

На правах рукописи



ПЛЕШАКОВА Екатерина Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ
КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПО ПАРАМЕТРАМ ДЕФЕКТОВ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мартынов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: **Агапов Сергей Иванович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет» (г. Волгоград),
профессор кафедры «Технология
машиностроения»

Лукьянов Александр Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (г. Ростов-на-Дону),
заведующий кафедрой «Автоматизация
производственных процессов»


Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рыбинский авиационный
технический университет
имени П.А. Соловьёва» (г. Рыбинск)

Защита состоится «25» декабря 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 410005, г. Волгоград, проспект им. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте www.vstu.ru

Автореферат разослан «_____» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Крайнев Дмитрий
Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современное производство характеризуется широким применением легированных сталей и сплавов, а также других материалов с высокими прочностными характеристиками. Для повышения качества процессов их лезвийной обработки создается инструмент с модифицированной различными способами рабочей частью, в частности воздействием низкотемпературной плазмы. Воздействие позволяет формировать наноструктуры в поверхностном слое рабочей части и на этой основе повышать в 1,5-2,5 раза надежность инструмента по показателям безотказности и долговечности за счет сокращения количества образующихся дефектов. Если же инструмент работает на сочетании значений параметров технологического режима, близком к оптимальному, то создаются условия для дальнейшего повышения его надежности, обеспечивающего стабилизацию значений параметров точности изготавливаемых деталей. Изложенное определяет целесообразность проведения исследований, направленных на поиск таких условий. При этом максимальная результативность будет обеспечена, если вести поиск в автоматизированном режиме с использованием соответствующего программно-математического обеспечения.

Цель работы: повышение надежности металлорежущего инструмента с модифицированной рабочей частью на основе автоматизированного оценивания качества процесса его эксплуатации.

Объект исследования: рабочая часть металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда.

Предмет исследования: состояние рабочей части, сформированное в процессе эксплуатации инструмента, и алгоритмизация его оценивания по параметрам дефектов.

Методы и средства исследования. Работа представляет собой комплекс исследований, направленных на обоснование возможности использования дефектов для проведения достоверной оценки результатов процесса эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента, выполненных с привлечением соответствующих разделов теорий резания, прочности и изнашивания, вероятностей и математической статистики, моделирования, методов экспертной оценки, положений технологии машиностроения и материаловедения. Экспериментальные исследования проведены методом математического моделирования на ЭВМ по результатам производственной эксплуатации инструмента различного целевого назначения и данным о его дефектах, полученным с помощью стандартной измерительной аппаратуры.

Научная новизна работы заключается в установлении взаимосвязи между условиями эксплуатации и параметрами дефектов рабочей части металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, обосновании способа и разработке математического и алгоритмического обеспечения для оценивания этой взаимосвязи с использованием вероятностного моделирования.

Практическая ценность работы состоит в создании программного комплекса для автоматизированного оценивания и анализа результатов модификации и эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента, позволяющего осуществлять целенаправленный поиск условий для их оптимизации.

Реализация работы была осуществлена по результатам стойкостных испытаний модифицированных сменных многогранных твердосплавных пластин в лаборатории кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ОАО «Саратовский подшипниковый завод», ОАО «Саратовский агрегатный завод» и вагоноремонтном депо ВЧД-5 (ж/д ст. Сортировочная-Фарфоровская Октябрьской железной дороги) при изготовлении деталей (в том числе военной техники) из сталей 45, 45ГСФ, ШХ-15, 40Х, 12Х2Н4А, 30ХГСА и 35ХГСЛ на универсальном и специальном колесотокарном станках, а также токарном, токарно-фрезерном и многоцелевом станках с ЧПУ и позволила не только подтвердить достоверность основных научных положений и выводов, но и разработать рекомендации по повышению эффективности использования модифицированного инструмента.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-практической Интернет-конференции с международным участием «Bringing Science to Life – Наука и жизнь» (Саратов, 2013), Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2013» (Казань, 2013), Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (Тамбов, 2013), международной научно-технической конференции «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (Дивноморское, 2013), IX Mezinárodní vědecko-praktická konference «Vědecký průmysl evropského kontinentu-2013» (Praha, Čeh. Resp., 2013), IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Wykształcenie i nauka bez granic – 2013» (Przemysł, Pol. Resp., 2013), I Международной заочной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» (Челябинск, 2013), 9-а Международна научна практична конференция «Бъдещето въпроси от света на науката – 2013» (София, Респ. България, 2013), Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2014), XXVII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27» (Саратов, 2014), Международной научно-практической конференции «Инновации в профессиональном образовании и научных исследованиях вуза» (Брянск, 2014), Международной научно-технической конференции «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» (Москва, 2015), Third International Symposium on Optics and Biophotonics and Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS) (Saratov, Russian Federation, 2015), 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (Tomsk, Russia, 2015), IV Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017), заседаниях кафедр «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении», «Проектирование технических и технологических комплексов», «Информационная безопасность автоматизированных систем» и «Технология машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. в 2013-2018 гг.

В 2014 г. проект, включавший материалы работы, участвовал в экспозиции Министерства образования и науки Российской Федерации на Salon L'Etudiant (Paris, France).

Публикации. Материалы работы опубликованы в 36 печатных трудах, в том числе 3 монографиях, 13 статьях в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, 4 статьях в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS, и зарегистрированы в 2 свидетельствах на программы для ЭВМ и 1 свидетельстве на базу данных.

Материалы работы используются в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Компьютерное моделирование в технике» и «Надежность и диагностика технологических систем».

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 165 страницах, списка литературы из 190 наименований, 80 рисунков, 20 таблиц и 4 приложений. Общий объем работы составляет 227 страниц.

Представленные результаты являются завершением исследований, начатых в магистерской диссертации автора на тему: «Автоматизированное оценивание качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента», а также составной частью фундаментальных исследований, выполнявшихся автором в научном коллективе кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» СГТУ имени Гагарина Ю.А. по проектам в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) в 2012-2013 гг., Программы стратегического развития СГТУ имени Гагарина Ю.А. на 2012-2016 гг., гранта РФФИ № 14-08-00396-а на 2014-2016 гг. и гранта У.М.Н.И.К. № 004514 на 2014-2015 гг.

На защиту выносятся следующие научные положения работы, соответствующие пунктам 2, 3, 4 паспорта специальности 05.02.07 и определяющие новизну решенных в ней задач:

1. Результаты экспериментального исследования процесса изменения состояния рабочей части модифицированного инструмента на примере сменных многогранных твердосплавных пластин.

2. Результаты классификации дефектов модифицированного режущего инструмента.

3. Способ (модель и технология ее использования) оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по параметрам дефектов.

4. Программно-математическое обеспечение для оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по параметрам дефектов.

5. Результаты практической реализации оценивания процессов модификации и эксплуатации модифицированного сборного инструмента различного целевого назначения и поиска условий повышения их надежности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрена проблема эксплуатационной надежности металлорежущего инструмента, в том числе с модифицированной воздей-

ствием низкотемпературной плазмы рабочей частью. Отмечено, что различным аспектам решения этой проблемы применительно к обычному инструменту, в том числе с защитными покрытиями, посвящены работы В.А. Бобровского, Г.И. Грановского, Н.Н. Зорева, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова, В.Ф. Безъязычного, А.С. Верещаки, С.Н. Григорьева, С.В. Грубого, В.Ц. Зориктуева, Ю.Г. Кабалдина, Б.Я. Мокрицкого, А.Л. Плотникова, В.Н. Подураева, В.В. Постнова, А.А. Рыжкина, В.Г. Солоненко, В.П. Табакова, Ю.Л. Чигиринского. Работы по низкотемпературной плазменной модификации инструмента и исследованию его надежности в процессе эксплуатации ведутся в СГТУ имени Гагарина Ю.А. под руководством Б.М. Бржозовского. Однако вопросы оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента и поиска условий для повышения его надежности в этих исследованиях не рассматривались. С учетом этого была сформулирована цель работы и поставлены задачи, решение которых обеспечивает ее достижение:

1. Экспериментально-аналитическое исследование процесса изменения состояния рабочей части модифицированного инструмента на примере сменных многогранных твердосплавных пластин.

2. Разработка способа оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по результатам эксплуатации.

3. Разработка программно-математического обеспечения для оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента.

4. Практическая реализация оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента.

Решению 1 и 2 задач посвящена *вторая глава* работы. Решение 1 задачи осуществлялось по материалам стойкостных испытаний модифицированного инструмента в условиях реального производства на российских предприятиях различных отраслей (оборонной, авиационной, подшипниковой, транспортной). Результаты позволили установить, что наиболее характерным следствием модификации является повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов на его рабочих поверхностях. Традиционные дефекты отличаются по внешнему виду от аналогичных дефектов обычного инструмента. Отличие связано с видом изнашивания, которое у модифицированного инструмента имеет характер механического истирания без обнажения исходной матрицы и образования сетки трещин. Поверхности являются притертыми, края поверхностей не имеют острых кромок и выступов. Образование новых дефектов связано с отличным от традиционного поведением модифицированного слоя при воздействии температурно-силовых нагрузок, и проявляется в перемещении в различных направлениях его микрообъемов в зоне контактного взаимодействия с отделяемым материалом. Это позволило сделать вывод о том, что оценивание качества процесса эксплуатации инструмента с модифицированной рабочей частью можно осуществлять по параметрам дефектов.

Результаты классификации дефектов, выполненной методами кластерного анализа и обработки категоризированных данных, позволили объединить дефекты в 3 группы: микролокальные, микроповерхностные и макро (табл. 1).

Дефекты модифицированного режущего инструмента

№	Микролокальные	№	Микроповерхностные	№	Макро
1	Истирание покрытия*	7	Козырек*	13	Проточина
2	Микротрещина	8	Наплыв*	14	Лунка износа
3	Истирание зерен матрицы	9	Несплошности	15	Фаска износа
4	Вырыв зерен	10	Трещины	16	Точечные (розетка)*
5	Деформирование матрицы	11	Пропахивание (микропроточкины)	17	Выкрашивание
6	Вкрапление продуктов износа в поверхность	12	Налипание обрабатываемого материала на продукты износа	18	Отслаивание покрытия
				19	Локальные разрушения

* – непосредственный результат движения микрообъемов

При решении 2 задачи было принято во внимание, что в последнее время для оценивания качества процесса эксплуатации инструмента все чаще начинает применяться имитационное моделирование. Основная цель при этом состоит в воспроизведении поведения изучаемой модели и количественной оценке наиболее существенных взаимосвязей ее входных и выходных переменных.

Обычно параметрами моделей исследования качества и надежности являются вероятности или интенсивности переходов между состояниями, которые содержат информацию об основных закономерностях реакции объекта на действие возмущающих факторов, а также о структуре объекта, т.е. о том, как соотносятся между собой его основные элементы и выходные характеристики. В данном случае объектом является постэксплуатационное состояние рабочей части модифицированного инструмента, взаимосвязь которого с условиями эксплуатации определяется через дефекты, образовавшиеся на рабочей части. Поэтому для определения параметров модели были использованы степени относительной значимости дефектов $K_{i,j}^{омн}$. Для их определения в работе предложен и реализован подход, основанный на попарном сравнения дефектов между собой по некоторой совокупности признаков с помощью метода расстановки приоритетов и разработанной стратегии принятия решений при сравнении. В качестве признаков с позиций основных положений теории резания, а также результатов анализа материалов опытно-промышленной эксплуатации модифицированных сменных многогранных твердосплавных пластин были отобраны основные факторы, влияющие на образование дефектов: параметры технологического режима, радиус округления и толщина пластины, толщина модифицированного слоя, химический состав, твердость и зернистость инструментального материала, химический состав и твердость обрабатываемого материала, схема обработки, размеры дефектов по параметру суммарной площади (или объему), занимаемой на рабочей части.

Результаты определения степеней относительной значимости дефектов

Дефекты (табл. 1)	Факторы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$K_{i,j}^{отн.} (i = 1, \dots, 19, j = 1, \dots, 13)$												
1	0,064	0,068	0,057	0,066	0,066	0,062	0,068	0,039	0,039	0,034	0,064	0,043	0,069
2	0,055	0,053	0,093	0,062	0,051	0,054	0,059	0,040	0,040	0,047	0,060	0,067	0,030
3	0,046	0,055	0,044	0,048	0,050	0,048	0,054	0,065	0,065	0,050	0,072	0,050	0,061
4	0,050	0,050	0,044	0,043	0,047	0,047	0,056	0,068	0,068	0,061	0,064	0,060	0,046
5	0,055	0,058	0,051	0,059	0,058	0,061	0,062	0,069	0,069	0,052	0,037	0,058	0,044
6	0,068	0,061	0,061	0,055	0,062	0,059	0,060	0,039	0,039	0,043	0,066	0,056	0,062
7	0,064	0,058	0,061	0,057	0,061	0,064	0,065	0,039	0,039	0,030	0,039	0,050	0,037
8	0,062	0,057	0,059	0,061	0,060	0,061	0,061	0,039	0,039	0,033	0,036	0,051	0,062
9	0,054	0,057	0,057	0,064	0,055	0,061	0,057	0,040	0,040	0,061	0,064	0,062	0,058
10	0,042	0,047	0,047	0,057	0,057	0,055	0,040	0,063	0,063	0,059	0,037	0,055	0,033
11	0,039	0,042	0,036	0,034	0,037	0,037	0,033	0,057	0,057	0,066	0,043	0,043	0,062
12	0,060	0,054	0,056	0,051	0,053	0,053	0,060	0,039	0,039	0,050	0,068	0,062	0,062
13	0,047	0,055	0,049	0,052	0,053	0,051	0,060	0,066	0,066	0,061	0,053	0,047	0,040
14	0,044	0,047	0,049	0,044	0,045	0,048	0,036	0,066	0,066	0,057	0,054	0,043	0,062
15	0,052	0,051	0,052	0,052	0,051	0,051	0,058	0,066	0,066	0,059	0,054	0,051	0,063
16	0,064	0,058	0,059	0,054	0,058	0,058	0,060	0,039	0,039	0,043	0,040	0,048	0,035
17	0,037	0,042	0,043	0,045	0,042	0,043	0,031	0,062	0,062	0,064	0,047	0,058	0,043
18	0,055	0,053	0,051	0,066	0,057	0,057	0,050	0,039	0,039	0,066	0,062	0,054	0,062
19	0,042	0,034	0,031	0,030	0,037	0,030	0,030	0,065	0,065	0,064	0,040	0,042	0,069

Результаты определения значений $K_{i,j}^{отн.}$ представлены в табл. 2. Параметры модели – вероятности $P_{k,l}$ переходов между состояниями – определялись по следующим выражениям:

$$P_{s,p} = K_{s,p}^{компл.} \times (N-1) / \left(\sum_{j=1}^N K_{s,p}^{компл.,j} \times N \right), \text{ если } N > 2 \quad (1)$$

$$P_{s,p} = K_{s,p}^{компл.} / \sum_{j=1}^N K_{s,p}^{компл.,j}, \text{ если } N = 2, \quad (2)$$

где $K_i^{компл.} = \sum_{l=1}^m K_{i,l}^{отн.} \cdot \rho_l \cdot \delta$ – взвешенные комплексные оценки значимости дефектов по всей совокупности признаков; ρ – относительные величины значимости каждого признака ρ_i в их общей сумме, определенные аналогично $K_{i,j}^{отн.}$, δ – показатель, учитывающий степень влияния признака на стадиях формирования и развития дефектов, N – число направлений переходов из состояния.

Материалы выполненных исследований легли в основу разработки способа оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента с использованием модели процесса формирования его состояния (рис.1) и имитационного моделирования. Основным результатом моделирования является определение времени достижения модифицированным инструментом поглощающих состояний: 6 (при условии, что вероятность $P_{6,2}$ становится равной нулю) или 10, т.е. наработки до отказа или времени стойкости под действием входных сигналов в виде совокупностей: дефектов; параметров, характеризующих условия контактных взаимодействий; параметров, характеризующих обрабатываемый материал и модифицированный слой. Полученная статистика наработок до отказа позволяет идентифицировать закон распределения времени стойкости модифицированного инструмента и вычислить его вероятностные характеристики.

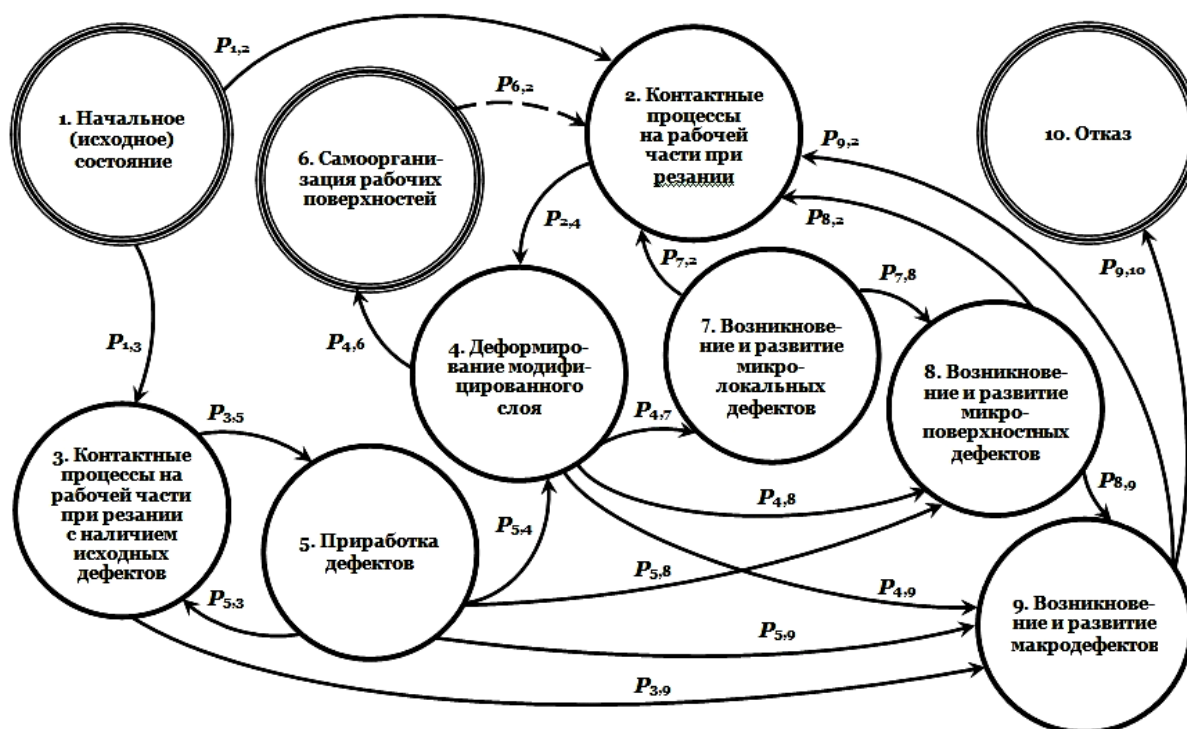


Рис. 1. Модель процесса формирования состояния модифицированного инструмента

Для практической реализации процедуры моделирования были решены следующие задачи:

- поиск наиболее эффективных и экономичных приемов, позволяющих осуществлять «движение» инструмента в структуре модели, т.е. разработка технологии моделирования;
- разработка расчетной схемы времени самоорганизации модифицированного слоя.

Результаты решения первой задачи связаны с обоснованием схем, позволяющих определять момент и направление перехода инструмента из состояния в состояние, а также шага моделирования.

В первом случае были обоснованы схемы, в которых для определения момента и направления перехода используется одно случайное число, что значительно сокращает время вычислений. Достоверность вычислений обеспечивается, во-первых, количеством реализаций процедуры имитационного моделирования, во-вторых, количеством циклов самоорганизации в каждой реализации, т.е. статистически.

Во втором случае в качестве шага моделирования было обосновано использование количества циклов стружкообразования, проходящих между актами самоорганизации, которые состоят из смещения и трансформации элементарного микрообъема модифицированного слоя. Значения времен были определены по специально разработанной программе с использованием положений теории резания металлов, результатов измерений микротвердости модифицированного слоя инструмента и материалов его опытно-промышленной эксплуатации.

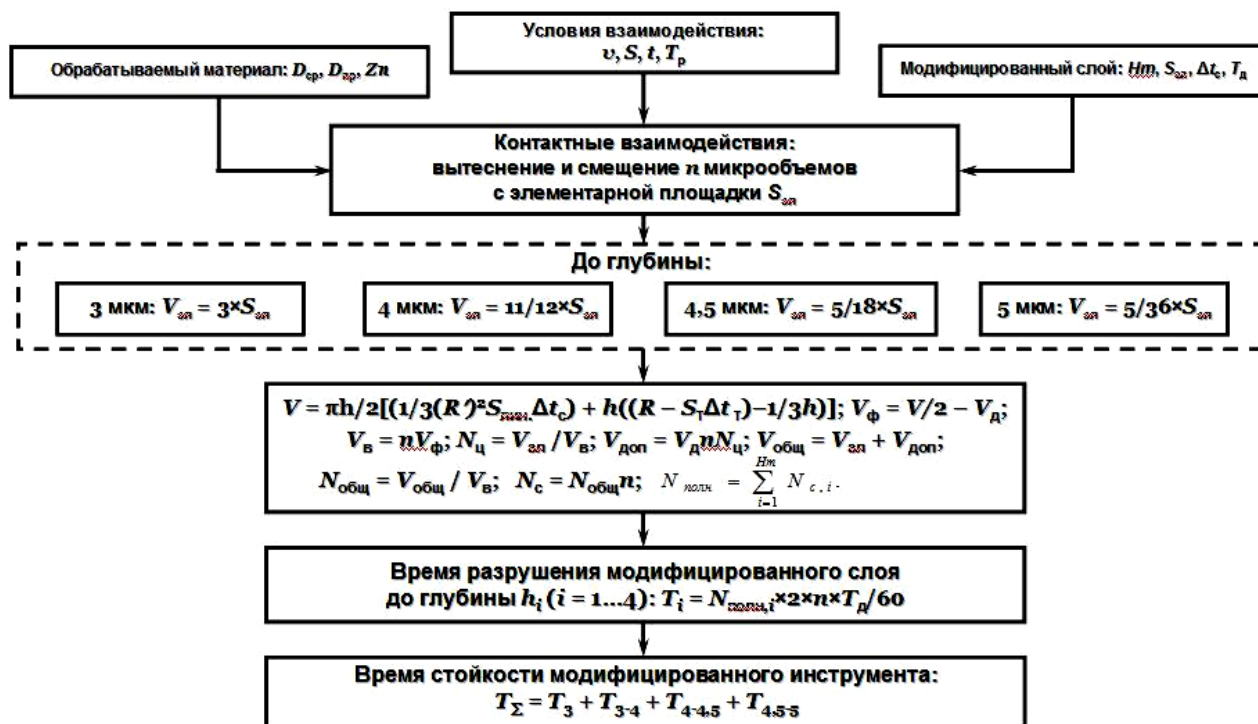


Рис. 2. Расчетная схема процесса самоорганизации модифицированного слоя

Результаты решения второй задачи, по сути, представляют собой сформированную с помощью принятых исходных предпосылок и допущений и использованных на их основе математических соотношений, физических и логических условий расчетную схему процесса постепенного разрушения модифицированного слоя при его контактных взаимодействиях с отделяемым материалом (рис. 2). Данная схема является ядром модели оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента.

Разработанная модель и технология позволили решить вопрос формирования в ходе моделирования траектории изменения состояния модифицированного инструмента, отображающей качество процесса его эксплуатации. С этой целью была реализована процедура, суть которой состоит в следующем. Процесс формирования рассматривался как многоуровневый, и каждому уровню был присвоен свой количественный идентификатор. Значения идентификаторов принимались с учетом более явного отображения тенденции изменения состояния. После завершения каждого цикла самоорганизации и анализа событий в модели к текущему уровню траектории прибавляется значение соответствующего идентификатора. По окончании моделирования производится усреднение по числу его реализаций ансамбля сформированных траекторий, сглаживание усредненной траектории и ее представление в координатах «Время работы инструмента» – «Уровни состояния».

Анализ материалов решения 2 задачи показал целесообразность создания компьютерной системы, позволяющей выполнять все действия по оцениванию состояния рабочей части модифицированного инструмента автоматизировано, т. е. решение 3 задачи. Материалам ее создания посвящена *третья глава* работы. Основным результатом использования системы являются данные о виде и характере дефектов, их местоположении и размерах, морфологическом и химическом соста-

ве поверхности, а также условиях формирования (полной совокупности эксплуатационных параметров). Эта информация становится исходной для реализации процедуры имитационного моделирования процесса формирования состояния модифицированного инструмента по параметрам дефектов его рабочей части. Полученные по результатам моделирования данные подвергаются статистической обработке с использованием как традиционных, так и специальных методов математической статистики, основная цель которой заключается в получении информации о закономерностях изменения состояния модифицированного инструмента в виде закона распределения времени стойкости и вычисления его вероятностных характеристик.

Материалы и результаты исследований, полученные при решении 2 и 3 задач, позволили в *четвертой главе* реализовать процедуру оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента практически, т. е. решить 4 задачу работы с использованием сформированной по результатам опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента базы данных. Работа с базой строилась таким образом, чтобы раскрыть механизмы повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента как до и после модификации, так и после эксплуатации. Результаты обработки данных базы позволили установить следующее.

1. Эксплуатационная надежность модифицированного инструмента зависит от исходных свойств инструментальных материалов и особенностей формирования их поверхностного слоя в процессе изготовления инструмента. Чем в большей степени отличаются механические свойства материалов, тем в меньшей степени обеспечивают сопротивляемость инструмента нагрузкам при резании, даже при работе на сочетаниях параметров технологического режима, близких к оптимальным, тем более неоднородными являются данные о надежности инструмента.

2. Различие в исходных механических свойствах материалов обуславливает и их различное изменение по результатам модификации. Модификация приводит к выравниванию свойств. Это связано с тем, что изменения проявляются не только на количественном, но и на качественном уровнях вследствие различного по характеру уплотнения структуры материалов.

3. Идентификация распределений плотности показала, что они во всех случаях являются логарифмически-нормальными. Это означает, что модификация, улучшая механические свойства материалов, сохраняет их специфические особенности, поскольку факторы (технологические параметры процесса модификации), под влиянием которых формируются значения показателей, характеризующих свойства, действуют не аддитивно, а мультипликативно, т. е. в соответствии со своими величинами. Как следствие, это приводит к различному повышению времени стойкости модифицированных инструментов и по-разному влияет на их постэксплуатационное состояние. Это означает, что физико-механические свойства поверхностного слоя материалов в процессе изготовления и модификации режущего инструмента претерпевают изменения в соответствии с закономерностями технологического наследования.

Моделирование состояния модифицированного режущего инструмента проводилось по данным экспериментальных исследований и опытно-промышленной эксплуатации сменных многогранных пластин из сплавов T15K6 и RX-10, выполненных:

– в лаборатории кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» СГТУ имени Гагарина Ю.А.;

– в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» и ОАО «Саратовский агрегатный завод».

Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло. Число реализаций было принято равным 500. По результатам моделирования формировались массивы наработок пластин до отказа при заданной характеристике зёрненной структуры обрабатываемого материала, полученной на основе идентификации закона распределения зёрен. Затем выполнялась процедура идентификации законов распределения времен стойкости пластин, вычислялись их вероятностные характеристики, формировались и сглаживались усредненные по числу реализаций траектории движения к конечному состоянию и определялись времена устойчивой работы как расстояния от начала координат до точек, в которых скорость изменения состояния начинала возрастать (по аналогии с началом катастрофического износа у обычного инструмента).

Результаты моделирования на принципиальном уровне позволили установить следующее (рис. 3).

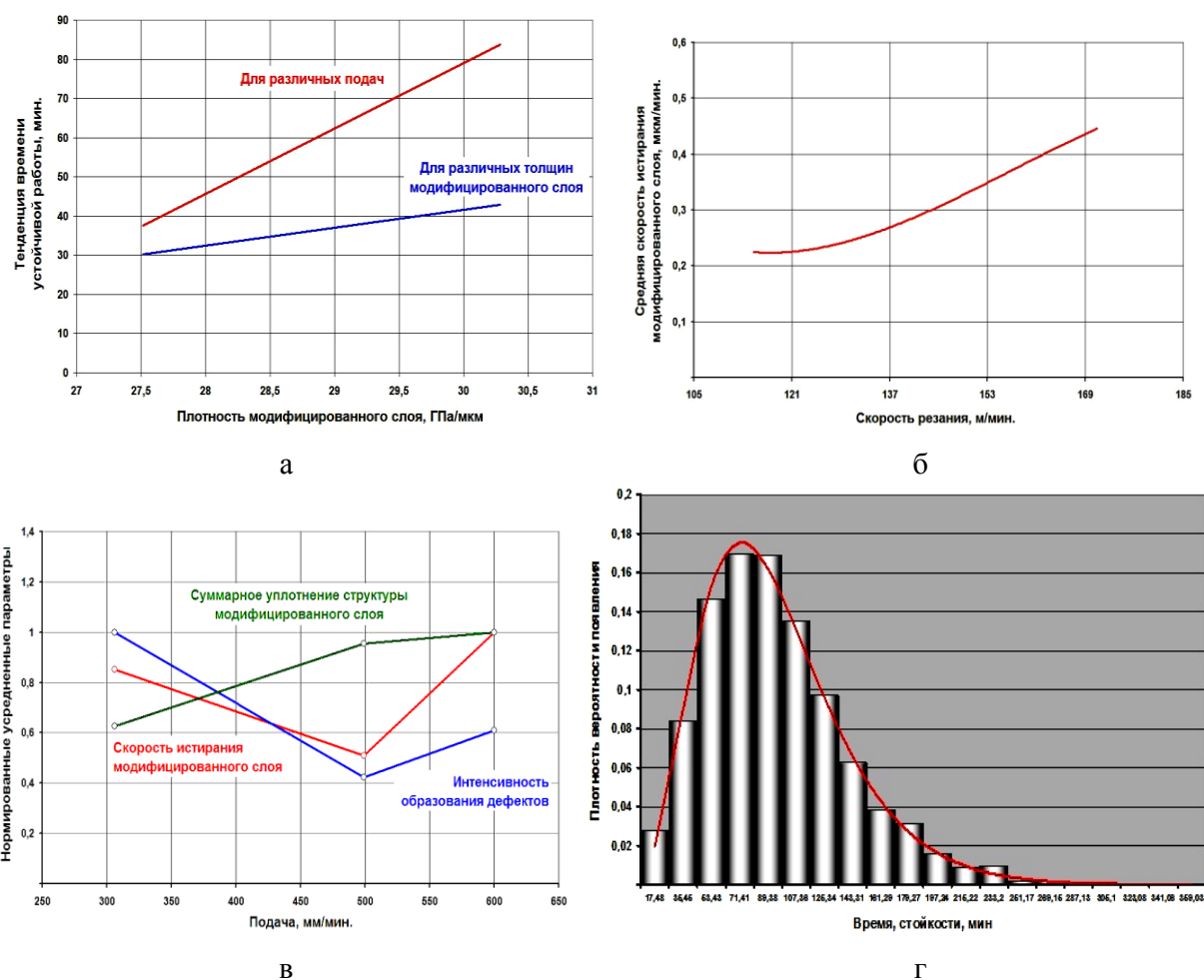


Рис. 3. Основные результаты моделирования состояния модифицированного металлорежущего инструмента: а-в – влияние плотности модифицированного слоя, скорости резания и подачи на показатели эксплуатационной надежности; г – распределение времени стойкости

1. Надежность модифицированного инструмента необходимо повышать на основе оптимизации как процесса модификации, так и процесса эксплуатации, поскольку в этом случае повышение будет более значимым.

2. При работе в одинаковых условиях модификация обеспечивает значимое повышение стойкости (рис. 3, а).

3. Увеличение скорости резания не является направлением повышения надежности модифицированного инструмента (рис. 3, б).

4. Увеличение подачи может рассматриваться как направление повышения не только надежности модифицированного инструмента, но и производительности обработки тем в большей степени, чем в большей степени будут обеспечены условия одновременного снижения скорости истирания модифицированного слоя, интенсивности образования дефектов и повышения суммарного уплотнения структуры модифицированного слоя (рис. 3, в).

5. Время стойкости модифицированного инструмента имеет гамма-распределение (рис. 3, г) с параметром формы, изменяющимся в диапазоне от 1,0 до 6,0, и может рассматриваться как статистическое отображение механизма повышения сопротивляемости модифицированного слоя процессам ползучести и изнашивания. При этом чем большее значение имеет параметр формы, тем сопротивляемость имеет место в большей степени.

Результаты оценивания и моделирования данных процесса эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента позволили определить условия, обеспечивающие повышение надежности и эффективности его использования:

1. Учет результатов анализа распределения микротвердости материала по глубине поверхностного слоя при назначении режимных параметров процесса модификации инструмента.

2. Стабилизация значений режимных параметров с целью обеспечения оптимального хода тепловых процессов.

3. Оптимизация значения оборотной подачи для инструмента, уплотнение поверхностного слоя которого по результатам модификации в максимальной степени произошло на больших от поверхности глубинах, поскольку это свидетельствует о формировании подслоя и, как следствие, повышении прочности инструментальной матрицы.

4. Оптимизация значения минутной подачи для инструмента, уплотнение поверхностного слоя которого произошло вблизи поверхности, поскольку это свидетельствует о непрочности инструментальной матрицы.

Результативность выполнения перечисленных условий подтверждена документами о практическом использовании результатов работы, полученными при непосредственном участии автора.

Материалы решения 4 задачи были положены в основу разработки алгоритма оптимизации процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента.

На первом этапе работы алгоритма производится моделирование процесса эксплуатации инструмента при различных сочетаниях значений параметров технологического режима: частоты вращения n и оборотной подачи S , и совокупностях дефектов. Результатом моделирования становится вычисление массивов значений наработок до отказа и после идентификации их распределений – любой из вероятностных характеристик, например, средних значений $T_o^{cp}(n_i, S_j)$, которые

становятся точками поверхности отклика времени стойкости на условия эксплуатации модифицированного инструмента. На втором этапе производится аппроксимация двумерного массива $T_o^{cp}(n_i, S_j)$ выражением $T_o^{cp} = f(n, S)$. С этой целью можно использовать различные программные приложения Microsoft Office, например DataFit 9.0, которое позволяет не только строить поверхности по дискретным данным, но и находить их уравнения. На третьем этапе реализуется процедура поиска экстремума на построенной поверхности, за который принята максимальная наработка модифицированного инструмента до отказа, т.е. стратегия оптимизации сформулирована как

$$T_o^{cp} = f(n, S) \rightarrow \max. \quad (3)$$

Соответствующие найденному максимуму значения параметров n и S и будут оптимальными.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Материалы выполненных исследований по повышению надежности модифицированного металлорежущего инструмента на основе автоматизированного оценивания качества процесса его эксплуатации по параметрам дефектов рабочей части позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы.

1. Модификация рабочей части металлорежущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы является одним из перспективных направлений повышения его эксплуатационной надежности. Поскольку основным результатом модификации становится повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов на его рабочих поверхностях, формирующих постэксплуатационное состояние, постольку дефекты могут быть использованы для оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с целью поиска условий, обеспечивающих повышение его эксплуатационной надежности.

2. На основе методов кластерного анализа, обработки категоризированных данных, расстановки приоритетов и разработанной стратегии принятия решений разработана процедура классификации дефектов, позволившая:

– объединить дефекты в три группы и с учетом использованных для классификации признаков, а также комплекса дополнительных параметров, уточняющих вид, расположение и количество дефектов присвоить им названия микролокальные, микроповерхностные и макродефекты;

– определить параметры дефектов на основе установления их взаимосвязи с условиями формирования для оценивания направлений и степени воздействия дефектов на состояние модифицированного инструмента в процессе его эксплуатации.

Универсальность процедуры позволяет использовать ее и для классификации дефектов обычного инструмента.

3. Разработан способ оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента с использованием его имитационной модели. Модель отображает процессы, связанные с изменением состояния модифицированного инструмента, через параметры дефектов и расчетную схему самоорганизации модифицированного слоя. Технология моделирования обладает эле-

ментами адаптации как к входной информации, так и к информации, получаемой в ходе моделирования. Это позволяет, воспроизводя процессы самоорганизации модифицированного слоя, возникновения и развития дефектов, определять время работы инструмента, вероятности возникновения отказов и формировать траекторию изменения его состояния, т.е. получать информацию об основных закономерностях и причинах изменения состояния модифицированной рабочей части инструмента.

4. Создана компьютерная система автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента, включающая базу данных и комплекс имитационного моделирования. Система организована таким образом, чтобы обеспечивала не только получение информации, но и ее анализ, позволяющий:

- раскрывать физические механизмы, лежащие в основе формирования информации о процессах модификации и эксплуатации модифицированного инструмента;

- обеспечивать достоверность (на уровне как конкретных, так и обобщенных сведений) и релевантность (в аспекте степени практической применимости) полученной информации, т. е. выводить ее на уровень знаний.

5. Практическая реализация оценивания и моделирования качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента на примере сменных многогранных пластин из вольфрамкобальтовых и титано-вольфрамкобальтовых твердых сплавов позволила:

- определить, что физико-механические свойства поверхностного слоя материалов в процессе изготовления и модификации режущего инструмента претерпевают изменения в соответствии с закономерностями технологического наследования, поскольку влияющие на свойства факторы действуют не аддитивно, а мультипликативно, т. е. в соответствии со своими величинами. Как следствие, это приводит не только к различному повышению времени стойкости инструмента, но и к различной степени сопротивляемости нагрузкам при резании, вызывающим различные по величине и направлению изменения состояния не только модифицированного слоя, но и матрицы, вплоть до качественных (проседание);

- установить, что статистической моделью времени стойкости модифицированного инструмента является гамма-распределение, позволяющее по значению параметра формы оценить связь отказов инструмента не только с процессами износа, но и с процессами образования и развития дефектов. Большему значению параметра формы соответствует повышение роли отказов, вызванных истиранием модифицированного слоя, т. е. параметрических, меньшему – повышение роли отказов, вызванных образованием дефектов, т. е. функциональных. В связи с этим гамма-распределение можно рассматривать как статистическое отображение механизма повышения сопротивляемости модифицированного слоя процессам ползучести и изнашивания;

- определить условия, обеспечивающие повышение эффективности эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента. Выполнение условий способствует формированию модифицированного слоя оптимальной толщины и плотности и созданию такого режима эксплуатации инструмента, при котором про-

цесс постепенного истирания модифицированного слоя будет преобладать над процессами образования и развития дефектов. Практически это позволит изменить вид износа инструмента с абразивного, диффузионного и адгезионного износа матрицы на механический износ (истирание) модифицированного слоя;

– разработать алгоритм оптимизации процесса эксплуатации модифицированного инструмента.

6. Практическая реализация автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации по параметрам дефектов рабочей части позволяет прогнозировать следующие результаты дальнейшего повышения показателей надежности и эффективности использования модифицированного металлорежущего инструмента:

– времени стойкости в 1,5...1,6 раза;

– производительности обработки в 1,2...1,6 раза.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

– **монографии:**

1. Плешакова Е.С. Интегральное оценивание качества процесса плазменной модификации рабочей части металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, С.Б. Вениг, В.В. Галушка и др. – Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2014. – 160 с.

2. Плешакова Е.С. Формирование композитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 140 с.

3. Плешакова Е.С. Повышение эксплуатационной надежности изделий с наноструктурированным поверхностным слоем: монография / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, П.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 132 с.

– **статьи в изданиях из Перечня ВАК РФ:**

4. Плешакова Е.С. Сравнительный анализ характеристик твердости инструментальных материалов / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 3. – С. 3-7.

5. Плешакова Е.С. Автоматизированное оценивание состояния модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов рабочей части / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 4. – С. 7-12.

6. Плешакова Е.С. Надежность режущего инструмента с модифицированной рабочей частью / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // СТИН. – 2014. – № 5. – С. 8-11.

7. Плешакова Е.С. Определение параметров дефектов инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 11: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – № 8. – С. 13-16.

8. Плешакова Е.С. База знаний автоматизированной системы оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 11. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – № 8. – С. 31-33.

9. Плешакова Е.С. Оценивание качества поверхностного слоя рабочей части режущего инструмента по параметру микротвердости / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Металлообработка*. – 2015. – № 2 (86). – С. 15-21.

10. Плешакова Е.С. Экспериментальное исследование качества эксплуатации модифицированного инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 6. – С. 69-72.

11. Плешакова Е.С. Анализ возможностей формирования диссипативных структур в поверхностном слое рабочей части металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // *Научные технологии в машиностроении* – 2015 – № 8. – С. 28-37.

12. Плешакова Е.С. Технология и оборудование для синтеза нанокompозитных ионно-плазменных покрытий на рабочих поверхностях геометрически сложных изделий / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева*. – 2017. – № 1 (40). – С. 216-222.

13. Плешакова Е.С. Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2017. – Т. 13. № 5. – С. 213-218.

14. Плешакова Е.С. Экспериментальное изучение поведения комбинированной структуры, сформированной воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова, И.Н. Янкин // *Металлообработка*. – 2017. – № 3 (99). – С. 35-42.

15. Плешакова Е.С. Аналитическая модель износостойкости модифицированного режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Вестник машиностроения*. – 2017. – № 7. – С. 75-79.

16. Плешакова Е.С. Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2017. – № 12. – С. 21-25.

– статьи в изданиях, включенных в международные базы Scopus и Web of Science:

17. Плешакова Е.С. Reliability of Modified Cutting Tools / В.М. Brzhozovskii, V.V. Martynov, E.P. Zinina, E.S. Pleshakova // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34. – Issue 12. – Pp. 769-772.

18. Плешакова Е.С. Analysis of Composite Structure Formation in the Surface Layer of Complex-Shaped Products when Exposed to Low-Temperature Plasma of Combined Discharge / В.М. Brzhozovsky, V.V. Martynov, E.P. Zinina, M.B. Brovkova, E.S. Pleshakova // *Published in 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Publisher: IEEE. 4 p.

19. Плешакова Е.С. Basic features of low-temperature plasma formation in the course of composite coating synthesis at the active faces of complex contoured hard tools / В.М. Brzhozovsky, D.A. Zimnyakov, E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Pleshakova, S.A. Yuvchenko // *Proc. of SPIE*. – Saratov, 2016. – Vol. 9917.

20. Плешакова Е.С. Wear resistance of cutting tools with a plasma-modified surface layer / В.М. Brzhozovskii, E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Pleshakova // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. Issue 10. – Pp. 882-887.

– статьи в иностранных изданиях:

21. Плешакова Е.С. Алгоритмизация процесса идентификации распределения данных о свойствах модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // *Vědecký průmysl evropského kontinentu* – 2013: materiály

IX mezinárodní vědecko-praktická konference. Díl 32. Technické vědy. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013 – S. 77-84.

22. Плешакова Е.С. База данных для автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Wykształcenie i nauka bez granic – 2013: materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. Vol. 45. Techniczne nauki. – Przemysł: Nauka i studia, 2013. – S. 55-58.

23. Плешакова Е.С. Постановка задачи классификации дефектов модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Бъдещето въпроси от света на науката – 2013: материали за 9-а международна научна практична конференция. Т. 37. Технологии. Химия и химически технологии. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 3-7.

– *статии в других изданиях:*

24. Pleshakova E.S. The problem of providing operational reliability of cutting tools with a modified working part / V.V. Martynov, E.S. Pleshakova // Bringing Science to Life: Наука и жизнь: материалы научно-практической Интернет-конференции с международным участием 2013. – Saratov: Saratov State Technical University, 2013. – P. 49-51.

25. Плешакова Е.С. Автоматизированное оценивание качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента по параметрам дефектов рабочей части / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование материалы – 2013: мат. Междунар. науч.-техн. конф. и Форума «Повышение конкурентоспособности и энергоэффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО». Ч. 2. – Казань, Фолиант, 2013. – С. 28-31.

26. Плешакова Е.С. Обоснование способа оценивания состояния рабочей части модифицированного режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч.-практ. конф.: в 34 ч. Ч. 27 / Мин. обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 31-33.

27. Плешакова Е.С. Экспериментальное исследование процесса механической обработки материалов инструментом с модифицированной рабочей частью / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова, И.Н. Янкин // Научно-технические комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2013. – С. 414-420.

28. Плешакова Е.С. Классификация дефектов режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. докл. I Междунар. заочн. науч.-техн. конф. – Челябинск: ЮУрГУ (НИУ), 2013. – С. 292-297.

29. Плешакова Е.С. Основные аспекты наноструктурирования режущего инструмента различного назначения воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда пониженного давления / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Инновации. Технологии. Производство: сб. тез. Междунар. технол. форума. – Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2014. – С. 41-42.

30. Плешакова Е.С. Инновационный программный комплекс оценивания состояния модифицированного режущего инструмента / Е.С. Плешакова // Инновации в профессиональном образовании и научных исследованиях вуза: сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. – Брянск: БГТУ, 2014. – С. 34-39.

31. Плешакова Е.С. Разработка программного комплекса оценивания состояния модифицированного режущего инструмента / Е.С. Плешакова, В.В. Мар-

тынов // Участники школы молодых ученых и программы У.М.Н.И.К.: сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 27»: в 12 т. Т. 11 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: СГТУ, 2014. – С. 58-61.

32. Плешакова Е.С. Повышение надежности механической обработки на основе низкотемпературной плазменной модификации режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // Производительность и надежность технологических систем в машиностроении: сб. науч. тр. МНТК / под науч. ред. В.В. Прейса и И.Л. Волчкевича. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С. 159-163.

33. Плешакова Е.С. Исходные предпосылки к разработке модели процесса формирования состояния режущего инструмента с модифицированной рабочей частью Е.С. Плешакова // Исследование сложных технических и технологических систем: науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2015. – С. 70-77.

– результаты интеллектуальной деятельности:

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611620. Оценивание качества эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка № 2014662618. Дата поступления 08.12.2014. Дата регистрации 08.02.2015.

35. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620259. Дефекты модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка № 2014622006. Дата поступления 22.12.2014. Дата регистрации 11.02.2015.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617335. Программа имитационного моделирования процесса формирования состояния модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка № 2015617134. Дата поступления 03.08.2015. Дата регистрации 29.09.2015.

ПЛЕШАКОВА Екатерина Сергеевна

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ
КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПО ПАРАМЕТРАМ ДЕФЕКТОВ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 15.10.18

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл.-печ. л. 1,0

Заказ 48

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л.1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел. 24-95-70, 99-87-39. e-mail: izdat@sstu.ru

