

*На правах рукописи*



Ардашев Дмитрий Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ  
В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ  
НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Специальности:

05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки  
05.02.08 –Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре технологии автоматизированного машиностроения в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный консультант:** **Гузеев Виктор Иванович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Волков Дмитрий Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный  
авиационный технический университет  
им. П.А. Соловьева», заведующий кафедрой  
«Мехатронные системы и процессы  
формообразования им. С.С. Силина»

**Носенко Владимир Андреевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Волжский политехнический институт  
(филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный технический университет»,  
заведующий кафедрой «Технология  
и оборудование машиностроительных  
производств»

**Козлов Александр Михайлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет», заведующий  
кафедрой «Технология машиностроения»

**Ведущая организация** – ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), г. Пермь.

Защита состоится «27» апреля 2018 г., в 14-00, на заседании объединенного диссертационного совета Д999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3, первый учебный корпус, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета:

<http://www.ulstu.ru/main/view/article/20175>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Веткасов Николай Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Задача проектирования операций шлифования – выбора характеристики шлифовального круга (ШК) и режимов обработки – задача тривиальная и вполне успешно решаемая, в том числе, при помощи справочников общемашиностроительных нормативов (ОМН), которые основаны на передовом опыте различных машиностроительных предприятий страны. Такие справочники для производства партии деталей, изготовленных из определенного материала, со своими требованиями по точности, шероховатости, неприжоговости и др. предписывают использовать ШК конкретной характеристики. В связи с этим успешное применение подобных справочников возможно в условиях крупносерийного и массового производства, когда размеры партий выпускаемых деталей велики, и выгодно для каждой партии обрабатываемых заготовок приобретать ШК различных характеристик.

Для современного машиностроения характерна многономенклатурность – выпуск малых партий изделий, изготовленных из различных материалов, с разными требованиями к качеству. В таких условиях на первый план выходит задача сокращения времени на технологическую подготовку производства, а также задача максимального использования ресурсов оборудования и инструмента.

Применение в многономенклатурном производстве методов и подходов к проектированию операций шлифования, описанных в справочниках ОМН, приводит зачастую к тому, что время изготовления партии деталей становится сопоставимым со временем на наладку станка, связанную с заменой ШК для обработки партии заготовок, вновь поступающих на станок. При этом общий ресурс ШК, установленного на станок, используется всего на 5...7 %, и неизвестно, будет ли данный ШК использоваться в дальнейшем, поскольку в соответствии с рекомендациями ОМН он был приобретен для производства конкретной партии деталей. В результате, применение методики, описанной в справочниках ОМН, в современных условиях многономенклатурного производства приводит к длительным простоям оборудования, дополнительным затратам, связанным с организацией хранения ШК, а в итоге к существенному снижению эффективности операций шлифования.

В связи с этим, в настоящее время на машиностроительных предприятиях довольно часто ШК одной характеристики, установленным на станке, изготавливают партии деталей, которые отличаются как основным материалом, так и требованиями по точности, шероховатости и др. При этом проектирование операций шлифования ведется интуитивно, на основе субъективного опыта рабочего-шлифовщика. Следовательно, работоспособность ШК не ограничивается условиями, описанными в справочниках ОМН: ШК конкретной характеристики обладает определенным ресурсом работоспособности и может использоваться для изготовления различных деталей с разным уровнем производительности процесса в зависимости от режимов и условий реализации операции шлифования.

В результате в технологии машиностроения существует острое противоречие, обусловленное современными условиями многономенклатурного машиностроения. Оно заключается в недостатках существующих методик проектирования операций шлифования, с одной стороны, и достаточно широкой областью возможной эксплуатации ШК, что подтверждается производственным опытом шлифования, – с другой.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная научная проблема, решение которой имеет важное хозяйственное значение. Она заключается в отсутствии методики проектирования операций шлифования для условий современного многономенклатурного производства. Решение этой проблемы возможно на основе созда-

ния новой методики проектирования операций шлифования, которая основана на прогнозировании работоспособности абразивного инструмента и определении условий его эффективной эксплуатации в конкретных технологических условиях.

**Степень разработанности темы.** Существующие работы, направленные на повышение эффективности операций шлифования, можно разделить на три группы:

- работы, посвященные эмпирическому получению сведений о работоспособности абразивных инструментов в виде отдельных показателей;
- работы, посвященные комплексной оценке работоспособности инструментов по результатам стендовых испытаний;
- работы, позволяющие проектировать эффективные операции шлифования для конкретных технологических условий.

Общим существенным недостатком указанных выше работ является то, что они не позволяют проектировать эффективные операции шлифования для широкого диапазона технологических условий, а ограничены рамками проведенных стендовых испытаний либо условиями применимости разработанных моделей процесса.

*Данная работа выполнялась в рамках:*

– заданий Министерства образования и науки РФ:

- № 7.4079.2011 «Теория механического и физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала в процессах абразивной обработки» (2012–2013 гг.);
- № 9.5589.2017/8.9 «Суперкомпьютерный инжиниринг технологических процессов обработки высокоточных изделий машиностроения» (2017–по наст. время).
  - грантов Губернатора Челябинской области;
  - программы воспроизводства кадрового потенциала ЮУрГУ (НИУ).

**Цель работы.** Повышение эффективности операций шлифования в многономенклатурном производстве на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработана методика континуального проектирования операций шлифования, позволяющая повысить их эффективность за счет учета работоспособности ШК в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

2. Разработана математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, впервые связывающая ее величину с параметрами эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования).

3. Создана методика прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, впервые позволяющая за счет учета текущей величины размера площадки затупления единичного абразивного зерна прогнозировать работоспособность инструмента для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

4. Разработана методика определения периода стойкости ШК, позволяющая определять режимно-временную область его рациональной эксплуатации на основе спрогнозированной работоспособности.

5. Разработан комплекс инженерных методик континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, позволяющий повысить их эффективность за счет учета работоспособности инструмен-

та в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

6. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение контура технологической подготовки, осуществляющего автоматизированное проектирование операций шлифования на основе разработанной методики континуального проектирования операций шлифования.

7. Выполнена практическая реализация, опытно-промышленная апробация и внедрение результатов работы.

### ***Научная новизна работы.***

1. Разработана методика континуального проектирования операций шлифования, реализуемая на основе учета работоспособности ШК, впервые позволяющая проектировать эффективные операции шлифования в многономенклатурном производстве для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы), с учетом требований к качеству обработки (по точности, шероховатости, бесприжоговости) с минимальными затратами времени на обработку.

2. Разработана математическая модель долговечности абразивного зерна при шлифовании, реализованная на основе кинетической теории прочности твердых тел, впервые устанавливающая взаимосвязь между технологическими условиями эксплуатации ШК и механическим износом единичного абразивного зерна.

3. Установлено влияние химического состава материала обрабатываемой заготовки на величину физико-химического износа единичного абразивного зерна посредством коэффициента сродства, определяющего интенсивность физико-химического взаимодействия между абразивным и обрабатываемым материалом, предложены эмпирические модели для его прогнозирования в зависимости от концентрации элементов, входящих в состав материала обрабатываемой заготовки.

4. Разработана математическая модель величины износа абразивного зерна, учитывающая время его работы, технологические условия его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования), а также основные механизмы его износа при шлифовании – механический и физико-химический.

5. Разработана математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, учитывающая время работы инструмента, позволяющая определять ее величину для широкого диапазона параметров эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования) и прогнозировать величину износа зерна с учетом основных его механизмов – механического и физико-химического.

6. Разработана методика прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, включающая систему имитационных стохастических моделей, учитывающих изменчивость величины площадки затупления единичного абразивного зерна во времени, что позволяет прогнозировать работоспособность ШК в широком диапазоне параметров эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования) с учетом времени работы инструмента.

7. Разработана методика определения периода стойкости ШК, реализуемая на основе определения режимно-временной области рациональной эксплуатации ШК, что позволяет определить величину времени эффективной работы инстру-

мента исходя из его работоспособности и требований к качеству обработки (точность, шероховатость, неприжоговость).

***Положения, выносимые на защиту.***

1. Понятие «континуальное проектирование», подразумевающее проектирование операций шлифования с учетом работоспособности ШК в широком диапазоне параметров его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования) и во взаимосвязи со временем его эксплуатации.

2. Методика континуального проектирования операций шлифования, учитывающая работоспособность ШК и позволяющая проектировать эффективные операции шлифования в многономенклатурном производстве для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

3. Математическая модель величины износа абразивного зерна, учитывающая время его работы, технологические условия эксплуатации инструмента (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования), а также основные механизмы износа абразивного зерна при шлифовании – механический и физико-химический.

4. Математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, позволяющая определить ее величину для широкого диапазона технологических условий эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования), с учетом времени работы инструмента.

5. Математическая модель долговечности абразивного зерна при шлифовании, связывающая технологические условия эксплуатации ШК и механический износ единичного абразивного зерна инструмента.

6. Имитационная твердотельная модель взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью, позволяющая определить величину напряжений, действующих в теле абразивного зерна.

7. Методика определения коэффициента химического сродства абразивного и обрабатываемого материала, позволяющая установить влияние химического состава материала обрабатываемой заготовки и температуры на интенсивность физико-химического взаимодействия между материалами при шлифовании.

8. Эмпирические регрессионные модели коэффициента сродства, позволяющие расчетным способом определить его величину в зависимости от концентрации легирующих элементов, входящих в состав материала обрабатываемой заготовки.

9. Методика прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, реализуемая при помощи системы моделей эксплуатационных показателей ШК за счет учета временной изменчивости величины площадки затупления единичного абразивного зерна.

10. Методика определения периода стойкости ШК, позволяющая определить режимно-временную область рациональной эксплуатации ШК для различных технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования по точности, шероховатости, неприжоговости).

11. Комплекс инженерных методик проектирования эффективных операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, реализованный на основе разработанной методики континуального проектирования.

### ***Практическая значимость работы.***

1. Разработан комплекс инженерных методик континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства на основе прогнозирования работоспособности ШК.

2. Разработаны справочные рекомендации по выбору характеристики абразивного инструмента в части назначения марки материала абразивного зерна ШК для различных технологических условий операции шлифования (разные марки обрабатываемого материала).

3. Разработаны справочные рекомендации по определению периода стойкости ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в разных технологических условиях в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

4. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение модуля технологической подготовки производства «Т&TooL», реализующего методику континуального проектирования операций шлифования.

***Методология и методы исследования.*** Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, кинетической теории прочности твердых тел, корректным использованием методов математического и численного моделирования, в частности с применением программного комплекса «Ansys», корректным использованием методов планирования и обработки результатов экспериментов.

***Достоверность результатов работы.*** Достоверность основных положений работы, выводов и рекомендаций подтверждена сравнением данных, полученных по разработанным методикам и моделям расчетным путем, с результатами прямых экспериментов, выполненных с применением аттестованного измерительного оборудования, а также сопоставлением с производственными данными.

### ***Внедрение результатов работы.***

1. Результаты работы, оформленные в виде рекомендаций по назначению марки абразивного материала для проектирования операций шлифования, включены в справочник (издания 2007 и 2012 гг.). Справочник прошел промышленную апробацию и внедрен в технологических службах 99 предприятий РФ, включая предприятия машиностроения, автомобилестроения, аэрокосмической отрасли, а также принят к использованию в учебном процессе в 16 учреждениях высшего и 8 учреждениях среднего профессионального образования.

2. Результаты работы оформлены в виде РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов», который прошел промышленную апробацию и внедрен на машиностроительных предприятиях РФ, а также на предприятиях, занимающихся производством и реализацией абразивной продукции в качестве методического и нормативно-технологического сопровождения.

***Апробация работы.*** Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях (г. Челябинск – 2004...2017 гг.), международных, всероссийских конференциях и семинарах (г. Волжский – 2003, 2004, 2009 гг., г. Екатеринбург – 2003, 2009 г., г. Тольятти – 2008, 2009 гг., г. Санкт-Петербург –

2010 г., г. Москва – 2010...2013, 2015...2017 гг., г. Курск – 2013 г., г. Барнаул – 2014 г., г. Брянск – 2015 г., TUB IWF, Braunschweig, Germany – 2011 г.).

**Публикации по теме.** По теме работы опубликовано 68 печатных работ, в том числе из них: 18 – в изданиях по списку ВАК; 10 – в изданиях из базы Scopus; 4 – в изданиях из базы Web of Science. Опубликовано 2 монографии, выполнено 4 отчета о НИР, получено 3 патента.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, общих результатов и выводов, списка литературы (465 наименований) и четырех приложений. Работа изложена на 351 странице машинописного текста, включает 88 рисунков и 59 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ



Рис. 1. Порядок проектирования операций шлифования по справочникам ОМН

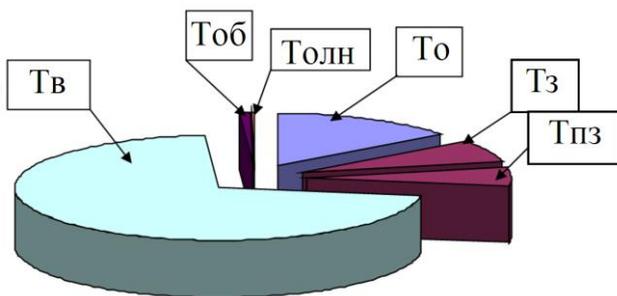


Рис. 2. Структура нормы времени в многономенклатурном производстве

приводит к существенным потерям. Время на замену ШК и наладку станка – Тз – сопоставимо с основным временем обработки всей партии деталей – То (рис. 2). Кроме этого, необходимость частой замены ШК приводит к выводу станков из производственного цикла, их длительным простоям, что отрицательно сказывается на эффективности операций шлифования.

В связи с этим, в настоящее время на предприятиях одним ШК стремятся изготовить как можно большее количество деталей, отличающихся как основным материалом, так и требованиями чертежа. При этом увеличение основного времени обработки различных деталей составляет более 600 % по сравнению с данными

**Во введении** рассмотрены тенденции развития мирового машиностроения, а также абразивной отрасли.

**В первой главе** рассмотрены особенности проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, а также процесса износа абразивных зерен ШК.

В настоящее время одним из основных методов назначения характеристики инструмента и режимов шлифования является проектирование операций по справочникам ОМН (рис. 1). Эти справочники предназначены для крупносерийного и массового производства, т.к. предписывают для обработки конкретной партии заготовок применять ШК определенной характеристики. При этом режим шлифования выбирается отдельно от характеристики ШК, что не позволяет говорить о нем, как о наиболее эффективном для данной операции шлифования.

Применение рассмотренной методики в многономенклатурном производстве

справочников ОМН (рис. 3). Это вызвано отсутствием рекомендаций по эксплуатации ШК в разных технологических условиях.

Вместе с тем имеются операции, на которых эксплуатация ШК «ненормативной» характеристики

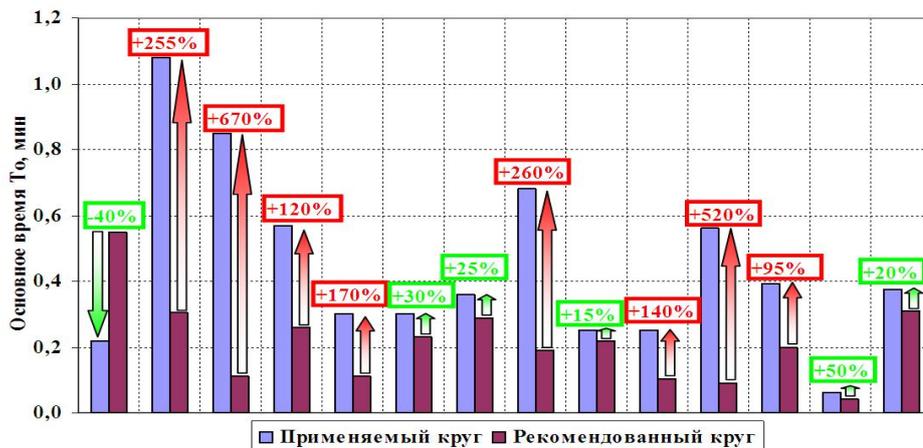


Рис. 3. Сопоставление производственных данных с рекомендациями справочников ОМН

приводит к незначительному увеличению основного времени – на 15...30 %. Это свидетельствует о том, что реальная область возможной эксплуатации любого ШК не является детерминированной величиной, как указано в справочниках ОМН.

Любой ШК обладает ресурсом работоспособности и может эксплуатироваться в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, диапазон точности, шероховатости и т.д.). При этом инструмент демонстрирует наилучшие показатели работоспособности в условиях, описанных в справочниках ОМН.

Для обеспечения требуемого уровня производительности операций необходимо определить для ШК диапазон режимов шлифования различных материалов, с обеспечением требуемого качества обработки. При этом работоспособность ШК определяется его эксплуатационными показателями.

В соответствии с ГОСТ 25751–83 под работоспособностью инструмента понимается состояние инструмента, при котором выполняется обработка при установленных условиях с установленными требованиями. ГОСТ Р 52781–2007 содержит рекомендации по оценке работоспособности ШК двумя показателями: коэффициентом шлифования и шероховатостью поверхности. Указанные показатели определяются экспериментально, по приведенной в стандарте методике.

В настоящее время известно более 30 специальных *отдельных показателей* для оценки работоспособности ШК, предложенных Ю.С. Багайсковым, Н.И. Богомоловым, Н.И. Веткасовым, Ю.М. Зубаревым, Е.С. Киселевым, А.Д. Курносковым, Г.Б. Лурье, Н.П. Малевским, Е.Н. Масловым, В.А. Никифоровым, В.А. Носенко, С.А. Поповым, А.В. Приемышевым, Г.И. Саютиным, В.П. Сиротиным, Л.Н. Филимоновым, И.В. Харченко, Л.В. Худобиным, Л.Н. Хшиво, В.М. Шумячером, L. Dabrowski, S. Kumar, M. Marciniak, С. Rubenstein и др. Отдельные показатели могут использоваться для сравнения инструментов или оценки влияния различных параметров на результаты процесса шлифования и не дают возможность проектировать операцию шлифования.

Работы по *комплексному описанию работоспособности* ШК в подавляющем большинстве направлены на создание испытательных установок, позволяющих измерять набор эксплуатационных показателей различного состава. Это исследования Н.Н. Васильева, В.Г. Гусева, Р.В. Жигалова, В.В. Звоновских, В.Т. Ивашинникова, Д.В. Исакова, С.Н. Корчака, В.Я. Коршунова, В.И. Муцянко,

А.Г. Неижкаши, В.А. Никифорова, Д.В. Пашкова, В.В. Федорова, П.С. Швагирева, A. Decneut, R. Hahn, R. Lindsay, M.K. Miyashita, J. Peters, S. Shvozaki, R. Snoeys, C. Smith и др. Недостатком этих работ является отсутствие возможности проектирования операций шлифования для различных технологических условий, поскольку применимость полученных результатов ограничивается рамками выполненных испытаний ШК. Кроме этого, величины эксплуатационных показателей определялись как средние за период работы инструмента. Однако из практики шлифования известно, что работоспособность ШК изменяется во времени.

*Моделированием процессов шлифования* с целью проектирования эффективной технологии занимались Д.И. Волков, А.М. Козлов, С.Н. Корчак, А.А. Кошин, З.И. Кремень, В.И. Курдюков, В.И. Островский, А.Н. Резников, Г.И. Саютин, Я.И. Солер, С.А. Фадюшин, А.К. Цокур, K. Ding, Y. Fu, X. Gong, K. Wu и др.

В работах Г.В. Бокучавы, Г.И. Грановского, Н.Н. Зорева, Е.П. Калинина, С.Н. Корчака, А.А. Кошина, И.В. Лаврова, Т.Н. Лоладзе, Е.Н. Маслова, А.А. Маталина, Л.Л. Мишнаевского, П.П. Переверзева, А.Г. Сулова, А.Н. Унянина, Л.Н. Филимонова, Л.В. Худобина, В.Ю. Шамина, С. Bao, S.J. Deutsch, S. Gleich, K.-U. Hess, M.P. Hitchiner, S. Hou, R. Neugebauer, S. Pop, C. Rubenstein, K. Salonitis, Z. Shi, Y. Song, J. Wilks, J. Yang, X. Yang, W. Yao, S. Yossifon и др. указывается, что преобладающее влияние на работоспособность абразивного инструмента оказывает интенсивность и величина его износа. При этом для определения величины износа единичного абразивного зерна принимается качественный безразмерный показатель или предлагаются эмпирические модели, содержащие трудноопределимые параметры. В ряде исследований принимается постоянная величина размера площадки затупления единичного абразивного зерна, что не отражает временного характера процесса шлифования.

Учитывая, что износ абразивного зерна – процесс, развивающийся во времени, то представляется возможным определить работоспособность ШК в зависимости от его износа. Это позволит прогнозировать изменение работоспособности инструмента во времени его эксплуатации.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость создания комплексной математической модели размера площадки затупления единичного абразивного зерна в зависимости от условий работы инструмента. Модель должна позволять определить размер площадки затупления в любой момент времени работы ШК, т.е. в качестве одного из аргументов в модели должно выступать время работы инструмента. Учитывая, что в научной литературе выделяют *механический и физико-химический механизмы износа* абразивного зерна как основные, действующие совместно при обработке большинства материалов, эти механизмы и должны быть включены в разрабатываемую модель.

Традиционные теории прочности предполагают, что разрушение наступает при превышении порогового значения какого-либо критерия, что не позволяет рассмотреть процесс разрушения во времени. Временную прочностную характеристику материала предлагает кинетическая теория прочности твердых тел, созданная С.Н. Журковым, В.Р. Регелем и др. Ими получена зависимость долговечности  $\tau_{ц}$  для твердого тела, подвергающегося многоцикловой нагрузке, вызывающей в материале тела напряжения  $\sigma$ , изменяющиеся во времени  $T$ . Модель долговечности

$\tau_{ц}$  требует адаптации к условиям шлифования и может быть использована для прогнозирования массы изношенной части абразивного зерна  $M_{а.з.}^M$  в результате его механического взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Модель, предложенная Т.Н. Лолодзе и Г.В. Бокучавой позволяет рассчитать величину массы изношенной части абразивного зерна  $M_{а.з.}^{\Phi-x}$  в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом. Однако трудно-определимым параметром в ней является коэффициент диффузии  $D$ , поскольку он является функцией многих переменных. Этот коэффициент известен в большинстве исследований для чистых материалов – железа, алмаза и др. Учитывая многообразие легирующих элементов, применяемых для производства шлифуемых сталей и сплавов, этот коэффициент необходимо рассматривать как комплексный, характеризующий интенсивность физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов при шлифовании.

**Вторая глава** посвящена разработке методики континуального проектирования операций шлифования, в основу которой положена континуальная система обработки информации, описанная А.Б. Путилиным (рис. 4, а). Применительно к абразивной обработке, это система взаимодействия объекта управления – шлифовального круга – с внешними и внутренними информационными полями. При этом возмущающим воздействием на ШК являются режимы шлифования, а выходным действием – качество обработки (рис. 4, б). Взаимодействие ШК с внутренними информационными полями позволяет прогнозировать работоспособность инструмента, а также определять режимно-временную область его рациональной эксплуатации в различных технологических условиях.

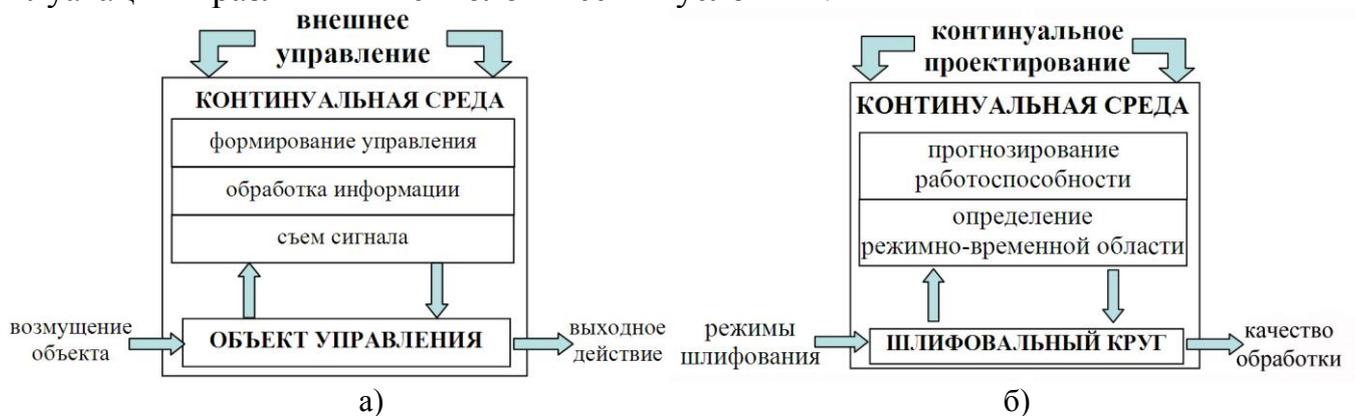


Рис. 4. Континуальная модель управления объектом  
а) исходная; б) для абразивной обработки

Структура методики континуального проектирования операций шлифования показана на рис. 5. Заготовки для обработки поступают на станок партиями  $n_i$  (на рис. 5 показаны плоскостями  $n_1, n_2 \dots n_i$ ), при этом для каждой партии изготавливаемых деталей имеются требования к качеству их обработки – IT, Ra.

Для каждой партии заготовок, изготовленных из своего материала (ГрОМ) по существующим рекомендациям ОМН или другим методикам, выбирается ШК, обладающий наилучшей работоспособностью  $X^i$  (на рис. 5 условно показаны эллипсами). В результате формируется номенклатура ШК, рекомендованных к применению при обработке всех партий заготовок в запланированном периоде времени. При этом область работоспособности каждого ШК при обработке конкретной партии заготовок различна, поскольку каждый ШК рекомендован для обработки

одной из запланированных партий. Для других партий заготовок ШК не является рекомендуемым, поэтому область его работоспособности меньше.

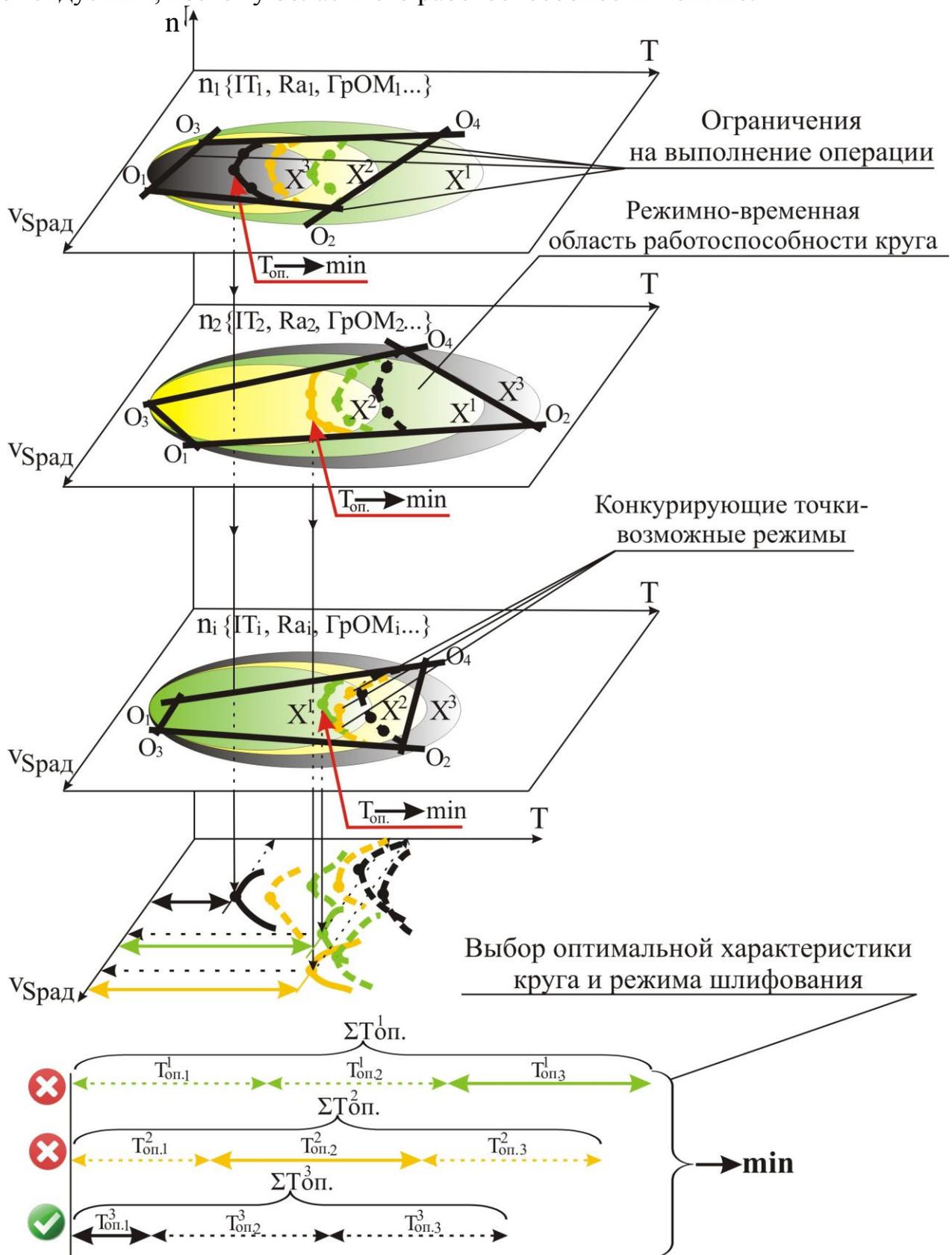
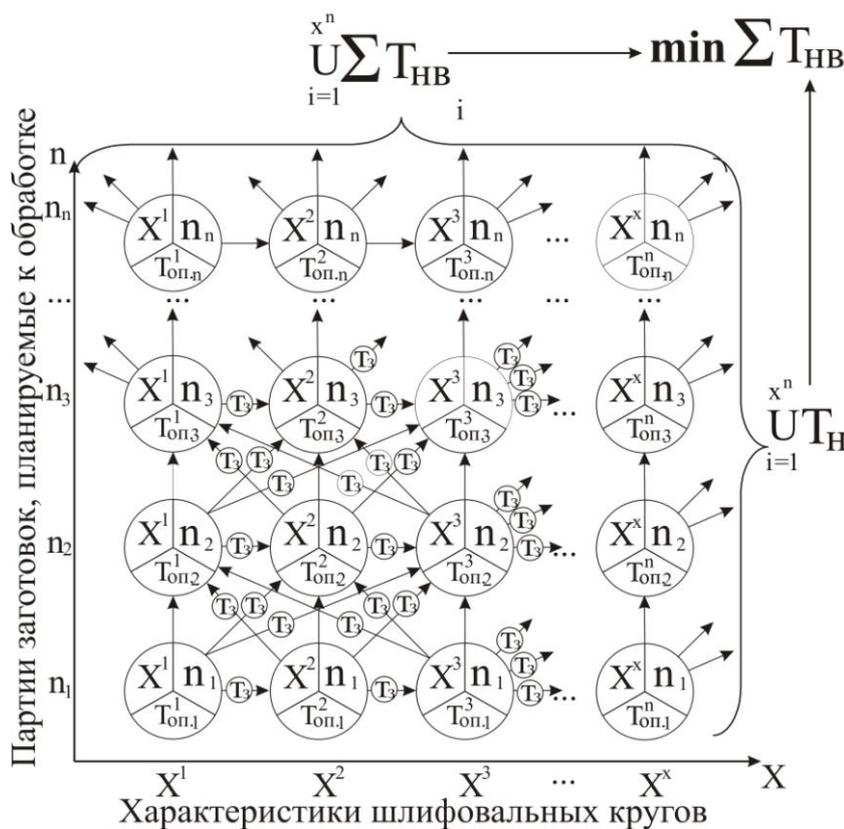


Рис. 5. Структура методики континуального проектирования операций шлифования (на примере круглого врезного шлифования)

Необходимо знать работоспособность каждого ШК при обработке каждой партии заготовок, изготовленных из различных материалов. После наложения на ра-

ботоспособность каждого ШК ограничен по выполнению требований к обработке каждой партии заготовок, в координатах «режим шлифования ( $v_{\text{спад}}$ ) – время ( $T$ )», определяется режимно-временная область рациональной эксплуатации каждого ШК при обработке всех запланированных партий заготовок. Режимно-временная область содержит информацию о возможных режимах шлифования и времени работы инструмента на этих режимах. Режимы шлифования обеспечивают разный уровень производительности процесса, т.е. существует период времени, в течение которого ШК конкретной характеристики на определенных режимах шлифования обеспечивает требуемый уровень технологических ограничений – требований к выполнению операции шлифования. Этот период времени и определяет работоспособность конкретного ШК при обработке каждой партии заготовок. Далее, для различных режимов шлифования определяется оперативное время обработки каждым ШК каждой партии заготовок  $T_{\text{оп}i}^i$  – сумма основного  $T_o^i$  и вспомогательного  $T_b^i$  времени. В итоге для каждого ШК определяется суммарное время обработки всех партий заготовок  $T_{\text{оп}i}^i$  и принимается тот ШК, для которого суммарное время по всем партиям минимально. Таким образом, одновременно выбирается пара «характеристика ШК – режим шлифования» для обработки каждой партии заготовок.

Особенность разработанной методики континуального проектирования операций шлифования заключается в том, что в ней учитывается возможность обработки партий заготовок, поступающих на станок, ШК различных характеристик



(рис. 6). Возможна ситуация, когда ШК, установленный на станке, является менее эффективным для обработки последующих партий заготовок в сравнении с другим ШК. При этом затраты на замену ШК будут оправданы высоким уровнем его производительности.

Для учета указанной особенности методики в состав определяемой технической нормы времени –  $T_{\text{н.в.}}$  – включено время на замену ШК –  $T_3$ . При помощи полного перебора вариантов обработки всех партий заготовок возможно построение рационального порядка замены ШК на станке при обработке заготовок, изготовленных из различных материалов в запланированном периоде времени.

Рис. 6. Вариативный характер методики континуального проектирования

обработки заготовок, изготовленных из различных материалов в запланированном периоде времени.

Таким образом, разработанная методика континуального проектирования операций шлифования позволяет:

- назначить режимы шлифования различных заготовок при использовании ШК определенной характеристики в широком диапазоне технологических условий (различные материалы, требования по точности, шероховатости и др.);
- назначить пару «характеристика ШК – режим шлифования» и порядок замены ШК на станке для обработки запланированных партий заготовок с выполнением требований по качеству обработки и минимальными затратами времени на выполнение операций шлифования.

Для реализации вариативного характера разработанной методики в качестве целевой функции принят минимум неполной технической нормы времени:

$$T_{\text{нв}}^* = \sum_{n=1}^m n \cdot T_o^n + \sum_{i=1}^{P_n} T_b^i + f \cdot T_3 \rightarrow \min . \quad (1)$$

Формула (1) учитывает режущие свойства ШК ( $T_o$ ), время на правку ШК ( $T_b$ ), а также время на замену ШК на станке ( $T_3$ ) нужное количество раз ( $f$ ).

Определение режимно-временной области рациональной эксплуатации ШК той или иной характеристики в различных технологических условиях производится путем наложения системы ограничений на сведения о работоспособности ШК при выполнении целевой функции (1). Поскольку наиболее распространенными требованиями к чистовой обработке деталей, выполняемыми на операциях шлифования, являются точность размера, качество поверхности (шероховатость), а также отсутствие прижогов, то система технологических ограничений включает в себя ограничение по силе шлифования ( $P_{yn}$ ), шероховатости поверхности ( $Ra_n$ ) и температуре шлифования ( $U(x)_n$ ):

$$P_{y3} \leq P_{yn} ; \quad Ra_3 \leq Ra_n ; \quad U(x)_3 \leq U(x)_n . \quad (2)$$

Соответственно и работоспособность ШК необходимо оценивать по комплексу эксплуатационных показателей, входящих в систему (2).

Реализация методики континуального проектирования операций шлифования основывается на комплексной оценке работоспособности ШК в различных технологических условиях. Для прогнозирования показателей работоспособности  $P_{y3}$ ,  $Ra_3$  и  $U(x)_3$  необходима система прогнозных моделей, учитывающих износ абразивных зерен, как фактор, предопределяющий режущие свойства инструмента.

**Третья глава** посвящена износу абразивного зерна в процессах шлифования. Общее уравнение для определения износа в массовом выражении, с учетом механического и физико-химического механизма его протекания, выглядит как

$$M_{a.з.} = M_{a.з.}^m + M_{a.з.}^{\phi-x} . \quad (3)$$

После адаптации модели долговечности, предложенной С.Н. Журковым, В.Р. Регелем и др. для твердого тела, испытывающего циклические нагрузки, получаем, что долговечность абразивного зерна  $\tau_{ц}$  может быть определена по следующей формуле:

$$\tau_{ц} = \frac{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{\text{спад}}}{n_3}}}{60 \cdot V_k} \cdot \frac{I_0 \left( i, \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma \right)}{\exp \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma} \quad (4)$$

Через плотность абразивного материала  $\rho_a$  и величину элементарного объема  $w_{a.з.}^M$ , испытывающего напряжения  $\sigma$ , можно перейти к формуле расчета массы абразивного материала  $M_{a.з.}^M$ , изношенной в результате механического взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом за время  $T$ :

$$M_{a.з.}^M = \frac{60V_k \cdot \rho_a \cdot w_{a.з.}^M \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{\text{спад}}}{n_3}} \cdot I_0 \left( i, \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma \right)} \quad (5)$$

Для определения величины напряжений  $\sigma$ , действующих в единичном абразивном зерне при различных условиях шлифования, создана конечно-элементная модель (рис. 7) и проведена серия численных экспериментов в пакете ANSYS (рис. 8). Зависимости напряжения  $\sigma$  от размера площадки затупления для различных температур при взаимодействии зерна с заготовкой приведены на рис. 9.

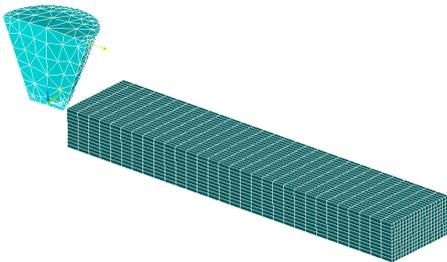


Рис. 7. Конечноэлементная модель взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой

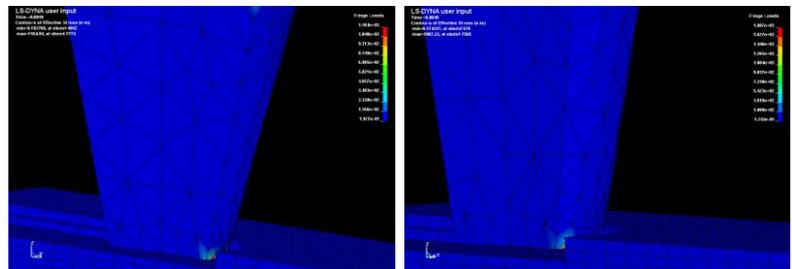
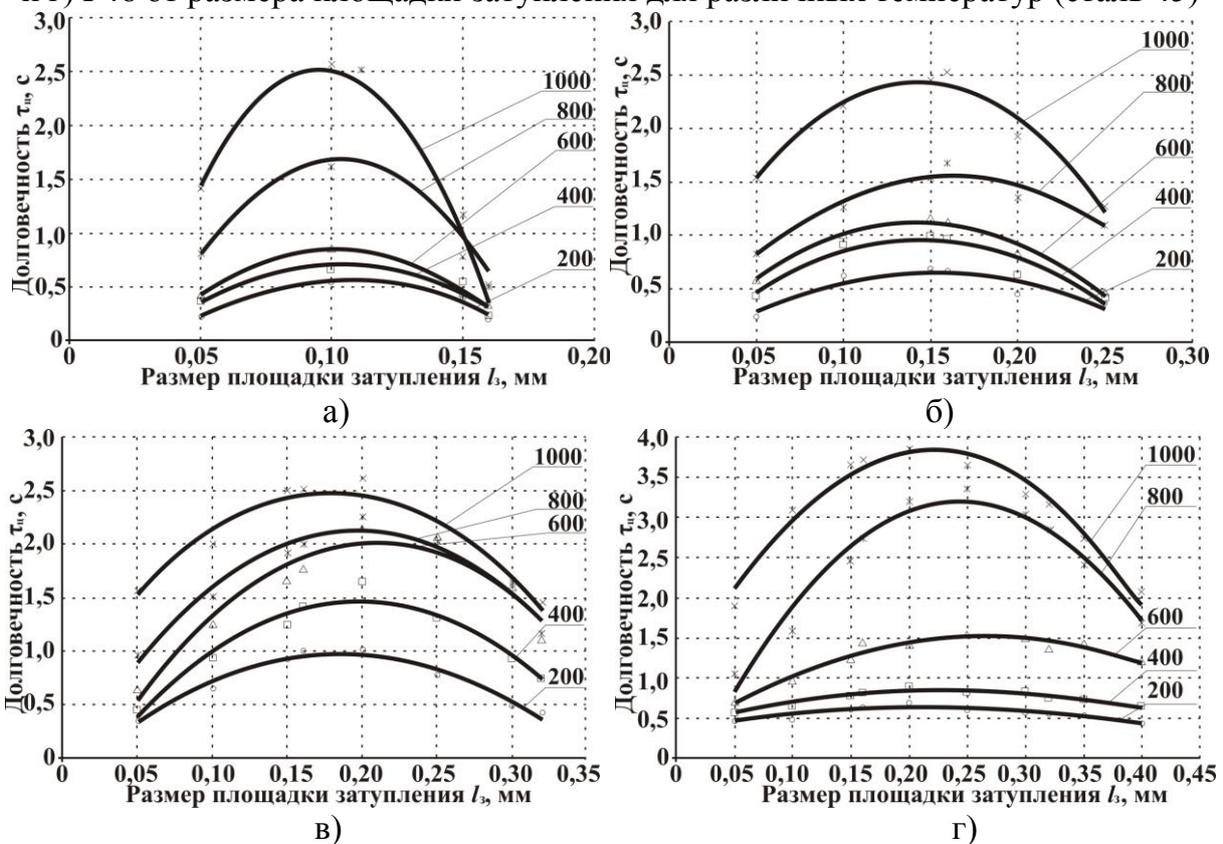
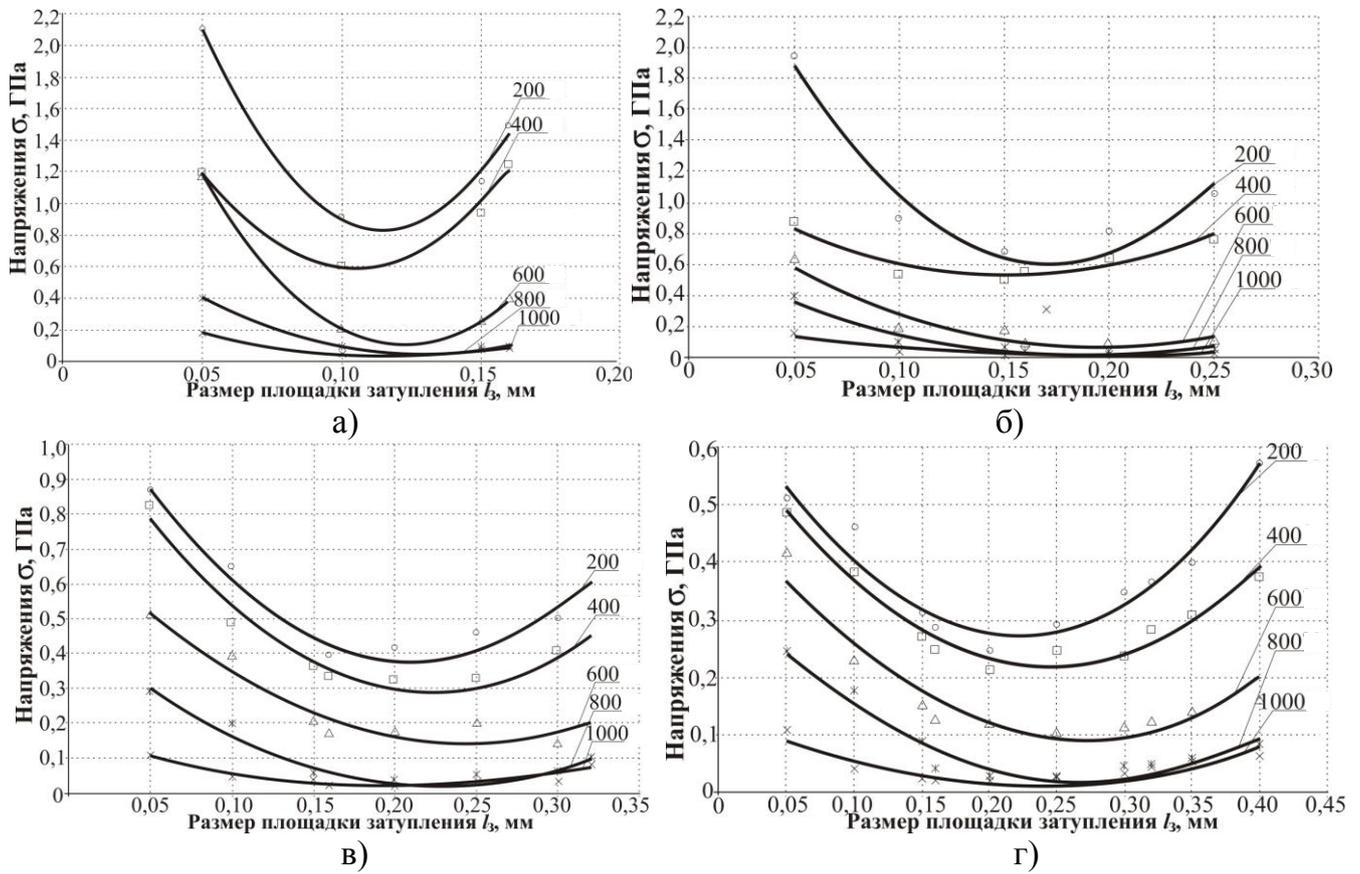


Рис. 8. Моделирование взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой

Для условий круглого врезного шлифования по формуле (4) для различных технологических условий рассчитана долговечность  $\tau_{ц}$  абразивного зерна (рис. 10). Результаты расчета по формуле (5) массы абразива, изношенного вследствие действия механического износа приведены на рис. 11 и 12.

Таким образом, в результате проведенного исследования на основе кинетической теории прочности твердого тела разработана модель (5), позволяющая определить массу абразивного зерна, изношенную в результате его механического взаимодействия с обрабатываемым материалом.



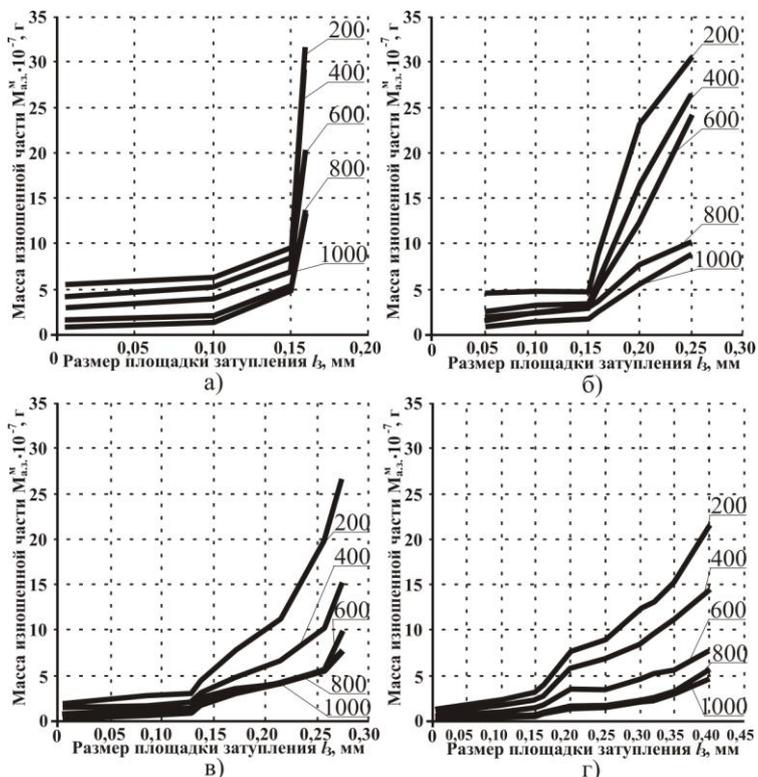


Рис. 11. Зависимость массы изношенной части абразивного зерна а) F90; б) F60; в) F54 и г) F46 от размера площадки затупления для различных температур

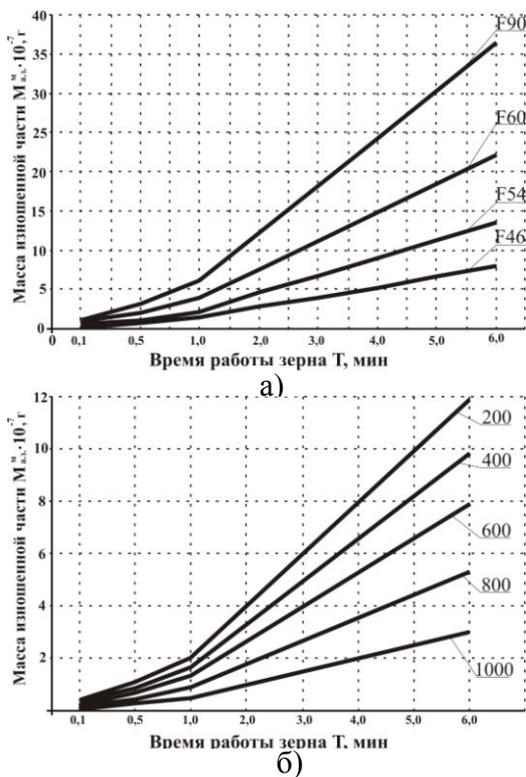


Рис. 12. Зависимость массы изношенной части абразивного зерна от времени работы для различных зернистостей (а, при 600 °C) и температур (б, для F46)

Многочисленными исследованиями доказано, что рост толщины  $x$  диффузионной прослойки как при гетеро-, так и при реактивной диффузии протекает по параболическому закону диффузии, который может быть получен из закона диффузии Фика. Используя этот закон, можно определить коэффициент диффузии. Поскольку процессы, протекающие между абразивным и обрабатываемым материалом представляют собой сложные физико-химические взаимодействия, обусловленные наличием и концентрацией легирующих элементов в шлифуемом материале, то коэффициент диффузии  $D$  будем рассматривать как обобщенный коэффициент сродства  $D_{cp}$  абразивного материала к обрабатываемому.

Учитывая сложность физико-химических процессов, протекающих между абразивным и обрабатываемым материалом при шлифовании, отмеченную Г.В. Бокучавой, Т.Н. Лоладзе, В.Ю. Шаминам и др., а также большое количество сочетаний легирующих элементов в различных шлифуемых материалах, теоретическое определение величины коэффициента сродства  $D_{cp}$  крайне затруднительно. В связи с этим, для определения коэффициента сродства  $D_{cp}$  разработана экспериментальная методика, заключающаяся в нагреве образцов «электрокорунд – обрабатываемый материал» до различной температуры, их выдержке и последующем анализе поперечных шлифов при помощи электронного сканирующего микроскопа Jeol JSM 6460LV. Обрабатываемый материал принимался из различных групп обрабатываемости шлифованием. Результаты анализа приведены на рис. 13.

Толщина  $x$  диффузионной зоны определялась в нескольких местах, перпендикулярно линии раздела материалов. Рассчитанные в соответствии с измеренной толщиной  $x$  диффузионной зоны коэффициенты сродства  $D_{cp}$  электрокорунда бе-

лого к различным обрабатываемым материалам, отличающихся концентрацией конкретного химического элемента в своем составе, позволяют осуществлять прогнозирование величины коэффициента химического сродства  $D_{cp}$  без проведения экспериментов (рис. 14, 15).

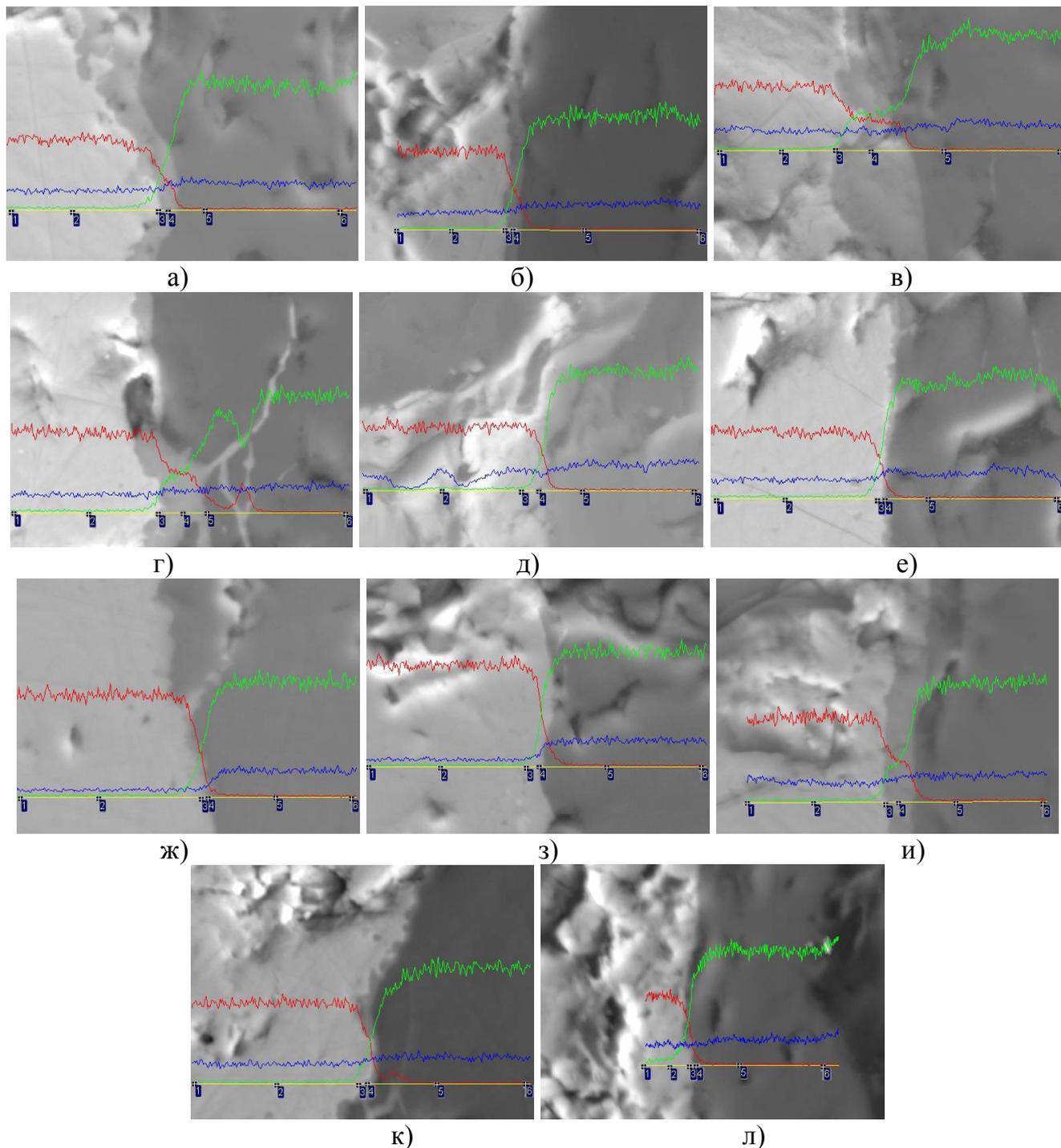


Рис. 13. Определение толщины диффузионной зоны:  
а) ВТ-15; б) 38ХС; в) 60Г; г) 38ХГН; д) 40Х; е) 40ХН;  
ж) 40ХНЗА; з) 45; и) ОТ-3; к) СЧ-20; л) 40Х13

— кислород; — титан (а, и), железо (б–з, к, л), — алюминий

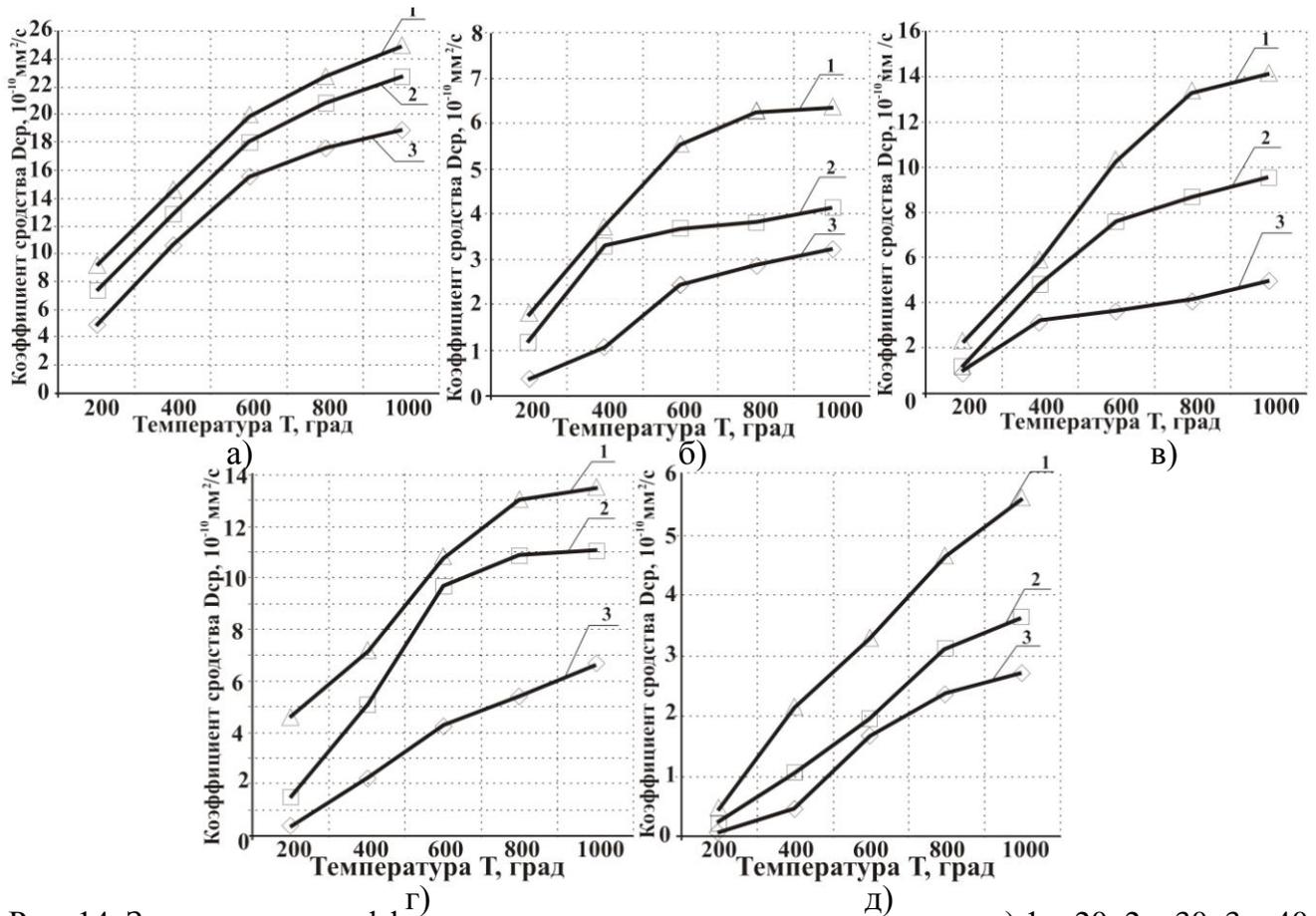


Рис. 14. Зависимость коэффициента срoдства от температуры: сталь а) 1 – 20, 2 – 30, 3 – 40; б) 1 – 20X, 2 – 30X, 3 – 40X; в) 1 – 20X13, 2 – 30X13, 3 – 40X13; г) 1 – 20XH, 2 – 30XH, 3 – 40XH; д) 1 – 20XH3A, 2 – 30XH3A, 3 – 40XH3A

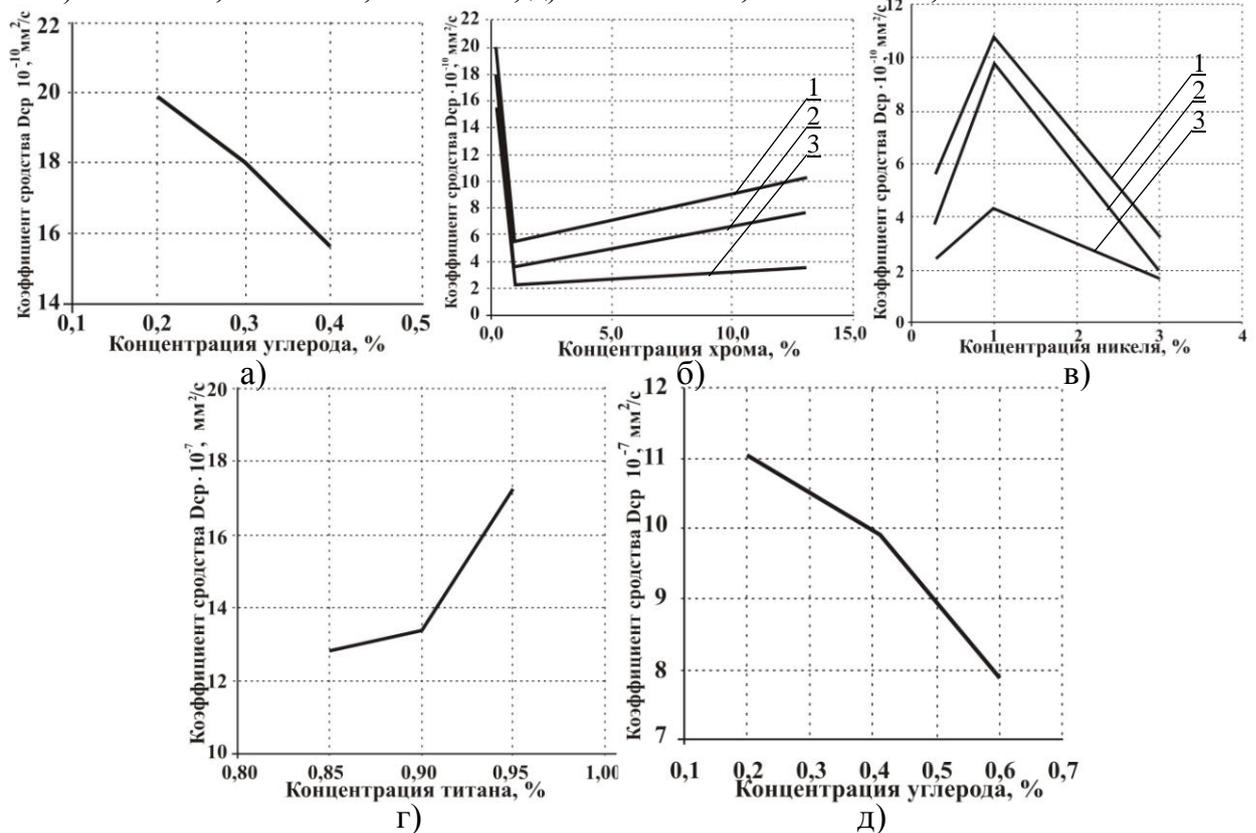


Рис. 15. Зависимость коэффициента срoдства от концентрации в обрабатываемом материале (при 600 °С): а) углерода, б) и в) хрома и никеля соответственно, при концентрации углерода 1 – 0,2, 2 – 0,3 и 3 – 0,4 %, г) титана, д) углерода, с присутствием 1 % марганца

В итоге математическая модель для определения величины изношенной части абразивного зерна в массовом выражении будет иметь следующий вид:

$$M_{a.з.} = \frac{60V_k \cdot \rho_a \cdot w_{a.з.}^M \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{6 \cdot \rho \cdot 10^{23}}}{2kT_t} + n_k \cdot \left( 1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot \frac{V_{спал}}{n_3}}{D_k + d_3}} \cdot I_0 \left( i, \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{6 \cdot \rho \cdot 10^{23}} \right) + 0,08\rho_m \frac{m_d}{m} C_0 l_3^{3/2} D_{cp}^{1/2} \left( 1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot \frac{V_{спал}}{n_3}}{D_k + d_3}} V_k^{1/2} \frac{T}{D_k} \quad (6)$$

Результаты расчета по формуле (6) показывают, что удельная доля рассмотренных механизмов износа в общей величине износа абразивного зерна варьируется в зависимости от марки обрабатываемого материала (рис. 16).

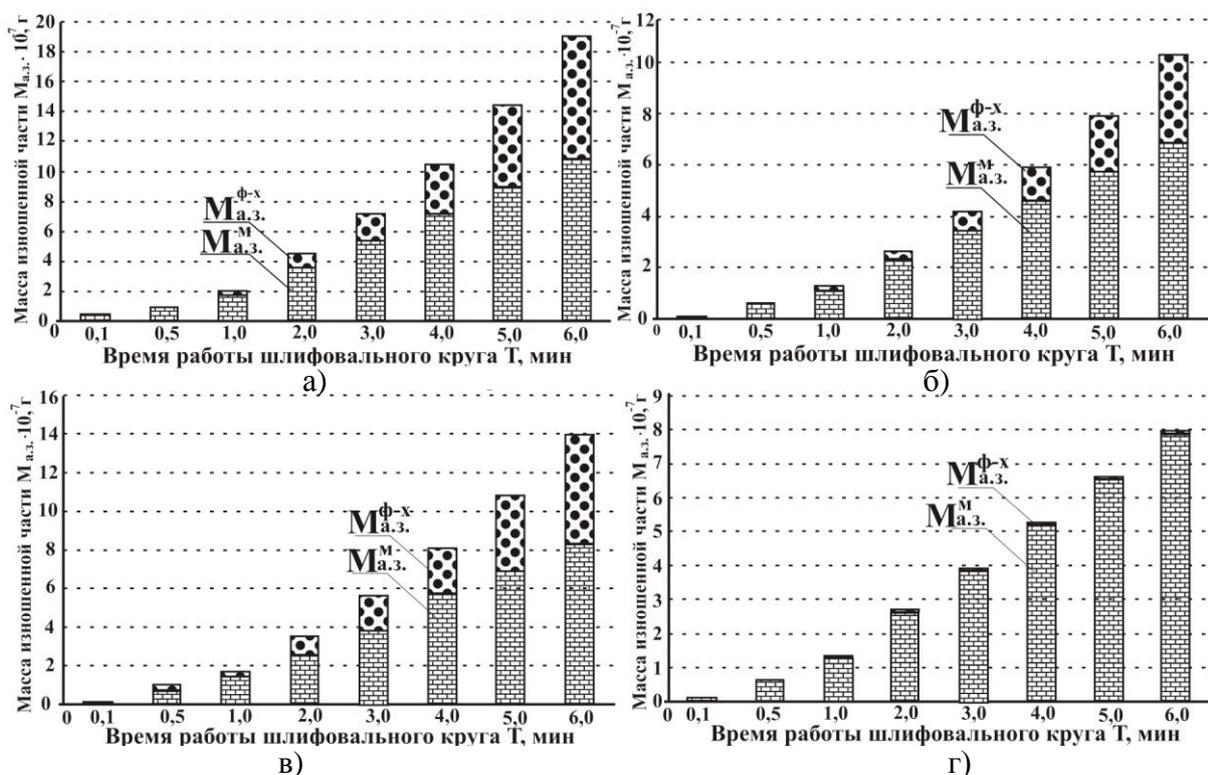


Рис. 16. Зависимость суммарного износа абразивного зерна от времени работы при шлифовании различных марок сталей и сплавов: а) 38ХС; б) 60Г; в) ВТ-15; г) 45

Так, для стали 38ХС доля физико-химического износа абразивного зерна составляет 15...42 %, 60Г – 12...28 %, сплава ВТ-15 от 10 до 43 %. Для представителя группы конструкционных нелегированных сталей – стали 45 – доля физико-химического износа крайне мала и не превышает 2 %. Это говорит о том, что механический износ абразивного зерна при обработке таких материалов оказывает доминирующее влияние на общую величину износа абразивного зерна.

После аппроксимации абразивного зерна усеченным конусом, с учетом (6), размер площадки затупления  $l_{з.і}$  может определяться по следующей зависимости:

$$l_{3,i}^3 = 2 \left[ \frac{180V_k \cdot w_{a.z.}^m \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{12kT_t \cdot \rho_a \cdot 10^{23}}}{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3 D_k + d_3}} \cdot I_0 \left( i, \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{12kT_t \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \right) \cdot \pi} + \frac{0,24C_0 l_{3,i-1}^{3/2} D_{cp}^{1/2} \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3 D_k + d_3}} V_k^{1/2} \rho_m m_d T}{D_k m \rho_a} \right] \quad (7)$$

Созданная модель (7) является рекурсивной: она учитывает нелинейную обратную связь по размеру площадки затупления, образованной в результате предыдущего контакта абразивного зерна с материалом (рис. 17)

Для проверки адекватности результатов расчета по модели (7) выполнено фотометрическое исследование размеров площадок затупления ШК после круглого врезного шлифования заготовок из стали 45. Также было выполнено сопоставление с аналогичными данными, полученными другими учеными (рис. 18).

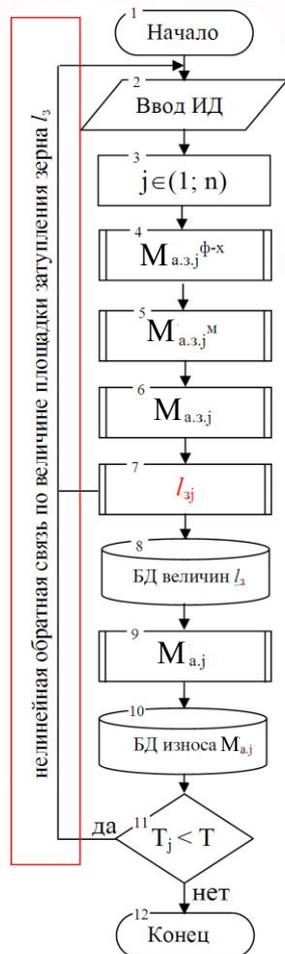


Рис. 17. Алгоритм расчета размера площадки затупления абразивного зерна

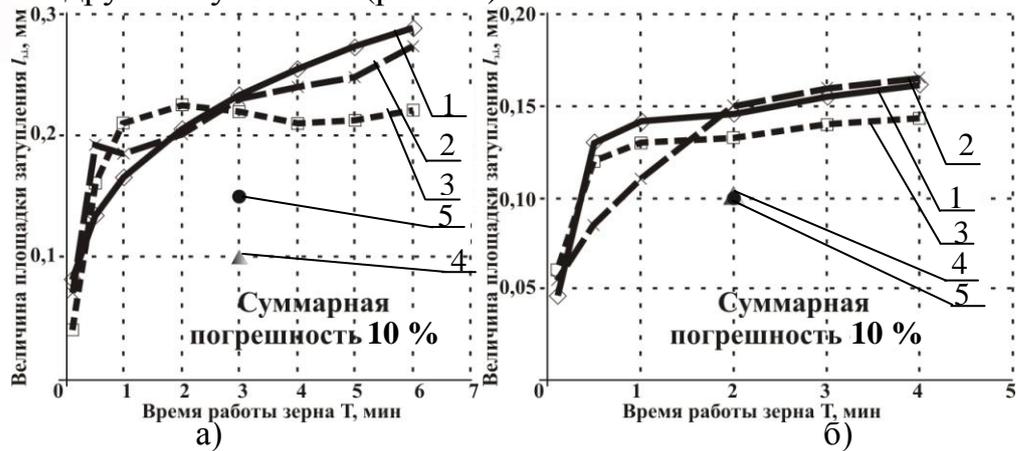


Рис. 18. Сопоставление результатов расчета (1) размера площадки затупления абразивных зерен (а) F46; б) F60) с данными: 2 – эксперимента; 3 – А.А. Дьяконова; 4 – С.Н. Корчака; 5 – А.А. Маталина

Полученные результаты расчета не противоречат данным, описанным в технической литературе, а также результатам прямого измерения размеров площадок затупления на поверхности ШК. Сопоставление расчетных данных, полученных по модели (7), показало, что суммарная погрешность расчета за все время работы абразивного зерна не превышает 10 %.

Следовательно, модель (7) может использоваться для прогнозирования размера площадки затупления абразивных зерен в различных технологических условиях. Модель (7) может использоваться для различных схем шлифования, разных характеристик ШК и обрабатываемых материалов, поскольку содержит механические и физико-химические характеристики абразивного и обрабатываемого материалов, геометрические пара-

метры инструмента и заготовки, а также технологические параметры выполняемой операции шлифования.

**Четвертая глава** посвящена прогнозированию работоспособности ШК.

В соответствии со сформированным набором технологических ограничений (2) система прогнозных моделей включает в себя:

- ✓ модель радиальной составляющей силы шлифования;
- ✓ модель шероховатости шлифованной поверхности;
- ✓ модель температуры шлифования.

Использование в прогнозных моделях модели (7) позволит получить режимно-временную область эксплуатации ШК различных характеристик в разных технологических условиях. Рассчитанный по модели (7) размер площадки затупления в прогнозных моделях задается математическим ожиданием и дисперсией.

Для расчета величины радиальной составляющей силы шлифования принимаем имитационную стохастическую модель А.А. Дьяконова (рис. 19). В существующий алгоритм расчета радиальной составляющей силы шлифования встраивается модуль расчета размера площадки затупления (см. рис. 17). Это позволяет прогнозировать изменение величины радиальной составляющей

силы шлифования во времени работы инструмента для различных технологических условий.

Для проверки адекватности разработанной прогнозной модели было выполнено сопоставление результатов расчета с данными экспериментальных измерений силы шлифования полученных при круглом врезном шлифовании разных сталей (рис. 20).

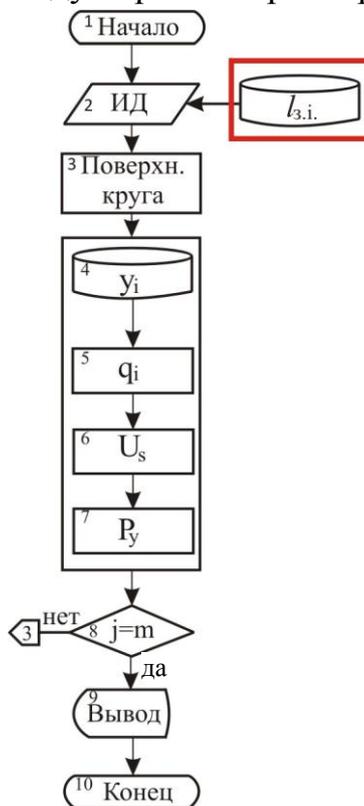


Рис. 19. Алгоритм

прогнозной имитационной модели силы шлифования

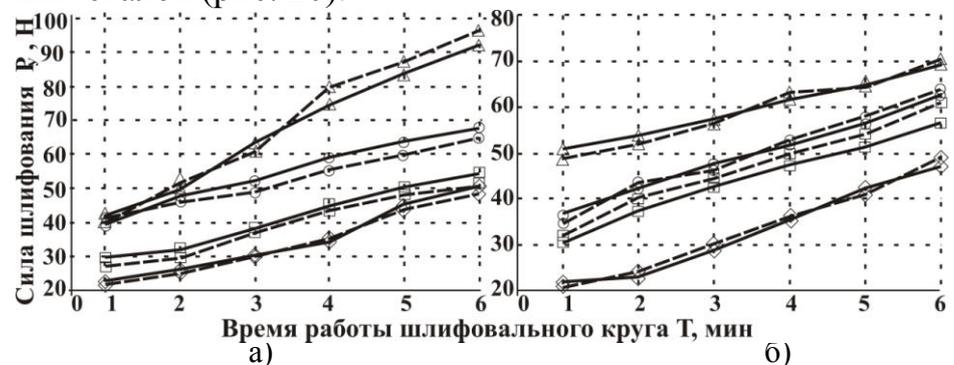


Рис. 20. Сопоставление расчетных (—) и экспериментальных (---) данных при шлифовании кругом а) 24AF60L7V и б) 24AF46L7V: подача 0,5 мм/мин:  $\Delta$  – сталь 40X,  $\circ$  – сталь 45; подача 0,3 мм/мин:  $\square$  – сталь 40X,  $\diamond$  – сталь 45

Из рис. 20 видно, что разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 10 %.

Это говорит о том, что предложенная прогнозная модель может быть использована для прогнозирования изменения величины радиальной составляющей силы шлифования в зависимости от времени работы инструмента и режима шлифования при обработке разных марок сталей и сплавов.

Для расчета величины шероховатости шлифованной поверхности принимаем имитационную модель Л.В. Шипулина, в основу которой положено взаимодействие единичных абразивных зерен, каждое из которых представлено конусом с

площадкой затупления размером  $l_3$ , с обрабатываемой заготовкой (рис. 21). Прогнозирование изменения шероховатости шлифованной поверхности во времени становится возможным при использовании модели (7), следовательно, появляется возможность получения режимно-временной области эксплуатации ШК в различных технологических условиях. Для проверки адекватности разработанной прогнозной модели были выполнены экспериментальные исследования, заключающиеся в измерении шероховатости шлифованной поверхности заготовки после круглого врезного шлифования (рис. 22).

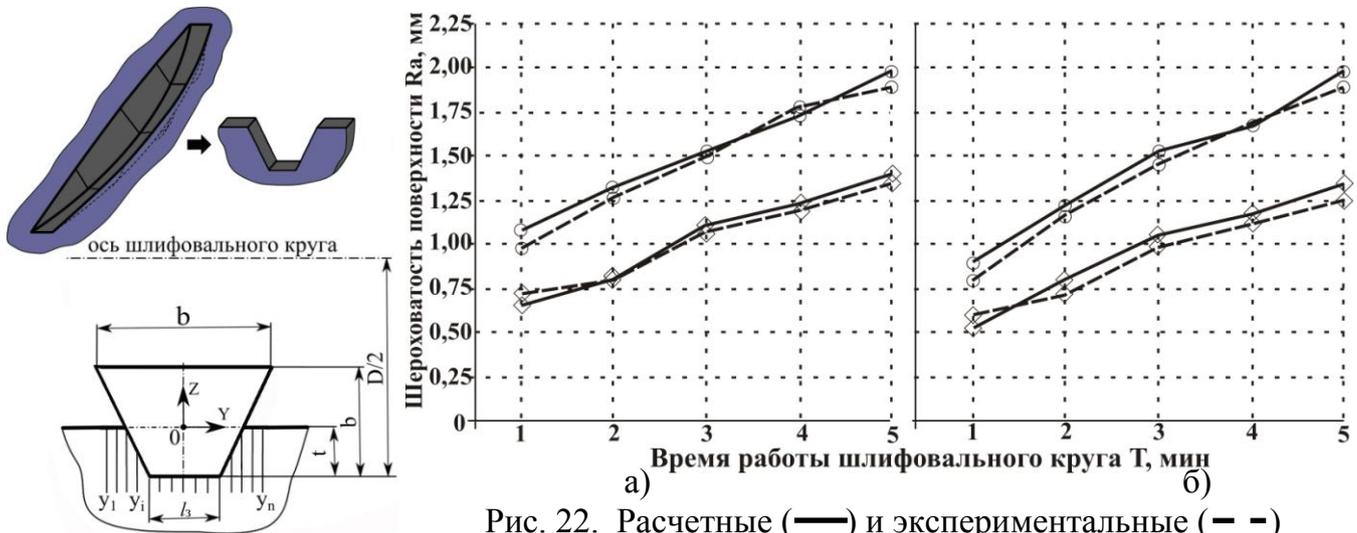


Рис. 21. Единичная абразивная цапапина

Рис. 22. Расчетные (—) и экспериментальные (---) данные при шлифовании кругом 24AF60L7V на подаче  $\circ$  – 0,5 мм/мин и  $\diamond$  – 0,3 мм/мин: а) сталь 45; б) сталь 40XH

Из рис. 22 видно, что разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 10 %. Также полученные результаты сочетаются с данными В.В. Агафонова, Н.И. Веткасова, В.Ф. Гурьянихина, А.А. Панкова, Р.М. Стрельчука и др. Это говорит о том, что предложенная прогнозная модель может использоваться для прогнозирования изменения величины шероховатости шлифованной поверхности в зависимости от времени работы инструмента и режима шлифования при обработке разных марок сталей и сплавов.

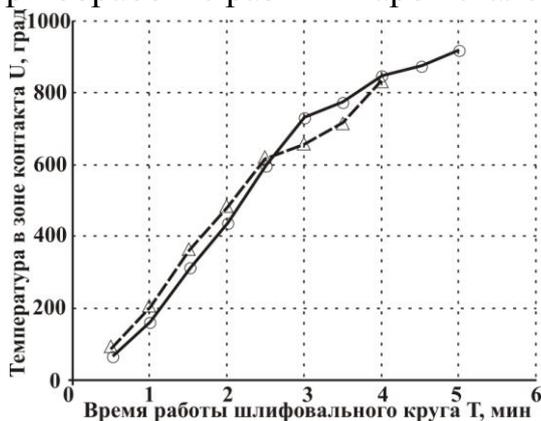


Рис. 23. Сопоставление расчетных (—) и экспериментальных (---) данных

Расчет температуры при шлифовании производится по стохастической имитационной модели А.А. Дьяконова. Для прогнозирования изменения величины температуры шлифования во времени в алгоритм расчета температуры встраивается модуль определения размера площадки затупления по формуле (7), что позволяет прогнозировать режимно-временную область эксплуатации ШК.

Для проверки адекватности созданной прогнозной имитационной модели выполнено сопоставление расчетных данных с данными, полученными путем прямого измерения температуры при круглом врезном шлифовании заготовок из стали 45 ШК характеристики 24AF60L7V. Результаты приведены на рис. 23. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что средняя погрешность расчета не превышает 10 %. Это говорит о том,

что предложенная прогнозная модель температуры шлифования может быть использована для получения режимно-временной области эксплуатации ШК в различных технологических условиях.

**В пятой главе** разработан комплекс инженерных методик континуального проектирования операций шлифования.

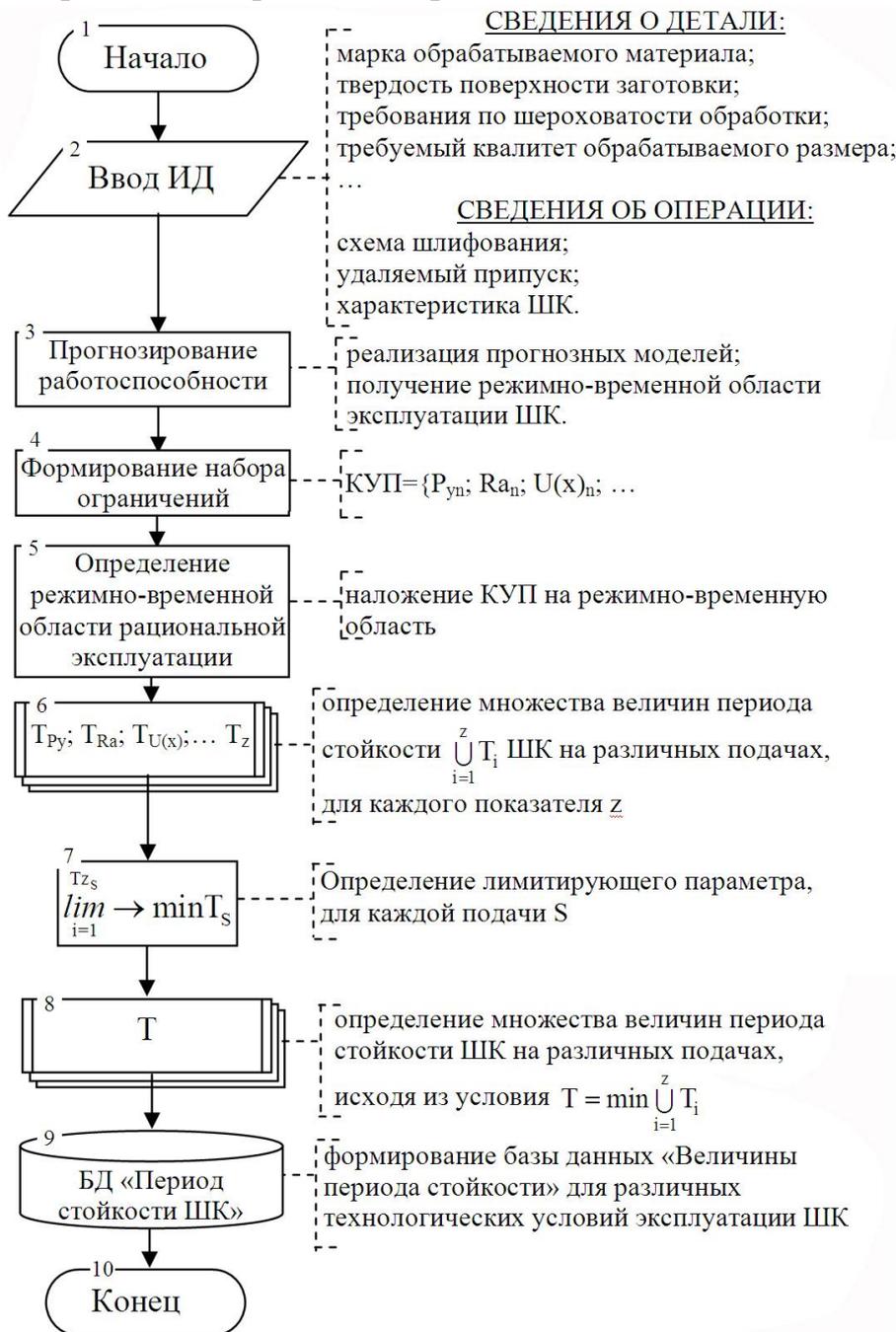


Рис. 24. Алгоритм определения периода стойкости ШК

технологических условиях (блок 3).

**Этап 2.** Формируется комплекс условий применимости, накладываемый на режимно-временную область работоспособности ШК (блок 4).

**Этап 3.** Для каждого эксплуатационного показателя ШК определяется режимно-временная область эксплуатации инструмента, в которой будет выполняться конкретное требование (блок 5).

При шлифовании различных материалов в разных технологических условиях выполнение целевой функции (1) зависит от величины периода стойкости ШК – T. Вместе с тем, в целевую функцию так-же входит вспомогательное время, затрачиваемое на правку ШК. Следовательно, для реализации методики континуального проектирования операций шлифования (см. рис. 5, 6) необходима методика определения периода стойкости ШК при обработке разных марок сталей и сплавов.

Методика представлена в виде алгоритма (рис. 24) и основана на сведениях о работоспособности инструмента в различных технологических условиях.

**Этап 1.** При помощи системы прогнозных моделей прогнозируется работоспособность ШК в конкретных

**Этап 4.** Для каждого эксплуатационного показателя ШК определяется время, в течение которого ШК будет обеспечивать заданное требование (блок 6).

**Этап 5.** По лимитирующему параметру определяется минимальное из всех времен, найденных на этапе 4, которое является периодом стойкости ШК при его эксплуатации на разных режимах шлифования (блоки 7, 8).

Для практической реализации методики континуального проектирования операций шлифования выделено **два основных сценария**:

**I. Назначение режима шлифования ШК** определенной характеристики, установленным на станке для обработки различных заготовок.

**II. Назначение пары «характеристика ШК – режим шлифования»** для каждой партии заготовок, планируемых к обработке.

Сценарий I реализуется в условиях мелких предприятий, где детали, отличающиеся основным материалом и требованиями к качеству обработки, изготавливаются малыми партиями с непланируемой номенклатурой. Имеется ШК и необходимо определить режим шлифования этим кругом разных заготовок, подлежащих обработке в определенном периоде.

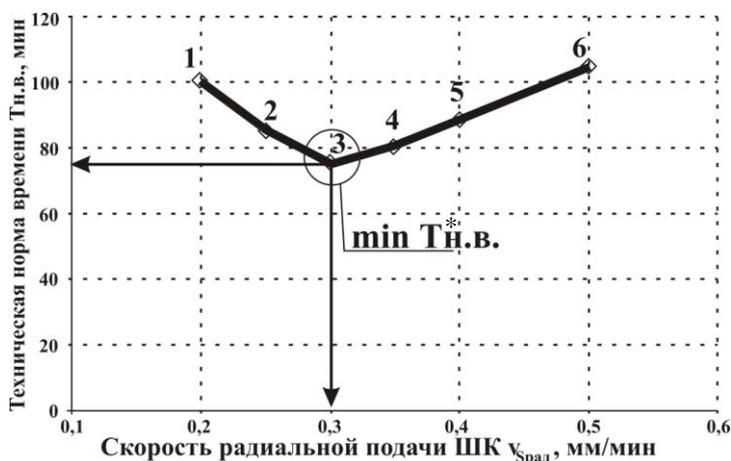


Рис. 25. Определение режима шлифования, обеспечивающего требования чертежа детали и выполнение целевой функции (1)

Рис. 25. Определение режима шлифования, обеспечивающего требования чертежа детали и выполнение целевой функции (1) и требований, предъявляемых к готовой детали.

Сценарий II используется для проектирования операций шлифования на планируемый период времени. Результатом реализации данного сценария является номенклатура ШК, которые будут использованы для обработки партий разных заготовок в планируемом периоде. Особенностью данного сценария проектирования является то, что одновременно с выбором характеристики ШК для обработки каждой партии заготовок выбирается режим шлифования. Также формируется рациональный порядок замены ШК различных характеристик на станке.

**Этап 1.** На основе справочников ОМН и других рекомендаций для обработки каждой партии заготовок подбирается характеристика ШК. В результате формируется номенклатура ШК (1...3), рекомендованных к применению при обработке запланированных партий заготовок.

**Этап 2.** Для ШК, входящих в сформированную номенклатуру, прогнозируются эксплуатационные показатели в соответствии с прогнозными моделями.

**Этап 1.** При помощи прогнозных моделей выполняется прогнозирование эксплуатационных показателей рассматриваемого ШК.

**Этап 2.** Определяется величина периода стойкости ШК на различных режимах шлифования в соответствии с разработанной методикой (см. рис. 24).

**Этап 3.** Выполняется построение зависимости целевой функции (1) от режима шлифования (рис. 25).

**Этап 4.** Из массива конкурирующих точек-подач 1...6 выбирается

**Этап 3.** По разработанной методике для каждого ШК определяется величина периода стойкости на различных режимах шлифования (см. рис. 24).

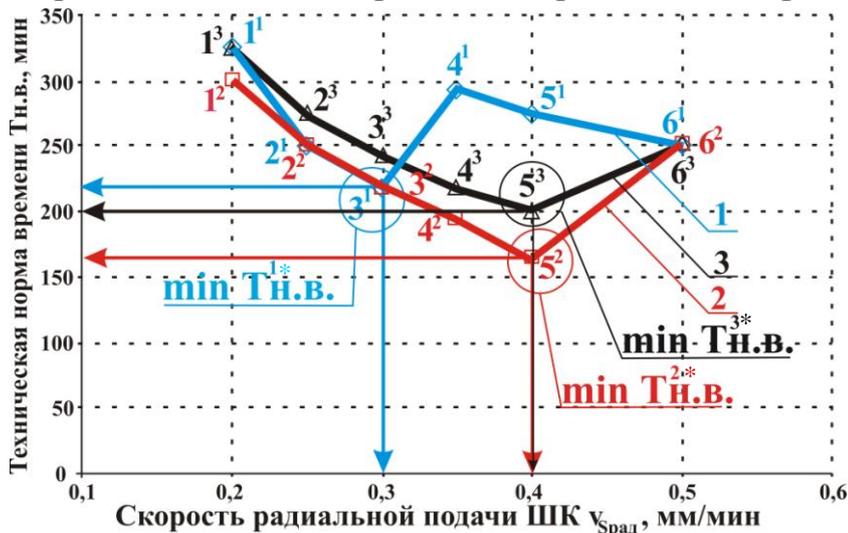


Рис. 26. Определение пары «характеристика ШК – режим шлифования»

(1) (т. 5<sup>2</sup>, см. рис. 26). Одновременно выбирается характеристика ШК (№ 2) и рациональный режим шлифования этим инструментом (0,4 мм/мин).

Для других партий заготовок описанная процедура повторяется. В соответствии с рис. 6, после полного перебора всех возможных сочетаний «характеристика ШК (из сформированной на этапе 1 номенклатуры ШК) – обрабатываемая заготовка» формируется порядок замены ШК на станке при обработке всех партий разных заготовок в планируемом периоде времени.

Рассмотренные сценарии реализованы в виде модуля технологической подготовки производства «Т&ТооL», который может функционировать как самостоятельно, так и интегрироваться в существующие САПР ТП.

**В шестой главе** выполнена практическая реализация методики континуального проектирования операций шлифования. Результаты сопоставления производственных данных различных предприятий машиностроения с данными, полученными в результате применения разработанной методики континуального проектирования операций шлифования по сценарию I, приведены на рис. 27.

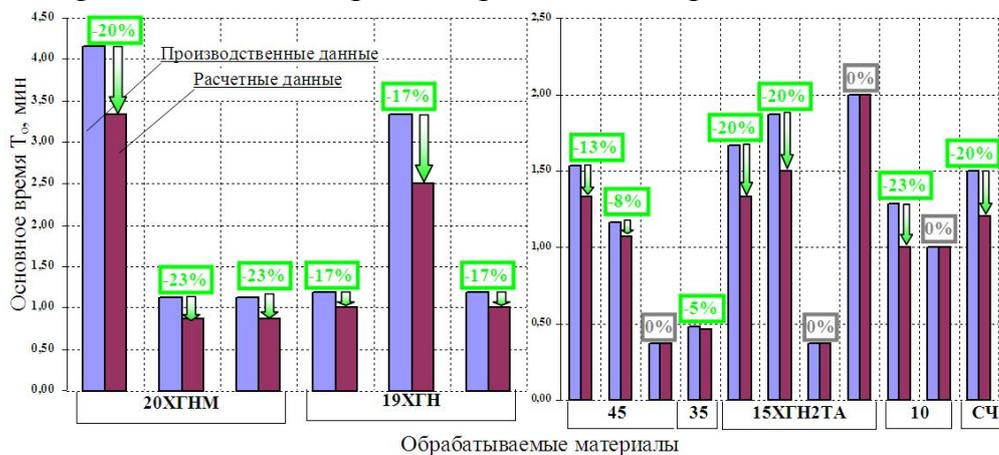


Рис. 27. Сопоставление данных по эксплуатации шлифовальных кругов

Из рис. 27 видно, что существует резерв повышения эффективности операций шлифования. Он заключается в снижении основного времени обработки на

10...20 % за счет прогнозирования режимно-временной области рациональной эксплуатации ШК конкретных характеристик в различных технологических условиях. Это является существенным результатом и открывает перспективы по повышению производительности операций шлифования в целом. Также установлено, что в некоторых случаях производственный режим шлифования совпадает с результатом моделирования или отличается незначительно – на 5...10 %. Это говорит об адекватности разработанной методики и отсутствии противоречий между результатами ее использования и производственными данными.

Для реализации сценария II были рассмотрены операции круглого врезного шлифования заготовок, изготовленных из закаленной стали 45. В производственных условиях обработка велась двумя ШК – 24AF60L и 24AF54M, что соответствует рекомендациям справочников ОМН и продиктовано различными техническими требованиями, предъявляемыми к готовым деталям.

В соответствии с разработанной методикой выполнено прогнозирование работоспособности ШК характеристики 24AF54M. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты прогнозирования работоспособности шлифовального круга 24AF54M

Время работы круга, мин	Составляющая силы шлифования $P_v$ , Н				Шероховатость поверхности $R_a$ , мкм			
	Скорость радиальной подачи круга $v_{\text{Срад}}$ , мм/мин							
	0,2	0,3	0,5	0,8	0,2	0,3	0,5	0,8
	Значение показателя							
1,0	35	38	40	51	1,00	1,25	1,45	1,50
2,0	37	39	42	55	1,12	1,27	1,48	1,52
3,0	41	43	43	58	1,22	1,32	1,51	1,54
4,0	43	44	46	60	1,26	1,39	1,55	1,60
5,0	45	47	49	63	1,29	1,44	1,58	1,65
6,0	48	49	52	65	1,34	1,47	1,62	1,73
7,0	51	53	55	69	1,45	1,51	1,66	1,88

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к готовой детали, выделена режимно-временная область возможной эксплуатации ШК. Из табл. 1 видно, что обе детали можно изготовить одним кругом характеристики 24AF54M с небольшим увеличением основного времени – на 16 %.

Расчет величины себестоимости  $C_T$  реализации операций шлифования по действующему техпроцессу и по разработанной методике показал, что во втором случае операция имеет большую переменную часть себестоимости  $C_{\text{пер}}$  на 16 % (таблица 2).

Таблица 2. Результаты расчета себестоимости

Параметр, руб.	По ТП		По расчету	
	на 1 деталь	на партию	на 1 деталь	на партию
$C_{\text{пер}}$	16,18	4045,70	19,42	4855,13
$C_{\text{пост}}$	91,16	6067,16	71,16	1000,00
$C_T$	107,34	10112,86	90,58	5855,13

Это вызвано увеличением основного времени, поскольку выбранный ШК не является рекомендованным для обеспечения требований качества конкретной детали. Однако, постоянные затраты  $C_{\text{пост}}$  при использовании результатов разработанной методики меньше аналогичной составляющей на 22 %. При определении себестоимости производства партии деталей получено, что  $C_{\text{пост}}$  для заводского варианта превышает величину аналогичной составляющей себестоимости по предложенной методике почти в 6 раз.

Вариативный характер методики континуального проектирования операций шлифования реализуется при известной перспективной ситуации. При этом в соответствии с имеющимися рекомендациями обработку каждой партии заготовок необходимо выполнять ШК определенной характеристики, с суммарным временем 695 мин (в соответствии с данными техпроцессов). Разработанная методика континуального проектирования операций шлифования позволяет определить характеристики ШК и режимы шлифования, позволяющие обработать все партии заготовок с минимальными затратами времени, а также сформировать порядок замены инструментов на станке.

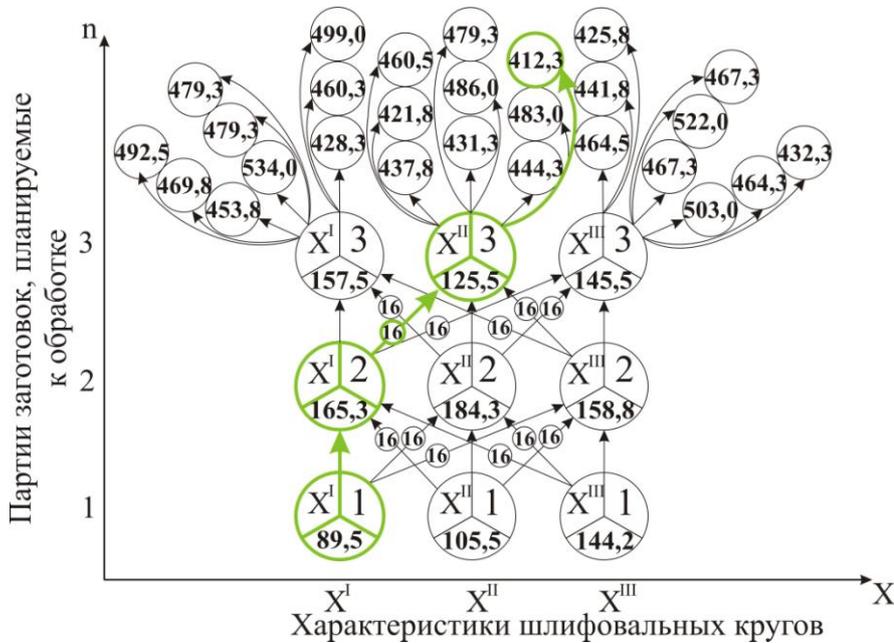


Рис. 28. Результаты реализации вариативного характера методики континуального проектирования операций шлифования

замены ШК на станке при обработке запланированных партий заготовок (рис. 28). Внутри события «обработка партии заготовок ШК определенной характеристики» (большой круг) на рис. 28 приведен номер обрабатываемой партии заготовок (1...3), обозначение характеристики круга ( $X^I \dots X^{III}$ ) и величина оперативного времени. Внутри события «замена ШК» (малый круг) приведена величина времени, на замену ШК.

Для рассматриваемого примера видно, что рациональным порядком замены ШК на станке является вариант «I–I–II». При этом уже определены режимы шлифования (подача ШК) для обработки каждой партии заготовок ШК выбранной характеристики. Сокращение времени обработки всех партий заготовок в сравнении с рекомендациями ОМН составляет 1,7 раза.

Таким образом, показана практическая значимость и работоспособность разработанной методики континуального проектирования операций шлифования, основывающейся на прогнозировании работоспособности ШК для различных технологических условий (обрабатываемые материалы, требования по точности, шероховатости) и позволяющей повысить эффективность операций шлифования.

**Седьмая глава** посвящена внедрению результатов работы.

Обобщение результатов расчета параметра «долговечность» по модели (4) позволило сформировать рекомендации по назначению марки абразивного зерна для шлифования материалов, относящихся к различным группам обрабатываемости (I–

После прогнозирования работоспособности рекомендованных ШК, определения режимно-временной области их эксплуатации при обработке всех партий заготовок для каждого ШК определен режим шлифования, обеспечивающий минимум оперативного времени при обработке каждой партии заготовок.

Затраты времени на установку ШК характеристики, отличной от установленного на станке, должны быть учтены при определении целевой функции (1). В результате получен полный перебор возможных вариантов порядка

VIII). Для этого абразивные материалы ранжированы в соответствии с коэффициентом применимости (1...5), определенным исходя из величины их долговечности при обработке разных марок сталей и сплавов (рис. 29).

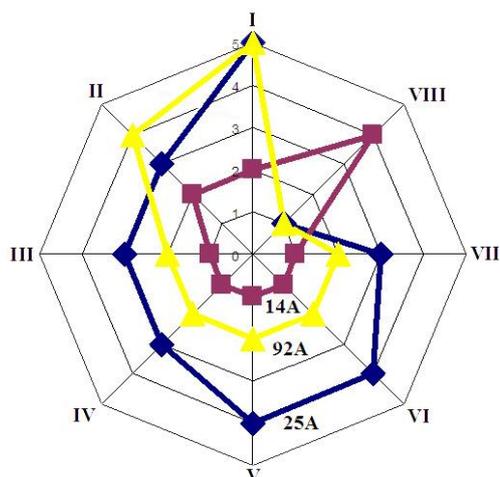


Рис. 29. Относительная оценка работоспособности абразивных материалов

В итоге область эксплуатации ШК, изготовленных из различных абразивных материалов, существенно расширилась. Это позволяет более эффективно использовать ресурс работоспособности инструмента при проектировании операций шлифования в современных условиях многономенклатурного производства.

Полученная относительная оценка применимости различных абразивных материалов дополнила существующую методику выбора параметров характеристики ШК в справочнике по режимам шлифования.

В справочнике также представлен раздел по величинам периода стойкости ШК, полученных по результатам имитационного моделирования эксплуатационных показателей ШК при помощи системы прогнозных моделей и методики, предложенных в работе. Раздел впервые связывает характеристику ШК и параметры его эксплуатации.

Справочник прошел апробацию на 99 предприятиях РФ и используется в технологических службах при проектировании операций шлифования, а также в учебном процессе в заведениях высшего и среднего образования.

Разработанный РТМ «Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов» внедрен на машиностроительных предприятиях в качестве технологических рекомендаций, а также на предприятиях, осуществляющих реализацию абразивной продукции в качестве материалов для информационного сопровождения инструмента.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов работы составил 1 282 468 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача, имеющая важное государственное хозяйственное значение, связанная с повышением эффективности операций шлифования в условиях современного многономенклатурного производства на основе применения разработанной новой методики континуального проектирования операций шлифования, базирующейся на прогнозировании работоспособности шлифовальных кругов в широком диапазоне технологических условий их эксплуатации.

Разработано научное обеспечение концептуально нового подхода к проектированию операций шлифования, выполняемых в условиях многономенклатурного производства, включающее математические модели износа абразивного зерна и площадки затупления на абразивном зерне, комплекс стохастических имитационных моделей, позволяющих прогнозировать работоспособность ШК в широком диапазоне технологических условий проектируемой операции, комплекс методик континуального проектирования операций шлифования, прогнозирования эксплуатационных показателей и определения периода стойкости ШК, результаты дифференцированной оценки интенсивности механического и физико-химического износов абразивных зерен и адекватные доказательства разработанных моделей.

Разработано технологическое обеспечение проектирования операций шлифования для условий многономенклатурного производства, включающее комплекс инженерных методик и рекомендаций по проектированию и реализации операций шлифования, рег-

ламентирующих выбор параметров проектируемой операции шлифования с учетом конкретных технологических условий ее выполнения при обеспечении всех требований чертежа детали и минимизации затрат времени на ее выполнение, результаты экспериментальных исследований работоспособности ШК на операциях шлифования заготовок из материалов различных групп обрабатываемости.

Разработанное в диссертационной работе научное и технологическое обеспечение концептуально нового подхода к проектированию операций шлифования, выполняемых в условиях многономенклатурного производства, позволило повысить эффективность операций шлифования за счет сокращения номенклатуры ШК для конкретных условий их эксплуатации, снижения основного технологического времени обработки за счет рационального использования ресурса работоспособности инструмента и затрат на приобретение ШК.

Проведенный комплекс исследований по проблеме повышения эффективности операций шлифования позволяет сделать следующие выводы.

1. Обоснована необходимость проектирования операций шлифования на основе учета сведений о ШК, которые отражают уровень его работоспособности в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования). Работоспособность любого ШК континуальна – изменяется в зависимости от условий выполняемой операции, времени работы инструмента и характеризуется режимно-временной областью. Проектирование операций шлифования на основе учета работоспособности ШК впервые позволяет определить рациональные режимы шлифования в зависимости от требований, предъявляемых к операции.

2. На основе учета свойства континуальности работоспособности ШК разработана новая методика континуального проектирования, впервые позволяющая проектировать операции шлифования с учетом работоспособности инструмента. Принципиальное отличие разработанной методики в том, что работоспособность ШК рассматривается в широком диапазоне технологических условий – при обработке заготовок из различных материалов с выполнением разных требований к качеству обработки, чего не позволяют сделать существующие и применяемые в настоящее время методики проектирования операций шлифования. Это является существенной предпосылкой для повышения эффективности операций шлифования, реализуемых в современных условиях многономенклатурного производства.

3. Разработана математическая модель долговечности абразивного зерна, реализованная на основе кинетической теории прочности твердых тел, позволившая установить взаимосвязь между технологическими условиями эксплуатации ШК и механическим износом единичного абразивного зерна. Это позволяет оценивать работоспособность того или иного абразивного инструмента в широком диапазоне технологических условий его эксплуатации.

Установлено, что увеличение температуры в зоне шлифования с 400 до 800 °С повышает долговечность абразивного зерна более чем на 60 %, изменение зернистости с F90 до F46 – более чем на 50 %. Увеличение площадки затупления оказывает характеристическое влияние на долговечность абразивного зерна: для каждой зернистости существует определенная площадка затупления, при которой долговечность абразивного зерна максимальна.

4. Оценка интенсивности физико-химического износа, характеризуемого коэффициентом химического сродства, позволила охватить номенклатуру шлифуемых материалов различного химсостава и впервые позволила установить степень влияния различных компонентов обрабатываемого материала на интенсивность протекания данного вида износа. Это позволяет расчетным путем определять коэффициент сродства для прогнозирования величины физико-химического износа абразивного зерна при шлифовании.

Установлено, что увеличение в 2 раза содержания в обрабатываемом материале углерода снижает коэффициент сродства на 27 %; увеличение содержания хрома до 1 % снижает коэффициент сродства в 2,2...2,4 раза; рост его концентрации более 1 % увеличивает коэффициент сродства более чем на 20 %; увеличение в обрабатываемом материале

содержания никеля до 1 % приводит к увеличению коэффициента сродства почти на 30 %, а дальнейший рост его концентрации уменьшает коэффициент сродства практически в 3 раза; рост концентрации титана в сплавах ВТ до 95 % приводит к возрастанию коэффициента сродства практически на 30 %; марганцовистые стали имеют тенденцию к росту коэффициента сродства порядка 30 % с увеличением концентрации углерода в 2 раза.

5. Разработана математическая модель износа абразивного зерна, учитывающая механический и физико-химический механизмы износа, позволяющая определять величину износа в зависимости от времени работы инструмента и условий его эксплуатации (режимы шлифования, механические и физико-химические свойства обрабатываемого и абразивного материала).

6. Выявлено соотношение механического и физико-химического износа абразивного зерна при обработке различных обрабатываемых материалов, необходимое для количественной оценки каждого из механизмов износа при эксплуатации ШК в широком диапазоне технологических условий. Это соотношение составило: для стали, легированной хромом и кремнием – 60/40; для стали, легированной марганцем – 70/30; для титанового сплава – 60/40.

7. Разработана математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, которая впервые позволяет спрогнозировать ее величину с учетом основных факторов эксплуатации инструмента – обрабатываемого материала, режимов шлифования, времени работы, параметров характеристики инструмента. Установлено, что за время работы инструмента происходит изменение величины площадки: при работе ШК зернистостью F60 – на 15 %, F46 – более чем на 70 %. Модель позволяет определить размер площадки затупления единичного абразивного зерна ШК для различных технологических условий его эксплуатации, что дает возможность прогнозирования работоспособности инструмента.

8. Разработана методика прогнозирования работоспособности ШК, впервые позволяющая на основе комплекса имитационных стохастических моделей с учетом разработанной математической модели размера площадки затупления единичного абразивного зерна прогнозировать работоспособность инструмента в широком диапазоне технологических условий его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования). В основу методики положен учет изменения размера площадки затупления абразивного зерна во времени работы инструмента, что впервые позволяет расчетным путем определять область его работоспособности, что в свою очередь, является предпосылкой для повышения эффективности операций шлифования для широкого диапазона технологических условий их реализации.

9. Разработана методика определения периода стойкости ШК, учитывающая характеристику абразивного инструмента и технологические условия его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования), основанная на определении режимно-временной области эксплуатации инструмента, полученной по результатам прогнозирования его работоспособности, с одновременным выполнением всех технологических ограничений операции шлифования.

10. Разработан комплекс инженерных методик проектирования операций шлифования для условий многономенклатурного производства, в котором учитывается работоспособность инструмента. Методики базируются на сравнительном анализе эксплуатационных свойств различных ШК, выделении режимно-временной зоны их рациональной эксплуатации и одновременном определении пары «характеристика ШК–режим шлифования» для выполнения операции шлифования в конкретных технологических условиях с обеспечением всех требований чертежа детали при минимуме технической нормы времени.

11. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение модуля технологической подготовки производства «Т&Tool», позволяющего выполнять проектирование операций шлифования (выбор характеристики ШК и режима шлифования) для партий различных заготовок, подлежащих обработке в планируемом периоде времени.

12. По результатам работы создана методика назначения марки абразивного материала при проектировании операций шлифования, а также получены данные по средним величинам периода стойкости различных ШК. Данные материалы оформлены в виде соответствующих разделов справочника по режимам шлифования. Разработанный руководящий технический материал «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов» содержит методику прогнозирования работоспособности инструмента и инженерные методики проектирования операций шлифования в многономенклатурном производстве.

Указанные технологические рекомендации внедрены на машиностроительных предприятиях РФ, в учебных заведениях высшего и среднего профессионального образования.

13. Практическое использование методики континуального проектирования операций шлифования, методики прогнозирования работоспособности ШК, а также инженерной методики проектирования операций шлифования позволили:

- определить режим шлифования для ШК определенной характеристики, повысив тем самым эффективность использования ресурса его работоспособности при эксплуатации в изменяющихся технологических условиях (разные марки обрабатываемого материала, требования к качеству обработки и т.д.), что позволило сократить основное технологическое время обработки до 20 %;

- определить пару «характеристика ШК–режим шлифования» для изготовления партий различных деталей, сократив тем самым номенклатуру абразивного инструмента, применяемого для реализации операций шлифования, что позволило повысить эффективность шлифования на 15 % на одну деталь и 60 % на партию деталей за счет снижения себестоимости изготовления;

- сформировать рациональный порядок замены ШК различных характеристик на станке для обработки различных партий заготовок в планируемом периоде времени, сократив тем самым суммарное время обработки этих партий, что привело к повышению эффективности операций шлифования практически на 70 % за счет сокращения суммарного времени обработки всех партий заготовок.

14. Внедрение результатов работы в производственных условиях ПАО «Агрегат» (г. Сим), АО «Кыштымское машиностроительное объединение» (г. Кыштым), ООО «Уральский завод спецтехники» (г. Миасс), ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения» (г. Екатеринбург), ООО «Уральский механический завод» (г. Первоуральск) и др. позволило повысить эффективность операций шлифования за счет рационального использования ресурса работоспособности инструмента, что привело к сокращению основного технологического времени обработки различных деталей на 15...20 %, номенклатуры применяемого инструмента на 15...20 % и снижению затрат на приобретаемый абразивный инструмент на 25...30 %.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Ардашев, Д.В. Определение периода стойкости шлифовального круга на основе его технологического эксплуатационного паспорта / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – СПб: Политехника, № 1 (55), 2010. – С. 23–27.

2. Ардашев, Д.В. Химическое сродство абразивного и обрабатываемого материалов / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2011. – № 6. – С. 29–32.

3. Ардашев, Д.В. Термомеханическая усталость абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2012. – № 4. – С. 2–4.

4. Ардашев, Д.В. Эксплуатационные характеристики шлифовального круга в виде технологического паспорта / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 26–28.

5. Ардашев, Д.В. Комплекс показателей оценки эксплуатационных свойств шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – 2010. – № 9. – С. 30–33.

6. Ардашев, Д.В. Стенд для исследования взаимодействия абразивного зерна и образца в процессах абразивной обработки / Д.В. Ардашев, В.В. Ахлюстина // Технология машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 27–28.

7. Ардашев, Д.В. Напряженно-деформированное состояние абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев, И.С. Болдырев // Технология машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 27–30.

8. Дьяконов, А.А. Имитационное моделирование процессов шлифования на основе применения высокопроизводительных кластеров и технологий параллельных вычислительных процессов / А.А. Дьяконов, Д.В. Ардашев, А.В. Лепихов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/2. – С. 29–34.

9. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 33. – С. 113–116.

10. Ардашев, Д.В. Определение величины механического износа абразивных зерен при шлифовании / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 55–65.

11. Ардашев, Д.В. Термофлуктуационный механизм износа абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // Научные технологии. – 2013. – № 12. – С. 23–28.

12. Ардашев, Д.В. Прогнозирование работоспособности абразивного инструмента при проектировании многономенклатурных операций / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2014. – № 9. – С. 14–17.

13. Ардашев, Д.В. Прогнозирование долговечности абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2014. – № 10. – С. 27–31.

14. Ардашев, Д.В. Алгоритмическая рекурсивная модель площадки затупления абразивного зерна / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 17–19.

15. Ардашев, Д.В. Континуальное проектирование операций шлифования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // СТИН. – 2016. – № 8. – С. 33–37.

16. Ардашев, Д.В. Геометрическая имитационная модель процесса шлифования с учетом износа абразивного зерна / Д.В. Ардашев, Л.В. Шипулин // СТИН. – 2016. – № 8. – С. 18–22.

17. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение операций абразивной обработки на основе вариативного проектирования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // СТИН. – 2016. – № 11. – С. 32–35.

18. Ардашев, Д.В. Проектирование операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // Известия ВолГУ, № 9. – 2017. – С. 98–102.

#### **Публикации в журналах, цитируемых Scopus**

19. Ardashev, D.V. Standardization of Grinding Wheels / D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, No 9. – P. 910-912.

20. Ardashev, D.V. Predicting the Performance of Abrasive Tools in Process Design for Diversified Production / D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 3. – P. 206–208.

21. Ardashev, D.V. Predicting the Working Life of Abrasive Grains // D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 4. – P. 302–304.

22. Ardashev, D.V. Predicting the Physicochemical Wear of an Abrasive Grain in Grinding // D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 5. – P. 394–397.

23. Ardashev, D.V. Recursive Model of the Blunting of an Abrasive Grain / D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, No. 9. – P. 781–783.

24. Ardashev, D.V. Algorithmic Model of the Continuum Design of Grinding / D.V. Ardashev, V.I. Guzeev // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, No. 11. – P. 979–981.

25. Ardashev, D.V. Continuum Design of Grinding Operations / D.V. Ardashev, V.I. Guzeev // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, No 2. – P. 164–166.

26. Ardashev, D.V. Simulation of Grinding with Wear of the Abrasive Grains / D.V. Ardashev, L.V. Shipulin // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, No. 2. – P. 150–153.

27. Ardashev, D.V. Mathematic Model of a Blunting Area of an Abrasive Grain in Grinding Processes, with Account Different Wear Mechanisms / D.V. Ardashev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 500–504.

28. Ardashev, D.V. Prediction of Intensity of Physicochemical Interaction of Abrasive and Workpiece Material Depending on the Chemical Composition of the Material being Machined / D.V. Ardashev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129 – P. 505–509.

#### **Публикации в журналах, цитируемых Web of Science**

29. Ardashev, D.V. Definition of Abrasive Grain Wear upon Grinding from the Standpoint of the Kinetic Theory of Strength / D.V. Ardashev // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, No 3. – P. 266–272.

30. Ardashev, D.V. Physicochemical Wear of Abrasive Grains During Grinding Processes / D.V. Ardashev // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, No 4. – P. 284–289.

31. Ardashev, D.V. Mathematical Model of the Grinding Force with Account for Blunting of Abrasive Grains of the Grinding Wheel / D.V. Ardashev, A.A. Dyakonov // Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of ASME. – 2017. – Vol. 139. Номер статьи – 121005.

32. Dyakonov, A.A. Prediction of Blunting Area of Abrasive Grains on a Grinding Wheel / D.V. Ardashev, A.A. Dyakonov // Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of ASME. – 2017. – Vol. 139. Номер статьи – 121004.

#### **Технологические рекомендации**

33. Ардашев, Д.В. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик и др. – Челябинск: АТОКСО, 2007. – 384 с.

34. Ардашев, Д.В. Абразивная обработка: наладка, режимы резания. 2-е изд., перераб. и доп.: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: АТОКСО, 2012. – 386 с.

35. РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов». Челябинск, Уральский НИИ абразивов и шлифования. – 2012. – 20 с.

#### **Монографии**

36. Ардашев, Д.В. Научные основы технологической паспортизации шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Прогрессивные инструменты и технологии шлифования / Д.В. Ардашев, Ю.В. Василенко, В.Г. Гусев и др. – М.: Спектр, 2013. – Разд. 3. – С. 113–186.

37. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение операций шлифования в условиях многономенклатурного производства / Д.В. Ардашев // Наука и технологии / С.В. Абдурахманов, К.Г. Аvezов, Д.В. Ардашев и др. – М.: РАН. – 2012. – С. 197–220.

#### **Отчеты о НИР**

38. Режимно-инструментальное оснащение операция абразивной обработки (доп. работа) [Текст]: отчет о НИР / Уральский НИИ абразивов и шлифования; рук. Ардашев Д.В.; исполн.: Уразбахтин Б.Ф. [и др.] – Челябинск, 2007. – 151 с.

39. Комплекс научно-исследовательских работ по режимно-инструментальному обеспечению операций абразивной обработки [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) / Уральский НИИ абразивов и шлифования; рук. Ардашев Д.В.; исполн.: Уразбахтин Б.Ф. [и др.] – Челябинск, 2008. – 47 с.

40. Комплекс научно-исследовательских работ по исследованию режущих свойств абразивных инструментов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) / Уральский НИИ абразивов и шлифования; рук. Ардашев Д.В.; исполн.: Уразбахтин Б.Ф. [и др.] – Челябинск, 2009. Ч. I – 80 с., Ч. II – 134 с.

41. Комплекс научно-исследовательских работ по исследованию режущих свойств абразивных инструментов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): / Уральский НИИ абрази-

вов и шлифования; рук. Ардашев Д.В.; исполн.: Уразбахтин Б.Ф. [и др.] – Челябинск, 2010. – 66 с.

### **Патенты**

42. Пат. 107996 Российская Федерация, МПК В 24 В 49/00. Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента [Текст] / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2011106953/02; заявл. 24.02.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25. – 5 с.: ил.

43. Пат. 113362 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00. Стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки [Текст] / Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов, А.А. Кошин; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2011141414/28; заявл. 12.10.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. – 5 с.: ил.

44. Пат. 127923 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/58. Стенд для исследования многоциклового взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки [Текст] / Д.В. Ардашев; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2012134174/28; заявл. 09.08.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 5 с.: ил.

### **Другие публикации**

45. Ардашев, Д.В. Особенности контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом в процессах шлифования / Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов // Механика и процессы управления. Труды XXXIX Уральского семинара. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 364–374.

46. Ардашев, Д.В. Проектирование операций шлифования на основе алгебры логики / Д.В. Ардашев // Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2015. – № 1. – С. 17–21.

47. Ардашев, Д.В. Основные механизмы износа абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2013. – № 4. – С. 40–43.

48. Ардашев, Д.В. Моделирование контактного взаимодействия абразивного зерна с заготовкой при шлифовании / Д.В. Ардашев // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ – 2014. – С. 1551–1558.

49. Ардашев, Д.В. Информационное обеспечение современного многономенклатурного производства / Д.В. Ардашев // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ – 2014. – С. 1540–1546.

50. Ардашев, Д.В. Повышение эффективности операций шлифования на основе учета работоспособности шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С. 20–23.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,00. Тираж 100 экз. Заказ / .

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76