивления мощностью 160 кВт. Контроль температуры в реакционной зоне печи осуществлялся пирометром с помощью специальной визуальной трубы.

Полученные продукты отделяли от слоев, подвергшихся частичному разложению, и от полупродуктов. Из отсортированного материала приготавливали пробы для испытаний.

Получаемые продукты подвергали химическому, рентгеноструктурному, микроскопическому, микрорентгеноспектральному анализам. Определяли микромеханические характеристики, прочность единичных зерен, разрушаемость, режущую способность, эксплуатационные свойства зерна в шлифинструменте.

Установлено, что во всех пробах оксид алюминия находится в виде $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а карбид кремния представлен смесью кубического $\beta\text{-SiC}$ и гексагонального SiC . Полученный композит представляет собой материал (рис. 1) с мелкозернистой двухфазной структурой (размер фаз 2 – 20 мкм; серая фаза – корунд, светлая – карбид кремния).

На рис. 2 приведен график зависимости диагонали отпечатка и зоны хрупкой повреждаемости при микроиндентировании пирамиды Виккерса в поверхность образца от нагрузки в логарифмических координатах для областей двухфазной системы карбида кремния и корунда.

Из рис. 2 видно, что мелкодисперсная двухфазная структура по диагонали отпечатка индентора (микротвердости) близка к карбиду кремния и корунду, а по зоне хрупкой повреждаемости (микропрочности) значительно отличается от них (за исключением отдельных участков поверхности) в сторону большей трещиностойкости. Поскольку характер этих зависимостей при всех нагрузках одинаковый, то сопоставление исследуемых образцов материала целесообразно производить при одной и той же нагрузке, например, 10 Н (табл. 1).

Эта двухфазная структура имеет большую пластичность и гасит трещины при их движении. Например, на некоторых образцах трещин в районе отпечатка индентора не образуется даже при нагрузке 10 Н. В то время как на большинстве высокотвердых материалов, в том числе и на алмазе, они появляются при нагрузках 0,20 – 0,40 Н. Более крупнозернистые двухфазные системы SiC и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ по сравнению с мелкозернистыми имели более низкую трещиностойкость.

Таблица 1. Сравнительные микромеханические показатели исследованных образцов продукта

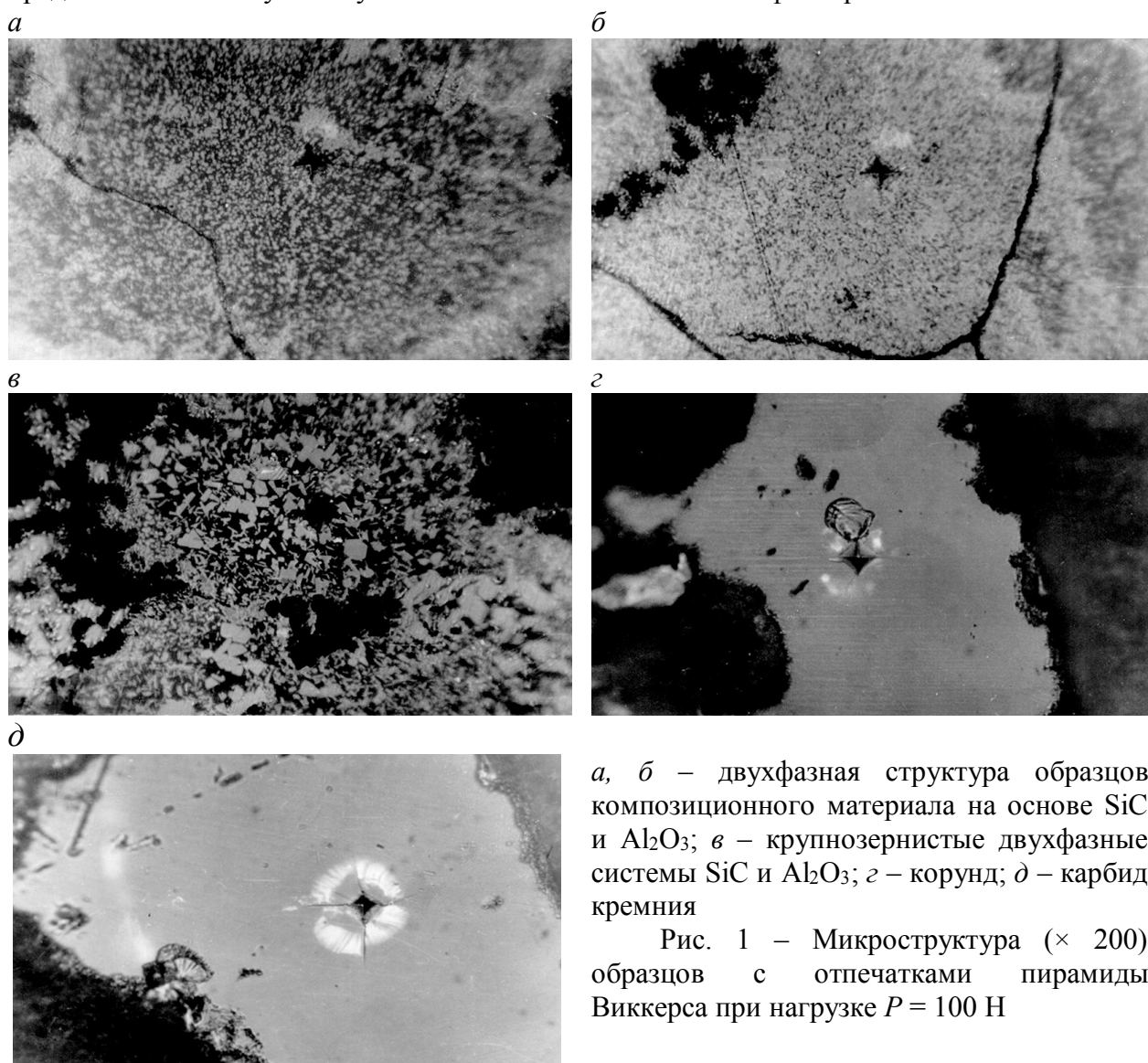
Характеристика образцов	Вид фазового состава	Микротвердость, H , ГПа	Микропрочность, σ , ГПа
SiC	-	31,0	2,3
Al_2O_3	-	22,000	2,0
Исследованные образцы	Двухфазная структура	23,0-32,0	4,5-5,9
	Светлая фаза	30,0	2,1
	Темная фаза	20,0	1,7

Физико-механические характеристики продуктов плавок, выполненных с разным содержанием алюминия в шихте, исследовали также по пробам узких фракций, полученных рассевом измельченных продуктов.

Табл. 2. Сравнительные микромеханические и эксплуатационные характеристики проб шлифматериалов, полученных из шихты с содержанием алюминия 33, 26, 18 процентов

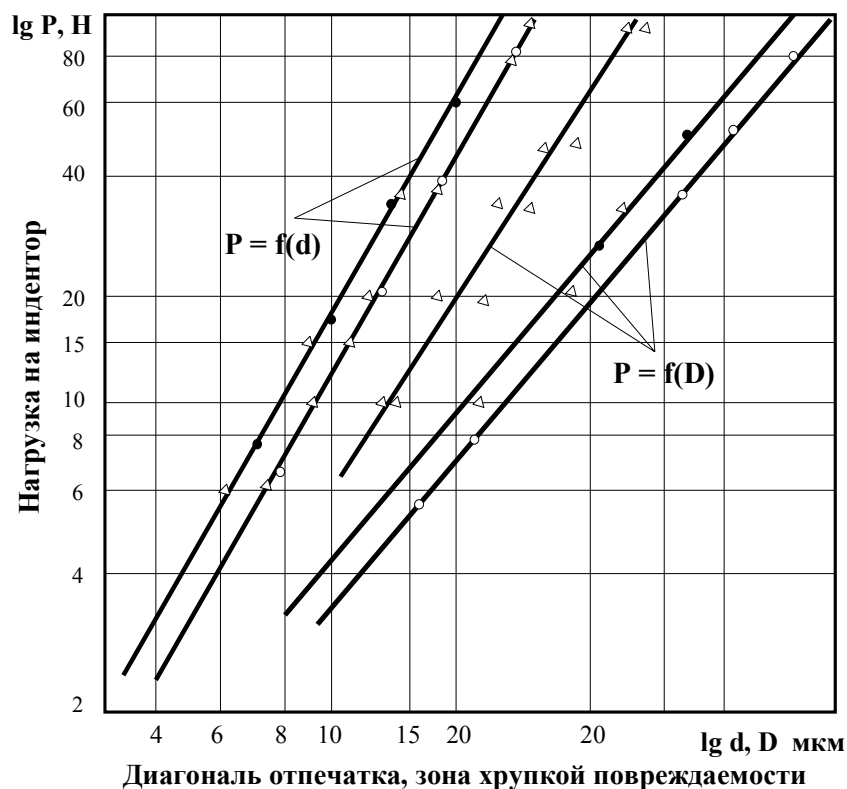
Содержание в шихте алюминия, %	Микротвердость, H_v , ГПа	Микропрочность σ , ГПа	Разрушаемость (хрупкость), %	Прочность единичных зерен, Н	Относительная режущая способность
33	23,0-27,0	2,3-4,8	31,5	48,0	1,6
26	20,5-22,5	2,9-3,3	34,0	42,0	1,3
18	22,4-29,0	2,0-3,3	39,0	40,0	1,0

Из таблицы 2 видно, что большему содержанию алюминия в исследованных пределах соответствует получение более качественного шлифматериала.



a, б – двухфазная структура образцов композиционного материала на основе SiC и Al_2O_3 ; *в* – крупнозернистые двухфазные системы SiC и Al_2O_3 ; *г* – корунд; *д* – карбид кремния

Рис. 1 – Микроструктура ($\times 200$) образцов с отпечатками пирамиды Вickers при нагрузке $P = 100$ Н



● – SiC; ○ – Al₂O₃; Δ – двухфазная структура образцов композиционного материала на основе SiC, α – Al₂O₃

Рис. 2. Зависимость диагонали отпечатка и зоны хрупкой повреждаемости от нагрузки на индентор

Заключение

Испытания шлифовальных кругов, изготовленных из полученных композиционных материалов, показали, что их шлифующая способность при абразивной обработке чугуна и титановых сплавов на 30 процентов выше, чем у аналогичных из карбида кремния и электрокорунда.

Список литературы

1. Г.Г. Гнесин Карбидокремниевые материалы./ Гнесин Г.Г. М.: Metallurgy, 1977.-216 с.
2. С.М. Кац Высокотемпературные теплоизоляционные материалы./ Кац С.М. -М.: Metallurgy, 1981. 258 с.
3. Н.Н. Францевич Карбид кремния, свойства области применения/ Францевич Н.Н., Гнесин Г.Г., Зубкова СМ.. Киев: Наукова Думка, 1976, С.80.
4. А.А. Рейхардт Теплозащитные материалы на основе нитевидных кристаллов карбида кремния. /Рейхардт А.А. Труды ЕЛО ГИПХ, № 104, с 67.
5. Патент 1286038, 1996 (Великобритания).
6. С.А. Суворов Физико-химические исследования и свойства интегрированных высокотемпературных теплоизоляционных материалов. / Суворов С.А., Скурихин В.В. Новые огнеупоры. - 2004. - № 2. - с. 18-24.

Характеристики прочности и трещиностойкости режущих зёрен при алмазно-абразивной обработке материалов

Пушкарев О. И.^{1*}, Кулик О.Г.¹, Башкирцева И.В.¹

¹Профессор, Доцент, Доцент, Волжский политехнический институт (филиал)
«Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волжский, Волгоградская обл., Россия

Аннотация

Для технологического контроля качества алмазно-абразивных зерен, которые представляют собой частицы достаточно малых размеров, не применимы классические методы механики материалов. В данном случае целесообразно использовать микромеханические методы испытаний. В статье рассмотрен процесс упругопластического деформирования при микровдавливании алмазной пирамиды. Отражена зависимость прочностных характеристик материалов от размера концентратора напряжений. Результаты проведенных исследований указывают на глубокую связь процессов упругопластического деформирования и хрупкого разрушения при микроиндентировании высокотвердых хрупких материалов, изучены силовые и энергетические условия зарождения, медленного докритического подрастания и последующего устойчивого роста трещин в районе локального концентратора напряжений – отпечатка алмазного наконечника для широкого круга различных материалов.

Ключевые слова: алмазно-абразивные зёрна, микроиндентирование, упругопластическое деформирование, хрупкое разрушение, высокотвёрдые хрупкие материалы.

Characteristics of strength and crack resistance of cutting grains during diamond-abrasive processing of materials

Pushkarev O.I.^{1}, Kulik O.G.¹, Bashkirtseva I.V.¹*

¹Professor, Assistant Professor, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhskiy, Volgograd region, Russia

Abstract

For technological quality control of diamond-abrasive grains, which are particles of sufficiently small sizes, classical methods of material mechanics are not applicable. In this case, it is advisable to use micromechanical testing methods. The article considers the process of elastic-plastic deformation during micro-compression of a diamond pyramid. The dependence of the strength characteristics of materials on the size of the stress concentrator is reflected. The results of the research indicate a deep connection between elastic-plastic deformation and brittle fracture processes during micro-indentation of high-hard brittle materials. The force and energy conditions of origin, slow subcritical growth and subsequent steady growth of cracks in the area of the local stress concentrator – the diamond tip imprint for a wide range of different materials have been studied.

Key words: *diamond-abrasive grains, micro-indenting, elastic-plastic deformation, brittle fracture, high-hardness brittle materials.*

Введение

В процессах шлифования и доводки алмазно-абразивные зерна испытывают механические и тепловые нагрузки. Установлено [1], что для каждого материала существует допустимый перепад температур, не вызывающий растрескивание от термических напряжений. В процессе многократного взаимодействия зерна с тепловым полем в его микрообъемах накапливаются растягивающие напряжения.

1. Теоретическая часть

Способность изделия из керамики, к которым относятся абразивы, к сопротивлению разрушению под воздействием внутренних (термоупругих) напряжений, возникающих при быстрой смене температур, оценивается той или иной величиной термостойкости. Термоупругие напряжения могут также возникать и при химических, полиморфных превращениях, а также вследствие анизотропии коэффициента термического расширения. Напряжения, возникающие под действием разности температур в изделии, называют напряжениями первого рода; эти напряжения в подавляющем большинстве случаев и определяют термостойкость.

Критическая разность температур ΔT_k , то есть разность между максимальной и минимальной температурами в материале, при которой наступает его разрушение, определяется по формуле:

$$T_{\max} - T_{\min} = \Delta T_k = 3(1-\nu)B \frac{\sigma}{E\alpha}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; B – параметр, зависящий от теплового сопротивления керамического изделия; α – термический коэффициент линейного расширения.

Критерий ΔT_k получен из условия равенства разрушающего напряжения σ (прочности при растяжении) термоупругим напряжениям, возникающим вследствие разности упругих деформаций (линейного расширения) α при максимальной T_{\max} и минимальной T_{\min} температуре в изделии.

Устойчивость материала к зарождению трещин под влиянием термоупругих напряжений оценивают критерием:

$$R = (1-\nu) \frac{\sigma}{E\alpha}. \quad (2)$$

Он представляет собой отношение прочности материала изделия к величине термоупругих напряжений при разности температур ΔT_k в изделии, если предположить, что с увеличением температуропроводности α увеличивается.

2. Практическая часть

Для технологического контроля качества алмазно-абразивных зёрен, которые представляют собой частицы достаточно малых размеров, не применимы классические методы механики материалов. В данном случае целесообразно использовать микромеханические методы испытаний.

Для большинства керамических материалов коэффициент Пуассона находится в пределах $0,3 \pm 0,02$. Показатели α известны, а прочности в микрообъемах абразива (микропрочности) σ и модуля Юнга E можно определить методом микровдавливания [2].

При микроиндентировании алмазно-абразивных материалов осуществляются взаимосвязанные процессы упругопластического деформирования материала – образование отпечатка размером d (диагональ отпечатка) и хрупкого разрушения отдельных его микрообъемов – образование в районе этого отпечатка зоны D хрупкой повреждаемости, включающей всевозможные нарушения сплошности (трещины, сколы) (рис.1). Размеры этой зоны определяются хрупкими и прочностными свойствами испытуемого материала, а также условиями испытания (нагрузка P на индентор, угол вдавливания α , геометрия индентора, рис. 2).

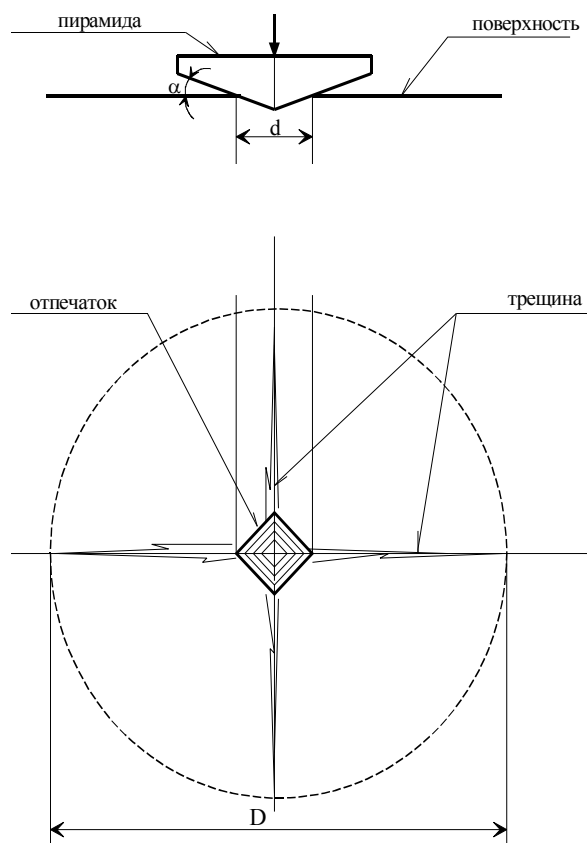


Рис. 1. Схема вдавливания пирамидального индентора в испытуемую поверхность шлифа абразивного зерна: d – диагональ отпечатка; D – длина трещины; α – угол вдавливания

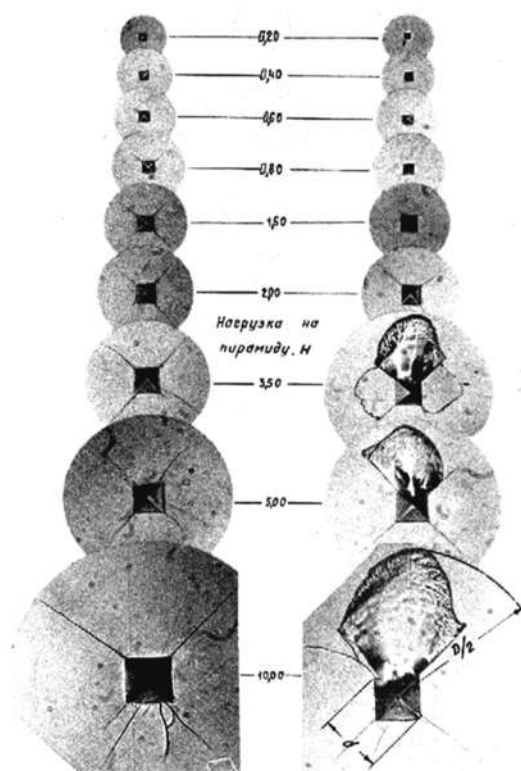


Рис. 2. Вид ($\times 400$) отпечатков пирамиды Виккерса и зоны хрупкой повреждаемости материала в районе этих отпечатков на монокристаллах карбида кремния при возрастании нагрузки от 0,2 до 10Н

Процесс микроиндентирования высокотвердых и хрупких материалов не может быть достаточно полно описан с помощью общеизвестного закона вдавливания $P = f(d)$, как это обычно делается для пластических материалов, так как при этом игнорируется хрупкое разрушение материала в районе отпечатка. Поэтому необходимо одновременно исследовать процесс роста трещин с увеличением нагрузки на индентор $P = f(D)$.

Процесс упругопластического деформирования при микровдавливании алмазной пирамиды описывается формулой:

$$P = a_d \cdot d^{n_d} = P_{\text{зар}} \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{зар}}} \right)^{n_d}, \quad (3)$$

где a_d – размерная прочностная постоянная формулы; n_d – безразмерная постоянная формулы, характеризующая интенсивность упругопластического деформирования материала при микроиндентировании. Постоянная n_d не зависит ни от условий опыта, ни от прочностных свойств индентируемого материала; для всех исследованных материалов она практически одинакова ($n_d = 1,8 - 2,0$).

Процесс хрупкого разрушения четко разделяется на две стадии (рис. 3).

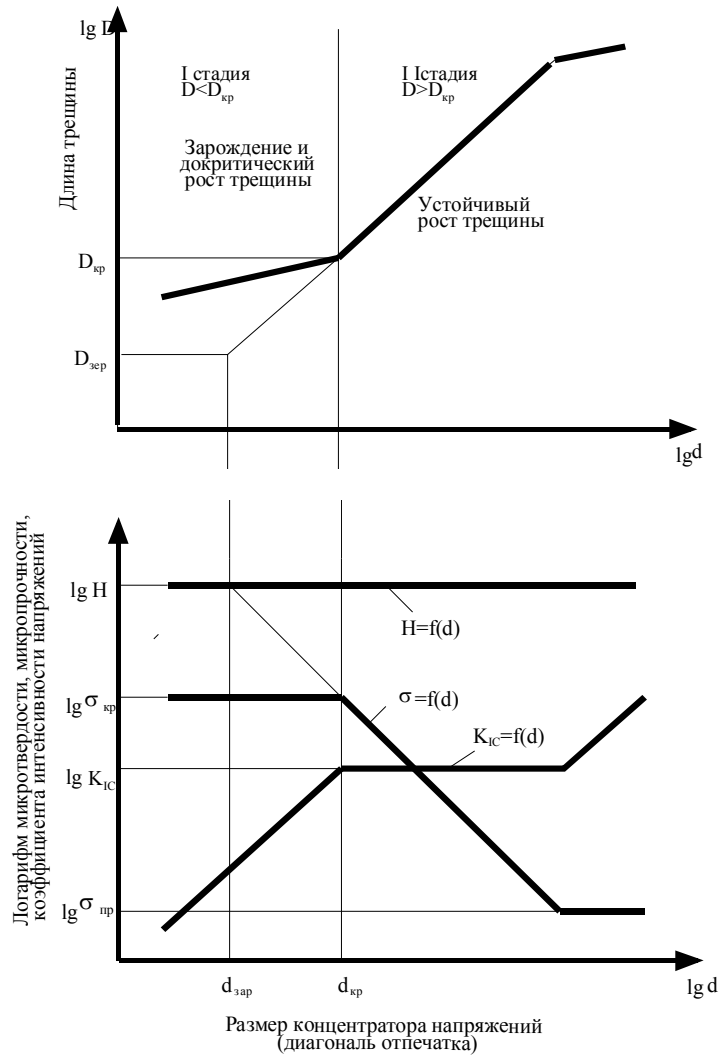


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик материалов от размера концентратора напряжений (диагонали отпечатка)

На 1-ой стадии ($P < P_{кр}$) происходит зарождение и медленное подрастание трещины до критического размера $D_{кр}$, которое описывается формулой:

$$P = P_{кр} \cdot \left(\frac{D}{D_{кр}} \right)^{n_d} = P_{кр} \cdot \left(\frac{d}{d_{кр}} \right)^{n_d}, \quad (4)$$

где $P_{кр}, D_{кр}, d_{кр}$ – критическая нагрузка на индентор и критические размеры трещины и отпечатка соответственно, причем $D_{кр} = K \cdot d_{кр}, 1 < K < 3$.

Безразмерный коэффициент K характеризует степень дефектности материала с точки зрения наличия в нем «врожденных» трещин. При $K=1, D_{кр} = d_{зар}$ первая стадия вырождается.

На II стадии ($P > P_{кр}$) происходит устойчивый рост трещин, который описывается формулой:

$$P = P_{зар} \cdot \left(\frac{D}{d_{зар}} \right)^{n_D} = P_{кр} \cdot \left(\frac{D}{D_{кр}} \right)^{n_D}, \quad (5)$$

где $P_{зар}$, $d_{зар}$ – критическая нагрузка на индентор и размер отпечатка, соответствующие зарождению трещины для совершенно «бездефектного» материала ($K = 1$); n_d – безразмерная постоянная, характеризующая интенсивность трещинообразования с ростом нагрузки на индентор. Постоянная n_D так же, как и n_d , не зависит ни от условий опыта, ни от прочностных свойств индентируемого материала: для всех исследованных материалов n_D практически одинакова ($n_D = 1,29 - 1,34$).

$$n_D = \frac{2n_d}{n_d + 1}. \quad (6)$$

Длина трещин связана с размером отпечатка формулами:

$$D = d_{зар}^{\frac{1-n_d}{2}} \cdot d^{\frac{n_d+1}{2}} = D_{кр} \cdot \left(\frac{d}{d_{кр}} \right)^{\frac{n_d+1}{2}}, \quad (7)$$

$$D_{кр} = d_{зар} \cdot \kappa^{(n_d-1)(n_d+1)}; \quad d_{кр} = d_{зар} \cdot \kappa^{\frac{2}{n_d-1}}, \quad (8)$$

$$\text{при } n_d = 2, \quad D_{кр} = d_{зар} \cdot \kappa^3; \quad d_{кр} = d_{зар} \cdot \kappa^2. \quad (9)$$

Результаты проведенных исследований указывают на глубокую связь процессов упругопластического деформирования и хрупкого разрушения при микроиндентировании высокотвердых хрупких материалов.

С учетом вышеизложенного изучены силовые и энергетические условия зарождения, медленного докритического подрастания и последующего устойчивого роста трещин в районе локального концентратора напряжений – отпечатка алмазного наконечника для широкого круга различных материалов. Это дает возможность определять методом микроиндентирования основные характеристики их трещиностойкости: критическую длину трещины $D_{кр}$ и критическое напряжение по Гриффитсу $\sigma_{кр}$, удельную работу разрушения G , коэффициент интенсивности напряжения K_{IC} и изучать закономерности изменения этих характеристик в зависимости от условий испытаний (нагрузка на индентор, размер концентратора напряжений, форма индентора, угол вдавливания).

Установлены следующие силовые и энергетические условия упругопластического деформирования и хрупкого разрушения при микроиндентировании высокотвердых и хрупких материалов.

Микротвердость определяется по формуле:

$$H = 1,37 \cdot \psi \cdot E = \varepsilon \cdot E, \quad (10)$$

где E – модуль Юнга; ψ – относительное упругое уменьшение площади отпечатка после снятия нагрузки P на пирамиду; ε – относительная упругая деформация в направлении действия P ; $\psi = 0,1(1 - \cos \alpha)$, где α – угол вдавливания.

При полном восстановлении отпечатка, то есть для идеально упругого тела $\psi = \psi_{max} = 0,073$ (рис. 4, рис. 5).

$$H = H_{max} = H_{теор} = 0,1E. \quad (11)$$

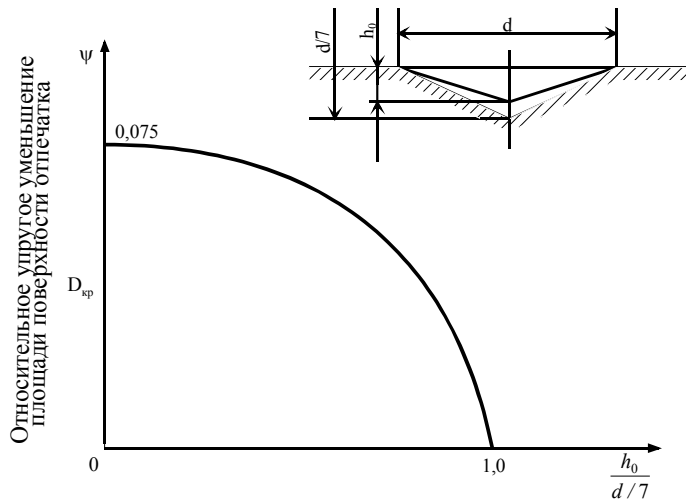


Рис. 4. Упругие свойства материалов при микро-вдавливании (h_0 – глубина внедрения после снятия нагрузки)

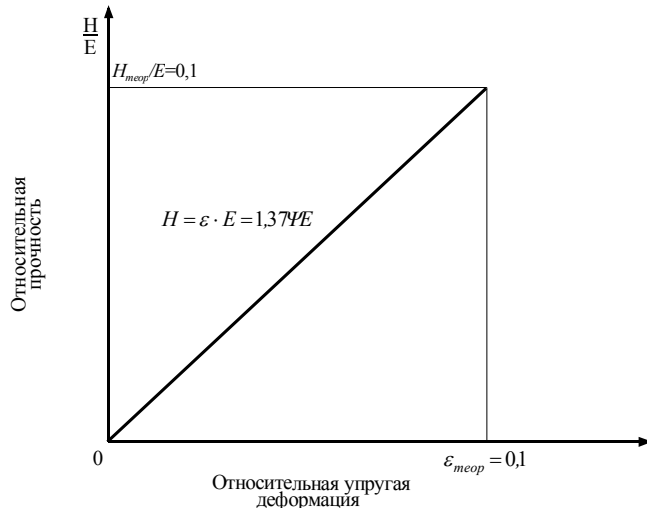


Рис. 5. Зависимость относительной прочности материалов от относительной деформации их поверхностных слоев

Поскольку в плоскости индентирования возникают растягивающие напряжения (решение уравнения Герца), которые уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния от линии действия силы P (решение уравнения Буссинеска), микропрочность с точностью до постоянного коэффициента равна:

$$\sigma = \frac{2P}{D^2} = \frac{H_{\text{зар}} \cdot d_{\text{зар}}}{d} \quad (12)$$

При $d = d_{\text{кр}}$, $\sigma = \sigma_{\text{кр}} = \frac{H_{\text{зар}} \cdot d_{\text{зар}}}{d}$,

при $d = d_{\text{кр max}}$ $\sigma = \sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{пр}}$,

где $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности для массивного образца.

$$d \leq d_{\text{зар}}$$

При $\sigma = \sigma_{\text{max}} = H_{\text{зар}} = 1,37\psi$,

для идеально упругого тела:

$$\sigma = \sigma_{\text{теор}} = H_{\text{теор}} = 0,1E.$$

Удельная работа хрупкого разрушения (II стадия):

$$G = \frac{A}{2S} = \frac{A}{mD^2} = \frac{P_{\text{зар}}}{20md_{\text{зар}}} = \frac{1\sigma \cdot d}{4 \cdot 10m} = \frac{1}{4} H_{\text{зар}} \frac{d_{\text{зар}}}{10m} \quad (13)$$

$$= \frac{a_d}{19,7} \left(\frac{a_D}{a_d} \right)^{1,55} = \text{const},$$

где A – работа упругопластического деформирования материала при вдавлении пирамиды; $2S$ – суммарная поверхность трещин; m – обобщенный коэффициент формы поверхности разрушения; $d_{\text{зар}}$ – диагональ отпечатка индентора, при которой происходит раскрытие трещин. Для идеально упругого тела: $H = H_{\text{теор}}$, $d_{\text{зар}} = 2B$.

Для идеально упругого тела: $H = H_{\text{теор}}$, $d_{\text{зар}} = 2B$.

$$G = \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{10} \cdot 2B = \frac{E \cdot B}{20} = S, \quad (14)$$

где B – расстояние между атомами; S – свободная поверхностная энергия.

Коэффициент интенсивности напряжения определяется по формуле:

$$K_{IC} = \sqrt{E \cdot G} = \sqrt{\frac{E \cdot a_d}{19,7} \left(\frac{a_D}{a_d} \right)^{1,55}} \quad (15)$$

На I стадии процесса разрушения G и K_{IC} прямо пропорциональны размеру d концентратора напряжений, то есть диагонали отпечатка, следовательно, широко используемый в механике и микромеханике материалов коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} может быть корректным только при определении его в условиях устойчивого роста трещин на II стадии хрупкого разрушения индентруемого материала.

В табл. 1 приведены основные полученные характеристики прочности и трещиностойкости ряда абразивных материалов, применяемых в промышленности и научных организациях.

Табл. 1. Поверхностная прочность и трещиностойкость абразивных материалов

Наименование характеристик / Материал	Микротвердость, ГПа	Микро-прочность, ГПа	Критическая длина трещины, мкм	Модуль Юнга, ГПа	Критический коэффициент интенсивности напряжений, $Mn \cdot m^{0,5}$
Карбиды					
B_4C	34	3,8	10	680	9,5
SiC	30	3,0	8	400	6,5
TiC	30	2,0	7	580	6,4
ZnC	27	2,1	8	310	4,8
HfC	21	2,5	30	320	5,7
VC	27	3,1	14	380	6,5
NbC	15	4,8	50	270	6,7
TaC	17	5,8	23	540	10,5
Cr_3C_2	23	7,8	30	480	11,5
Mo_2C	19	2,2	20	380	5,4
WC	23	4,7	35	810	11,5
Бориды					
TiB_2	32	1,6	7	460	5,1
ZnB_2	17	2,3	14	660	7,4
HfB_2	27	1,5	7	580	5,5
NbB_2	21	0,9	8	270	2,9
TaB_2	25	1,2	7	240	3,1
CrB_2	20	2,2	17	430	5,7
W_2B_2	28	1,6	7	460	5,0

Выводы

Проведенные исследования показали, что изученные нами характеристики являются структурно чувствительными к технологическим параметрам получения материалов и коррелируют с их износостойкостью при алмазно-абразивной обработке в лабораторных и эксплуатационных условиях [3].

Список литературы

1. Башкирцева И.В., Орлов И.Ю. Изменение микротвёрдости металла в зависимости от смачивающей способности смазочно-охлаждающей жидкости // сб. мат. междунар. науч.-техн. конф. ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Волжский, 2019.
2. Душко О.В., Шумячер В.М., Башкирцева И.В. Динамика контактного взаимодействия инструмента и детали при абразивном диспергировании // В сборнике: Абразивное производство сборник научных трудов. под редакцией Б.А. Чаплыгина. Челябинск, 2005.
3. Пушкарев О. И., Шумячер В. М. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов: монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2004. 144 с.

4. **Пушкарев О.И.**, Башкирцева И.В., Бражников Д.Б. Совершенствование качества алмазного инструмента для скоростной обработки посадочных отверстий заготовок шлифовальных кругов, СТИН. 2014. № 8.
5. **Пушкарев О.И.**, Башкирцева И.В., Бражников Д.Б. Финишная обработка заготовок шлифовальных кругов методом силовой обкатки, СТИН. 2014. № 5.
6. **Пушкарев О.И.**, Башкирцева И.В., Бражников Д.Б. Эффективные процессы охлаждения инструмента из сверхтвёрдых материалов при финишной обработке заготовок шлифовальных кругов, СТИН. 2014. № 3.
7. **Шумячер В.М.**, Башкирцева И.В. Рациональное применение смазочно-охлаждающей жидкости в процессах суперфиниширования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2014.
8. **Шумячер В.М.**, Душко О.В., Башкирцева И.В. Метод оценки эффективности процессов финишной абразивной обработки материалов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. Волжский, 2006.
9. **Пушкарев, О. И.** Контроль качества шлифовальных материалов по прочностным характеристикам их зёрен: (статья) / О. И. Пушкарев, В.А. Назаренко, А.В. Гончарова // СТИН. -2009. -№ 7. -С. 26 -29.
10. Пушкарев О. И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов : Монография / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер // ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – 144 с.
11. **Пушкарев, О. И.** Мониторинг физико-механических и эксплуатационных характеристик шлифматериалов [Текст] / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер // СТИН. - 2006. - **№ 10**. - С. . 24-27. - Библиогр.: с. 27
12. Пушкарев О. И., Шумячер В. М. Разработка комплексной технологической системы контроля качества шлифовальных материалов по физико-механическим характеристикам : сб. статей между. науч.-техн. конф. «Менеджмент качества продукции и услуг». Брянск : Брянский государственный технический университет, 2007. С. 107 – 108.
13. **Pushkarev, O. I.** Improved diamond tools for high-speed machining of seating holes in grinding-wheel blanks : (статья) / O. I. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 35, Is. 2. - Pp. 126-127. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X15020215>.
14. **Pushkarev, O. I.** Finishing of grinding-wheel blanks by power burnishing : (статья) / O. I. Pushkarev, I. V. Bashkirtseva, D. B. Brazhnikov // Russian Engineering Research. - 2015. - Vol. 34, Is. 12. - Pp. 773-774. - <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X14120211>.

Электронное научное издание

Под общей редакцией

Вячеслава Михайловича **Шумячера**

Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы
Шлифабразив-2019

сборник статей XVII Международной научно-технической конференции

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан тезисов докладов научных конференций 2019 г. Поз. № 5В.

Подписано к использованию 28.01.2020. Формат 60×84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 11,31.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.