

НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ И РАЗВИТИЕ УГАТУ

В. С. МУХИН**НАУЧНАЯ ШКОЛА УГАТУ
ПО ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД****Мухин
Виктор Сергеевич**

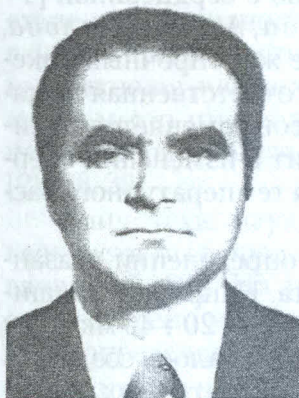
профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения УГАТУ. Заслуженный деятель науки и техники Республики Башкортостан и Российской Федерации. И. о. академика-секретаря отделения технических наук Академии наук Республики Башкортостан.

Дипломированный инженер-механик по авиационным двигателям (УАИ, 1962). Производственная деятельность: от токаря-расточника до инженера (Уфимский моторостроительный завод, 1956–1968). Научно-исследовательская и педагогическая деятельность в УГАТУ с 1968. Защита кандидатской (МАТИ, 1968) и докторской (МАИ, 1975) диссертаций.

Исследования в области химических и физико-механических свойств поверхности деталей газотурбинных двигателей на различных этапах изготовления и эксплуатации; повышение прочности, надежности и долговечности деталей технологическими методами; разработка новых технологий.

Научный руководитель и консультант четырех докторов и более двух десятков кандидатов наук. Автор более 200 публикаций, в том числе монографии и учебного пособия с грифом Минвуза СССР.

Тел. (3472) 23 07 63 E-mail kafedra@tm.ugatu.ac.ru



В шестидесятые годы Уфимским моторостроительным производственным объединением (тогда УМЗ) ежемесячно выпускались многие сотни авиационных реактивных двигателей. Ресурс же этих моторов не превышал ста–двухсот часов. Вместе с тем было известно, что зарубежные двигатели различного назначения имели ресурс до нескольких тысяч часов. Перед авиационной промышленностью была поставлена задача — кардинально увеличить ресурс ГТД. Стендовые испытания показали, что простое повышение длительности работы двигателя не давало положительных результатов. Имели место многочисленные разрушения деталей. При этом очаги усталостных трещин находились на поверхности или в некотором приповерхностном слое. Параллельно с опытно-исследовательскими работами в отрасли, в том числе и на УМПО, изучались двигатели американского производства. Было установлено, что практически все детали зарубежных двигателей изготавливались по технологиям, которые обеспечивали создание специальных защитных или упрочняющих поверхностей. Для разработки новых технологий и проверки их эффективности, с точки зрения долговечности деталей, на УМПО была создана лаборатория прочности, в обязанности которой входили оценка структуры и свойств металла поверхностного слоя деталей, полученных по различным технологиям, и установление функциональных связей между параметрами технологии изготовления деталей и их прочностью. Впоследствии от этой лаборатории отделился рентгеновский сектор и была создана лаборатория рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. Организатором и начальником этой лаборатории был

О. А. Кайбышев, ныне академик АН РБ, директор ИПСМ РАН. Обе эти лаборатории функционируют и поныне, решая различные задачи для новых поколений двигателей.

Следует отметить, что примерно в то же время в УГАТУ (тогда УАИ) канд. техн. наук, доц. А. Д. Макаров активно работал над докторской диссертацией, решая задачу оптимизации резания металлов. Велись хозяйственные работы с моторостроительным заводом применительно к резанию жаропрочных сплавов. Уже тогда стало ясно, что режимы резания металла необходимо выбирать не только с точки зрения минимальной интенсивности износа инструмента, но и с учетом получаемой структуры и свойств поверхностного слоя детали. Решение проблемы повышения прочности и надежности деталей технологическими методами начиналось с анализа состояния и свойств металла поверхностного слоя после получения деталей процессом, основанным на резании. Были выявлены причинно-следственные связи технологии и прочности. Известно, что обработка деталей резанием (лезвийным или абразивным инструментом) является одним из самых сложных видов пластической деформации, которая осуществляется в широком диапазоне изменения ее скорости при одновременном воздействии высоких давлений и температур (при больших градиентах этих параметров). Процесс резания по сложности условий пластического деформирования и разрушения не имеет себе аналогов в технике. Он характеризуется высокой интенсивностью деформации поверхности и, следовательно, резким изменением химических и физико-механических свойств металла поверхностного слоя по сравнению с сердцевиной [1–3, 10]. В кандидатских диссертациях В. М. Кишурова, С. К. Попова, А. М. Смылова, В. А. Кузнецова, В. Ц. Зориктуева показано, что при обработке жаропрочных никелевых и титановых сплавов разрушается интерметаллидная фаза, ответственная за жаропрочные свойства, вследствие адгезии и диффузионных процессов изменяется химический и структурно-фазовый состав. Это в свою очередь приводит к изменению твердости, прочности, пластичности, модуля упругости, коэффициента температурного расширения, наведению остаточных напряжений и др. [1, 4–8].

Следует указать на трудности методического характера при определении указанных свойств. Они вызваны микромасштабом исследуемого объекта. Например, толщина измененного поверхностного слоя достаточно мала и колеблется от 20 ÷ 40 мкм для лопаток компрессора до 100 ÷ 150 мкм — для дисков турбины. Требовалось создавать специальную лабораторную базу по оценке усталостной прочности, остаточных напряжений, экзoeлектронной эмиссии, прочностных и пластических свойств [4, 8–15].

Важно было не только исследовать и зафиксировать те или иные изменения в поверхностном слое, но и найти такие технологические режимы, при которых минимальны отрицательные последствия от деформации и разрушения в зоне резания. Была теоретически обоснована и практически реализована технология обработки специальных сплавов на основе использования естественных зон хрупкости (провалов пластичности). Установлено, что если процесс формообразования осуществлять при таких температурно-скоростных условиях, когда упрочняющая интерметаллидная фаза обладает наибольшей прочностью, то и металл поверхностного слоя в целом будет обладать высокими прочностными и пластическими свойствами в широком диапазоне температуры эксплуатации [2, 3, 9, 17–19].

Кривая Тейлора–Одинга, имеющая минимум и показывающая взаимосвязь между прочностью металла и плотностью дефектов кристаллической решетки, свидетельствует о том, что повысить прочность за счет деформации можно лишь до определенного предела. Учитывая широкое распространение в промышленности деформационных упрочняющих технологий, были выполнены специальные исследования прочностных и пластических свойств никелевых и титановых сплавов. Установлены предельные значения температур эксплуатации и предельные степени пластической деформации, при превышении которых наблюдается отрицательный эффект от деформационного упрочнения (исследования А. М. Смылова, В. А. Кузнецова, В. Г. Саватеева, С. М. Боровского [20–26]). Это при кратковременных испытаниях. При длительных усталостных испытаниях или испытаниях на жаропрочность на полученные закономерности влияет длительность (ресурс) испытания. Установлены и аналитически опи-

саны так называемые «температурно-ресурсные» зоны работоспособности материала в зависимости от технологии обработки. Показано, что любому сочетанию температуры и ресурса эксплуатации детали (при определенных статических или динамических нагрузениях) соответствует своя технология обработки. На стадии проектирования изделия конструктору или технологу объективно можно назначить технологию финишной обработки (электрополирование, деформационное упрочнение, термомеханическую обработку, ионную имплантацию и др.), обеспечивающую требуемые эксплуатационные свойства [12, 16, 27–32].

Назначение ресурса и эксплуатация двигателя по техническому состоянию требуют знаний изменения структуры и свойств металла поверхностного слоя на различных этапах эксплуатации. Иными словами, необходимо знание закономерностей релаксационных процессов и процессов разупрочнения. В этой связи раскрыт механизм и установлена закономерность (в том числе в аналитической форме) релаксационных процессов в широком диапазоне статических и динамических высокотемпературных испытаний. Установлено, что релаксация остаточных технологических напряжений обусловлена диффузионными процессами и рекристаллизацией в термодинамически неустойчивом поверхностном слое (исследования А.М. Смылова, С.М. Боровского, В.Г. Саватеева [28, 33–37]).

Раскрыт механизм подповерхностной повреждаемости (растрескивания) при высокотемпературных статических и динамических испытаниях. Установлено, что, вследствие неоднородности модуля упругости и коэффициента линейного расширения по глубине поверхностного слоя, результирующие напряжения (сумма рабочих, остаточных технологических и температурных напряжений) таковы, что на некоторой глубине имеет место пик напряжений растяжения. Под их воздействием в процессе испытаний образовавшаяся под поверхностью трещина развивается вглубь и к поверхности [28, 38, 39].

Канд. техн. наук С.М. Боровским на основе термодинамического описания поверхности был предложен вариант оптимизационного выбора способов модифицирования [67–69]. На примере поверхностного пластического деформирования (ППД) осуществлено моделирование оптимальной обработки. Показано, что выбор варианта ППД определяется значением прочности межатомных связей.

Развитие научно-технического прогресса в области авиационных двигателей нового поколения потребовало создания принципиально новых технологических процессов.

Одним из наиболее перспективных методов модифицирования поверхности конструкционных материалов, приводящим к значительным изменениям физико-химического состояния поверхностного слоя и, как следствие, эксплуатационных свойств (выносливости, жаропрочности, износо-, жаро- и коррозионной стойкости), является ионная имплантация.

В рамках совместных научно-исследовательских работ кафедры технологии машиностроения УГАТУ (руководитель работ проф. Смылов А.М.) с Курчатовским институтом (руководитель работ проф. М.И. Гусева) и Уфимским моторостроительным производственным объединением (руководитель работ Лесунов В.П.) применительно к наиболее ответственным деталям ГТД — лопаткам компрессора и турбины из сплавов на основе железа, титана и никеля раскрыты закономерности формирования физико-химического состояния поверхностного слоя при ионной имплантации, в том числе в комбинации с вакуумно-плазменными покрытиями [40–42, 45]. Установлено, что ионная имплантация и постимплантационный отжиг в контролируемой атмосфере обуславливают протекание радиационно-ускоренной диффузии, образование оксидных структур, твердых растворов внедрения, сетчатого каркаса из высокопрочных фаз и развитой дислокационной структуры. Все это приводит к упрочнению сплавов вследствие действия дислокационного, твердорастворного и дисперсионного механизмов. Как следствие, происходит увеличение предела выносливости лопаток на 7–23 %, стойкости против пылевой эрозии в 1,25–2,5 раз и коррозионной стойкости в 18–20 раз по сравнению с серийной технологией обработки [37, 43, 44]. Имплантация элементов из группы лантаноидов в поверхность турбинных лопаток значительно повышает

окалиностойкость и жаропрочность. Установлено, что после имплантации иттербия в поверхность в процессе высокотемпературной эксплуатации лопаток создаются защитные (барьерные) слои, препятствующие окислению и диффузии кислорода в глубь металла.

Комбинированное воздействие на поверхность, включающее ионное полирование, ионную имплантацию, вакуумно-плазменное осаждение вещества, шлифование, использование эффекта сублимации, позволяет создавать многокомпонентные покрытия, в том числе металлокерамические, и покрытия, содержащие каналы для охлаждения. В сочетании с эффектом полого катода возможно получение высокопрочных и пластичных покрытий с субмикроструктурной структурой (исследования А.М.Смылова, В.В.Будилова, В.Г.Абрамова, О.Д.Мингажева). Полученные проф. А.М.Смыловым с сотрудниками (кандидатами техн. наук М.К.Новиковой, Э.В.Сафиним и др.) результаты послужили основанием для создания промышленных импланторов, получивших название «ВИТА», и внедрения ионно-имплантационного модифицирования в серийное производство ГТД в условиях Уфимского моторостроительного производственного объединения. Это позволило, наряду с повышением эксплуатационных свойств и надежности, сократить длительность технологического процесса, исключить брак в связи с перенаклепом кромок и забоинами, сколами и отслаиванием жаростойких покрытий, решить проблемы экологии и поднять культуру производства [44].

Для тепловой и коррозионной защиты поверхностей применяют вакуумно-плазменные покрытия. Основными проблемами для такого типа упрочнения являются надежность технологии, адгезионная прочность, внутренние напряжения, роль подложки и др. Достаточно успешно с этими задачами удалось справиться В.В.Будилкову. В докторской диссертации «Обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД вакуумными ионно-плазменными методами обработки с учетом технологической наследственности» им обоснованы принципы обеспечения эксплуатационных свойств комплекса «покрытие-подложка» вакуумными ионно-плазменными методами обработки с учетом проявления технологической наследственности. Разработаны новые методы ионно-плазменной обработки поверхностей, основанные на эффекте полого катода и при подаче на детали положительного потенциала. Развита теория осаждения покрытий в вакууме методом конденсации с ионной бомбардировкой при длине свободного пробега частиц, соизмеримой с характерными размерами плазменных систем. Разработана методика проектирования интегрированной технологии на основе вакуумных ионно-плазменных методов обработки, позволяющая осуществлять выбор метода обработки, источника заряженных частиц, базового оборудования [46–50].

Разработанные В.В.Будилковым с сотрудниками (кандидаты техн. наук С.Р.Шехтман и Р.М.Киреев) технологии, методы и оборудование нашли широкое применение на предприятиях авиадвигателестроения. Технологии вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий на детали типа вал компрессора, вал турбины, лопатки компрессора, лопатки турбины позволили наряду с повышением эксплуатационных свойств сократить длительность технологического процесса на 30–60 %.

Развитие информационных технологий потребовало пересмотра существующих подходов к разработке и внедрению наукоемких технологий, направленных на модификацию свойств поверхности ответственных деталей изделий машиностроения. Отработка этих технологий в рамках трудоемких и дорогостоящих натурных экспериментов с построением эмпирических закономерностей перестала быть приемлемой. Появились средства, позволяющие получать более адекватные результаты исследований при меньших затратах. Речь идет об имитационном моделировании технологических воздействий на поверхность, конструируемую на основе многоуровневого моделирования ее структуры и свойств.

Начало данному научному направлению на кафедре технологии машиностроения было положено в 1990 году, когда в Германии на международном симпозиуме по исследованию материалов для высоких технологий профессором М.А.Анферовым (в то время доцентом кафедры) была изложена концепция моделирования технологиче-

ских воздействий на поверхность на микроуровне ее описания [51]. Позднее в Италии на восьмой международной технологической конференции по связи между структурой и динамическими свойствами материалов [52] им же было предложено новое понятие — «технологическое поле», расширяющее современное представление о моделировании процессов обработки поверхностей. Во-первых, появился подход, обеспечивающий совместное рассмотрение моделей, описывающих различные по физической природе технологические воздействия, что сняло барьер на пути оптимизации интегрированных технологий. Во-вторых, появилась единая схема описания, позволяющая:

- проследить наследственное изменение свойств поверхностного слоя вплоть до его окончательного формирования (т. е. получения эксплуатационных свойств);
- оптимизировать функциональные технологические параметры в широком спектре критериев, начиная с экономических и заканчивая эксплуатационными параметрами.

В результате была создана научная теория и системные средства [53–55], подкрепленные программным обеспечением для ЭВМ [56], которые позволяют проводить широкие исследования физических процессов, протекающих при тех или иных наукоемких методах обработки, с получением закономерностей, направленных на оптимизацию режимов данной обработки по критериям качества поверхностного слоя. Особое внимание при этом было уделено ионно-имплантационной обработке металлов (ИИО) как эффективному методу модификации структуры поверхностного слоя ответственных деталей ГТД, направленному на повышение их эксплуатационных свойств. Таким образом, появилась реальная возможность проведения системных исследований ИИО, направленных на выявление оптимальных ее режимов в тех или иных условиях.

В настоящее время данное научное направление развивается научно-исследовательской лабораторией моделирования и оптимизации наукоемких технологических процессов, научное руководство которой осуществляется профессором кафедры, доктором технических наук М. А. Анферовым. Проводимые исследования в области имитационного моделирования системно охватывают иерархические уровни описания перспективных технологических процессов [57, 58, 65].

На кафедре должное внимание уделяется разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов. Этой проблеме были посвящены успешно защищенные кандидатские диссертации В. А. Юлдашева, Г. М. Рахманкулова, В. Ю. Иванова, Е. Ю. Шляпина.

С 1979 года доцентом кафедры С. Г. Селивановым активно выполнялись системно-технические научные исследования в области технологической подготовки реконструируемого производства. Эти исследования позволили разработать новый метод непрерывной реконструкции, теоретические основы которого изложены в монографии [59]. Центральной частью этого метода стала новая специализированная система технологической подготовки производства — система ТПП мощностей машино- и приборостроительных предприятий.

Новая система технологической подготовки производства позволила в ходе промышленного эксперимента по ее применению на одном из авиационных заводов удвоить объем выпуска продукции (194,4 %) за пять лет на тех же производственных площадях и при той же численности рабочих, поставить на производство десятки (52 единицы) новых изделий. Дополнительными результатами можно назвать положительные социально-экономические последствия и улучшение технико-экономических показателей действующего производства.

Было разработано и утверждено 5 Государственных стандартов СССР и 12 различных методик по технологической подготовке машиностроительного производства. Эти разработки были использованы на многих машино- и приборостроительных предприятиях страны как нормативные документы. Часть из них была отмечена медалями ВДНХ СССР. Ряд названных методик по технологической подготовке производства был переведен и использован также в странах СЭВ. В 1991 году по итогам выполненных НИР доц. С. Г. Селивановым была защищена докторская диссертация «Основы технологи-

ческой подготовки реконструкции машиностроительного производства» (Мосстанкин) по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения».

Следствием развития научных исследований явились не только эффективные научные и промышленные результаты, но и повышение качества учебного процесса. Были написаны учебники и учебные пособия [27–29, 33, 38, 39, 60–64, 66], открыта новая специальность 1207 «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки», созданы новые учебно-научные лаборатории, дисплейные классы, разработаны новые учебные дисциплины.

Ученые кафедры являются членами семи диссертационных советов по присуждению ученой степени доктора технических наук (Уфа, Казань, Челябинск). В. С. Мухин является членом редакционной коллегии журнала «Авиационная техника».

Десятки авторских свидетельств и патентов, золотые, серебряные и бронзовые медали ВДНХ СССР, участие в международных выставках в Малайзии, Аргентине, Индии и ФРГ, гранты по Министерству науки и Министерству образования РФ – вот далеко не полный перечень итогов педагогической и научно-исследовательской работы ученых кафедры технологии машиностроения.

В 2000 году коллектив ученых кафедры удостоен гранта государственной поддержки ведущих научных школ России в области инженерных и технических наук (№ 00-15-99053).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. Д., Мухин В. С. Особенности обработки сплава ЭИ437БУ // Станки и инструмент. 1970. № 11. С. 23–25.
2. Макаров А. Д., Мухин В. С., Кишуров В. М. Влияние прочностных свойств и структурно-фазового состава жаропрочных сплавов на их обрабатываемость // Станки и инструмент. 1973. № 6. С. 28–30.
3. Мухин В. С. К методике исследования механизма износа режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1974. № 5. С. 58–60.
4. Мухин В. С. Остаточные напряжения при точении сплава ЭИ826 // Известия вузов. Машиностроение. 1972. № 12. С. 139–144.
5. Мухин В. С., Зориктуев В. Ц. Остаточные напряжения и наклеп при торцовом точении // Вестник машиностроения. 1974. № 1. С. 60–64.
6. Мухин В. С., Кишуров В. М. Влияние физико-механических свойств жаропрочных сплавов на формирование поверхностных напряжений при резании // Изв. вузов. Машиностроение. 1974. № 8. С. 133–137.
7. Мочалов А. Н., Мухин В. С., Попов С. К. Изменение структуры и химического состава металла поверхностного слоя детали в процессе механической обработки // Авиационная промышленность. 1977. № 1. С. 65–66.
8. Мухин В. С., Кайбышев О. А., Матвеев Л. В. К вопросу определения остаточных напряжений на деталях из сталей 1Х17Н2 и ЭИ961 // Авиационная промышленность. 1965. № 4. С. 48–50.
9. Мухин В. С., Матвеев Л. В., Турков Б. В. Новый метод прочностных свойств материалов и деталей машин // Авиационная промышленность. 1964. № 11. С. 91–92.
10. Мухин В. С., Касимов Л. Н. Прибор для измерения тангенциальных остаточных напряжений // Заводская лаборатория. 1967. № 1. С. 113–114.
11. Мухин В. С., Касимов Л. Н., Турков Б. В. Измерение остаточных напряжений с автоматической записью кривой деформации // Авиационная промышленность. 1967. № 8. С. 68–69.
12. Borovskii S. M., Mukhin V. S. Diagnostics of the reliability of aircraft component manufacturing processes Russian Aeronautics // Allerton Press, Inc. New York. 1987. № 1. P. 13–17.
13. Паскудский Е. А., Якушин Б. А., Мухин В. С., Турков Б. В. Использование метода экзoeлектронной эмиссии для определения оптимальной скорости резания при обработке специальных сплавов // Авиационная промышленность. Приложение. 1986. № 2. С. 24–25.
14. Мухин В. С., Саватеев В. Г. Математическое описание эпюр остаточных поверхностных напряжений // Вопросы оптимального резания металлов: Тр. УАИ. Уфа, 1972. Вып. 29. С. 130–132.
15. Мухин В. С., Паскудский Е. А. и др. Экзоэмиссионный контроль поверхностного слоя авиационных сплавов // Поверхность: физика, химия, механика. 1993. № 9. С. 44–49.
16. Боровский С. М., Гаврилов Н. В., Мухин В. С. Повышение коррозионной стойкости поверхности лопатки комплексной обработкой // Авиационная промышленность. 1990. № 12. С. 22–23.
17. Мухин В. С., Смыслов А. М., Кузнецов В. А. Оценка обрабатываемости титановых сплавов по их пластическим характеристикам // Станки и инструмент. 1976. № 6. С. 34–38.

18. **Мухин В. С., Боровский С. М.** К методике ускоренного определения оптимальных режимов обработки жаропрочных никелевых и титановых сплавов // *Авиационная промышленность*. 1986. № 1. С. 14–15.
19. **Макаров А. Д., Мухин В. С., Воронин Н. В.** Износ твердосплавного инструмента при резании жаропрочных сплавов // *Станки и инструмент*. 1974. № 2. С. 26–28.
20. **Мухин В. С., Мочалов А. Н., Саватеев В. Г.** Длительная прочность сплава ЭП220 в зависимости от устойчивости деформационного упрочнения // *Авиационная промышленность*. 1977. № 5. С. 88–90.
21. **Мухин В. С., Мочалов А. Н., Кузнецов В. А.** К вопросу выбора технологического варианта обработки сплава ХН77ТЮР по условиям получения наибольшей жаропрочности // *Проблемы прочности*. Киев: АН УССР. 1978. № 8. С. 117–120.
22. **Мухин В. С., Боровский С. М., Саватеев В. Г.** Информативность параметров, отражающих влияние поверхностного слоя на длительную прочность жаропрочных материалов // *Проблемы прочности*. Киев: АН УССР. 1985. № 1. С. 66–69.
23. **Мухин В. С., Боровский С. М.** Зависимость длительной прочности жаропрочных материалов от анизотропии поверхностного слоя // *Авиационная промышленность*. 1986. № 11. С. 62–63.
24. **Мухин В. С., Боровский С. М.** Расчетно-экспериментальная оценка длительной прочности материалов ГТД после технологической обработки // *Известия вузов. Авиационная техника*. Казань. 1986. № 4. С. 77–79.
25. **Budilov V. V., Mukhin V. S., Minaeva O. V.** Mathematical modeling of vacuum ion-plasma spray depositon // *Russian Aeronautics: Allerton Press ins. New York*. 1995. № 1. С. 92–96.
26. **Щипачев А. М., Мухин В. С.** Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя // *Авиационная техника*. 1999. № 3. С. 23–25.
27. **Мухин В. С., Боровский С. М.** Оптимальный выбор технологических вариантов обработки поверхностей деталей ГТД: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1989. 74 с.
28. **Макаров А. Д., Мухин В. С.** Оптимизация процесса механической обработки по физическим параметрам, качеству поверхностного слоя и долговечности деталей из жаропрочных материалов: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1976. 114 с.
29. **Мухин В. С., Шустер Л. Ш.** Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов: Учеб. пособие с грифом Минвуза СССР. Уфа: УАИ, 1987. 217 с.
30. **Mukhin V. S., Borovskii S. M.** Determination of optimal heat treatment of titanium structural alloys // *Russian Aeronautics: Allerton Press ins. New York*. 1988. № 2. P. 84–87.
31. **Mukhin V. S., Borovskii S. M.** Design of optimal strengthening treatment of metal surfaces of gas turbine engine parts // *Russian Aeronautics: Allerton Press inc. New York*. 1990. № 1. P. 70–75.
32. **Mukhin V. S., Borovskii S. M.** Choice of optimal treatment of metallic surfaces of the component using wear-resistance criterion // *Russian Aeronautics: Allerton Press inc. New York*. 1991. № 3. P. 59–64.
33. **Мухин В. С., Боровский С. М.** Технологическое управление ресурсом деталей ВРД при обслуживании по техническому состоянию: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1987. 90 с.
34. **Мухин В. С., Саватеев В. Г.** Релаксационная стойкость остаточных технологических напряжений в стали 13Х12НВМФА // *Проблемы прочности*. Киев: АН УССР, 1973. № 5. С. 88–91.
35. **Мухин В. С., Саватеев В. Г., Мочалов А. Н., Добrorез А. П.** и др. Применение математического планирования эксперимента для оценки устойчивости остаточных технологических напряжений и разупрочнения поверхностного слоя // *Авиационная промышленность*. 1977. № 1. С. 39–42.
36. **Мухин В. С.** Вопросы оптимального резания металлов // *Сб. тр. Уфа: УАИ*. 1972. Вып. 29. С. 165–170.
37. **Мухин В. С., Смыслов А. М., Боровский С. М.** Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. 387 с.
38. **Мухин В. С.** Технологические методы обеспечения качества поверхности деталей: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1981. 73 с.
39. **Мухин В. С.** Технологические методы повышения эксплуатационных свойств изделий: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1982. 56 с.
40. **Гусева М. И., Смыслов А. М., Новикова М. К.** Физико-механические свойства и структурно-фазовый состав ионно-имплантированных сплавов на основе титана // *Радиационная физика твердого тела: Тез. докл. 1-го Междунар. совещ. стран СЭВ (Сочи, 1989)*. 1989. С. 90–93.
41. **Смыслов А. М., Новикова М. К.** Применение РФЭС для оценки ионно-модифицированного сплава на основе титана // *Тез. докл. III Междунар. НТК по электронно-лучевым технологиям (Варна, Болгария)*. 1991. С. 531–535.
42. **Смыслов А. М., Лесунов В. П.** Эксплуатационные свойства жаростойких покрытий после ионной имплантации поверхности // *Радиационная физика твердого тела: Тез. докл. Межотраслевой НТК. Севастополь*, 1992. С. 74–75.
43. **Смыслов А. М., Лесунов В. П., Гребенюк Г. П.** Пути снижения повреждаемости рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД // *Авиационная промышленность*. 1990. № 12. С. 50–51.

44. **Лесунов В. П., Смыслов А. М.** Ионно-имплантационное модифицирование поверхности лопаток ГТД // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Тр. Межд. конф. Самара, 1999. С. 77–78.
45. **Мухин В. С., Смыслов А. М.** и др. Оценка состояния поверхности титановых сплавов, модифицированных ионной обработкой // Авиационная промышленность. 1989. № 12. С. 33–35.
46. **Будилов В. В.** Технология вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1993. 78 с.
47. **Будилов В. В.** Физические основы вакуумно-плазменной технологии нанесения покрытий: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1993. 73 с.
48. **Будилов В. В., Сырезкин В. А., Тулупов В. П.** Проблемы и перспективы технологии вакуумной ионно-плазменной обработки деталей ГТД // Авиационная промышленность. 1994. № 9. С. 19–25.
49. **Будилов В. В., Мухин В. С.** Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей ГТД с вакуумными ионно-плазменными покрытиями // Проблемы машиноведения конструкционных материалов и технологий: Сб. тр. АН РБ. Уфа: Гилем, 1997. С. 67–81.
50. **Будилов В. В., Иванов В. Ю.** и др. Моделирование интегрированной технологии ионно-плазменных и электронно-лучевых методов обработки // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Вестник СГАУ. Самара, 1999. С. 57–62.
51. **Anfyorov M. A.** Quantum-Stochastic modelling of inherited formation of surface properties // Mater. Science forum. Switzerland, 1990. Vols. 62–64. P. 727–728
52. **Anfyorov M. A.** Simulation of the technological action on the microstructure and dynamic properties of metals // Mater. 8th Tech. Conf. DU-MAT. Italy, 1993. P. 141–143.
53. **Анферов М. А.** Квантово - механический подход к описанию технологии наследственного формирования требуемых свойств поверхности // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: Уфа: УАИ, 1989. С. 149–155.
54. **Анферов М. А.** Моделирование фоновно-энергетического взаимодействия в технологических полях // Поверхность: технологические аспекты прочности деталей. Уфа: УГАТУ, 1994. С. 88–95.
55. **Анферов М. А.** Математическое обеспечение компьютерной системы моделирования технологического воздействия на поверхностный слой // Поверхность: технологические аспекты прочности деталей. Уфа: УГАТУ, 1994. С. 64–69.
56. **А. с. 950221.** Автоматизированная система имитационного моделирования физических процессов при технологической обработке ИМТЕС / М. А. Анферов.
57. **Анферов М. А.** Системное имитационное моделирование физических процессов при вакуумной ионной имплантации металлов // Вакуумная техника и технология. 1996. № 2. С. 25–27.
58. **Анферов М. А.** Метод структурной оптимизации технологических процессов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1995. № 4. С. 100–102.
59. **Панков Г. В., Селиванов С. Г.** и др. Непрерывная реконструкция предприятий машиностроения. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.
60. **Афанасьев В. П., Селиванов С. Г.** Обеспечение технологичности конструкции агрегатов авиационных двигателей: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1991. 86 с.
61. **Селиванов С. Г., Касимов Р. Г.** Организационно-технологические основы многостаночного обслуживания в машиностроении: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1985. 84 с.
62. **Селиванов С. Г.** Проектирование роботизированных технологических процессов: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1994. 87 с.
63. **Селиванов С. Г., Касимов Р. Г.** Теоретические основы организационного проектирования: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1999. 90 с.
64. **Алиев В. Г., Селиванов С. Г.** и др. Теория организации: Учебник для вузов. М.: Луч, 1999. 416 с.
65. **Селиванов С. Г., Анферов М. А.** Моделирование технологической подготовки производства в машиностроении. Уфа: Гилем, 1999. 271 с.
66. **Мухин В. С.** Формирование специальных свойств поверхности деталей летательных аппаратов: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1986. 83 с.
67. **Боровский С. М.** Оптимизационный выбор поверхностной обработки и напыления // Авиационная техника. 1993. № 1. С. 62–67.
68. **Mukhin V. S., Anfyorov M. A., Smyslov A. M., Novikova M. K.** Model of metal-implanted ions distribution. Russian Aeronautics: Allerton Press. Ins. New York. 1996. № 2. P. 83–89.
69. **Боровский С. М., Мухин В. С.** Пластификация покрытий и подложки как метод повышения эксплуатационных свойств деталей // Проблемы машиностроения и автоматизации. М., 1995. № 6. С. 23–28.