ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 12 (60)
декабрь
2009

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р физ.-мат. наук,
заслуженный деятель науки РФ
В.Н. НЕВОЛИН

Председатель редакционного совета
д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместители главного редактора:
И.Н. ЖЕСТКОВА
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК
д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.Ю. ЗАМЯТИН
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Ю.В. ПАНФИЛОВ
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
Г.А. СУХОЧЕВ
В.П. ТАБАКОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:
Е.П. ЗЕМСКОВА
С.В. СИДОРОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159**, "Пресса России" **39269**, "Почта России" **60252**) или в издательстве.

Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Шандров Б.В. Развитие упрочняющих технологий и покрытий на кафедре "Технология машиностроения" МГТУ "МАМИ" 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Мирошин И.В. Расчет циклической долговечности упрочненных деталей машин по сигналам акустической эмиссии . . 5

Кречетов А.А. Функциональная модель технологического наследования наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин 10

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Авдиенко А.А., Авдиенко К.И. Упрочнение поверхности конструкционных металлов и сплавов методом ионно-лучевой обработки 16

Блюменштейн В.Ю., Земскова Е.П. Функциональная модель технологического обеспечения коррозионной стойкости тонких покрытий на основе применения метода микродугового оксидирования 28

Овсянников Б.Л., Енин А.Д. Имитационное моделирование процесса электроэрозионного формообразования 36

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Митрюшин Е.А., Саушкин С.Б., Саушкин Б.П. Пути развития и перспективы применения технологий электрохимической размерной обработки 40

Саушкин Г.Б., Моргунов Ю.А. Электрохимическое нанесение информации на поверхность деталей машин 45

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Виноградов В.М. Особенности высокопроизводительных станков для калибрования зубьев цилиндрических колес средних модулей 50

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

© **Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2009**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 12 (60)
December
2009

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr of Phys. Math. Sci.,
The honoured worker
of a science of the RF
V.N. NEVOLIN

Chair of Editorial Council
Dr of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistants:
I.N. ZHESTKOVA
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
S.N. GRIGORIEV
V.Yu. ZAMYATIN
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
Yu.V. PANFILOV
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
E.P. ZEMSKOVA
S.V. SIDOROVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159**, "Pressa Rossii" **39269**, "Pochta Rossii" **60252**) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry Tele- and Broadcasting of Mass Communications Media. The certificate of registration ПИ № 77-17733, March 9, 2004

CONTENTS

Shandrov B.V. Development of strengthening technologies and coatings in "Technology of machine building" department of MSTU "MAMI" 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Blyumenshtein V.Yu., Krechetov A.A., Miroshin I.V. Computation of the strengthened machine component's cycle life based on signals of acoustical emission 5

Krechetov A.A. Functional model of technological inheritance of nanostructured state of coating surface in phase of machine components life-cycle 10

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Avdienko A.A., Avdienko K.I. Strengthening of construction metals and alloys surfaces by ion beam treatment 16

Blyumenshtein V.Yu., Zemskova E.P. Functional model of technological securing of corrosion stability of thin coating on basis of micro-arc oxidation method 28

Ovsyannikov B.L., Yenin A.D. Simulation of electric discharge machining process 36

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Mitryushin E.A., Saushkin S.B., Saushkin B.P. Ways of development and prospects of application electrochemical dimensional processing technologies 40

Saushkin G.B., Morgunov Yu.A. Electrochemical marking of the parts from aircraft materials 45

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Vinogradov V.M. Features of efficient equipments for cogs calibration of middle module spur gears 50

Reprint is possible only with the reference to the journal "Strengthening technologies and coatings".

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses

© **"Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2009**

Б.В. Шандров
(МГТУ "МАМИ", г. Москва)
Тел.: (495) 223-05-23, доб. 1557

Развитие упрочняющих технологий и покрытий на кафедре "Технология машиностроения" МГТУ "МАМИ"

3 декабря 2009 г. кафедра "Технология машиностроения" им. Ф.С. Демьянюка МГТУ "МАМИ" отмечает свой 70-летний юбилей. В 1961 г. кафедру возглавил Фома Семенович Демьянюк – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники СССР, лауреат Государственных премий СССР, один из основателей и организаторов поточно-массового производства. Ф.С. Демьянюк оказал большое влияние на развитие кафедры. Под его руководством были созданы такие новые направления в технологии машиностроения, как *поверхностное пластическое деформирование* (ППД) методом алмазного выглаживания, токарная безкопирная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей машин и автоматизация сборки агрегатов машин.

Первое направление связано с разработкой научных основ механики и технологии обработки ППД. По этому направлению в СССР первые четыре кандидатские диссертации были выполнены в МАМИ на кафедре "Технология машиностроения" в 1967–1970 гг. Впоследствии исследования начали проводиться в МВТУ им. Н.Э. Баумана, МАТИ, ВЗПИ, ВНИИалмаз, ЦНИТИ и других вузах и НИИ.

С 1970 г. работы по проблемам ППД на кафедре продолжались под руководством Вадима Михайловича Смелянского, впоследствии доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ, действительного члена академии качества РФ. Всего по этой проблеме с 1970 г. на кафедре защищены три докторские и более 10 кандидатских диссертаций. Сегодня можно сказать, что по проблемам ППД В.М. Смелянским была создана научная школа, получившая признание в России и за ее пределами. Преподаватели этой школы успешно работают в вузах Сибири и Центральной России.

ППД является методом упрочнения деталей машин, особенно имеющих концентраторы напряжений и работающих в условиях циклического нагружения. Эффективность ППД объясняется тем, что упрочнение поверхностного слоя деталей пластическим деформированием увеличивает их долговечность в несколько раз. Поэтому главной задачей технолога является управление процессом ППД для создания качественного поверхностного слоя и получения требуемой долговечности деталей. В.М. Смелянский впервые разработал наиболее эффективный подход к технологическому обеспечению эксплуатационных показателей деталей, который базируется на внутренних закономерностях процесса упрочнения и разрушения деталей машин. Именно этот подход был положен в основу развития теории ППД и разработки методов технологического обеспечения эксплуатационной надежности деталей при упрочнении ППД. Основой теории ППД явились механико-математические модели процесса ППД обкатыванием и выглаживанием (работы А.А. Шапарина, Н.А. Чоудхури, В.Н. Данга).

Отличительной особенностью работ по механике ППД, выполненных на кафедре "Технология машиностроения" в 1970–1995 гг. под руководством В.М. Смелянского, является постановка и решение проблемы технологической наследственности. Решение этой проблемы нашло отражение в работах А.А. Журавлева и В.Ю. Блюменштейна и позволило ответить на вопрос об оптимальном уровне деформирования поверхностного слоя, обеспечивающем наибольшее значение сопротивления усталости.

Полученные результаты исследования проблемы ППД были положены в основу создания системы автоматизированного проектирования "САПР ППД" и отраслевых методик проектирования технологических процессов ППД обкатывания. С учетом нового понимания процессов, происходящих при ППД, созданы и внедрены в производство ряд новых методов ППД, которые защищены авторскими свидетельствами. Среди этих методов следует выделить *размерное совмещенное обкатывание* (РСО) – обработка, сочетающая в себе резание и жесткое калибрующее обкатывание. Исследованию РСО посвящены работы В.Ю. Блюменштейна, В.А. Васильева, В.Б. Игнатова, В.В. Баринова.

Были созданы и испытаны станки для РСО, обеспечивающие обработку "черных" заготовок за один проход с получением 8-го квалитета точности и параметра шероховатости $Ra = 0{,}3$ мкм. Это позволяет использовать станок РСО вместо двух токарных и одного-двух шлифовальных.

Результаты исследований проблем обработки ППД В.М. Смелянского и его учеников представлены в монографии В.М. Смелянского "Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим дефор-

мированием", которая опубликована издательством "Машиностроение" в 2002 г.

Начиная с 1995 г. на базе направления ППД на кафедре "Технология машиностроения" под руководством В.М. Смелянского получили развитие исследования новых технологий поверхностного упрочнения – *электроэрозионного синтеза* (ЭЭС) сверхтвердых износостойких покрытий (работа В.А. Земскова) и покрытий методом *микродугового оксидирования* (МДО) (работы О.Ю. Герций, В.В. Колеватова, Е.П. Земсковой, А.В. Жуковского), а также комбинированных методов обработки ППД и МДО (работа В.В. Филиппова). Эти исследования привлекали интерес различных предприятий, в том числе зарубежных, например таких как фирма Festo (Германия). Они включают создание новых источников тока с минимальной энергоемкостью процессов, создание систем управления процессами, исследование физики формирования процессов и эксплуатационных свойств покрытий.

Защитные покрытия методами ЭЭС и МДО повышают износостойкость, теплостойкость и коррозионную стойкость деталей из различных материалов, что позволяет использовать их при изготовлении поршней и гильз двигателей, втулок буровых установок, деталей запорной арматуры и сварочных аппаратов. Полный список деталей занял бы не одну страницу. Особенно актуально применение МДО-покрытий для обеспечения коррозионной стойкости деталей из алюминиевых сплавов.

В комбинированной обработке ППД создает условия для увеличения скорости роста МДО-покрытия и повышения его качества. Такая технология позволяет на поверхности стальной детали плазменным напылением наносить алюминиевое покрытие, которое далее обрабатывается точением и подвергается преобразованию в оксид алюминия методом МДО. Толщина такого покрытия составляет 0,15 мкм. Область применения – пары трения, детали, подверженные действию высоких температур, эрозии и абразивного износа.

Для подготовки инженерных кадров по защитным покрытиям и другим высокоэффективным методам обработки кафедра "Технология машиностроения" в 1995 г. начала подготовку молодых специалистов по специальности 150206 (1207) "Машины и технология высокоэффективных процессов обработки". В.М. Смелянский внес большой вклад в организацию, кадровое, методическое и материальное обеспечение этой подготовки. Выпускники этой специальности хорошо зарекомендовали себя на таких предприятиях, как ПО "Москвич", Карачаровский механический завод, ММПП "Салют", ЗАО "Метровагонмаш", ОАО "Рубин", ОАО "Вымпел" и др.

В настоящее время руководителем учебного цикла кафедры по специальности 150206 является воспитанник кафедры профессор Ю.А. Моргунов. В учебном процессе этой специальности принимают участие известные ученые, специалисты в области обработки концентрированными потоками энергии доктора наук, профессора Б.П. Саушкин, К.И. Авдиенко, А.А. Авдиенко и доцент, канд. техн. наук Б.Л. Овсянников. Команда студентов кафедры "Технология машиностроения" в 2008 г. заняла 2-е место во Всероссийской студенческой олимпиаде "Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов".

Выпускники кафедры по специальности 150206 составили основу научно-исследовательской лаборатории кафедры упрочняющих технологий и защитных покрытий, созданной В.М. Смелянским в конце 90-х гг. В настоящее время лабораторию возглавляет канд. физ.-мат. наук, специалист в области покрытий методом МДО Е.М. Морозов. Лаборатория располагает необходимой экспериментальной базой для проведения исследований по хоздоговорам и программам НИР Минобрнауки РФ.

В этом номере журнала представлены статьи сотрудников кафедры "Технология машиностроения" МГТУ "МАМИ", а также аспирантов, выполнявших научную работу на кафедре в разные годы.

УДК 621.787:620.179.17:519.688

В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, И.В. Мирошин
(КузГТУ, г. Кемерово)
Тел.: (8-384-2) 58-30-73
E-mail: blumenstein@rambler.ru

Расчет циклической долговечности упрочненных деталей машин по сигналам акустической эмиссии[1]

Предложено использовать сигналы акустической эмиссии для расчета наследуемых феноменологических параметров качества поверхностного слоя. Разработана методика и программная система, позволяющая по сигналам акустической эмиссии, регистрируемым в процессе упрочняющей обработки ППД, прогнозировать циклическую долговечность деталей при эксплуатации.

Ключевые слова: *акустическая эмиссия, циклическая долговечность, технологическое наследование, упрочнение, поверхностное пластическое деформирование.*

Signals of acoustical emission are applied to compute heritable phenomenological parameters of the surface layer quality. The technique and the program system have been developed. Based on acoustical emission signals recorded during the strengthening treatment by surface plastic deformation the program system allows to forecast the cycle durability of the operated machine components.

Keywords: *acoustical emission, cyclic durability, technological inheritance, strengthening, surface plastic deformation.*

Использование акустической эмиссии для оценки показателей механического состояния упрочненного металла

В условиях возрастающих требований к надежности и качеству машин актуальной задачей при проектировании технологических процессов упрочняющей обработки является разработка методики контроля наследуемых параметров состояния поверхностного слоя. Применение этой методики позволяет на основе раскрытия закономерностей формирования поверхностного слоя на стадиях механической обработки обеспечить требуемую циклическую долговечность изделия в процессе эксплуатации. Для описания накопления и трансформации свойств поверхностного слоя на стадиях механической обработки и эксплуатации могут быть использованы положения аппарата механики *технологического наследования* (ТН), в основе которых лежит сквозное описание состояния поверхностного слоя детали на этапах ее жизненного цикла в единых физических терминах и категориях [1].

В основу теории ТН качества поверхностного слоя на стадиях механической обработки положена базовая феноменологическая модель формирования поверхностного слоя при *поверхностном пластическом деформировании* (ППД), разработанная в МГТУ "МАМИ" В.М. Смелянским [1]. В соответствии с этой моделью в зоне контакта инструмента с деталью возникает асимметричный *очаг деформации* (ОД) *ABCDEFG* глубиной *h*, *напряженно-деформированное состояние* (НДС) которого характеризуется тензорами напряжений и скоростей деформаций (рис. 1). Формирование поверхностного слоя происходит в результате деформации его частиц по линиям тока, например, линии *1*, *2* и *3*. Начальные параметры состояния, которые частицы имели до входа в ОД (линия *AG*), трансформируются в накопленные к моменту выхода их из ОД (линия *FG*). В качестве накопленных параметров состояния используются степень дефор-

[1]Работа выполнена в рамках проекта "Научные основы технологического наследования наноразмерной дефектной структуры поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки, эксплуатации и восстановления ответственных деталей машин" аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы на 2009 год".

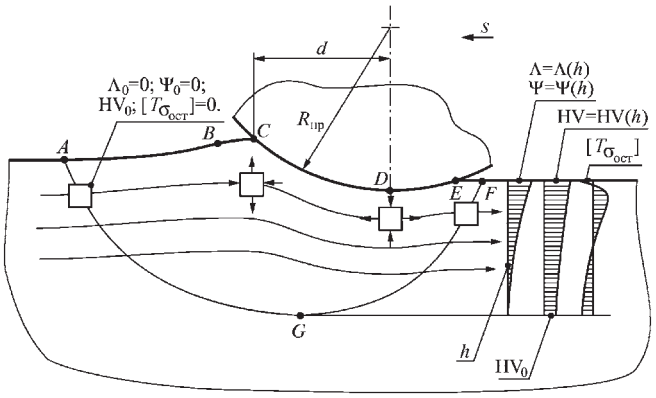


Рис. 1. Модель формирования поверхностного слоя при ППД

мации сдвига Λ, *степень исчерпания запаса пластичности* (СИЗП) Ψ, компоненты тензора остаточных напряжений $[T_{\sigma_{ост}}]$ и т.д., но сложность их аналитического определения затрудняет использование феноменологической теории в производственных условиях.

Проведенный анализ позволил установить, что метод акустической эмиссии является эффективным инструментом для исследования динамики развития дефектной структуры материалов ввиду высокой чувствительности к условиям деформации.

В ходе исследований была выдвинута основная научная гипотеза о существовании взаимосвязи между технологически наследуемыми механическими параметрами качества поверхностного слоя Λ, Ψ и параметрами сигналов акустической эмиссии [2].

В рамках работы был исследован типовой процесс механической обработки деталей машин, состоящий из операций резания и ППД, поскольку при правильно выбранных режимах обработки данный процесс позволяет обеспечить максимальную долговечность деталей, работающих в условиях усталостного циклического нагружения.

Разработана структурно-аналитическая модель состояний металла поверхностного слоя, описывающая его формирование на стадиях жизненного цикла изделия и устанавливающая взаимосвязи между наследуемыми параметрами качества и сигналами акустической эмиссии, регистрируемыми в процессе механической обработки деталей машин. Предложено описание ТН в терминах и категориях сигналов акустической эмиссии, выделяемых на каждой операции механической обработки или стадии эксплуатации в виде функциональных моделей [3].

Проведены теоретические исследования, которые позволили установить, что мощность сигнала акустической эмиссии *W*, регистрируемая при деформировании материала, зависит от его постоянных составляющих – физико-механических свойств и геометрии образца (детали), т.е. площади сечения или же объема деформируемой зоны (ОД), а также от показателей НДС – интенсивности деформаций и напряжений (ε_i, σ_i), в частности, скорости деформации $\dot{\varepsilon}$.

Предложена модель механического состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки детали, в основе которой лежат представления о накоплении деформации и исчерпании запаса пластичности металлом и их взаимосвязи с мощностью сигналов акустической эмиссии, накопленных поэтапно. Особенностью модели является учет ТН на основе анализа полученной акустико-эмиссионной информации.

Проведены комплексные экспериментальные исследования формирования НДС поверхностного слоя металла в зависимости от вида и режимов его нагружения. Исследования проводили в широком диапазоне режимов, параметров режущих и деформирующих инструментов на плоских образцах в условиях свободного ортогонального резания и ППД. Использовали различные программы нагружения: "резание–резание", "резание–ППД", "резание–ППД1–ППД2", "ППД1–ППД2–ППД3". Исследования позволили установить, с одной стороны, характер накопления механических свойств в поверхностном слое с учетом ТН и, с другой стороны, взаимосвязь мощности сигналов акустической эмиссии, зарегистрированной в процессе обработки, с параметрами механического состояния.

В результате исследований раскрыты закономерности накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя в зависимости от основных технологических факторов при резании и ППД. Полученные аналитические модели положены в основу решения задач расчета параметров механического состояния поверхностного слоя.

Проведенные экспериментальные исследования на операциях резания и ППД позволили установить пути обеспечения основных параметров качества поверхностного слоя путем контроля формирования свойств в процессе обработки по сигналам акустической эмиссии. Полученные взаимосвязи положены в основу алгоритма расчета параметров упрочняющей обработки с учетом явления ТН, позволяющего управлять качеством поверхностного слоя с целью обеспечения заданной циклической долговечности детали.

Методика расчета степени исчерпания запаса пластичности по сигналам акустической эмиссии и расчета циклической долговечности (прямая задача)

При решении задачи исходными данными на операциях механической обработки являются: материал детали, характеризуемый исходной твердостью HV_0,

кривой течения в виде $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon)$ и диаграммой пластичности в виде $\Lambda_р = \Lambda_р(П)$; геометрические параметры режущего и деформирующего инструментов (ρ, α, γ, φ, φ_1, $R_{пр}$, $D_р$); толщина срезаемого при резании слоя a; действительный натяг ролика $h_д$; подача s; частота вращения детали n; диаметр детали $D_д$.

Задача решается в следующей последовательности.

1. По известным моделям в зависимости от заданных режимов рассчитываются геометрические параметры ОД при резании и ППД, определяющие его форму и размеры [1].

2. Определяется время прохождения ОД вдоль линии тока материальной точкой поверхностного слоя.

3. С использованием полученной на стадиях механической обработки акустико-эмиссионной информации определяется величина накопленной энергии сигнала и выделившаяся мощность W.

4. Определяется значение Ψ на поверхности детали с учетом ТН по формуле

$$\Psi = 0{,}0453 \exp(3{,}42 \cdot 10^{-5} W).$$

5. Рассчитывается распределение Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя после механической обработки с текущими режимами.

6. Рассчитывается циклическая долговечность, которая определяется механическим состоянием поверхностного слоя.

Исходными данными для расчета циклической долговечности являются: численное амплитудное значение эксплуатационного напряжения $\sigma_а$ на данной глубине, МПа; глубина h, на которой рассчитывается циклическая долговечность; степень исчерпания запаса пластичности на поверхности после механической обработки Ψ_0; численное значение степени деформации сдвига на поверхности детали $(\Lambda_{мех})_0$; численное значение степени деформации сдвига на данной глубине после механической обработки $(\Lambda_{мех})_h$; степень исчерпания запаса пластичности на данной глубине после механической обработки $\Psi_{мех}$; численное значение компоненты тензора остаточных напряжений после механической обработки $(\sigma_{ост})_x$ на данной глубине, МПа.

Программная система "Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии"

Методика расчета циклической долговечности упрочненных деталей машин [4] реализована в виде программной системы "Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии", которая позволяет импортировать данные сигналов акустической эмиссии в виде текстовых файлов и производить расчет [5]:

- длины ОД и времени его прохождения материальной точкой вдоль линии тока;
- коэффициентов аппроксимации функции распределения импульсов по энергии;
- мощности сигналов акустической эмиссии;
- значений степени исчерпания запаса пластичности и степени деформации сдвига на поверхности обработанной детали и на расчетной глубине;
- циклической долговечности упрочненных деталей машин, подвергаемых усталостному нагружению при различных схемах в зависимости от значения эксплуатационного напряжения.

Действия, производимые программой, выводятся на экран в виде текстовой и графической информации. Основное окно программы, представленное на рис. 2, состоит из областей ввода, вывода и графической панели.

В области ввода заносится информация о параметрах режимов обработки: для резания – подача инструмента и глубина резания; для ППД – подача инструмента и действительный натяг, устанавливаемые на станке при обработке детали (рис. 3).

К области ввода относится окно выбора текстового файла с информацией о сигналах акустической эмиссии (рис. 4).

Порог энергии сигналов устанавливается на уровне, соответствующем пластической деформации. С клавиатуры задаются величина эксплуатационного напряжения, глубина вероятного зарождения трещины, диаметр детали и момент времени, с которого начинается обработка файла сигналов акустической эмиссии, соответствующих участку установившегося процесса обработки (рис. 5).

Глубина вероятного зарождения трещины рассчитывается по формуле, приведенной в работе [4]:

$$h_{тр} = 0{,}002 \exp(3{,}7 \Delta\Lambda_{ЦД}),$$

где $\Delta\Lambda_{ЦД}$ – приращение степени деформации сдвига на стадии циклической долговечности до значения, соответствующего моменту образования трещины ($\psi = 1$, $\Lambda = \Lambda_р$):

$$\Delta\Lambda_{ЦД} = \Lambda_р - (\Lambda_{мех})_0.$$

Определение времени начала обработки акустико-эмиссионной информации производится по данным с монитора DiSP16L, получаемым в графическом виде (рис. 6).

После завершения процедуры импорта акустико-эмиссионной информации на графическую панель выводится кривая, аппроксимирующая распре-

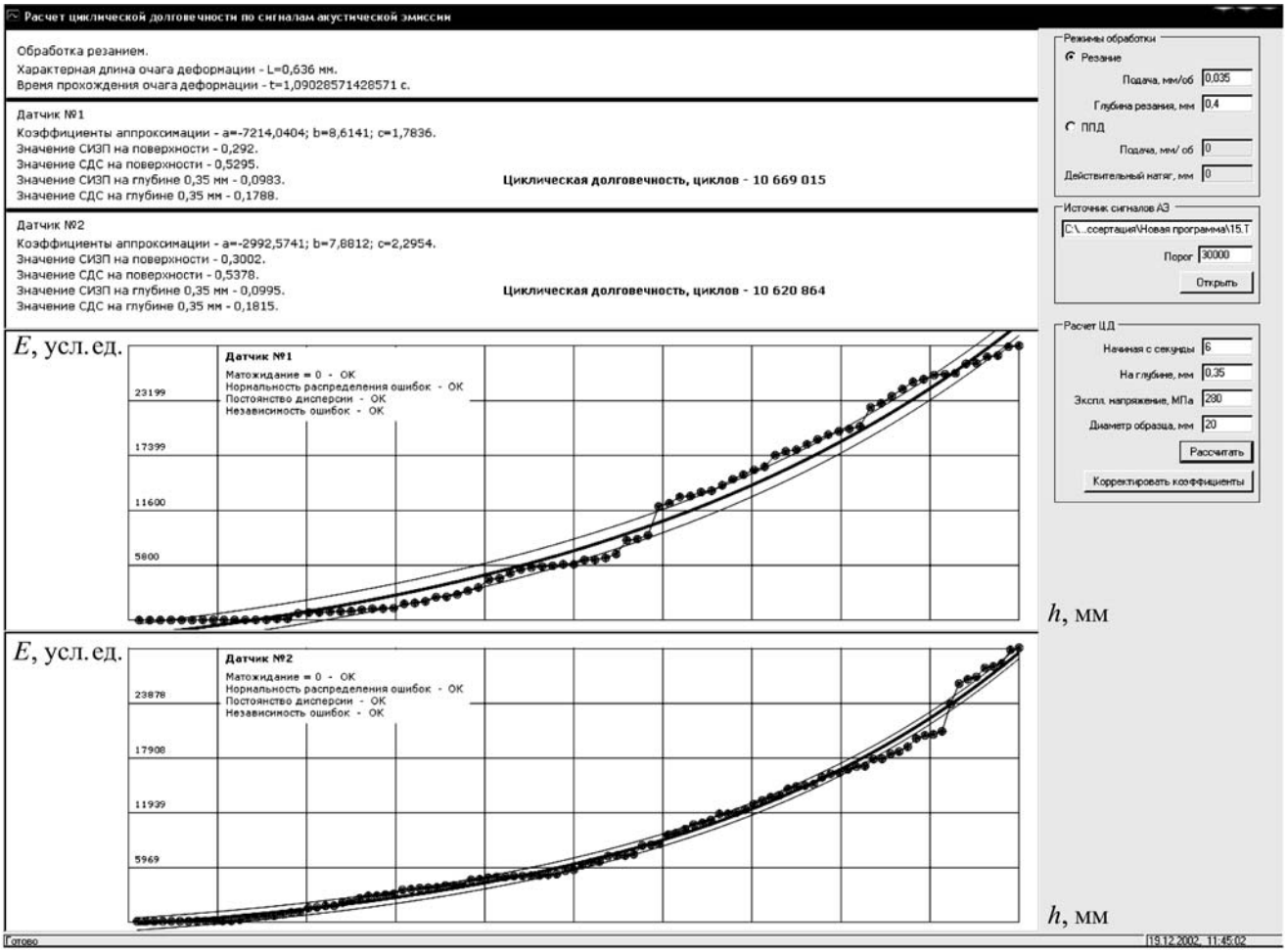


Рис. 2. Основное окно программы расчета циклической долговечности

деление энергии сигналов по глубине упрочненного слоя для двух используемых датчиков с отображением доверительного интервала (рис. 7).

После задания всех исходных данных в процессе работы программы по известным зависимостям производится расчет циклической долговечности. По окончании расчета в области вывода показывается следующая информация (рис. 8):

• величина характерной длины ОД и время его прохождения материальной точкой вдоль критической линии тока;

• значения коэффициентов аппроксимации для модели распределения импульсов сигналов акустической эмиссии по энергии (программа допускает корректировку коэффициентов аппроксимации при использовании статистических программ сторонних производителей);

• значения исходной степени деформации сдвига Λ_0 и степени исчерпания запаса пластичности Ψ_0 после механической обработки на поверхности детали;

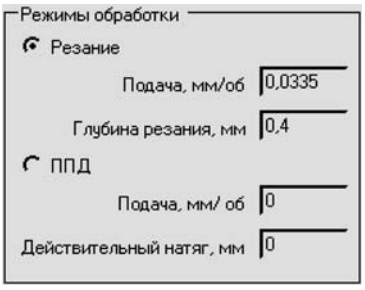


Рис. 3. Область ввода данных о параметрах режима обработки

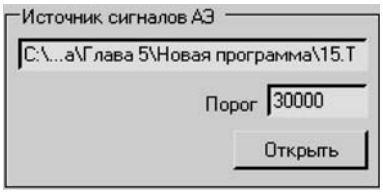


Рис. 4. Область ввода данных о сигналах акустической эмиссии

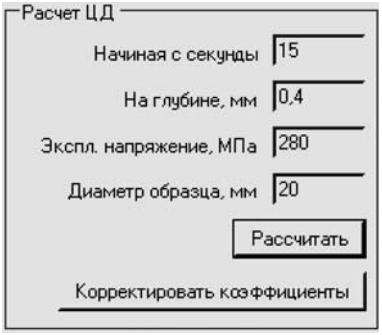
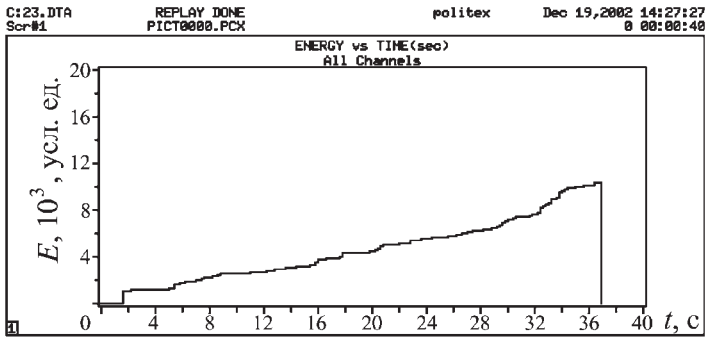


Рис. 5. Область ввода параметров расчета

Рис. 6. Информация о накоплении энергии сигналов акустической эмиссии по времени



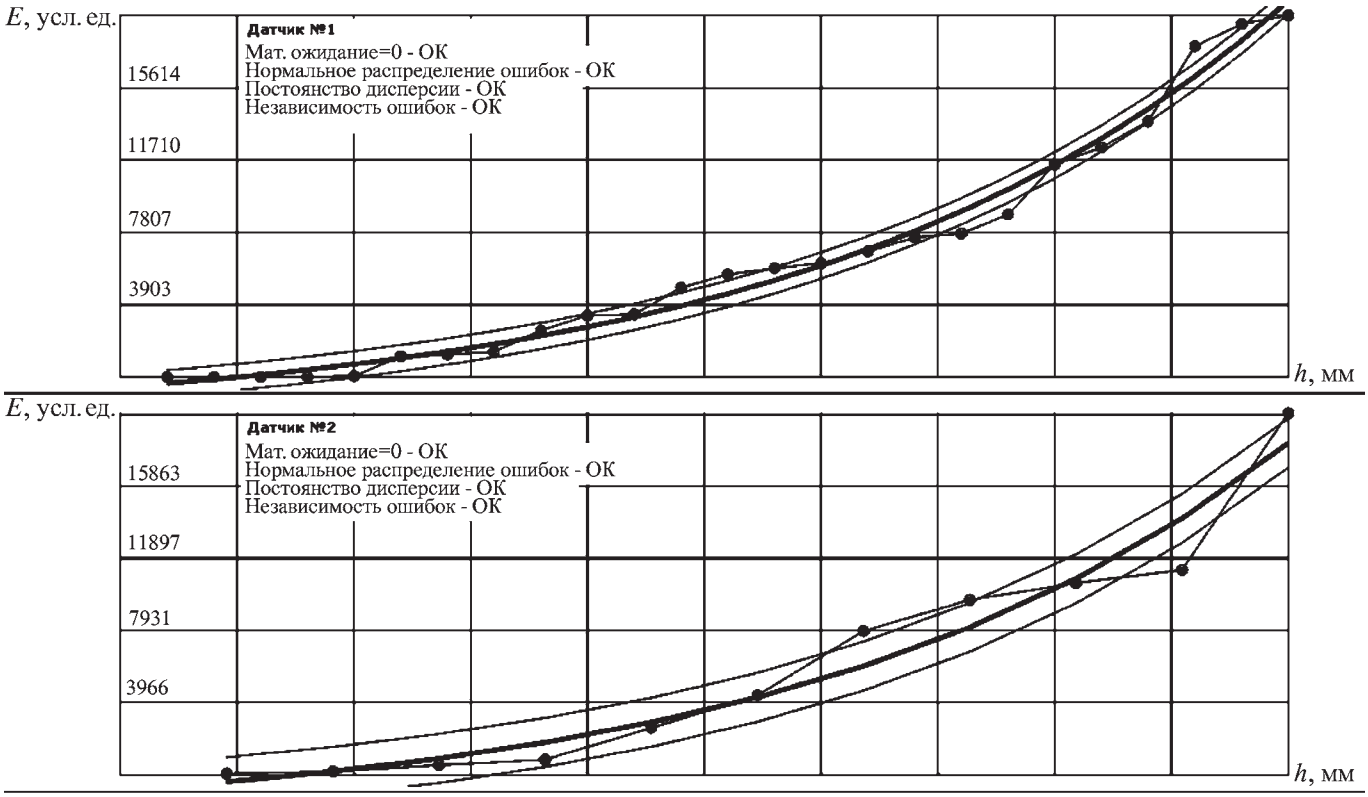


Рис. 7. Распределение энергии сигналов акустической эмиссии по глубине упрочненного слоя

• значения степени деформации сдвига $(\Lambda_{мех})_h$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi_{мех}$ после механической обработки на заданной глубине;

• значение количества циклов нагружения до вероятного разрушения детали.

Разработанная программная система "Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии" прошла официаль-

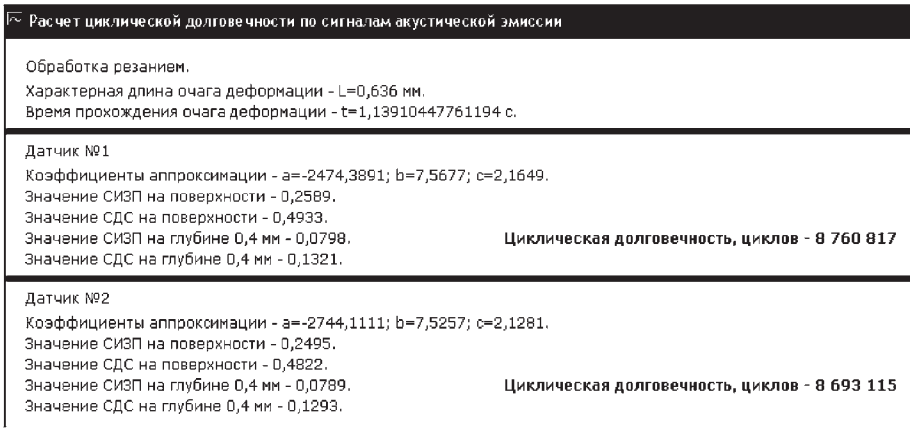


Рис. 8. Область вывода информации

ную регистрацию и включена в реестр программ для ЭВМ Российского агентства по патентам и товарным знакам [5]. Программа позволила автоматизировать трудоемкую процедуру определения параметров механического состояния поверхностного слоя на стадиях обработки резанием и ППД и расчета циклической долговечности деталей по сигналам акустической эмиссии, зарегистрированным в процессе механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.: ил.

2. **Мирошин И.В.** Оценка взаимосвязей феноменологических параметров металла с сигналами акустической эмиссии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 2. С. 44–50.

3. **Мирошин И.В.** Технологическое обеспечение наследуемых параметров качества при упрочняющей обработке на основе выбора рациональных режимов методом акустической эмиссии: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Барнаул. 2008.

4. **Кречетов А.А.** Разработка методики проектирования технологических процессов обкатывания на основе раскрытия наследственных закономерностей влияния состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность деталей машин: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. М. 2003.

5. **Программа** для ЭВМ № 2008610463 Российская Федерация. Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии [Электронный ресурс] / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, И.В. Мирошин; заявитель и правообладатель И.В. Мирошин. № 2007614816; заявл. 30.11.07; рег. 24.01.08.

УДК 621.01:67.02

А.А. Кречетов
(КузГТУ, г. Кемерово)
Тел.: (8-384-2)-58-35-25
E-mail: krechetov@mmfkuzstu.ru

Функциональная модель технологического наследования наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин

Разработана функциональная модель эволюции наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин. Выполнено общее аналитическое описание связей функциональной модели.

Ключевые слова: *деформационное наноструктурирование, программа нагружения, поверхностный слой, технологическое наследование.*

The functional model of evolution nanostructured surface layer state is developed. This model describes main stage of parts machine's life cycle. The general analytical description of functional model's relations is executed.

Keywords: *deformation nanostructurization, loading program, surface layer, technological inheritance.*

На сегодняшний день общепринятым является представление о трансформации структуры металла в наноразмерное состояние (с характерным размером структуры менее 100 нм) как об одном из эффективных способов существенного повышения эксплуатационных свойств изделий.

Увеличение прочностных характеристик и твердости при сохранении удовлетворительной пластичности и ударной вязкости при наноструктурировании связывают с изменением закономерностей пластического деформирования поликристаллического тела, обусловленном уменьшением размера зерна и увеличением относительного объема границ зерен. Анализ большого количества работ показывает, что для повышения эксплуатационных свойств деталей машин при неизменности фазового состава определяющее значение имеет характерный размер δ структурных элементов (зерен и субблоков) и угол γ разориентировки зерен.

В настоящее время разработаны и продолжают активно развиваться различные методы деформационного наноструктурирования, направленные на формирование наноразмерного структурного состояния металла по всему объему заготовки [1–3]. Получены локальные экспериментальные результаты, характеризующие зависимость механических и эксплуатаци-

онных свойств изделия от режимов деформационного наноструктурирования [4, 5].

Однако уровень сегодняшних знаний в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделий методами наноструктурирования не позволяет в полной мере использовать эти методы для инженерных приложений.

Известно, что в процессе эксплуатации под действием силовых, температурных и других факторов может происходить трансформация структурного состояния. При этом вопросы стабильности наноразмерного структурного состояния, закономерностей его эволюции практически не исследованы. Также отсутствуют надежные методы аналитической оценки параметров структурного состояния при варьировании технологических режимов и схем реализации методов наноструктурирования.

Для проектирования упрочняющих технологических процессов, основанных на наноструктурировании и обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства изделия, требуется разработка аналитического аппарата, позволяющего оценивать параметры структурного состояния на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Разработка такого аппарата возможна путем развития теории механики технологического наследования [6]. В соответствии с основными положениями механики технологического наследования на каждой стадии нагружения в поверхностном слое изделия происходит непрерывное накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности под действием характерной для каждой стадии программы нагружения.

На сегодняшний день получено описание формирования и трансформации программ нагружения на стадиях механической обработки и эксплуатации, а также закономерности формирования свойств поверхностного слоя под действием этих программ нагружения. Показано, что история нагружения на предшествующих стадиях обработки оказывает существенное влияние на формирование программ нагружения и накопление свойств поверхностного слоя на последующих стадиях.

Основная идея развития механики технологического наследования в направлении описания эволюции наноструктурированного состояния изделия заключается в установлении наследственных закономерностей формирования параметров структурного состояния металла под действием программ нагружения. При этом рассматриваются методы наноструктурирования, не приводящие к фазовым превращениям.

Описание формирования и трансформации наноструктурированного состояния на стадии жизненного

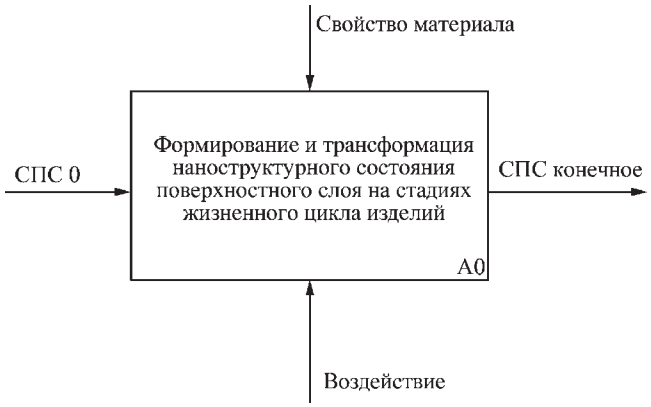


Рис. 1. Функциональная модель формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин: контекстная диаграмма А0

цикла изделия возможно, в частности, с использованием методологии структурного проектирования.

Главная функция структурно-аналитической модели сформулирована как "Формирование и трансформация наноструктурного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла изделий". На рис. 1 представлена контекстная (родительская) диаграмма, определены и описаны основные взаимодействия (стрелки), которые активируют основную функцию:

1. В качестве ресурса принято состояние поверхностного слоя детали после осуществления предшествующего нагружения (до выполнения данной функции). Это состояние описывается совокупностью параметров, таких как параметры структурного состояния, напряженно-деформированного состояния, упрочнения, микроструктуры, шероховатости и остаточных напряжений.

2. Продуктом выполнения данной функции является также состояние поверхностного слоя, но после соответствующего нагружения поверхностного слоя, описываемое той же совокупностью параметров.

3. В качестве управляющего воздействия приняты свойства материала.

4. В качестве механизма исполнения функции приняты, в общем виде, воздействия на поверхностный слой – технологические, эксплуатационные и связанные с ними.

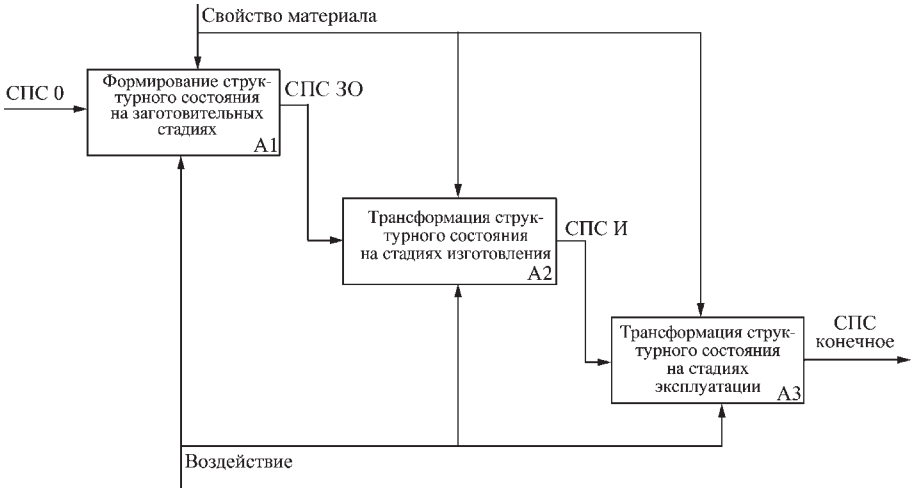
Семантика связей при декомпозиции исходной функции приведена в таблице.

На рис. 2 показана декомпозиция контекстной диаграммы А0. С точки зрения формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя основными этапами можно считать заготовительные операции, операции изготовления изделия и этапы эксплуатации. В соответствии с этими

Таблица

Семантика связей

Обозначение	Семантика	Обозначение	Семантика
СПС 0	Исходное состояние поверхностного слоя	Режимы резания	Режимы механической обработки, обусловливающие трансформацию структурного состояния поверхностного слоя в процессах обработки, при использовании технологических методов обработки без снятия стружки – соответственно режимы, характерные для этих методов
СПС конечное	Состояние поверхностного слоя после рассматриваемых стадий жизненного цикла изделий		
Свойства материала	Механические свойства материала, определяющие формирование и трансформацию структурного состояния металла: упругие свойства, кривая течения, диаграмма пластичности	Режимы модификации, режимы нанесения покрытий	Режимы, обусловливающие трансформацию структурного состояния при модификации поверхностного слоя и нанесении покрытий
Воздействия	Любые технологические, эксплуатационные и связанные с ними воздействия на поверхностный слой заготовки	Режимы сборки	Режимы, обусловливающие трансформацию структурного состояния поверхностного слоя при сборке
СПС ЗО	Состояние поверхностного слоя после заготовительных операций	Режимы сварки	Режимы, обусловливающие трансформацию структурного состояния поверхностного слоя при сварке
СПС И	Состояние поверхностного слоя после стадий изготовления изделия		
СПС ПД	Состояние поверхностного слоя, обусловленное пластической деформацией на заготовительных стадиях	СПС износ	Состояние поверхностного слоя, формирующееся при работе детали в условиях износа
Силовые воздействия	Все воздействия, приводящие к пластическому формоизменению заготовки	СПС усталость	Состояние поверхностного слоя, формирующееся при работе детали в условиях усталостных нагрузок
Термические воздействия	Все воздействия, приводящие к структурным превращениям при нагреве и охлаждении в процессе термической обработки, а также воздействия, обусловливающие закономерности кристаллизации и охлаждения отливок	СПС коррозия	Состояние поверхностного слоя, формирующееся при работе детали в условиях коррозии в агрессивной среде
СПС МО	Состояние поверхностного слоя после стадий механической обработки	Эксплуатационные режимы	Эксплуатационные режимы, обусловливающие трансформацию структурного состояния поверхностного слоя в процессах эксплуатации, конкретный набор этих режимов зависит от вида эксплуатационного нагружения
СПС МП	Состояние поверхностного слоя после модификации или нанесения покрытия		



этапами на данном уровне выделено три подфункции.

В результате процессов, протекающих в поверхностном слое на стадиях жизненного цикла, происходит изменение структурного состояния металла поверхностного слоя изделия. Свойства материала

Рис. 2. Декомпозиция контекстной диаграммы функциональной модели формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин

(предел текучести, кривая течения, диаграмма пластичности) также изменяются.

Декомпозиция диаграммы А1 приведена на рис. 3. Для большинства деталей машин в качестве заготовительных используются операции, связанные с пластическим формоизменением (прокатка, ковка, штамповка и др.) с последующей термической обработкой или формообразование заготовок литьем. В первом случае структурное состояние поверхностного слоя после заготовительных операций (СПС ЗО) определяется накоплением деформации и исчерпанием запаса пластичности под действием силовых факторов и процессами структурных превращений при нагреве и охлаждении при термической обработке. Во втором случае структурное состояние определяется параметрами процесса кристаллизации металла и охлаждения отливки в литейной форме, которые, с определенной долей условности, также можно считать зависящими от термических воздействий.

Рис. 3. Декомпозиция диаграммы А1 "Формирование структурного состояния на заготовительных стадиях"

На рис. 4 показана декомпозиция модели А2. Здесь выделены основные виды операций на стадии изготовления изделия, которые могут определять структурное состояние поверхностного слоя. Это стадии механической обработки, операции модификации поверхностного слоя и нанесения покрытий (например, электроэрозионный синтез покрытий, микродуговое оксидирование, ионная имплантация и др.), стадии сборки изделий, стадии сварки и восстановления изделий.

Следует отметить, что существенное повышение эксплуатационных свойств можно достичь использо-

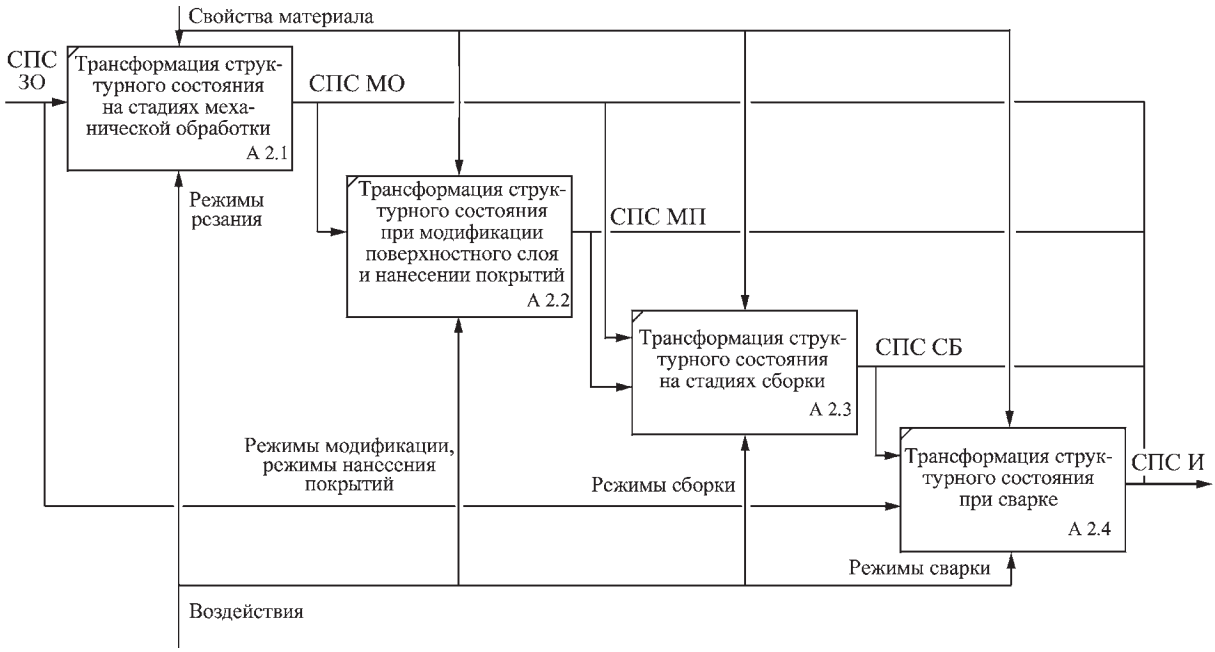


Рис. 4. Декомпозиция диаграммы А2 "Трансформация структурного состояния на стадиях изготовления"

ванием сочетания различных технологических методов – применением методов комбинированной обработки. Иными словами, структурное состояние поверхностного слоя может формироваться в процессах либо последовательного чередования, либо одновременного выполнения отдельных видов обработки. Последовательность чередования стадий изготовления изделия, показанная для декомпозиции диаграммы А2, условна.

Декомпозиция модели А3 приведена на рис. 5. Особенностью описания трансформации структурного состояния металла поверхностного слоя на стадиях эксплуатации является разделение процессов по видам нагружения – работа в условиях износа, усталостных нагрузок, при действии агрессивной среды, в условиях ползучести.

Условия эксплуатации изделия могут обусловливать совместное действие различных видов нагружения, например, выкрашивание поверхности под действием износа в сочетании с усталостными нагрузками, усталостные нагрузки изделия, работающего в агрессивной среде и т.д.

В связи с этим на этом уровне декомпозиции диаграммы А3 предусматривается возможность совместного действия различных видов нагружения на трансформацию структурного состояния поверхностного слоя детали в процессе эксплуатации. Последовательность различных видов эксплуатационного нагружения также является условной.

Связи функциональной модели формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин могут быть выражены в виде функциональных зависимостей (1).

Под действием пластической деформации на заготовительных стадиях формируется исходное структурное состояние, имеющее характерный размер структурных элементов δ и угол разориентировки зерен γ, которые могут быть определены по зависимостям вида

$$\begin{aligned}
\Lambda_{\text{ПФ}} &= f(\{\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3, \ldots\});\\
\xi_{\text{ПФ}} &= f(\{\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3, \ldots\});\\
\Lambda(\Pi) &= f(\{\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3, \ldots\});\\
\delta_{\text{ПФ}} &= f(\Lambda_{\text{ПФ}},\ \xi,\ \Lambda(\Pi));\\
\gamma_{\text{ПФ}} &= f(\Lambda_{\text{ПФ}},\ \xi,\ \Lambda(\Pi)).
\end{aligned} \qquad (1)$$

В этих выражениях $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, ...\}$ – множество (в математическом смысле) силовых воздействий, обусловливающих возникновение пластической деформации;

Λ – степень деформации сдвига, характеризующая накопленную деформацию;

ξ – скорость деформации;

$\Lambda(\Pi)$ – программа нагружения, характеризующая траекторию нагружения в координатах "показатель напряженного состояния" – "показатель деформированного состояния".

При нагреве и охлаждении происходят процессы трансформации структурного состояния, при этом можно записать

$$\begin{aligned}
\delta_{\text{НО}} &= f(\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \ldots\},\ \delta_{\text{ПФ}},\ \Lambda_{\text{ПФ}});\\
\gamma_{\text{НО}} &= f(\{\theta_1,\ \theta_2,\ \theta_3, \ldots\},\ \gamma_{\text{ПФ}},\ \Lambda_{\text{ПФ}}).
\end{aligned} \qquad (2)$$

Иными словами, параметры структурного состояния зависят от множества термических воздействий ($\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, ...\}$), структуры, сформированной на пред-

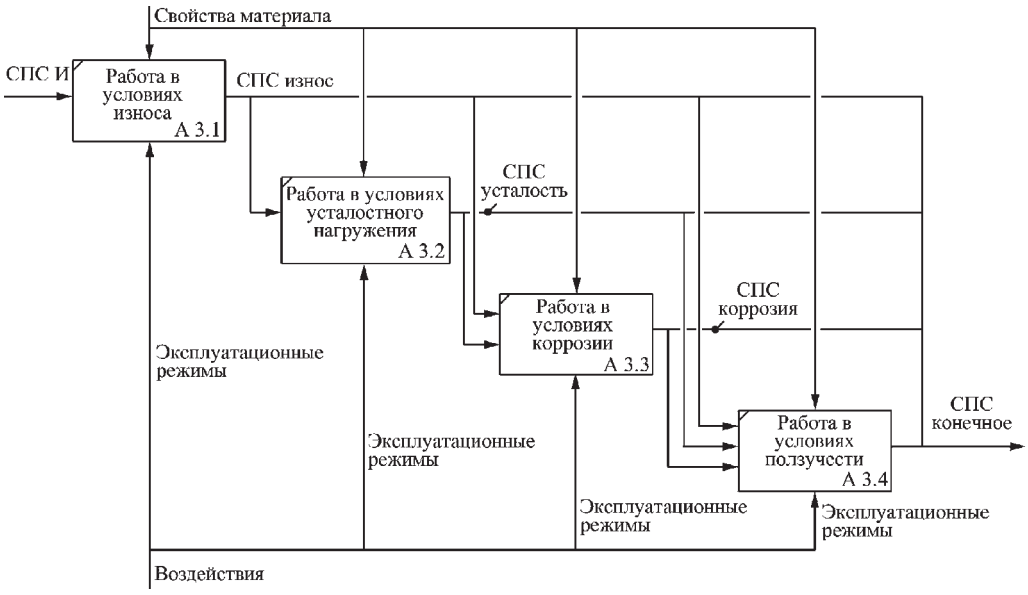


Рис. 5. Декомпозиция диаграммы А3 "Трансформация структурного состояния на стадиях эксплуатации"

шествующей стадии, и степени деформации сдвига, накопленной на предшествующей стадии.

В процессах механической обработки продолжается трансформация структурного состояния металла поверхностного слоя, при определенных условиях возможно наноструктурирование поверхностного слоя

$$\begin{aligned}
&\Lambda_{МО} = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \Lambda_{ПФ});\\
&\xi_{МО} = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \Lambda_{ПФ});\\
&\Lambda(П) = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\});\\
&\delta_{МО} = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \delta_{НО}, \lambda_{ПФ}, \Lambda_{МО}, \xi, \Lambda(П));\\
&\gamma_{МО} = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \gamma_{НО}, \Lambda_{ПФ}, \Lambda_{МО}, \xi, \Lambda(П)),
\end{aligned} \quad (3)$$

где $\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}$ – множество, определяющее элементы режимов механической обработки.

Степень деформации сдвига, накапливающаяся на стадиях механической обработки, и скорость деформации зависят от истории нагружения, т.е. от воздействий на предшествующих стадиях. Зависимость $\delta_{МО} = f(\delta_{НО})$ следует понимать как зависимость характерного размера структуры на рассматриваемой стадии от размера на всех предшествующих стадиях, эта зависимость может быть описана с использованием функционала наследственного типа.

В процессах сборки воздействия на поверхностный слой имеют такую же физическую природу, что и при механической обработке (например, посадка с натягом), поэтому трансформация структурного состояния при сборке может также быть описана выражением (4).

Процессы модифицирования поверхностного слоя и нанесения покрытий могут выполняться с использованием различных технологических методов, поэтому описание трансформации структурного состояния на этих стадиях возможно только в самом общем виде:

$$\begin{aligned}
&\delta_{МП} = f(\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \ldots\}, \delta_{МО}, \Lambda_{МО});\\
&\gamma_{МП} = f(\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \ldots\}, \gamma_{МО}, \Lambda_{МО}).
\end{aligned} \quad (4)$$

В этих выражениях $\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \ldots\}$ – множество, определяющее режимы модификации поверхностного слоя или нанесения покрытия.

В процессах сварки и восстановления деталей машин наплавкой происходит ряд процессов. В зоне расплавленного металла формируется исходная структура, в зоне термического влияния трансформация структурного состояния определяется параметрами нагрева и охлаждения в рассматриваемой точке. В общем виде эти структурные превращения могут быть описаны выражением (2).

В процессах эксплуатации при наличии силовых воздействий продолжается процесс накопления деформаций, который обусловливает дальнейшую трансформацию структурного состояния металла поверхностного слоя:

$$\begin{aligned}
&\Lambda_Э = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \Lambda_{МО});\\
&\xi_Э = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, \Lambda_{МО});\\
&\Lambda(П) = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\});\\
&\delta_Э = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, (\delta_{МО}|\delta_{МП}), \Lambda_{МО}, \Lambda_Э, \xi, \Lambda(П));\\
&\gamma_Э = f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \ldots\}, (\gamma_{МО}|\gamma_{МП}), \Lambda_{МО}, \Lambda_Э, \xi, \Lambda(П)),
\end{aligned} \quad (5)$$

где $\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \}$ – множество эксплуатационных режимов;

запись $\delta_{МО}|\delta_{МП}$ – характерный размер либо после механической обработки, либо после модификации поверхностного слоя или нанесения покрытия, что определяется конкретным технологическим процессом изготовления детали.

Для определения вида функциональных зависимостей (1)–(5) требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований. Вид программ нагружения, обусловливающих деформационное наноструктурирование, можно оценить путем моделирования процессов, например, равноканального углового прессования, кручения под давлением и др.

Реализация предложенного подхода к описанию эволюции наноструктурированного состояния позволит проектировать программы нагружения, обеспечивающие получение заданных параметров структурного состояния. Также полученные программы нагружения, обеспечивающие наноструктурирование, могут быть положены в основу разработки новых технологических методов деформационного наноструктурирования поверхностного слоя деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Nanostructured** materials: processing, properties and applications / Ed. C.C. Koch. N.Y.: William Andrews Publ., 2002. 546 p.

2. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: ИКЦ Академкнига, 2007.

3. **Андриевский Р.А., Рагуля А.В.** Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005. 192 с.

4. **Son Y.I., Lee Y.K., Park K.-T., Lee C.S., Shin D.H.** Ultrafine grained ferrite-martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: Microstructure and tensile properties // Acta Mater. 2005. Vol. 53. P. 3125–3134.

5. **Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др.** Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии / Отв. ред. Н.Н. Коваль. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 324 с.

6. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.

УДК 621.793.79

А.А. Авдиенко, К.И. Авдиенко
(МГТУ "МАМИ", г. Москва)
Тел.: (495) 223-05-23, доб. 1068
E-mail: kavdienko@yandex.ru

Упрочнение поверхности конструкционных металлов и сплавов методом ионно-лучевой обработки

Изложены результаты экспериментального изучения процесса упрочнения поверхности конструкционных металлов и сплавов методами ионной имплантации и ионно-лучевого смешивания. Выявлены основные закономерности и зависимости, определяющие технологические аспекты процессов ионной имплантации и ионно-лучевого смешивания. Предложена энергетическая модель процесса изнашивания, позволяющая выработать технологические режимы ионно-лучевой обработки с прогнозированием повышенного ресурса при истирании.

Ключевые слова: *упрочнение поверхности, ионное легирование, ионно-лучевое смешивание, удельная энергия разрушения.*

There are presented results of investigation ion beam treatment effects on construction steels and titanium alloys during ion implantation and ion beam mixing in this article. That is revealed the main natural phenomenon and dependencies, which determine technological aspects of ion implantation and ion beam mixing. There are proposed and developed model of fatigue worn out based on specific energy of destroying. It is possible to create and optimize technological regimes for ion beam hardening of steels and titanium alloys surface.

Keywords: *strengthening of surface, ion implantation, ion-beam mixing, specific energy of destroying.*

Введение

Использование *ионной имплантации* (ИИ) целесообразно для повышения ресурса работы штампов, пуансонов, режущего инструмента и других изделий из сталей и твердых сплавов. Их долговечность с помощью ионно-лучевого модифицирования удается повысить в 2...12 раз. Согласно результатам заводских испытаний, наблюдалось увеличение ресурса работы штампа вырубного (сталь Х12М) в 2,9 раз при обработке электротехнической стали. Стойкость стальных пресс-форм и пуансонов для штамповки колец в автомобильной промышленности увеличивалась в 10 раз по сравнению со стойкостью той же оснастки, защищенной твердым хромовым электропокрытием. Концевые фрезы служат в 5 раз дольше, чем обычно.

Разработанная технология ионно-лучевого упрочнения была использована на заводе "Стинол" (г. Липецк) для расширителей концов медных трубок. При формировании концевого конуса быстро вращающийся расширитель (сталь Х12М) вдавливается в медную трубку, разогревая деталь до 600...700 °С. Для предотвращения налипания на рабочую поверхность расширителя меди и закручивания трубок необходимо наносить смазочно-охлаждающие жидкости, в частности тетрахлорэтилен. После обработки расширителя методом ИИ было достигнуто увеличение износостойкости поверхности с одновременным снижением коэффициента трения, что привело к увеличению срока службы расширителя в 4 раза.

Ионно-лучевая обработка находит широкое применение для увеличения срока службы искусственных тазобедренных и коленных суставов, создания на поверхности медицинских имплантатов, находящихся в контакте с человеческой кровью, защитных покрытий, не подверженных образованию тромбов. Для этих целей производят имплантацию ионов кальция и/или фосфора в чистый титан и титановый сплав ВТ6, улучшая тем самым биосовместимость, повышая коррозионную стойкость и износоустойчивость [1].

Вместе с тем до сих пор существующие описания физических процессов при воздействии ионных пучков на металлические поверхности не позволяют сформулировать технологические модели и режимы обработки.

Истирание шероховатой поверхности

Силовое взаимодействие двух трущихся твердых тел (трение) сопровождается передачей энергии, расходуемой на разрушение поверхностных слоев материала, возбуждение упругих волн, нагрев. Мерой передачи энергии является коэффициент трения, зависящий от качества поверхности, в то время как износ определяется энергией, необходимой для удаления единицы массы вещества с поверхности материала (удельная энергия разрушения). Поверхность, подвергнутая механической обработке, представляет собой хаотический ансамбль неровностей, обладающих пониженной удельной энергией разрушения, благодаря чему имеет повышенный коэффициент трения и износ. Верхний разрушенный обработкой слой материала можно характеризовать как материал с плотностью $\rho(x)$, меняющейся от 0 до плотности массивного материала ρ_0 по экспоненциальному закону:

$$\rho(x) = \rho_0 (1 - e^{-l_\rho x}), \quad (1)$$

где l_ρ – константа роста плотности;

x – толщина истертого слоя.

Удельная энергия разрушения также должна меняться (возрастать) по мере приближения к неразрушенным слоям материала, поэтому закон изменения энергии примем также экспоненциальным:

$$W_p(x) = W_0 (1 - e^{-l_w x}), \quad (2)$$

где W_0 – удельная энергия разрушения массивного материала;

l_w – константа возрастания удельной энергии разрушения.

Ввиду хаотичности неровностей поверхности разрушенного обработкой материала можно предположить, что в процессе истирания коэффициент трения будет уменьшаться экспоненциально:

$$\mu(x) = \mu_0 (1 + k\mu e^{-l_\mu x}), \quad (3)$$

где μ_0 – коэффициент трения гладкого металла;

l_μ – константа снижения коэффициента трения по мере выглаживания поверхности.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных приведены на рис. 1, *а*.

Массовый износ по мере истирания слоя толщиной h определим следующим образом:

$$M_p(h) = \int_0^h \rho(x)dx. \quad (4)$$

Истирание (разрушение) материала происходит за счет сил трения:

$$W_p(x) M_p(x) = \mu(x) FL, \quad (5)$$

где F – нагрузка;

L – путь истирания.

Используя соотношения (1)–(5), варьируя коэффициенты W_0, l_w и l_ρ при $\rho_0 = 7{,}8$ г/см^3, получено соответствие зависимости массового износа от пути истирания с экспериментальными результатами (рис. 1, *б*).

Совпадение результатов измерения коэффициента трения при истирании металлических образцов со значением $\mu_0 = 0{,}192$, обработанных алмазными пастами различной зернистости и электрохимической полировкой достигается при значениях параметров k_μ и l_μ, приведенных в табл. 1.

На рис. 2 приведена зависимость удельной энергии разрушения по соотношению (2) от длины пути

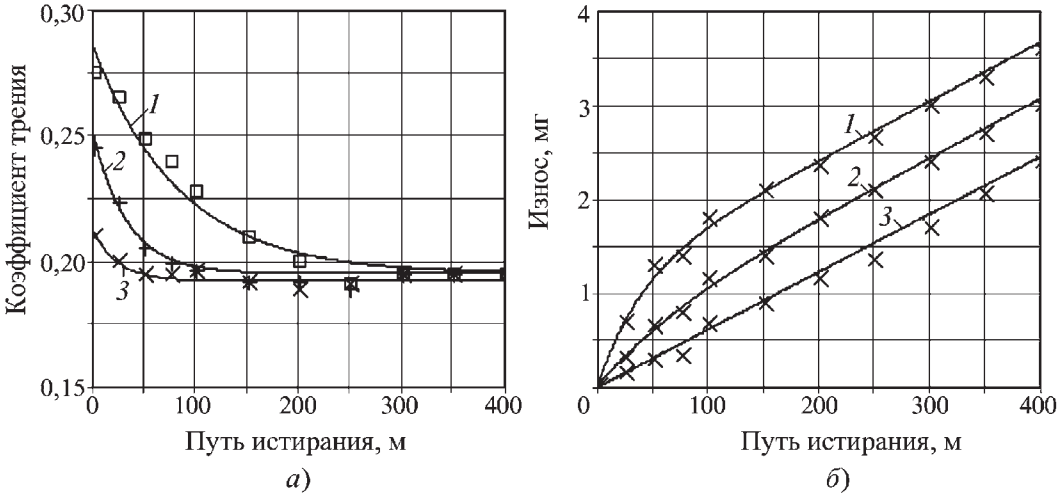


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (*а*) и износа (*б*) от длины пути истирания:
1 – шлифование алмазной пастой, зернистость 40 мкм; *2* – шлифование алмазной пастой, зернистость 14 мкм; *3* – электрохимическое полирование (линии – расчет, точки – эксперимент)

Таблица 1

Значения коэффициентов трения при различных обработках

Вид обработки	k_μ	l_μ, 1/мкм
Алмазными пастами зернистостью:		
40	0,5	1,0
14	0,29	2,6
Электрохимическое полирование	0,1	3,0

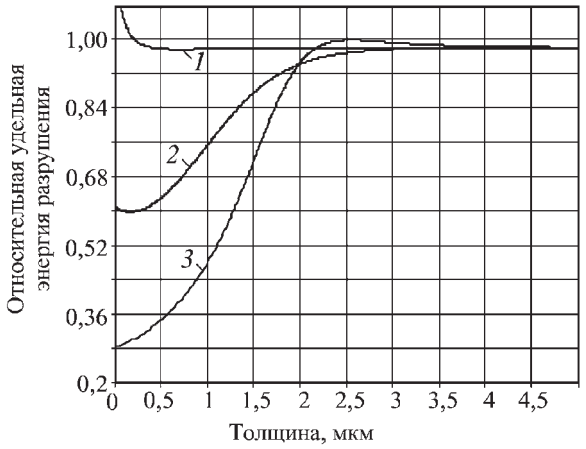


Рис. 2. Зависимость относительной удельной энергии разрушения от толщины истертого слоя при различном качестве обработки:
1 – электрохимическое полирование; *2* – шлифование алмазной пастой, зернистость 14 мкм; *3* – шлифование алмазной пастой, зернистость 40 мкм

истирания для различного качества обработки поверхности.

Как видно из рисунков, модельный расчет с высокой точностью соответствует эксперименту при соответствующем выборе показателей экспонент в распределении удельной энергии разрушения и плотности с глубиной. По мере истирания шероховатого слоя (в стадии притирания) коэффициент трения и скорость весового износа уменьшаются до величины, свойственной притертому материалу.

Таким образом, для повышения износостойкости металлических поверхностей в процессе абразивного истирания необходимо обеспечить повышенную удельную энергию разрушения материала, что достигается как путем снижения шероховатости поверхности в процессе обработки, так и путем иных дополнительных физико-химических воздействий.

Кристаллохимический анализ

В процессе ионно-лучевого воздействия на металлическую поверхность имеют место как высокие давления, так и высокие температуры (в области термических пиков), что приводит при имплантации ионов неметаллов (X = B, C, N, O) малых размеров к образованию фаз внедрения: твердых растворов (например, углерод в Fe) и соединений внедрения (бориды, карбиды, нитриды, оксиды). Более того, в этих условиях могут образовываться многие соединения и структуры, не существующие или не стабильные в обычных условиях.

При ионно-лучевой обработке образование различных соединений и структур связано с изменением типа связи, структуры, а также дефектности. Закономерности формирования фаз связаны с кристаллохимическими и термодинамическими характеристиками системы матрица–имплантант. Результат взаимодействия примеси с матрицей определяется растворимостью и возможностью образования соединений (табл. 2–4).

В первую очередь, растворение определяется электронным строением элемента, а именно его способностью ионизоваться под воздействием потенциального поля решетки металла с образованием металлических ионов, имеющих устойчивые s^2-, p^6-, d^6- или d^{10}-оболочки.

Таблица 2

Значения атомных, ионных, металлических радиусов *R* (Å) и потенциалов ионизации *U* (эВ)

Параметр	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	B	C	N
$R_{ат}$	1,45	1,36	1,28	1,31	1,25	1,24	0,91	0,77	0,71
$R_{ион}$	0,78	0,72	0,83	0,91	0,83	0,74	$0,2^{3+}$	$0,2^{4+}$	$0,15^{5+}$
$R_{мет}$	$1,48_\alpha$ $1,43_\beta$	1,34	1,25		$1,24_\alpha$ $1,29_\gamma$	1,24	0,73	0,55	0,38
U_n	43,2	65,0	31,0	–	16,2	18,2	37,8	64,5	47,2

Таблица 3

Размеры О и Т пор в ГЦК и ОЦК решетках переходных металлов (Å)

Форма поры	Вид решетки	
	ГЦК	ОЦК
О	$0{,}41d_{Me} = 1{,}06_{Fe}$ $0{,}154d_{Me}(h) = 0{,}382_{Fe}$	$0{,}633d_{Me}(t) = 1{,}57_{Fe}$
Т	$0{,}225d_{Me} = 0{,}565_{Fe}$	$0{,}291d_{Me} = 0{,}73_{Fe}$

Примечание. t и h – ширина и высота поры соответственно.

Таблица 4

Растворимость легких элементов в железе (% мас.)

Фаза	B	C	N
α-Fe	0,004	0,095	0,4
γ-Fe	0,021	3,61	11,0

Если потенциал ионизации последнего валентного электрона легкого элемента X окажется выше (65 эВ) уровня потенциала металла, то атом X не будет ионизоваться, а следовательно, и не растворится в металле матрицы. В процессе же ионной имплантации происходит внедрение уже высокоионизованных атомов, поэтому их встраивание в решетку матрицы не зависит от потенциала ионизации.

Следующим фактором, определяющим растворимость примеси X в металлической матрице, является соотношение радиусов атомов и параметров решетки.

Известно, что внедрение ионов X может происходить как в *октаэдрические* (О), так и *тетраэдрические* (Т) поры кубической и гексагональной плотнейших упаковок, которые образуют атомы переходных металлов IV–VI групп. По аналогии с растворами замещения растворимость определяется близостью удвоенных радиусов внедряемого элемента и поры, отношение которых не может превышать ± 15 %.

Атомы неметаллов X при температурах плавления металла и высоких давлениях переходят в решетке переходного металла в металлическое состояние, а их валентные электроны становятся электронами проводимости. При этом, в частности у боридов, проявляются явно выраженные металлические свойства (высокие значения твердости, тугоплавкости, электропроводности и т.д.), т.е. в этом смысле бориды ведут себя еще как типичные "соединения внедрения", подобные карбидам. Поэтому при рассмотрении процесса растворения этих элементов следует учитывать их металлические радиусы, обладающие меньшими размерами в сравнении с ионными и атомными радиусами.

Из данных табл. 2–4 видно, что атомы углерода и азота хорошо растворяются в γ-Fe и хуже в α-Fe, в то время как бор обладает очень малой растворимостью в железе. Ионная имплантация позволяет получать многие проценты внедренных ионов бора (например, при флюенсе $1{,}10^{17}$ см$^{-2}$ и энергии 30 кэВ концентрация B^+ достигает 12 %).

Встраивание атомов примеси в поры приводит к деформации решетки матрицы тем более значительной, чем больше металлический радиус ионов неметалла превышает размер поры.

Вероятность образования фаз внедрения определяется прочностью химической связи. Все атомы переходных металлов имеют незавершенные внутренние электронные *d*-орбитали. Валентные электроны неметаллов переходят на эти орбитали, что усиливает гибридизацию (по Полингу) и облегчает образование связи Me–X. Ранее установлено [2], что такой переход осуществляется за счет больших внутренних давлений в "расширившейся" решетке Me, окружающей межузельные атомы. При этом эффективные радиусы атомов X становятся меньше (табл. 2). Эффективный радиус межузельных атомов X зависит от химической природы Me. Этот радиус слегка увеличивается по мере возрастания концентрации межузельных атомов.

По мере повышения концентрации атомов X в решетке Me связь Me–Me ослабевает и доминирующую роль в фазах внедрения начинает играть связь Me–X. Число электронов, участвующих в образовании связей атомов C^{IV}, N^{III}, O^{II} (II–IV – валентности) уменьшается от 4 до 2. Это приводит к ослаблению связи Me–X.

Бор, которому присуща та же валентность, что и азоту, тем не менее проявляет себя иным образом. Известно [2], что у боридов, наряду с ослаблением связи Me–X увеличиваются межатомные силы за счет образования связей B–B. Главным фактором, определяющим структуру боридов, является большой атомный радиус бора, в сравнении с радиусами атомов углерода и азота, а не число валентных электронов. Большой радиус не способствует нахождению бора в октаэдрической координации ГЦК решетки. Согласно данным по структуре боридов в решетке фазы внедрения между слоями атомов металлической матрицы могут существовать 1-, 2- и 3-мерные сетки ковалентно связанных атомов бора (подобные фазам Гинье–Престона).

Эволюция независимых связей между атомами бора от изолированных атомов бора до непрерывного 3-мерного каркаса представлена на рис. 3. Этой эволюции соответствует ряд $Me_2B \rightarrow MB \rightarrow Me_3B_4 \rightarrow$

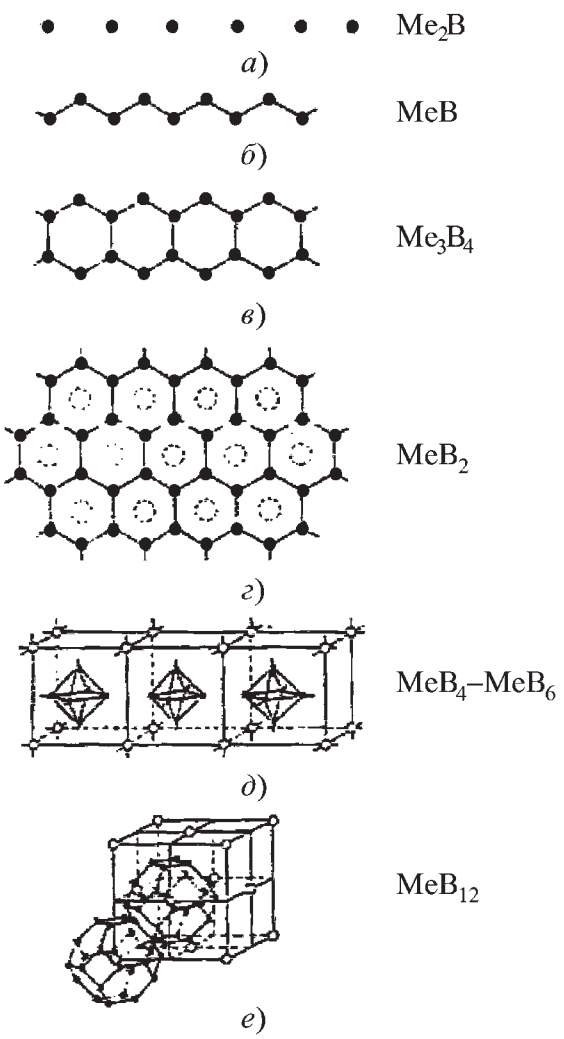


Рис. 3. Конфигурация атомов бора в структурах боридов: *а* – изолированные атомы; *б* – цепочка атомов; *в* – сдвоенные цепочки атомов; *г* – двумерные сетки (пунктир – атомы Ме располагаются выше и ниже сетки атомов бора); *д* – октаэдрические конфигурации бора (в простой кубической решетке Ме); *е* – кубооктаэдрические конфигурации атомов бора (атомы Ме образуют ГЦК решетку и располагаются в центрах кубооктаэдров из атомов бора)

$\rightarrow MeB_2 \rightarrow MeB_6 \rightarrow MeB_{12}$ (цепочки атомов бора→кольчатые цепочки→гексагональные сетки→трехмерные каркасы). Вначале решетка атомов бора просто внедряется в гексагональную решетку атомов металла, приводя к различной последовательности упаковки атомных слоев; позднее наличие решетки атомов бора обусловливает более серьезные изменения структуры.

Таким образом, основной особенностью боридов, новой по сравнению с фазами внедрения, является существование связей B–B. Пока атомы бора остаются в решетке изолированными, как в Me_2B, бориды совершенно аналогичны по структуре фазам с атомами неметалла меньшего размера (карбидам, нитридам). Однако, как только возникают связи B–B (т.е. начиная с боридов типа MeB) и по мере того, как они становятся все более прочными, на первый план выступает эволюция независимых связей между атомами бора.

Показано, что изменение структуры при имплантации ионов бора, связанное с началом образования боридных кластеров в стали 12Х18Н10Т, наблюдается лишь при достижении пороговой концентрации бора (~12 % мас.).

Фазы TiB и TiB_2 формируются также последовательно по мере роста дозы ионов бора. Отмеченные особенности структуры боридов обусловливают их повышенные прочностные характеристики и высокие температуры плавления.

Прочность химической связи и устойчивость соединений внедрения тем выше, чем больше величина атомов переходного металла. Чем меньше радиус атомов Ме, тем более затруднено образование соединений типа фазы внедрения.

Анализ теплот образования различных оксидов, нитридов, боридов и карбидов показывает, что преимущественно в процессе ИИ начинают образовываться те соединения, которым соответствуют максимальные (отрицательные) значения теплот образования. Таким образом, самое благоприятное состояние для образования фаз внедрения присуще титану, затем хрому и железу.

Приведенные закономерности позволяют утверждать, что в процессе внедрения фазообразующих ионов (азот, бор) происходит увеличение удельной энергии разрушения исследовавшихся материалов.

Формирующиеся в поверхностном имплантированном слое бориды, увеличивая при кристаллизации объем, создают значительные тангенциальные напряжения.

Имплантированные атомы, внедряясь в О поры решетки железа и хрома "расталкивают" атомы металла, создавая значительные напряжения сжатия. В то же время возникающие напряжения приводят к ускоренной диффузии дефектов и примесных атомов вглубь образца. Компенсация диффузии силами Пайерлса создает некоторое распределение концентрации боридной фазы, а следовательно, и упрочнение, спадающее вглубь образца.

По аналогии с изменением распределения напряжений по сечению нагруженной балки, распределение микротвердости по глубине (рис. 4) можно представить в виде зависимости относительного упрочнения от величины

$$h/(h_0 - h),$$

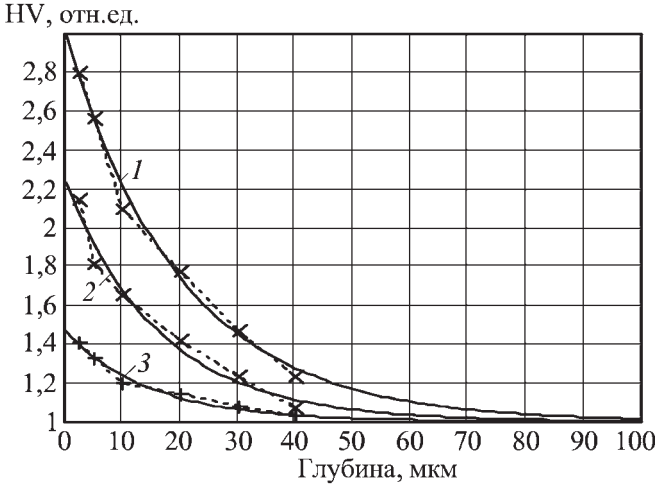


Рис. 4. Зависимость микротвердости по глубине при легировании ионами бора с энергией 40 кэВ:
1, *2* – сталь 12Х18Н9Т, флюенс – $5 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ соответственно; *3* – сплав ВТ16 (точки – эксперимент; линии – расчет по формуле (1))

где h – глубина, измеряемая от поверхности;

h_0 – удвоенная толщина упрочненного слоя.

Эта зависимость хорошо аппроксимируется функцией вида

$$H/H_0 = A\exp(-h/k) + B - C[h/(h_0 - h)]. \qquad (6)$$

Удельная энергия разрушения материала при внедрении (или формировании) упрочненной фазы может быть выражена следующим образом:

$$W_{\text{р}} = W_m + (W_f - W_m)C_f, \qquad (7)$$

где W_m, W_f – удельные энергии разрушения матрицы и упрочненной фазы;

C_f – доля упрочненной фазы.

Зависимость удельной энергии разрушения от флюенса ионов азота в процессе ионно-лучевой имплантации в систему сталь 45–олово имеет резко выраженный максимум (рис. 5).

Из соотношения (5) следует, что снижение массового износа зависит от удельной энергии разрушения упрочненной фазы и ее доли, а следовательно, и от флюенса ионов. Относительная величина износа в зависимости от флюенса записывается следующим образом:

$$S(D) = \frac{\mu(D)}{W_m + (W_f - W_m)C_f}, \qquad (8)$$

где $\mu(D)$ – коэффициент трения, зависящий от флюенса.

Для расчета зависимости C_f по глубине поверхностного слоя для реальной стали можно воспользоваться распределением Гаусса для концентрации ионов, имплантированных в немонокристаллическую среду:

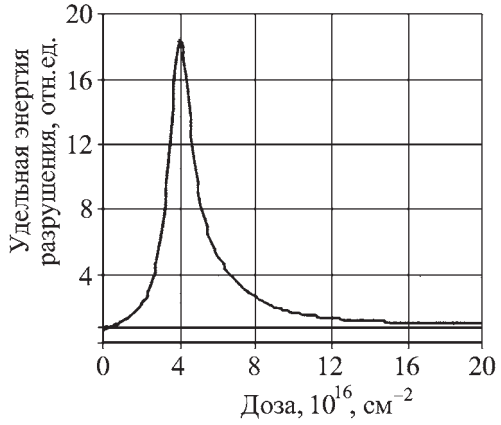


Рис. 5. Зависимость удельной энергии разрушения системы сталь 45–олово от флюенса ионов азота

$$C_f(h) = C_0[\exp(-(h_0 - h)^2/2d^2)]/\pi d\sqrt{2}, \qquad (9)$$

где C_0 – концентрация на поверхности, определяемая флюенсом;

h_0 – смещение максимума под поверхность, зависящее от энергии ионов;

h – координата в глубину материала;

d – дисперсия распределения, зависящая от энергии.

Для упрощения расчетов распределение (9) можно заменить соотношением:

$$C_f(h) = C_0 \exp(-h/\eta), \qquad (10)$$

где h – глубина;

C_0, η – константы спада концентрации.

Коэффициент трения, определяемый как отношение энергии сцепления поверхностей W_s к энергии разрушения наименее прочной из них, будет находиться в зависимости от концентрации и удельной энергии разрушения упрочняющей фазы и, следовательно:

$$\mu(C_f) = \frac{\mu_0(2W_m + (W_f - W_m)C_f}{(W_m + (W_f - W_m)C_f)}. \qquad (11)$$

В процессе износа при сухом трении прочная износостойкая фаза разрушается и удаляется из поверхностного слоя в меньшей степени, чем матрица. В результате поверхностный слой обогащается износостойкой фазой. Коэффициент втирания, несомненно, связан с соотношением энергий разрушения упрочненной фазы и матрицы. Примем простое соотношение для коэффициента втирания:

$$K_{tr} = 1 - W_m/W_f. \qquad (12)$$

Динамика изменения концентрации по мере истирания представляется в следующем виде:

$$C_{f_i} = \sum_{n=0}^{i} C_{i-n} K_{tr}^{n}, \qquad (13)$$

где n – число истертых слоев.

С учетом полученных экспериментальных результатов для зависимости коэффициента трения от величины истертого слоя, сопоставив микротвердость с удельной энергией разрушения и используя выражения (11)–(13), можно вычислить зависимость весового износа от пути истирания послоевым суммированием:

$$S(L, C_{f_0}) = \sum_{i}^{m} \mu_0 \delta L \times \frac{(2W_m + (W_f - W_m)\sum_{n=0}^{i} C_{f_{i-n}} K_{tr}^{n})}{\left(W_m + (W_f - W_m)\sum_{n=0}^{i} C_{f_{i-n}} K_{tr}^{n}\right)^2}, \qquad (14)$$

где L – путь истирания;

δL – элемент пути истирания;

m – число истертых слоев.

Воспользовавшись результатами, приведенными выше, на основании соотношения (6) можно построить зависимость удельной энергии разрушения, отнесенной к удельной энергии разрушения гладкой поверхности от толщины истертого слоя (рис. 2). Как и следовало ожидать, удельная энергия разрушения растет по мере снижения шероховатости поверхностного слоя. В соответствии с соотношением (6), измерив коэффициент трения и массовый износ для материала при различных вариантах обработки поверхностного слоя, возможно определить удельную энергию разрушения, и, следовательно, получить количественную характеристику упрочнения (или разупрочнения) материала в процессе обработки.

Методика ионно-лучевой обработки

В процессе ионного легирования ионы нужного сорта выделяются с высокой чистотой из потока ионов, получаемых из газоразрядного источника. Обработку экспериментальных образцов, малоразмерных деталей и инструмента производили непосредственно в вакуумной камере, составляющей часть имплантера.

Для экспериментов использовали стали Ст3, 45, Х12М, 5ХВ2С, 12Х18Н10Т и титановые сплавы ВТ4 и ВТ16. Образцы представляли собой шайбы диаметром 10 мм. Для ионной имплантации использовали моноатомные ($\Delta m/m < 0{,}01$) пучки бора, азота, кислорода. Внедрение бора проводили на установке "Лада-30" при токе пучка 0,4 мА, азота и кислорода (ток пучка 50 мкА) – на модернизированной установке "ПРИЗ-200". Температура облучаемых образцов была не более 100 °С, вакуум в приемной камере – не ниже $5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Механически шлифованные и полированные образцы НС подвергали стандартной термической обработке закалкой от T = 1100...1150 °С в воде без отпуска [3]. Исходная структура сплава ВТ4 представляла собой α-фазу с небольшим (< 5 %) количеством β-фазы, структура ВТ16 – α- и β-фазы.

После ИИ проводили рентгенографический фазовый анализ на дифрактометре ДРОН-4.07 (Cr-излучение) при съемке с условием фокусировки по Брэгу–Брентано [4]. Методика позволяет регистрировать наличие или отсутствие структурных изменений на глубинах 4...7 мкм. Изменение периодов решетки основных фазовых составляющих и появление новых фаз регистрировали по смещению и уширению дифракционных линий и появлению новых линий при диапазонах развертки 20 и 2°.

Микротвердость измеряли с использованием микротвердомера ПМТ-3 при регулируемой нагрузке на индентор 0,05...0,2 Н. Износ определяли на машине трения "Шлиф-2" [5] с периодическим измерением коэффициента трения методом маятника. Для более детального изучения износа и коэффициента трения была сконструирована и изготовлена специализированная машина трения, позволяющая измерять коэффициент трения непосредственно в процессе испытаний.

Все испытания проводили в условиях сухого трения по диску из стали 45, закаленной до 52...54 HRC, со скоростью 0,2 м/с под нагрузкой 56 Н. Износ определяли по потере массы образца, которая измерялась на аналитических весах с точностью ±0,05 мг.

Прямая ионно-лучевая имплантация

Наибольший эффект ионного борирования стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ16 наблюдается в зависимости микротвердости от дозы легирования (рис. 6) [6]. Согласно измерениям распределения микротвердости по глубине (рис. 4) можно видеть: упрочнение материала наблюдается на глубинах вплоть до 55 и 40 мкм (для 12Х18Н10Т и ВТ16 соответственно), что более чем на два порядка превышает проективный пробег ионов B^+ с энергией 40 кэВ. На рис. 4 распределение микротвердости по глубине соответствует значению выражения (6) с коэффициентами, приведенными в табл. 5.

Измерение плотности дислокаций и микротвердости по глубине при различных флюенсах для одних и

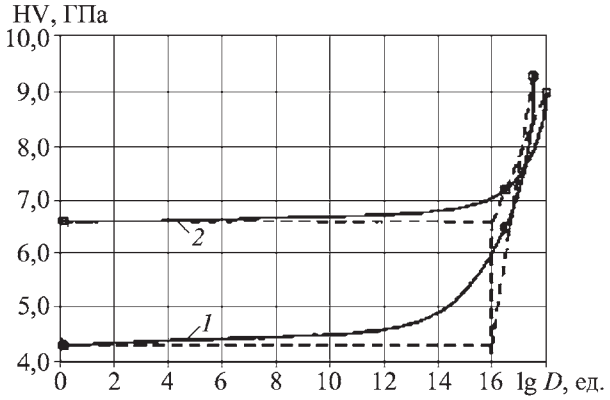


Рис. 6. Зависимость микротвердости HV стали 12Х18Н10Т (*1*) и сплава ВТ16 (*2*) от дозы облучения ионами бора

Таблица 5

Значения коэффициентов для выражения (6) и результатов, представленных на рис. 6

Доза, $см^{-2}$	*A*	*k*	*B*	*C*
$5 \cdot 10^{17}$	1,4	12,5	1,7	0,7
$5 \cdot 10^{16}$	0,8	7,8	1,48	0,48

тех же образцов [7] показали точную корреляцию: увеличение микротвердости прямо пропорционально возрастанию плотности дислокаций.

Для исследованных образцов пониженный износ наблюдался при истирании на 2 и 16 мкм для 12Х18Н10Т и ВТ16, оставаясь постоянным и равным 0,08 и 6,3 мкм/км соответственно. Зависимость удельного износа от коэффициента увеличения микротвердости в приведенном диапазоне износа линейная: $P = 1{,}68\ (1–0{,}41H)$ для 12Х18Н10Т, $P = 2{,}32\ (1–0{,}57H)$ для ВТ16, где $P = \Delta m_{лег}/\Delta m_{исх}$, $H = H_{лег}/H_{исх}$, $\Delta m_{лег}$ и $H_{лег}$ – удельный износ и микротвердость обработанной, а $\Delta m_{исх}$ и $H_{исх}$ – удельный износ и микротвердость необработанной поверхностей.

Как показал рентгеноструктурный анализ, соответственные фазы образуются в стали 12Х18Н10Т при дозе легирования выше 10^{17} $см^{-2}$, а в сплаве ВТ16 – выше $5 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$. Фрагменты рентгенограмм представлены на рис. 7.

В стали 12Х18Н10Т по мере увеличения дозы легирования наблюдается сначала уширение пика γ-Fe фазы от 1,0 до 1,2°, а затем с появлением фазы FeB – смещение этого пика на 0,4° в сторону больших углов. Одновременно наблюдается снижение интенсивности пика γ-Fe (022). С образованием фазы FeB связано и резкое возрастание микротвердости (рис. 6). Такая динамика рентгенограмм указывает на то, что

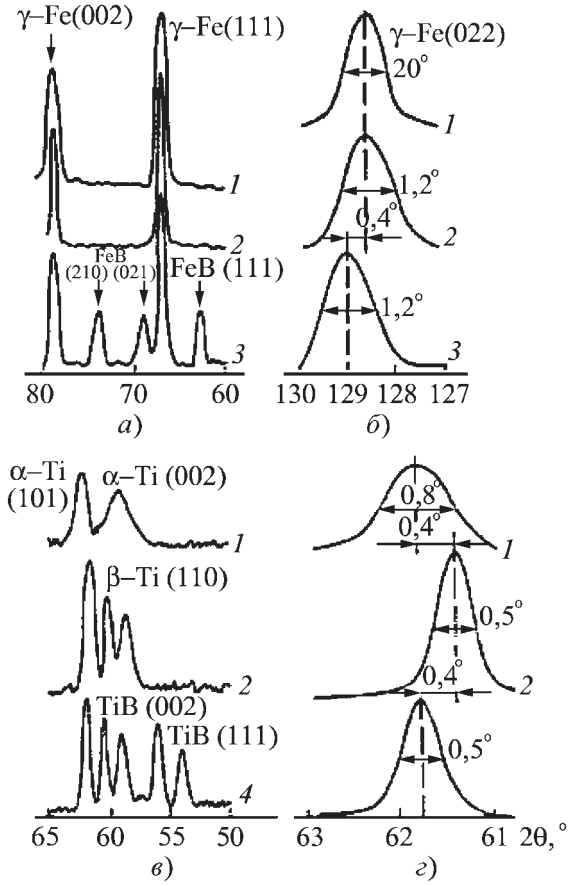


Рис. 7. Фрагменты дифрактограмм стали 12Х18Н10Т (*а*, *б*) и сплава ВТ16 (*в*, *г*), снятые с отсечкой через 1° (*а*, *в*) и 0,1° (*б*, *г*) для исходного (*1*) и обработанных ионным пучком бора (*2–4*) образцов до доз: $5 \cdot 10^{16}$ (*2*), $5 \cdot 10^{17}$ (*3*) и 10^{18} ион·$см^{-2}$ (*4*)

только с достижением некой критической концентрации атомов бора (при флюенсе ~10^{14}...10^{15} $см^{-2}$) происходит формирование мелкодисперсной фазы FeB и резкое возрастание микротвердости и износостойкости. При таком механизме упрочнения естественно ожидать большего увеличения износостойкости по сравнению с микротвердостью. И действительно, при дозе легирования ~$5 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ микротвердость возрастает в 2,2 раза, в то время как износ уменьшается в 4,6 раза.

Несколько иная картина наблюдается в динамике рентгенограмм от поверхности сплава ВТ16 при облучении ионами бора. При флюенсе ~$5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ имеет место смещение линий (101) и (002) α-Ti на угол ~0,4° в сторону меньших углов, ширина пика уменьшается с 0,8 до 0,5°, что свидетельствует о распаде мартенситной α′-фазы с выделением дисперсных частиц α- и β-фаз. Образование β-фазы подтверждается появлением пика β-Ti (110). В то же время эта интерпрета-

ция распада не совсем однозначна, так как в соответствии с результатами работы [8] после ударного нагружения давлением ~350 кбар (температура неизвестна) получена новая фаза титана с ОЦК-структурой (a = 3,276 Å). Предполагается, что это – новая фаза высокого давления в метастабильном состоянии.

С повышением флюенса до ~10^{18} см$^{-2}$ увеличивается концентрация мелкодисперсной α-фазы (увеличение интенсивности пика, смещение его на 0,4° в сторону больших углов) и появляются пики TiB (002) и TiB (111). При флюенсе бора 10^{18} см$^{-2}$ и энергии ионов 60 кэВ на Оже-спектрах фиксируется фаза TiB_2 гексагональной модификации и наблюдается упрочнение поверхностного слоя до глубины ~40 мкм. При этом износ материала уменьшается в 1,9 раза, а микротвердость на поверхности увеличивается в 1,4 раза.

Влияние элементного состава пучка на упрочнение

Как отмечалось ранее, воздействие ионным пучком приводит к существенному изменению физико-химических и механических свойств поверхностных слоев металлов. Однако в процессе облучения возможно внедрение неконтролируемых примесей, источниками которых могут быть примеси в рабочем веществе ионного источника, остаточные газы в вакуумной камере и др. Эти примеси могут оказывать непредсказуемое воздействие на ожидаемое изменение свойств, поскольку модификация механических свойств однозначно связана с изменением фазового состава.

ИИ азота в сталь 12Х18Н10Т приводит к образованию в приповерхностных слоях нитридных фаз железа. Нитрид Fe_4N в виде мелкодисперсных пластинчатых частиц наблюдался в растровом электронном микроскопе. Известно [2], что нитриды железа метастабильны и в реальной системе Fe–N в равновесии находятся α-твердый раствор, γ-твердый раствор и газообразный азот, а не нитрид. При этом может быть получено не одно состояние, а целая последовательность нестабильных, но долгоживущих состояний, которые и обнаруживаются при анализе.

Как известно, в аустенитных сталях помимо неупорядоченного твердого раствора азота в γ-Fe существует нитридная фаза Fe_4N (γ′-фаза), которая изоморфна этому раствору и характеризуется упорядоченным расположением атомов азота и вакансий. Таким образом, при повышенных флюенсах образуется большая концентрация γ′-фазы, что и приводит к возникновению напряжений сжатия, наблюдаемого при рентгеновских исследованиях.

Образование α-Fe (рис. 7, *а*) свидетельствует о частичном проявлении мартенситного γ→α-превращения под влиянием деформации аустенитной стали в процессе ИИ, что вносит определенный вклад в увеличение твердости.

На рентгенограммах, снятых с поверхности стали 12Х18Н10Т после ИИ наблюдаются также пики от карбида хрома Cr_3C_2 (211), (420), (002).

В то же время нитриды хрома более стабильны и характеризуются более высокими теплотами образования, чем нитриды железа. Однако легкое окисление хрома предотвращает, по-видимому, их образование. Нитриды никеля распадаются чрезвычайно быстро.

Дефектный характер структуры нитридов, отклонения от стехиометрии объясняют плохую стойкость их против окисления. После облучения смесью ионов азота (78 %) и кислорода (22 %) той же стали в поверхностном слое нитридов не наблюдалось, что можно объяснить присутствием кислорода, препятствующего их образованию (рис. 7, *а*).

Ионы бора, как было отмечено ранее, внедренные в поверхностный слой хромоникелевой стали, формируют бориды железа (рис. 7, *б*). Последующее облучение этих образцов смесью ионов азота и кислорода, а также чистым азотом, приводит к разложению борида железа: на дифрактограмме линии от FeB исчезают. Аналогичное влияние оказывает и последовательное облучение ионами бора, а затем азота.

Имплантация ионов азота в поверхностный слой сплавов ВТ4 и ВТ16 приводит к формированию нитридных фаз титана. Золотистый оттенок нитридного покрытия наблюдался уже при низких дозах облучения. Область твердых растворов азота в титане довольно широка. Основу титановых сплавов составляет α-фаза (структура ГПУ). Поэтому вначале происходит растворение азота в гексагональной структуре титана, с образованием твердого раствора внедрения, а затем образуется структура TiN (ГЦК), но она сильно дефектна по азоту (твердый раствор вычитания) [2].

Эти фазы приводят также к значительному увеличению микротвердости и износостойкости титановых сплавов.

В табл. 6 приведены зависимости микротвердости при нагрузке на индентор 0,1 Н исходного образца и после облучения сплава ВТ4 ионами азота и кислорода.

Максимальное увеличение микротвердости наблюдается у образцов, облученных ионами азота. Последовательное облучение азотом, а затем кислородом снижает микротвердость более чем на 30 % по сравнению с исходным образцом. Имплантация

Таблица 6

Микротвердость сплава ВТ-4 после облучения

Облучение ионами	Микротвердость, ГПа	Увеличение микротвердости, %
Без облучения	0,9	–
Кислорода, азота	1,1	22
Азота, кислорода	1,3	44
Азота	1,6	78

ионов кислорода, а затем азота хотя и уменьшает значения микротвердости, тем не менее остается выше значений для необлученного сплава.

Как видно из рис. 8, облучение титанового сплава чистым азотом (*2*) , а также последовательно азотом, а затем кислородом (*3*) приводит к уменьшению износа более чем на 40 % по сравнению с исходным образцом. Последовательное облучение кислородом, а затем азотом (*1*) уменьшает износ менее чем на 10 % по сравнению с исходным.

Характер изменения скорости износа от пути трения качественно соответствует зависимости микротвердости от толщины истертого слоя.

Характер зависимости микротвердости и износостойкости от последовательности облучения ионами азота и кислорода определяется взаимодействием кислорода с нитридом титана: $2TiN + 2O_2 = 2TiO_2 + N_2$. Образующийся оксид титана имеет более низкую твердость по сравнению с нитридом титана (5–6 и 8–9 по Моосу соответственно).

Последовательное облучение бором и азотом приводит к растворению борида титана в его нитриде (на дифрактограмме пики от борида титана исчезают). Структурные изменения в поверхностном слое титанового сплава в результате ионной имплантации бора в обоих случаях оказывают упрочняющее действие.

Ионно-лучевое смешивание и трибологические характеристики

Метод *ионно-лучевого смешивания* (ИЛС) используется для поверхностного легирования материалов с целью улучшения их эксплуатационных характеристик и основан на сочетании двух процессов – вакуумного нанесения покрытий и прямой ионной имплантации. Цель метода – создание на поверхности перемешанного слоя, содержащего как атомы легирующего элемента, так и атомы элементов основы. Энергия ионов подбирается так, чтобы длина проективного пробега R_p несколько превышала толщину тонкопленочного покрытия (маркера). В этом случае максимум внесенной ионом в слоистую мишень энергии приходится на границу раздела пленка–основа, что и обеспечивает максимальную эффективность перемешивания.

Метод ИЛС позволяет компенсировать многие серьезные недостатки прямой ИИ:

• существенно снижается ограничение на верхний предел концентрации вводимой примеси (до 20...50 % мас.), налагаемое процессом распыления поверхности;

• отпадает существующая в прямой ИИ необходимость использования источников металлических ионов;

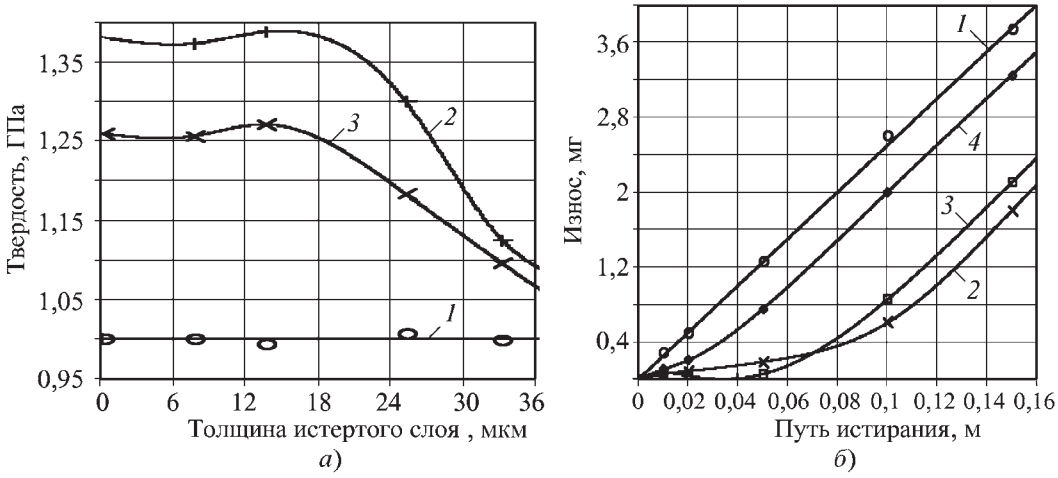


Рис. 8. Зависимости микротвердости от толщины истертого слоя для сплава ВТ16 (*а*) и весового износа от пути истирания для сплава ВТ4 (*б*):

а: 1 – необработанный; *2* – имплантация N_2 ($2 \cdot 10^{18}$ см$^{-2}$); *3* – имплантация N_2 80 % + O_2 20 %;

б: 1 – необработанный; *2* – N^+ ($5 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$); *3* – N^+ ($4 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$) + O^+ (10^{17} см$^{-2}$); *4* – N^+ ($4 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$) + O^+ (10^{18} см$^{-2}$)

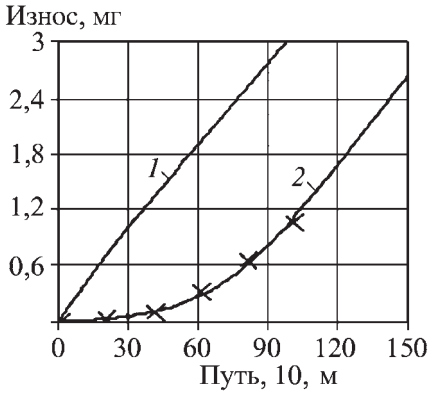


Рис. 9. Зависимость весового износа от длины пути истирания для системы сталь 45–олово:
1 – исходный образец; *2* – после имплантации ионов азота с флюенсом $4 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ (линии – расчет, точки – эксперимент)

• необходимые для синтеза соединения при прямой ИИ значения доз ионов (более $10^{17}...10^{18}$ см$^{-2}$) в случае ионного перемешивания снижаются до 10^{16} см$^{-2}$, что существенно сказывается на времени обработки.

На рис. 9 представлены результаты численного суммирования при относительной прочности $W_f = 8$, дисперсии $d = 0{,}03$, $\mu_0 = 0{,}24$, смещении $h_0 = 0{,}05$, $C_{f_0} = 0{,}25$ и $\delta L = 0{,}089$ в сравнении с экспериментально полученной зависимостью весового износа после ИЛС олова, нанесенного на сталь 45.

Для определения основных характеристик процесса была проведена серия экспериментов по ИЛС ионами азота в системах сталь 45–олово и сталь Х12М–серебро.

Образцы двухслойной системы сталь 45–олово были облучены потоком ионов азота в интервале флюенсов $3 \cdot 10^{16}...10^{18}$ см$^{-2}$. При толщине слоя олова 22 нм и энергии ионов азота 8,5 кэВ на поверхности создается слой, содержащий как атомы олова, так и атомы железа и основных примесных компонент стали 45. Известно [9], что ИЛС при низких температурах имеет сходство с процессом закалки. В этом случае ИЛС может приводить к образованию твердых растворов и структур с простой кубической решеткой.

С увеличением концентрации азота положение атомов азота в металлической решетке нитридов железа становится неустойчивым. Происходит постепенное стирание границы между твердым раствором со стороны металла и истинным нитридом (проявлением этой тенденции является присутствие азотистого мартенсита).

Рентгенофазовый анализ системы сталь 45–олово (N_2^+) показал присутствие нитрида железа Fe_4N наряду с β-Sn. Проявление на дифрактограмме нитрида железа замечено начиная с флюенса $7 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$. С ростом флюенса до 10^{18} см$^{-2}$ фазы Fe_4N и β-Sn исчезают, что может быть связано с образованием интерметаллических соединений олова с железом и высокой степенью аморфизации поверхности.

Микротвердость в процессе облучения практически не изменяется. При флюенсах более $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ наблюдается очень слабое ее увеличение при минимальной нагрузке на индентор (0,5 Н). Такое поведение микротвердости вызвано тем, что проективный пробег ионов менее или равен толщине напыленного слоя олова, в результате чего упрочнения поверхности стали за счет фазообразования и эффекта дальнодействия не происходит [6, 10]. И только при флюенсе более $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, после распыления слоя олова, начинается формирование нитридов железа. Образование же нитридов железа, микротвердость которых находится в пределах 2240...6870 МПа, увеличивает износостойкость.

За счет напыления олова коэффициент трения скольжения стали 45 снижается от 0,44 (поверхность без олова) до 0,27, характерного для пары олово–сталь. После ИЛС коэффициент трения сначала уменьшается до 0,19 при флюенсе $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, а затем плавно растет, приближаясь к значению 0,24 при флюенсе $2 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ и более (рис. 10). Относительная скорость износа в зависимости от флюенса коррелирует с изменением коэффициента трения (рис. 10). Характер наблюдаемой зависимости не изменяется по мере износа до полного истирания модифицированного слоя. При флюенсе $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ наблюдается минимальный износ. Наблюдающиеся зависимости трибологических характеристик от флюенса качественно могут быть объяснены тем, что в процессе пе-

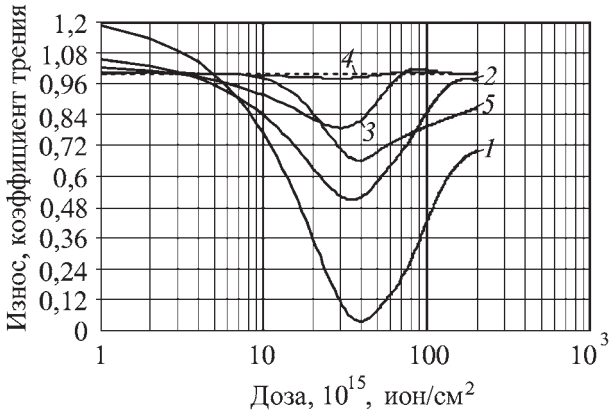


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения (*1*) и относительной скорости износа (*2–5*) стали 45 от флюенса (ИЛС, Sn^+) после различных длин путей истирания, м:
2 – 200; *3* – 400; *4* – 800; *5* – 1000

ремешивания формируется слоистая структура с малой энергией сцепления, а следовательно, и малым коэффициентом трения. Одновременно происходит процесс ионного распыления с преимущественным удалением олова. По мере уменьшения толщины пленки олова увеличивается содержание мелкодисперсной прочной фазы (Fe_4N).

Как было рассмотрено ранее, в процессе износа происходит втирание упрочненной фазы в следующие за истертым слои (уравнение (14)) с малым коэффициентом удаления упрочненной фазы. В результате такой динамики упрочненной фазы, повышенная твердость наблюдается на глубинах, существенно превышающих толщину первично модифицированного слоя (рис. 8, *а*).

Модификация трибологических характеристик наблюдалась и при ИЛС термически напыленной пленки (18...20 нм) серебра на поверхность инструментальной стали Х12М, предварительно закаленной в масле при температуре 1000...1010 °С [11]. Для ИИ использовали ионы азота N_2^+ с флюенсами от $8 \cdot 10^{16}$ до $2{,}5 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$, энергией 8,5 кэВ и плотностью тока ~10 мкА/см^2. Максимальную твердость H_{10} = = 842 МПа (что в два раза превышает исходную) имели образцы, облученные ионами азота с флюенсом $1{,}3 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$.

На образцы, предварительно облученные азотом до дозы, соответствующей максимальному упрочнению, напыляли пленку серебра и осуществляли ИЛС.

При флюенсе $1{,}6 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ достигаются минимальные скорость износа и коэффициент трения, а при дальнейшем росте флюенса происходит полное распыление перемешанного слоя и разрушение структуры поверхностного слоя стали, и, как следствие, снижение износостойкости.

Выводы

1. Микротвердость упрочненной поверхности возрастает в несколько раз после применения рассмотренных методов упрочнения.

2. Поведение коэффициента трения коррелирует с изменением интенсивности износа в зависимости от величины флюенса.

3. Толщина истираемого слоя с пониженной интенсивностью износа на несколько порядков превышает проективный пробег имплантируемых ионов.

4. В процессе ионной имплантации необходимо строго контролировать элементный состав ионного пучка, от которого непосредственно зависит фазовый состав поверхностных слоев и, следовательно, механические свойства.

5. Формирование упрочняющих фаз внедрения при имплантации ионов неметаллов определяется в соответствии с их теплотами образования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Wieser E., Tsyganov I., Matz W. a.o.** // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 111. P. 103.

2. **Гольдшмидт Х.Дж.** Сплавы внедрения. Т. 1. М.: Мир, 1971. 425 с.

3. **Сорокин В.Г., Волосникова А.В. и др.** Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

4. **Уманский С.Я.** Рентгенография металлов и полупроводников. М.: Металлургия, 1996. 400 с.

5. **Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Диденко Н.С.** Методы испытания на трение и износ. Методы и оборудование. Киев. 1981. 95 с.

6. **Авдиенко А.А., Авдиенко К.И., Кузенков С.Е.** Применение моноатомных ионных пучков бора для модификации поверхностных свойств металлов и сплавов // Поверхность. 1996. № 2. С. 86.

7. **Авдиенко К.И., Ивакин А.В., Авдиенко А.А.** Исследование дислокационной структуры приповерхностных слоев стали после ионной имплантации // Металлы. 1999. № 1. С. 98.

8. **Тонков Е.Ю.** Фазовые диаграммы соединений при высоком давлении. М.: Наука, 1983. 280 с.

9. **Hung L.S., Mayer J.W.** // Nucl. Instr. And Meth. 1985. V. B. 7/8. P. 696.

10. **Авдиенко А.А., Авдиенко К.И., Ивакин А.В.** Технологические аспекты упрочнения поверхностных слоев сталей и сплавов имплантацией легких ионов // IV Всерос. конф. Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Томск. 1996. С. 259.

11. **Авдиенко А.А., Авдиенко К.И., Волостных М.В., Ивакин А.В.** Влияние ионно-лучевого смешивания на трибологические характеристики // Материалы и упрочняющие технологии-97. V НТК с международным участием. Курск. 1997. С. 66.

УДК 621.793

В.Ю. Блюменштейн *(КузГТУ, г. Кемерово),*
Е.П. Земскова *(МГТУ "МАМИ", г. Москва)*
Тел.: (3842) 58-32-40
E-mail: blumenstein@rambler.ru

Функциональная модель технологического обеспечения коррозионной стойкости тонких покрытий на основе применения метода микродугового оксидирования

Проведены обобщение, систематизация и структурирование представлений о технологическом обеспечении коррозионной стойкости тонких МДО-покрытий. Установлены взаимосвязи параметров качества тонких покрытий и закономерностей коррозионного разрушения с управляющими технологическими факторами процесса микродугового оксидирования. Разработана функциональная модель технологического обеспечения коррозионной стойкости тонких покрытий на основе применения метода микродугового оксидирования.
Ключевые слова: *функциональная модель, коррозионная стойкость, микродуговое оксидирование, тонкие МДО-покрытия.*

Generalisation, systematization and structurization of overviews about technological providing of the corrosion resistance were made. Interrelations between parameters of quality of thin coatings, regularities of the corrosion destruction and the managing technological factors of the microarc oxidation were found. The functional model of the technological providing of the corrosion resistance of the thin coatings on the basis of application of the microarc oxidation was developed.
Keywords: *functional model, corrosion resistance, microarc oxidation, thin MAO-coatings.*

Технологические возможности метода микродугового оксидирования для обеспечения коррозионной стойкости деталей машин

Защита металлов от коррозии является одной из важнейших научно-технических и экономических проблем современного машиностроения, где ключевая роль отводится технологическому обеспечению качества и *коррозионной стойкости* (КС) деталей из алюминиевых сплавов, используемых для изготовления широкой номенклатуры деталей. Это обусловлено высокими затратами на замену поврежденных коррозией узлов и деталей машин, а также убытками от отказа оборудования по коррозионным причинам и возможных аварий.

Анализ литературных источников показал, что эффективным путем защиты от коррозии деталей из алюминиевых сплавов является нанесение коррозионно-стойких покрытий. Одним из наиболее эффективных методов является *микродуговое оксидирование* (МДО).

МДО – экологически чистая технология электроплазмохимического преобразования поверхностного слоя деталей из вентильных металлов и их сплавов в высокотемпературные модификации оксидов различных фаз. К отличительным особенностям метода МДО относят: высокие показатели КС и прочности сцепления получаемого покрытия с основой, технологическую простоту реализации, проведение процесса в экологически чистых и неагрессивных электролитах, отсутствие специальных требований к подготовке поверхности перед нанесением покрытий, возможность нанесения покрытий на сложнопрофильные изделия и др.

Известно, что на КС МДО-покрытий оказывают влияние управляющие технологические факторы: токовые режимы, время нанесения покрытия, состав и концентрация электролита и др.

Скорость роста покрытия увеличивается с увеличением плотности тока. Это связано с тем, что быстрее наступает стабилизация рабочего напряжения на образцах, характеризующая переход предварительных стадий процесса МДО (стадии анодирования и искрения) в рабочую стадию, на которой формируется основное покрытие. Однако увеличение плотности тока при большой продолжительности МДО приводит к увеличению мощности микродуговых разрядов, разрыхлению покрытия и, как следствие этого, снижению его КС. Выявлена необходимость получения тонких МДО-покрытий при высокой интенсивности процесса с ограничением времени оксидирования.

Анализ экспериментальных исследований влияния состава и концентрации электролита на параметры качества и КС толстых МДО-покрытий показал наличие противоречивых мнений о влиянии данного управляющего технологического фактора на параметры качества и КС. Незначительный объем исследований тонких МДО-покрытий, показывает необходи-

мость проведения дополнительных исследований влияния состава и концентрации электролита на параметры качества и КС тонких МДО-покрытий.

Установлено, что для получения коррозионно-стойких МДО-покрытий необязательно получать покрытия большой толщины. Толщина МДО-покрытия должна быть в пределах 4...15 мкм, так как резкое снижение скорости коррозии происходит при толщине 2...4 мкм, а резкое увеличение пористости покрытия происходит при толщине больше 15 мкм [1].

Выявлена необходимость дополнительного проведения теоретических и экспериментальных исследований для установления влияния управляющих технологических факторов на качество и КС тонких МДО-покрытий. Знание влияния данных факторов на качество и КС МДО-покрытий позволит в полной мере использовать возможности процесса МДО для повышения ресурса деталей машин.

Постановка задачи

Для раскрытия потенциала МДО и повышения ресурса деталей машин требуется обобщение, систематизация и структурирование представлений о технологическом обеспечении КС, проведение аналитических и экспериментальных исследований взаимосвязей параметров качества тонких покрытий и закономерностей коррозионного разрушения с управляющими технологическими факторами процесса МДО.

В работе применен системный подход к описанию проблемы, когда задача повышения КС представляется в виде информационной системы знаний и закономерностей. Для задания требований к системе и ее функциям, а затем для разработки собственно системы, которая соответствует заданным требованиям и исполняет заданные функции, использована методология структурного анализа Structured Analysis & Design Technique (SADT) [2–4]. В наибольшей мере решению этой проблемы соответствует смешанная методология стандартов IDEF0 и IDEF3.

Установлено, что на качество и эксплуатационные свойства многофункциональных тонких МДО-покрытий оказывают влияние свыше 50 основных действующих управляющих технологических факторов, имеющих различную физическую природу и размерность, часть из которых изменяется во времени. Сложность процесса МДО, несмотря на большой объем проведенных научных исследований, не позволила до настоящего времени получить стабильные математические и физические модели, позволяющие выполнить расчет качества и эксплуатационных свойств многофункциональных покрытий. Как было отмечено выше, в настоящее время отсутствует значительный объем экспериментальных и теоретических исследований качества и эксплуатационных свойств тонких МДО-покрытий. Необходимо проведение моделирования таких покрытий. Получив модель технологического обеспечения КС тонких МДО-покрытий, в дальнейшем, изменяя входные данные, можно будет получать режимы обработки, избегая проведения масштабных экспериментальных исследований [5].

Функциональная модель технологического обеспечения КС тонких покрытий

На начальном этапе разработки функциональной модели необходимо определить высокопоставленную функцию (функцию высшего порядка), которая будет отображать основную точку зрения на повышение КС. Так как целью работы является технологическое обеспечение КС, то логично выделить такую главную функцию, как "Технологическое обеспечение КС деталей машин методом МДО". На рис. 1 представлена контекстная (родительская) диаграмма – предок. Определены и описаны основные взаимодействия (стрелки), которые активируют основную функцию.

1. В качестве ресурсов приняты данные о материалах, которые подвергают защите от коррозии методом МДО. Так как эксплуатационные свойства, в частности, КС зависят от свойств не только покрытия, но и материала обрабатываемой детали, данные о нем играют важную роль. Прежде всего, это параметры состояния поверхностного слоя (твердость и шероховатость), а также химический состав и физико-механическое состояние (твердость, агрегатное состояние) материала покрытия, КС материала деталей без покрытий.

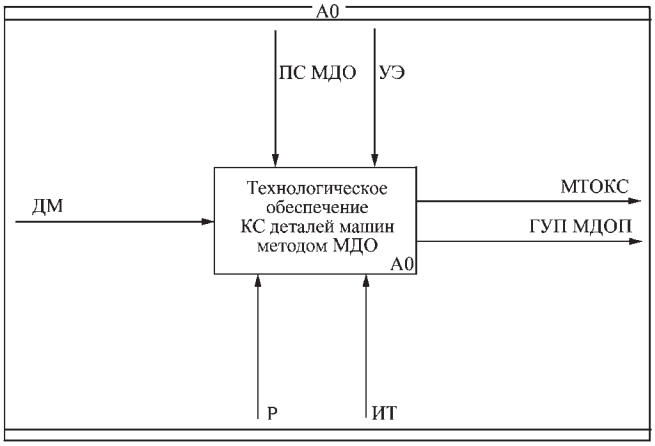


Рис. 1. Функциональная модель технологического обеспечения КС (родительский блок)

2. Продуктом выполнения данной функции являются методика технологического обеспечения КС деталей машин методом МДО и условия применения МДО-покрытий, т.е. те эксплуатационные факторы, при которых МДО-покрытие будет эффективно выполнять свои функции.

3. В качестве управляющих воздействий приняты принципиальная схема процесса МДО, включающая в себя последовательность выполнения технологических операций при нанесении МДО-покрытий и компоновку установки для нанесения МДО-покрытий, инструкции по эксплуатации оборудования, а также предполагаемые условия эксплуатации деталей с коррозионно-стойкими покрытиями.

4. В качестве механизмов исполнения функции приняты режимы (управляющие технологические факторы процесса МДО: плотность тока, время обработки, состав и концентрация электролита и др.), от значений которых зависит изменение параметров качества поверхностного слоя деталей, и режимы проведения экспериментальных исследований, под воздействием которых происходит возникновение и накопление знаний о состоянии поверхностного слоя и его характеристиках. Также в качестве механизмов приняты информационные технологии в виде программ для компьютерного моделирования, обработки информации и т.д.

Одной из наиболее важных особенностей методологии является постепенное введение все больших уровней детализации по мере создания диаграмм, отображающих модель.

В единых терминах и категориях технологии машиностроения, материаловедения и области коррозии и защиты от коррозии проведена декомпозиция модели (рис. 2). Отличительными особенностями детализированной диаграммы А0-уровня являются следующие:

1. Выделены четыре основные подфункции технологического обеспечения КС:

– нанесение МДО-покрытий;

– исследование качества МДО-покрытий;

– установление закономерностей нанесения коррозионно-стойких покрытий методом МДО (модель тонких МДО-покрытий);

– исследование КС МДО-покрытий.

2. Каждый блок представляет основную подфункцию исходной функции.

3. Каждая подфункция содержит только те элементы, которые входят в исходную функцию.

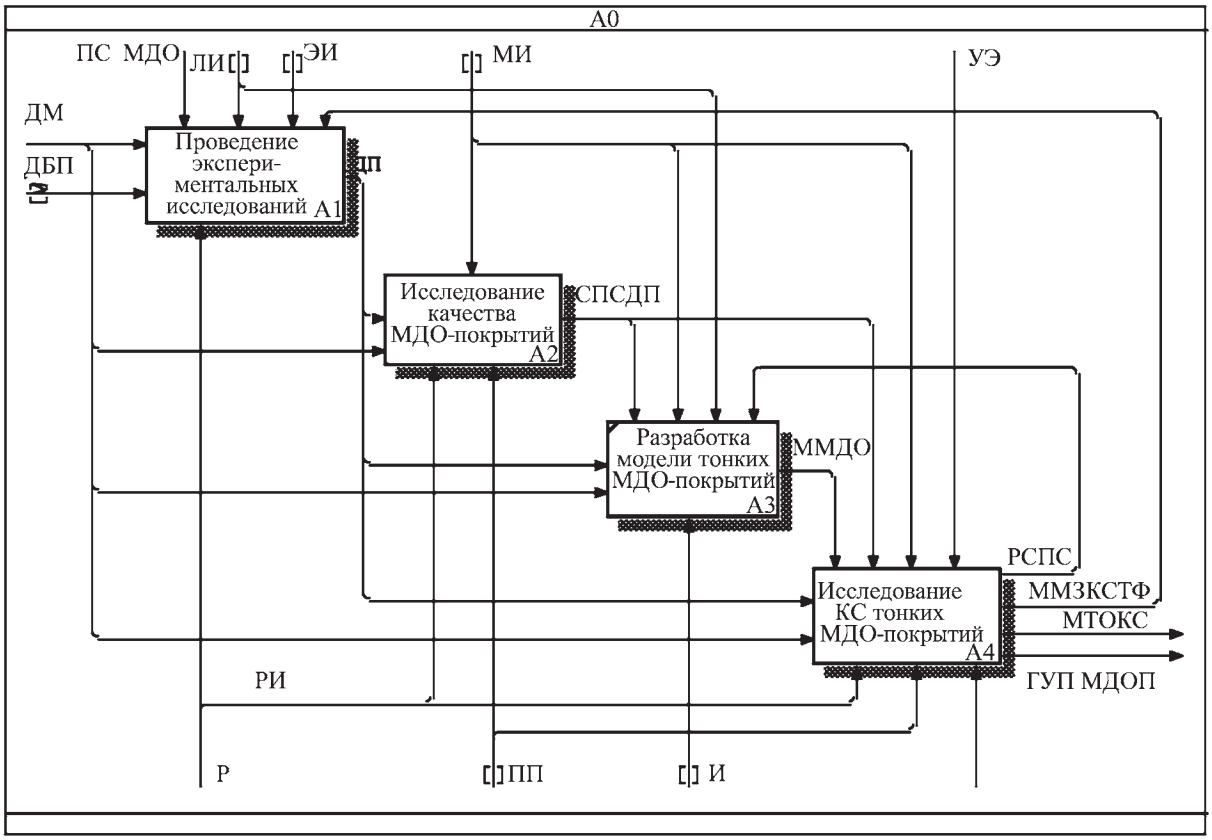


Рис. 2. Функциональная модель технологического обеспечения КС деталей методом МДО А0-уровня. Декомпозиция по основным подфункциям

4. Проведено описание изменения и исследования свойств поверхностного слоя деталей, подвергающихся нанесению покрытий методом МДО, на каждом этапе.

5. Каждый блок на диаграмме имеет свой номер (табл. 1).

6. Все блоки функционально связаны между собой.

7. Семантика ярлыков на данной и последующей функциональных схемах использует термины и категории технологии машиностроения, материаловеде-

Таблица 1

Схема индексации узлов

Индекс узла	Индекс подузла	Семантика узлов
A0		Технологическое обеспечение КС деталей машин методом МДО
A1, A2, A3, A4		Блоки-потомки, детализирующие родительский блок A0
A1		Проведение экспериментальных исследований
	A11, A12, A13, A14	Блоки-потомки, детализирующие A1
	A11	Определение взаимосвязей токовых параметров и КС
	A12	Определение влияния состава и концентрации электролитов на КС
	A13	Определение влияния времени обработки на КС
	A14	Определение влияния дополнительной обработки на КС МДО-покрытий
A14		Выполнить детализацию нанесения покрытий для исследования влияния дополнительной обработки на КС МДО-покрытий
	A141, A142, A143	Блоки-потомки, детализирующие A14
	A141	Определение влияния кипячения на КС
	A142	Определение влияния пигмента Fe_2O_3 на КС
	A143	Определение влияния технологического процесса нанесения фторопластовой суспензии на КС
A2		Исследование качества МДО-покрытий
	A21, A22, A23	Блоки-потомки, детализирующие блок A2
	A21	Проведение металлографического анализа с применением методов микрорентгеноспектрального анализа в сочетании с методом растровой электронной микроскопии
	A22	Исследование степени наполнения тонких МДО-покрытий
	A23	Исследование толщины тонких МДО-покрытий
A3		Разработка модели тонких МДО-покрытий
A4		Исследование КС тонких МДО-покрытий
		Провести декомпозицию данной подфункции из IDEF0 в диаграмму IDEF3
	A4.1.1	Подготовка деталей с покрытиями к коррозионным испытаниям
	A4.1.2	Проведение коррозионных испытаний
A4.1.2		Выполнить декомпозицию A4.1.2
	A412.1.1	Коррозионные испытания методом капли
	A412.1.2	Коррозионные испытания методом переменного погружения
	A412.1.3	Коррозионные испытания в искусственной атмосфере
	A412.1.4	Коррозионные испытания по потере массы
	A4.1.3	Разработка физической модели коррозионного разрушения тонких МДО-покрытий
	A4.1.4	Анализ КС методами мат. статистики
	A4.1.5	Анализ КС с помощью аппарата кластерного анализа
	A4.1.6	Анализ КС с помощью аппарата факторного анализа
	A4.1.7	Анализ КС с помощью метода энтропийного анализа
	A4.1.8	Разработка методики технологического обеспечения КС методом МДО

Таблица 2

Семантика ярлыков на функциональных схемах

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков	Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
ГУП МДОП	Граничные условия применения МДО-покрытий	НМ	Наличие микропористости в тонких МДО-покрытиях
ДБП	Детали без покрытий	ПП	Приборы и приспособления, необходимые для проведения исследований
ДМ	Исходные данные о материале детали и покрытия	ПС МДО	Принципиальная схема процесса нанесения тонких МДО-покрытий
ДП	Детали с тонким МДО-покрытием	Р	Режимы
И	Исполнитель	РИ	Режимы исследований
ИТ	Информационные технологии	РП	Размер пор
КИ	Коррозионные испытания	Р СПС	Рекомендации по состоянию поверхностного слоя деталей с тонкими МДО-покрытиями
КР	Коррозионное разрушение	ССП	Состав и структура покрытия
КС	Коррозионная стойкость	СПС ДП	Состояние поверхностного слоя деталей с покрытиями
ЛИ	Информация из литературных источников	ТП	Толщина покрытия
М МДО	Модель тонкого МДО-покрытия	ТСП	Толщина слоев покрытия
МИ	Методы исследований	УЭ	Предполагаемые условия эксплуатации деталей с тонкими МДО-покрытиями
ММЗКСТФ	Математические модели зависимости коррозионной стойкости от технологических факторов процесса МДО	ЭИ	Экспериментальные исследования, проводимые ранее
МТОКС	Методика технологического обеспечения коррозионной стойкости методом МДО		
НДФ	Наличие дефектов в покрытии (пор, трещин и т.д.)		

ния и области коррозии и защиты от коррозии (табл. 2).

При реализации подфункции "Проведение экспериментальных исследований" (см. рис. 2) проводится нанесение тонких МДО-покрытий на экспериментальные образцы. При этом ресурсы в виде данных о материалах и в виде деталей без МДО-покрытий под управляющим воздействием принципиальной схемы процесса нанесения тонких МДО-покрытий, данных о формировании МДО-покрытий из литературных источников и экспериментальных исследований, проведенных ранее под руководством д-ра техн. наук проф. В.М. Смелянского, преобразуются в детали с МДО-покрытиями, являющиеся результатом выполнения данной работы. Кроме того, при выполнении данной подфункции происходит изменение состояния поверхностного слоя деталей без покрытий под воздействием процессов, возникающих при действии управляющих технологических факторов процесса МДО. На декомпозиции данной подфункции (рис. 3) показаны работы, необходимые для выполнения данной подфункции. Управляющей информацией является принципиальная схема процесса МДО, показывающая последовательность технологических операций при нанесении покрытий. На декомпозиции подфункции "Определение влияния дополнительной обработки на КС" (рис. 4) показаны работы, необходимые для выполнения данной подфункции.

Таким образом, в результате выполнения первой подфункции получены физические объекты в виде деталей с тонкими МДО-покрытиями, необходимые в дальнейшем для исследования процессов коррозионного разрушения данных покрытий. При этом диаграмма А1-уровня полностью соответствует рассматриваемой работе А0-уровня при наличии одного и того же количества соединяющих внешних стрелок (интерфейсов). Второй подфункцией является исследование качества МДО-покрытий. При этом ресурсом для выполнения данной подфункции является выход (продукт) первой подфункции в виде деталей с

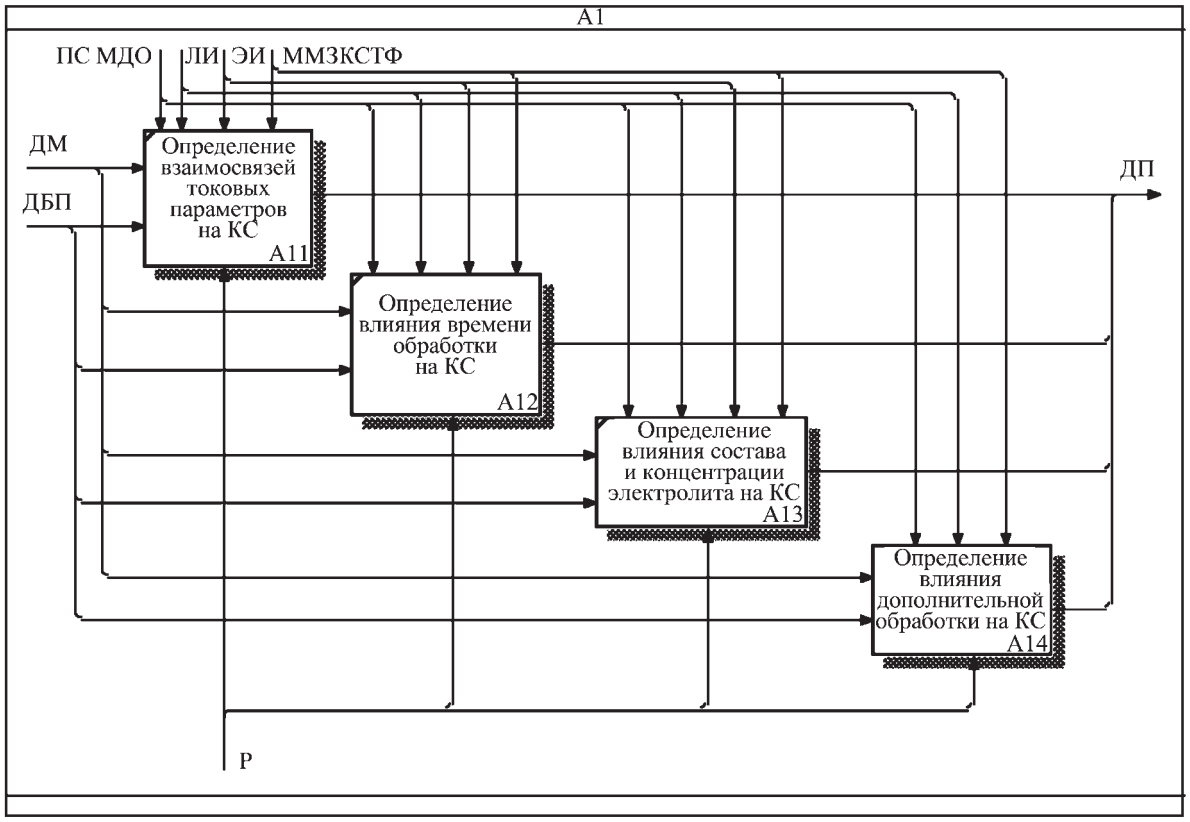


Рис. 3. Декомпозиция диаграммы А1-уровня "Проведение экспериментальных исследований"

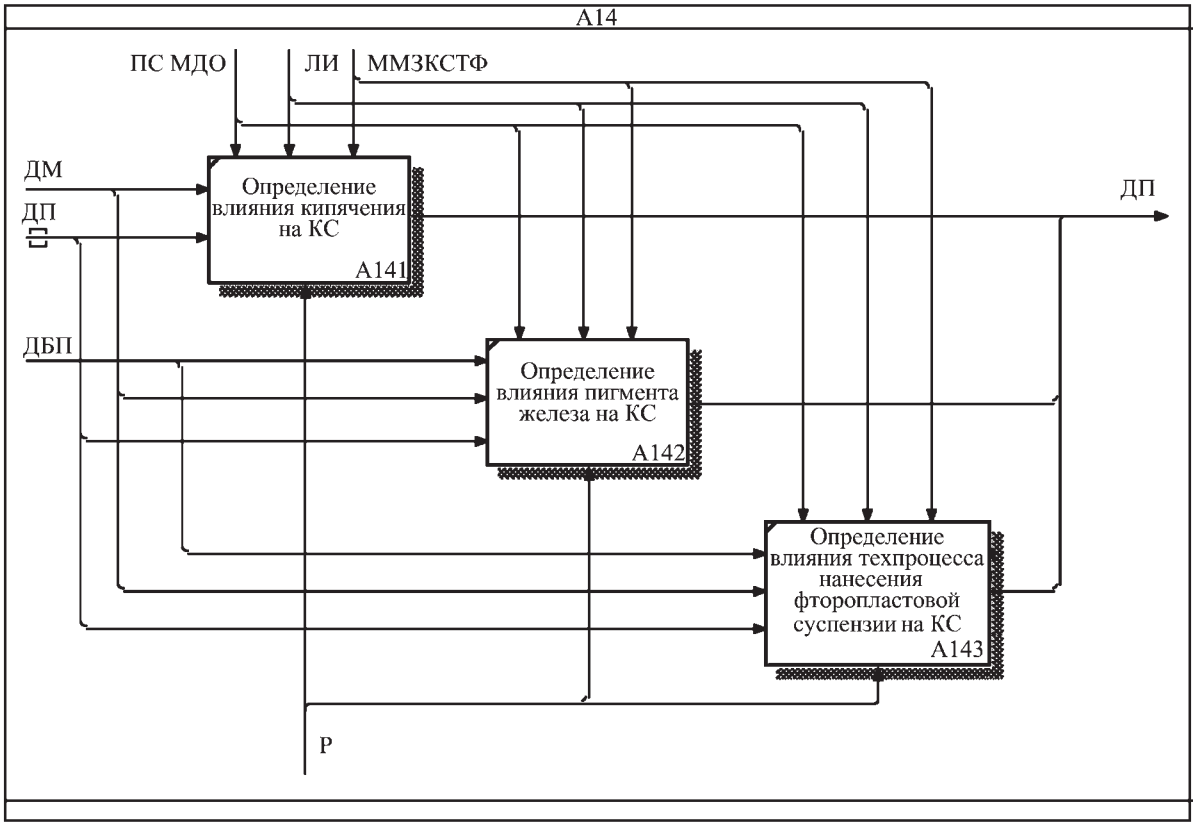


Рис. 4. Декомпозиция диаграммы А14-уровня "Определение влияния дополнительной обработки на КС МДО-покрытий"

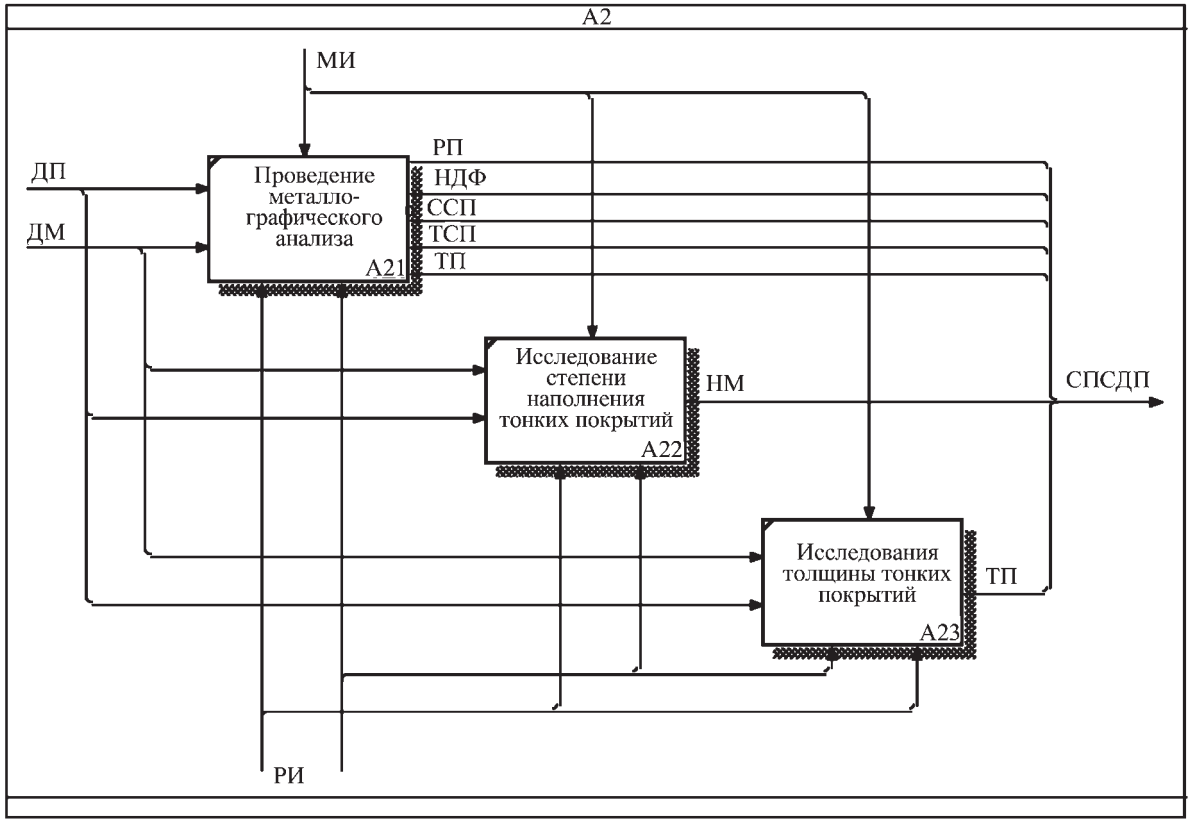


Рис. 5. Декомпозиция диаграммы А2-уровня "Исследование качества МДО-покрытий"

тонкими МДО-покрытиями и в виде первоначальных данных о материалах (см. рис. 2). Различные методы исследования, приборы и приспособления для проведения данных исследований позволяют преобразовать объекты в виде данных о материалах в систему знаний о состоянии поверхностного слоя МДО-покрытий. Знания параметров состояния поверхностного слоя и зависимостей их от управляющих технологических факторов необходимо для направленного формирования покрытий, обладающих определенными эксплуатационными свойствами (в данном случае, КС). На декомпозиции данной подфункции показано, какие исследования нужно провести для получения необходимого представления о состоянии поверхностного слоя деталей с тонкими МДО-покрытиями (рис. 5). В качестве методов исследования выбраны металлографический анализ с применением методов микрорентгеноспектрального анализа в сочетании с методом растровой электронной микроскопии, позволивший получить данные о составе и структуре покрытия, о толщине слоев покрытия и покрытия в целом, о размере пор, наличии или отсутствии дефектов в поверхностном слое в виде пор и трещин. Исследование степени наполнения МДО-покрытия дает представление о микропористости в МДО-покрытиях.

Третья подфункция технологического обеспечения КС на основе применения метода МДО заключается в разработке физической модели тонких МДО-покрытий (см. рис. 2). Ресурсом для выполнения данной подфункции являются данные о материалах под управляющим воздействием состояния поверхностного слоя деталей с покрытиями, рекомендаций по состоянию деталей с МДО-покрытиями, результатов анализа литературных источников и экспериментальных исследований. В результате выполнения третьей подфункции получен информационный поток в виде модели тонкого МДО-покрытия. Она необходима для моделирования в дальнейшем процессов коррозионного разрушения тонких МДО-покрытий и в итоге для направленного управления КС этих покрытий. Четвертая подфункция технологического обеспечения КС на основе применения метода МДО заключается в проведении исследований КС тонких МДО-покрытий (см. рис. 2). Была проведена декомпозиция данной подфункции из диаграммы IDEF0 в диаграмму IDEF3 (рис. 6).

В данной модели первой работой является подготовка экспериментальных образцов с МДО-покрытиями к коррозионным испытаниям. Окончание первой работы служит сигналом для начала следующей работы "Проведение коррозионных испытаний".

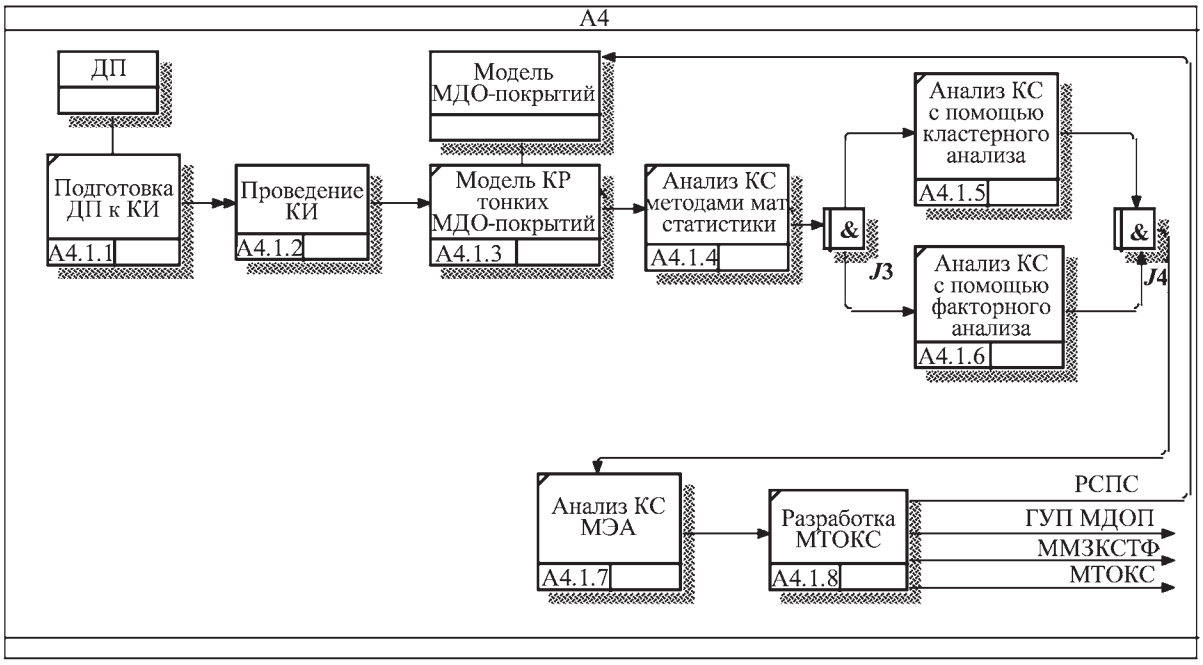


Рис. 6. Декомпозиция диаграммы А4-уровня "Исследование КС тонких МДО-покрытий"

Проведена декомпозиция данной работы (рис. 7). Окончание работы А412.1.1 "Коррозионные испытания методом капли" служит сигналом к началу нескольких работ: А412.1.2 "Коррозионные испытания методом переменного погружения", А412.1.3 "Коррозионные испытания в искусственной атмосфере" и А412.1.4 "Коррозионные испытания по потере массы". Причем здесь после завершения работы А412.1.1 запускаются работы А412.1.2, А412.1.3 и А412.1.4 (не обязательно одновременно). Для запуска следующей работы А4.1.3 "Модель коррозионного разрушения МДО-покрытий" требуется завершение работ А412.1.2, А412.1.3 и А412.1.4. В результате выполнения данной работы получен информационный поток в виде модели коррозионного разрушения тонкого МДО-покрытия. Данная модель необходима для направленного управления КС этих покрытий.

Окончание работы А4.1.3 служит сигналом для начала следующей работы А4.1.4 "Анализ КС методами мат. статистики". Кроме того, окончание данной работы служит сигналом к началу выполнения и других работ: А4.1.5 "Анализ КС с помощью аппарата кластерного анализа" и А4.1.6 "Анализ КС с помощью аппарата факторного анализа". Причем здесь после завершения работы А4.1.4 запускаются А4.1.5 и А4.1.6 (не обязательно одновременно). Для запуска следующей работы А4.1.7 "Анализ КС методом энтропийного анализа" требуется завершение работ А4.15 и А4.1.6. После окончания работы А4.1.7 запускается работа А4.1.8 "Разработка методики технологического обеспечения КС покрытий методом МДО".

Результатом данной работы являются математические модели зависимости КС покрытий от управляющих технологических факторов процесса МДО, методика технологического обеспечения КС и условия применения тонких МДО-покрытий.

При реализации функций и подфункций на различных этапах декомпозиции диаграмм возникают

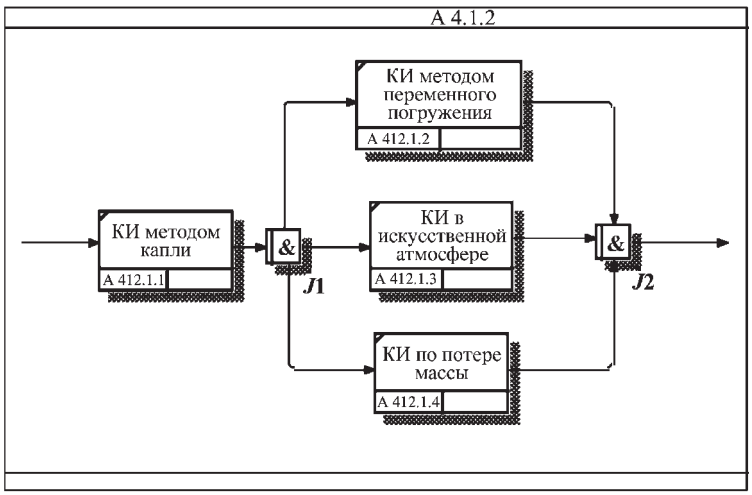


Рис. 7. Декомпозиция диаграммы А41-уровня "Проведение коррозионных испытаний"

обратные связи по управлению, когда выход нижестоящей работы направляется на управление вышестоящей. Такие обратные связи свидетельствуют об эффективности моделирования и управления КС. Примерами таких связей служат математические модели зависимости КС покрытий от управляющих технологических факторов процесса МДО и рекомендации по состоянию поверхностного слоя деталей с тонкими МДО-покрытиями (см. рис. 2). Данные информационные потоки направляются на управление подфункций нанесения МДО-покрытий и формирование модели тонких МДО-покрытий, а повышение КС обеспечивается изменением режимов нанесения покрытий на основании проведенных исследований и полученных рекомендаций.

Выводы

1. Функциональная модель технологического обеспечения КС на основе применения метода МДО позволяет направленно управлять КС на основе создания моделей коррозионного разрушения, учитывающих комплекс физико-механических свойств сформированных тонких МДО-покрытий и условий их эксплуатации.

2. Данная модель позволила выявить функциональные связи между работами. Функциональные связи, такие как связь КС с управляющими технологическими факторами процесса МДО и, как следствие, параметрами состояния поверхностного слоя, модель обозначила. Для выявления и количественного описания этих связей необходимо проведение экспериментальных исследований.

3. Некоторые работы и функциональные связи между ними, такие как моделирование процесса формирования тонких МДО-покрытий и моделирование их коррозионного разрушения, требуют проведения теоретико-экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Казанцев И.А.** Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. 240 с.

2. **Вендров А.М.** CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / А.М. Вендров. М.: Argussoft Co, 1999. 86 с.

3. **Братухин А.Г.** CALS-стратегия наукоемкого машиностроения // Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 5–17.

4. **Маклаков С.В.** Моделирование бизнес-процессов с AllFusion Process Modeler (BPwin 4.1). М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 240 с.

5. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.: ил.

УДК 621.793.79

Б.Л. Овсянников, А.Д. Енин *(МГТУ "МАМИ", г. Москва)*
Тел.: (495) 223-05-23, доб. 1068
E-mail: obl_d@mail.ru

Имитационное моделирование процесса электроэрозионного формообразования

Проведено описание имитационной модели процесса электроэрозионной обработки, позволяющий проводить оценку различных случайных факторов на процесс формообразования поверхности и которая может быть использована для оценки влияния наследственности электродов и для усовершенствования управления процессом.

Ключевые слова: *имитационное моделирование, электроэрозионная обработка, формообразование, упрочнение.*

Described simulation model of the process of electrical discharge machining which can be used to improve the management of the process.

Keywords: *simulation, electric discharge machining, EDM, hardering.*

Процесс *электроэрозионной обработки* (ЭЭО) широко распространен в технологии обработки токопроводящих материалов, в технологии упрочнения деталей и нанесения упрочняющих покрытий. Процесс ЭЭО всесторонне изучался с момента своего изобретения. На существующем уровне знаний о природе процесса ЭЭО, его технологические характеристики, по-видимому, уже близки к теоретическому пределу. Дальнейшее совершенствование процесса ЭЭО заключается в углубленном изучении физико-химических процессов, лежащих в его основе. Особое значение имеет исследование процесса пере-

носа вещества при искровом разряде и возможности его использования для внесения дисперсных добавок в поверхностные слои детали для придания им новых, улучшенных свойств.

Процесс ЭЭО имеет сложную природу [1–3] и выраженный вероятностный характер. Это проявляется, в частности, в значительном разбросе таких наблюдаемых характеристик, как амплитуды напряжения пробоя *межэлектродного промежутка* (МЭП), времени запаздывания начала пробоя по отношению к переднему фронту импульса напряжения, разброс амплитуд импульсов разрядного тока и, следовательно, разброс энергий импульсов и мощностей разряда.

Подобные явления объясняются по-разному. Так А.И. Безрук предполагает наличие разрядов различного типа в жидкости, в газе, по стенкам газовых пузырей, по частицам электродов и т.д., что приводит к различной эффективности разрушения электродов при каждом разряде. Очевидно, что эти различные типы разрядов не идентифицируются по наблюдаемым электрическим сигналам.

Другим фактором, влияющим на разброс наблюдаемых сигналов, является вероятностный характер места возникновения разряда в МЭП. Принято считать, что разряды проходят по минимуму МЭП, однако в течение процесса обработки поверхности электродов уже эродированы и множество участков поверхностей находятся в очень близких условиях, поэтому можно говорить только о тенденции возникновения разряда на выступах поверхности. В результате остается неясным, как происходит разрушение электродов во времени: разрушаются ли они случайным образом по всей площади взаимодействия электродов, или волны разрядов последовательно обходят поверхности электродов. Ответы на эти вопросы позволили бы улучшить процесс регулирования ЭЭО.

Оценка влияния этих факторов в реальном эксперименте крайне затруднительна или даже невозможна, так как сам процесс остается скрытым, хотя для практических целей представляет большой интерес. Для прояснения этих вопросов была разработана система имитационного моделирования процесса ЭЭО, в задачу которой входит воспроизведение вероятностного процесса пробоя в пространстве и времени. Система позволяет выделить характерные закономерности процесса и оценить их влияние на результат – обрабатываемую поверхность.

Модель выполнена в среде MATLAB и суть ее работы заключается в следующем: взаимодействующие электроды представлены в виде двумерных массивов анода – $A(m, m)$ и катода – $K(m, m)$. Количество элементов m в массиве соответствует размеру электродов в выбранном масштабе, например, один элемент соответствует 1 мкм. Значения чисел в каждом элементе массива соответствуют местной высоте электрода и местному МЭП. Таким образом, поверхности электродов разбиваются на элементарные площадки, каждая из которых имеет адрес – координаты в соответствующих массивах. В среде MATLAB электроды могут быть визуализированы. Система программным путем инициирует некоторый вероятностный процесс, имитирующий возникновение разрядов. При этом необходимо совместить два вероятностных процесса: случайный характер задержки пробоя во времени и вероятностный характер расположения разрядов на плоскости. Первоначально задается некоторая фиксированная величина энергии разряда.

В отсутствие общепринятой теории возникновения разряда в жидкой диэлектрической среде, за основу была взята "стримерно-лидерная" теория [4–5], согласно которой, на микронеровностях, неизменно присутствующих на шероховатых поверхностях электродов, при воздействии сильных электрических полей создаются локальные зоны высокой напряженности поля. В этих областях происходит резкое увеличение концентрации носителей тока, которые начинают формировать волну ионизации, приводящую к возникновению стримера – слабоионизированного низкотемпературного плазменного канала – вследствие развивающейся электронной лавины при вершине. Связанный с этим рост температуры в стримере приводит к резкому возрастанию вероятности термической ионизации и преобразованию стримерного канала в лидерный. Описанную выше волну ионизации, приводящую к фазовым переходам в жидкой диэлектрической среде, назовем треком. При достижении треком противоэлектрода происходит пробой.

При моделировании в силу вероятностного характера появления трека главным образом необходимо рассчитать произойдет ли пробой в заданном временном цикле, соответствующем длительности импульса (в данной модели рассматривается случай коротких импульсов).

Расчет текущей длины трека:

$$L = nd + l,$$

где n – сгенерированное нормально-распределенное случайное число;

d – дисперсия;

l – средняя длина трека.

Если полученная длина трека меньше минимального расстояния между электродами, в заданный промежуток времени пробой не происходит и вероятностный процесс повторяется заново, при этом возможная энергия разряда уменьшается на некоторую фиксированную величину. Число таких попыток имеет смысл модельного времени. Если энергия импульса исчерпана, считается, что это импульс холо-

стого хода, и процесс моделирования повторяется. Если по результатам случайных проб пробой будет инициирован, в массивах анода и катода находятся адреса всех мест, в которых он возможен, т.е. таких, местные МЭП которых укладываются в длину трека. Затем осуществляется ранжирование полученной несвязной области по величине местного МЭП и определяется площадь каждого уровня. По полученным данным на программном уровне строится функция распределения плотности вероятности возникновения разряда по площади. При этом принято экспоненциальное убывание плотности с увеличением местного МЭП и прямая зависимость плотности вероятности пробоя от суммарной площади элементов на каждом уровне ранжирования. По полученным данным случайным образом определяется место разряда (метод Монте-Карло). Процедура повторяется для каждого импульса. Параметры распределений подбираются экспериментально.

На завершающей стадии происходит формирование единичной лунки и ее интеграция в уже имеющуюся лунчатую поверхность. Геометрический блок программы по заданным параметрам создает уединенную лунку и интегрирует ее уже имеющийся массив. В этот процесс было заложено несколько основных зависимостей.

Во-первых, принято, что источник тепла, создаваемый разрядом, близок к мгновенному точечному источнику [6].

Во-вторых, объем лунки непосредственно связан с оставшейся после случайных проб энергией соотношением:

$$V = Eak,$$

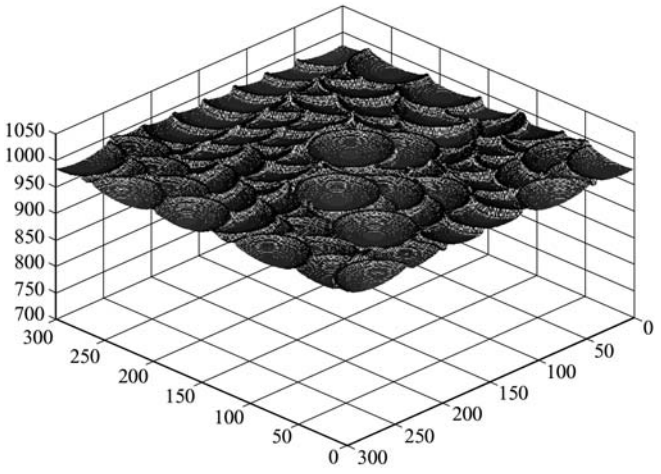


Рис. 1. Лунчатая поверхность электрода детали (анода) как результат моделирования процесса ЭЭО. Средняя глубина лунки $h_{ср}$ = 14,32 мкм, средний радиус лунки $r_{ср}$ = 37,49 мкм. Изображение электрода-инструмента (катода) идентично.
(Размеры указаны в мкм)

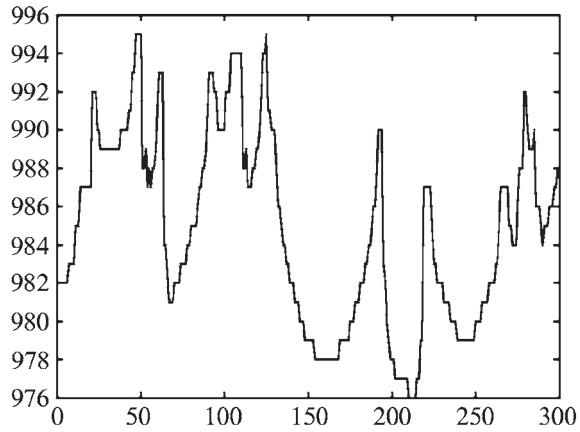


Рис. 2. Профилограмма поверхности, *Ra* = 3,41 мкм
(Размеры указаны в мкм)

где E – остаточная энергия импульса;

a – эмпирический коэффициент разрушения анода по отношению к катоду;

k – коэффициент связи энергии импульса и объема лунки в зависимости от материала, полученный по положению изотермы плавления в выбранной модели разрушения.

В-третьих, в реальности канал разряда не постоянен и может расширяться во время разряда, что неизбежно должно повлиять на диаметр лунки. Таким образом, диаметр и глубина единичной лунки связаны между собой эмпирическим коэффициентом формы лунки $k = d/h$.

Результатом работы программы является лунчатая поверхность (рис. 1), по виду и характеристикам (рис. 2) близкая к реальной поверхности, подвергшейся электроэрозионному воздействию. При проведении модельного эксперимента использовали фиксированные значения энергии (E = 0,02 Дж), напряжения холостого хода (U = 100 В), расстояния МЭП (l = 20 мкм) и диэлектрической прочности (P = = 5 В/мм), длительности импульса (τ = 10 мкс). Число зарядов для каждого было подобрано таким образом, чтобы они равномерно покрывали всю поверхность электродов (n = 100), размеры которых соответствуют массиву 300×300. За материал электродов был принят алюминий, коэффициент формы лунок у которого равен 6.

При варьировании начальной энергии от 0,01 до 0,05 Дж наблюдается четкая тенденция зависимости шероховатости от энергии импульса (рис. 3), что количественно, но не качественно совпадает с данными, полученными Б.Н. Золотых по соотношению:

$$Rz = \frac{\beta^2}{3} K_4 \sqrt[3]{W_и},$$

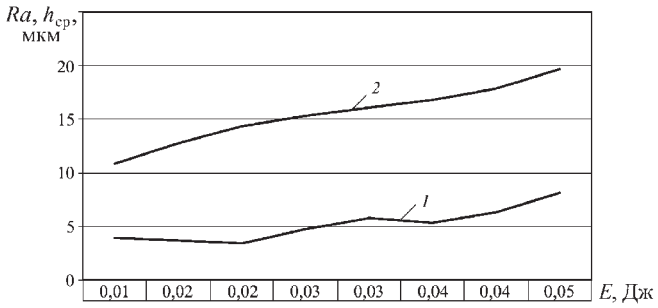


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости (*1*) и средней глубины лунок (*2*) от энергии импульса

где $Rz = 4Ra$, Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

β – коэффициент перекрытия лунок;

K_4 – коэффициент, зависящий от материала (для Al = $15 \cdot 10^{-3}$ см/Дж$^{1/3}$);

$W_и$ – энергия импульса.

Для более детального сопоставления результатов необходимо проведение дополнительных исследований.

Вывод

Разработанная имитационная модель позволяет воспроизводить и изучать не только морфологию эрозионной поверхности, но и моделировать глубинные воздействия искровых разрядов на поверхностные слои материала и связанные с этим процессы изменения структуры и упрочнения, а также внедрения мелкодисперсных частиц и кластеров инородных веществ в поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Daryl D. Dibitonto, Philip T. Eubank, Mukund R. Patel, Maria A. Barrufet.** Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model // Journal of Applied Physics, 66, 4095 (1989).

2. **Dibitonto Daryl D., Mukund R. Patel, Maria A. Barrufet, Philip T. Eubank.** Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model // Journal of Applied Physics, 66, 4104 (1989).

3. **Philip T. Eubank, Mukund R. Patel, Maria A. Barrufet, Bedri Bozkurt.** Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model // Journal of Applied Physics, 73, 7900 (1993).

4. **Кускова Н.И.** Волны фазовых превращений в сильных электрических полях // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 14. С. 41–44.

5. **Кускова Н.И.** Искровые разряды в конденсированных средах // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 2. С. 51–54.

6. **Фотеев Н.К.** Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал "Упрочняющие технологии и покрытия" читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами в России и странах ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Наш журнал распространяется только по подписке – это является надежной гарантией того, что Ваше рекламное объявление прочитают именно специалисты, т.е. оно попадет точно в цель.

Обращайтесь в отдел продаж, маркетинга и рекламы
ООО "Издательство Машиностроение":
107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98 Факс (499) 269-48-97
E-mail: marketing@mashin.ru www.mashin.ru

УДК 621.45.002.2: 621.9.047

Е.А. Митрюшин *(Российский государственный технологический университет, МАТИ, г. Москва),*
С.Б. Саушкин, Б.П. Саушкин *(МГТУ "МАМИ", г. Москва)*
E-mail: 6582434@mail.ru

Пути развития и перспективы применения технологий электрохимической размерной обработки

Выявлены основные направления развития технологий электрохимической размерной обработки. Показано расширение области применения данных технологий в результате повышения их функциональных возможностей, совершенствования средств технологического оснащения, появления новых конструкционных материалов.
Ключевые слова: *электрохимическая обработка, электрохимическое оборудование, проблемы и новые пути развития электрохимической размерной обработки.*

The basic ways of the development of electrochemical dimensional technologies are found and discussed. The application of this technologies is constantly enlarged in the result of increasing of its functional possibilities, improving of machine tools, working out of new constructive materials.
Keywords: *electrochemical machining, electrochemical equipment, problems and new ways of electrochemical machining applications.*

Круг задач машиностроительного производства, решаемых с применением электрохимических технологий, постоянно расширяется: появляются новые научные разработки, создается оборудование нового поколения [1–3]. Развитие *электрохимической размерной обработки* (ЭХРО) материалов как метода обработки и комплекса основанных на нем технологий требует решения целого ряда технологических задач научного и прикладного характеров. Выявление и правильная постановка таких задач позволяют минимизировать ресурсозатраты на их решение, сократить время на промышленное освоение новых технологий.

Кроме того, анализ достигнутых результатов в этой области технологии машиностроения с учетом общих тенденций развития машиностроительного производства позволяет сделать обоснованные прогнозы о месте и роли электрохимической обработки материалов в обозримом будущем.

Быстрый успех, достигнутый в прикладной области в 60–80 гг. прошлого века преимущественно за счет эмпирического и полуэмпирического подходов к разработке технологий и оборудования, только подчеркивает необходимость скорейшей разработки адекватных теоретических моделей, поскольку лишь гармоничное сочетание эмпирического и теоретического подходов гарантирует длительное, стабильное развитие метода обработки и соответствующих технологий.

Выделяют два основных теоретических направления развития метода ЭХРО.

1. *Разработка теоретических основ процесса высокоскоростного анодного растворения материалов* была и остается важнейшей задачей, связывающей фундаментальную электрохимию с прикладными проблемами электрохимической обработки материалов. В этой области продолжается процесс накопления новых экспериментальных данных [4, 5]. Дальнейшее развитие получили теоретические аспекты анодно-анионной активации металлов и сплавов, термокинетической неустойчивости электрохимических систем, роста и разрушения поверхностных пленок. Вместе с тем многие вопросы теории процесса носят, преимущественно, умозрительный характер. Так, развитие теоретических представлений о нестационарном электролизе в условиях наложения коротких импульсов ($\tau_и$ = 1...10 мкс) с крутыми фронтами (1...10 % от $\tau_и$) и высокими амплитудными значениями плотности тока (10^3...10^4 А/см^2) [6–8] заметно отстает от достигнутых практических результатов [9].

2. *Разработка технологических основ метода электроэрозионной обработки* (ЭЭО), создание достаточно простых и надежных методик расчета на основе адекватных моделей макро- и микроформообразования, переход от эмпирических и полуэмпирических знаний к теоретическому описанию процесса формообразования – важное направление прикладных исследований. Несмотря на достаточно большое число выполненных в этой области работ [10–12], инженерных методик, доступных широкому кругу цеховых технологов, явно недостаточно. CAD–CAM-системы, адаптированные к технологическим задачам ЭХРО, еще только создаются [13, 14]. Отсутствуют развитые банки технологических данных, что затрудняет разработку высокоэффективных технологий.

Интеграция информационных и обрабатывающих технологий в области ЭХРО отражает характерную черту современной технологии машиностроения в целом [15]. Эта интеграция выражается в создании современных систем CAD–CAM–CAE, разработке информационно-технологических баз данных, повышении уровня технического интеллекта соответствующих станков. Несмотря на интенсивные исследования в этой области [16–19], реальные практические результаты пока заметно отстают от достигнутых в других областях технологии машиностроения.

Разработка методов и средств повышения точности и качества обработанной поверхности является самостоятельной задачей метода ЭХРО [20]. Однако новые результаты в этой области делают возможным применение технологий электрохимической обработки в микромашиностроении и создание наноструктурных объектов.

Так, с помощью вольфрамового инструмента созданы трехмерные структуры на никелевом образце с размерами порядка 10...100 нм и глубиной 400 нм (рис. 1). Этого удалось достигнуть путем применения ультракоротких импульсов тока длительностью около 2 нс. В работе [21] показана возможность изготовления микрорельефа поверхности путем электрохимического травления канавок шириной 30 мкм. В работе [22] описана технология импульсной ЭХРО для изготовления режущего клина с радиусом закругления кромки, равным 600 нм. В работе [23] рассмотрена технология электрохимического микроформообразования осесимметричных деталей. Электроды-инструменты для таких технологий изготовляют с применением ионно-лучевых технологий и электрохимическим травлением [24].

Полагают, что в обозримом будущем применение технологий электрохимической обработки в области изготовления элементов с размерами $10^{-7}...10^{-5}$ м будет расширяться [25].

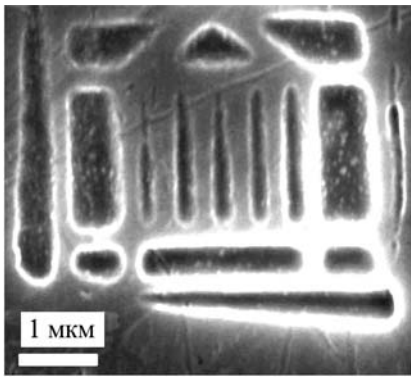


Рис. 1. Трехмерные структуры на никелевом образце

Разработка новых способов электрохимической обработки и их теоретическое обоснование являются методологической базой для создания новых технологий и оборудования. Расширение числа управляющих воздействий на процесс ЭХРО в результате применения биполярного импульсного тока (минимум семь изменяемых параметров), вибрации электродов (4 и более основных изменяемых параметров), пульсирующего потока электролита (4 основных изменяемых параметра) привело к увеличению числа возможных комбинаций и появлению значительного числа патентов на новые способы обработки. Этому способствовало также обнаружение новых физико-технических эффектов, влияющих на показатели качества обрабатываемого объекта. Практика показывает, что далеко не все патенты реализуются в производственной деятельности, однако заложенные в них новые идеи аккумулируются и формируют общее направление развития данной области техники.

Наряду с применением метода прямого копирования формы инструмента получают все большее развитие технологии и оборудование для электрохимической обработки, основанные на методах обката [26] и следов. Заметное развитие получили технологии ЭХРО с использованием диэлектрических масок и трафаретов [27, 28].

Дальнейшее повышение уровня автоматизации как при технологической подготовке, так и при производстве изделий. Применение современных адаптивных систем управления станками, повышение уровня надежности таких систем, создание высокоэффективной системы сервиса – все это обеспечивает переход к малолюдным и безбумажным технологиям в практике применения ЭХРО.

Освоение новых наукоемких технологических объектов с привлечением технологий электрохимической обработки особенно заметно в аэрокосмических отраслях машиностроения [29], в которых широко применяют маложесткие, ажурные конструкции изделий из материалов, трудно обрабатываемых резанием. Так, в качестве примера, на рис. 2 показан фрагмент

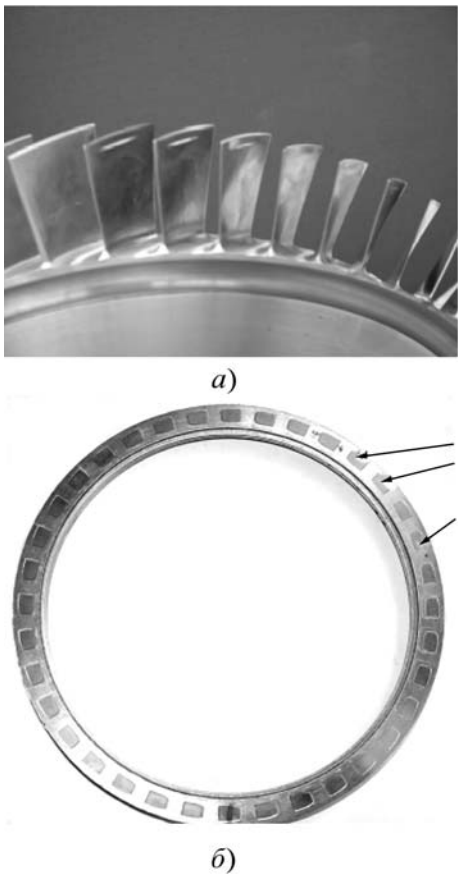


Рис. 2. Лопаточное колесо (*а*) и кольцо с занижениями (*б*). Занижения указаны стрелками

лопаточного колеса компрессора, изготовленного без применения сборочных операций с использованием технологий электрохимической обработки. Там же представлен фрагмент уплотнительного кольца с расположенными по контактному торцу площадками – занижениями глубиной (0,015±0,02) мм и параметром шероховатости поверхности Ra = 0,4 мкм.

Создание новых и совершенствование существующих комбинированных методов обработки на основе или с привлечением метода ЭХРО. Создание интегрированных технологических систем на основе процессов электрохимической обработки. Получили промышленное применение и продолжают развиваться технологии электроэрозионно-электрохимической, электрохимико-ультразвуковой, электрохимико-лазерной, электрохимико-абразивной и других видов комбинированной обработки [30, 31].

Создание гибких технологических модулей для осуществления различных операций физико-химической обработки позволяет существенно повысить эффективность обработки многих деталей в различных областях техники.

Разработка научных основ, технологий и оборудования для защиты окружающей среды и безопасности жизнедеятельности при выполнении электрохимических работ является основополагающей задачей. Согласно работе [32] снижение масштабов применения ЭХРО в промышленности Японии непосредственно связано с жестким законодательством по защите окружающей среды в этой стране. Дополнительные затраты на дорогостоящие технологии и оборудование для регенерации и утилизации отходов снижают эффективность основного производства. Поэтому разработаны и апробированы относительно дешевые технологии переработки отходов электрохимических производств [33]. Проанализированы состав, концентрация и токсикологическое действие продуктов разложения рабочих сред при электрохимической обработке, разработаны средства защиты электрохимобработчиков, требования к производственным помещениям.

Расширение номенклатуры материалов, трудно обрабатываемых резанием [34], вызывает необходимость постановки и проведения исследований по обрабатываемости этих материалов электрохимическим методом и оценки технико-экономической эффективности применения ЭХРО. Так, исследована обрабатываемость титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой [35], жаропрочных хромоникелевых сплавов с включением в состав рения, ниобия, тантала [4, 5, 36]. Проблемным остается вопрос об обработке некоторых видов композиционных материалов, керметов, электропроводных керамик. Технологические исследования в указанном направлении, как правило, приводят к расширению области эффективного применения операций ЭХРО.

В условиях гибкого многономенклатурного производства наукоемкой продукции важное значение приобретают **работы по технологической унификации операций ЭХРО.** Создание групповых операций электрохимической обработки для заданной номенклатуры изделий со схожими технологическими свойствами [37, 38] обеспечивает повышение технико-экономических показателей их производства. В этой связи подчеркивается необходимость разработки унифицированных банков данных для ЭХРО и включения сведений об электрохимической обрабатываемости материалов в машиностроительный паспорт материала [39]. При создании унифицированных операций ЭХРО важное значение придают повышению уровня гибкости станочного оборудования.

Создание технологий и оборудования для синтеза трехмерных объектов. Это направление в машино- и приборостроении рассматривают как одно из самых перспективных в XXI веке. Замена технологий, основанных на субтрактивном принципе, аддитивными

технологиями, обеспечивающими послойное выращивание пространственно сложных объектов, привлекает все большее внимание инженеров и исследователей. Большинство имеющихся технологий данного типа основано на уникальных свойствах лазерного излучения. Однако интенсивные процессы катодного осаждения материалов в потоке электролита (электроформинг), применение способов и средств селективного осаждения позволяют получать трехмерные структуры из различных металлов и сплавов.

Дальнейшее повышение технического уровня средств технологического оснащения тесно связано и является необходимым условием успешного развития технологий ЭХРО. Совершенствование конструкций станков для ЭЭО идет по пути их дальнейшей унификации, модульного принципа построения основных элементов, повышения геометрической и кинематической точности за счет применения новых конструкционных материалов, достижений в области мехатроники, применения современных приводов рабочих и вспомогательных перемещений. Быстрое развитие элементной базы сильноточной электроники раскрывает новые перспективы перед создателями источников питания для электрохимических станков. Значительные технологические резервы могут быть реализованы при разработке новых рабочих сред для ЭХРО.

Повышение функциональных возможностей электрохимических станков является необходимым условием конкурентоспособности электрохимических технологий. Современные станки должны обеспечить реализацию многопереходных операций, в которых интенсивный съем основного припуска сочетается с высокой точностью формообразования. Для увеличения производительности обработки станки оснащают устройствами для быстрой замены инструмента, применяют многоместные и поворотные приспособления. Так, в работе [40] лопатку обрабатывают с одной стороны, затем после поворота заготовки на 180° – с другой.

Практически все имеющиеся на рынке электрохимические станки оснащены системами ЧПУ. Многие из них способны длительное время работать в автоматическом режиме. Поставленная задача автоматизации процессов смены инструмента, загрузки-выгрузки объектов обработки успешно решается. Станки многих производителей оснащают системами адаптивного управления, элементами искусственного интеллекта.

Отмечено отсутствие надежных локальных датчиков состояния *межэлектродного промежутка* (МЭП). Разработка систем получения информации о состоянии МЭП хотя бы в нескольких точках обрабатываемой поверхности представляет собой пока не решенную задачу, сдерживающую разработку надежных систем обратной связи и систем адаптивного управления станками.

Улучшаются динамические характеристики станков. Так, для станков с вибрацией электродов разработаны специальные вибросистемы, обеспечивающие высокую поперечную жесткость. Ведется разработка приводов электрохимических станков на линейных двигателях, что позволяет заметно расширить амплитудно-частотный диапазон вибрационной системы, интенсифицировать отвод продуктов электролиза в объем раствора за счет "помпового" эффекта, повысить точность слежения за координатой инструмента.

Продолжается поиск конструктивных решений для создания сверхточных станков. В конструкциях прецизионных станков используют бесконтактные опоры, высокоточные датчики перемещения, лазерные юстировочные устройства и иные высокоточные системы. Ведется разработка и производство электрохимических станков для микро- и нанообработки.

Перспективным направлением развития электрохимического оборудования остается разработка источников питания с высоким качеством управления параметрами импульсов, широким диапазоном изменения этих параметров, совершенствование существующих и разработка новых систем адаптивного управления процессом обработки [41]. Предложены и реализованы биполярные импульсные источники питания, способные обеспечить не только формирование импульсов заданных параметров, но и управление этими параметрами в течение обработки.

Есть основания полагать, что в ближайшем будущем появятся прецизионные электрохимические станки мехатронного типа, которые позволят существенно повысить технический уровень данного типа оборудования в результате реализации глобальной идеи в развитии технологического оборудования, основанной на замене материалоемких систем программным продуктом.

Заключение

Несмотря на некоторое отставание технического уровня электрохимического оборудования отечественных производителей от оборудования ведущих мировых компаний, потенциальные возможности отечественной науки и станкостроения далеко не исчерпаны. В обозримом будущем наукоемкие российские электрохимические технологии и станки могут занять заметное место в данном сегменте мирового рынка технологий и станков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Атанасянц А.Г., Саушкин Б.П., Сычков Г.А.** Современное состояние и перспективы развития электрохимической размерной обработки (обзор) // Металлообработка. 2002. № 6. С. 9–17.

2. **Атанасянц А.Г., Саушкин Б.П., Сычков Г.А.** Проблемы и перспективы развития импульсной электрохимической обработки (обзор) // Электронная обработка материалов. 2003. № 2. С. 10–22.

3. **Зайцев А.Н.** Технологические преимущества и область применения электрохимической обработки // Экономика и производство. 2003. № 4. С. 63–65.

4. **Дикусар А.И., Саушкин Б.П., Иваненков И.А.** и др. Высокоскоростное анодное растворение жаропрочных хромоникелевых сплавов, содержащих вольфрам и рений. 1. Хлоридные растворы. // Электронная обработка материалов. 2007. № 1. С. 4–15. 11. Нитратные растворы. // Электронная обработка материалов. 2007. № 3. С. 4–12. 111. Хлоридно-нитратные растворы. // Электронная обработка материалов. 2007. № 4. С. 4–11.

5. **Особенности** высокоскоростного анодного растворения никельхромовых сплавов // Н.А. Амирханова, Р.С. Исламова, В.В. Саяпова и др. Уфа: Гилем, 2002. 200 с.

6. **Демьянцева Н.Г., Солунин М.А., Кузьмин С.М.** и др. Электрохимическое формообразование никеля при импульсной поляризации // Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. Вып. 2. С. 78–83.

7. **Высокочастотная** пульсирующая ЭХО особо тонких деталей. Wu Gao-yang, Zhang Zhi-jing, Zhang Wei-min // Trans. Beijing Inst. Technol. 2006. 26. № 7. P. 585–588.

8. **Lohrengel M.M.** Pulsed electrochemical machining of iron in $NaNO_3$: Fundamentals and new aspects // Mater. and Manuf. Processes. 2005. 20. № 1. P. 1–8.

9. **Смирнов М.С.** Повышение точности и качества поверхности при электрохимической обработке за счет применения импульсов тока сверхвысокой плотности. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2004. 16 с.

10. **Житников В.П., Зайцев А.Н.** Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.

11. **Бурков В.М.** Электрохимическое формообразование с вибрацией электрода-инструмента. Иваново: ИГХТУ, 2008. 160 с.

12. **Строшков В.П., Пшеничников В.А., Кожевников В.Л.** Высокоточное электрохимическое формообразование сложнопрофильного инструмента и деталей машин. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 212 с.

13. **Фирсов А.Г.** Разработка оборудования и технологии финишной электрохимической размерной обработки проточных поверхностей малогабаритных лопаток компрессора ГТД с применением компьютерных технологий. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГТУ, 2005. 16 с.

14. **Смелов В.Г.** Повышение эффективности ЭХО лопаток компрессора на основе компьютерного моделирования подготовки производства. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара: СГАУ, 2006. 19 с.

15. **Братухин А.Г.** CALS – стратегия наукоемкого машиностроения // Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 5–16.

16. **Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B.** 3D electrochemical machining computer simulations // J. Mater. Process.Technol. 2004. 149. № 1–3. P. 472–478.

17. **Nohara Ryuki, Kato Dai, Imanari Kuniyuki.** Study of numerical modeling of ECM // Ishikawajirna-Harima Eng. Rev. 2005. 45. № 3. P. 130–134.

18. **Wang Lei, Zhu Di.** Shape evolution and prediction of three dementional workpieces in electrochemical machining // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 2005. 15. № 3. P. 241–246.

19. **Kozak J., Gulbinowicz D., Gulbinowicz Z.** The mathematical modeling and Computer Simulation of Pulse ECM // Engeneering Letter. 2008. № 11. P. 47–52.

20. **Гайлит Ю.А., Саушкин Б.П.** Технологическое обеспечение производства новых изделий // Крылья Родины. 2007. № 10. С. 35–40.

21. **Исследование** основ микроэлектрохимической обработки проволочным электродом // Wang Kun, Zhu Di, Zhang Zhao-yang // China Mech. Eng. 2007. 18. № 7. P. 833–837.

22. **Wang Juns J., Chung C., Wu B.** Fabrication of wedge-shape tool via electrochemical micromachining with diamond-like carbon coating // J. Mater. Process. Technol. 2007. P. 264–269.

23. **Смирнова Т.А.** Электрохимическое микроформообразование осесимметричных деталей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула: ТГУ, 2007. 20 с.

23. **Zhang Liao, Liu Yao.** An experimental study on electrochemical machining of microelectrode // J. China Ordnance. 2006. 2. № 3. P. 206–210.

25. **Kozak J., Rajurkar K., Makkar J.** Selected problems of micro-ECM // J. Mater. Process.Technol. 2004. 149. № 1–3. P. 426–431.

26. **Богданов В.С., Богданов М.В.** Способ размерной электрохимической обработки металлов. Пат. 2330746. Россия. Опубл. 10.08.2008.

27. **Беников В.С., Дикусар А.И., Саушкин Б.П.** Анализ технологий изготовления поверхностных занижений глубиной 10...20 мкм // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 8. С. 49–52.

28. **Хафизов И.И., Закирова А.Р., Садыков З.Б.** Способ электрохимической обработки: Пат. 2323071. Россия. МПК B23 H3/00. Опубл. 27.04.2008.

29. **Павлинич С.П.** Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. Сер.: Машиностроение, 2008. Т. 11. № 2. С. 105–115.

30. **Pajak P., De Silva A., McGeough J., Harrison D.** Modelling the aspects of presision and efficiency in laser-assisted jet ECM // J. Mater. Process. Technol. 2004. 149. № 1–3. P. 512–518.

31. **Саушкин Б.П.** Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве (обзор) // Металлообработка. 2003. № 1. С. 8–17.

32. **Коваленко В.С.** Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии // Электронная обработка материалов. 2000. № 3. С. 4–12.

33. **Амирханова Н.А., Саяпова В.В., Черняева Е.Ю.** и др. Утилизация шламов после электрохимической обработки титановых и коррозионно-стойких сплавов // Экология и промышленность России. 2008. № 4. С. 8–9.

34. **Хорев А.И.** Теория и практика создания современных титановых сплавов для перспективных конструкций // Технология машиностроения. 2007. № 12. С. 5–12.

35. **Балянов А.Г.** Высокоскоростное анодное растворение и взаимодействие с внешними средами металлов с ультрамелкозернистой структурой для разработки технологических процессов электрохимического формообразования. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2003. 17 с.

36. **Алтынбаев А.К., Саушкин Б.П., Иваненков И.А.** Улучшение показателей качества поверхностного слоя при обработке отверстий малого диаметра в жаропрочных сплавах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 8. С. 38–42.

37. **Митрюшин Е.А., Пименов С.П., Саушкин С.Б.** Групповая операция электрохимической обработки окон в деталях типа "втулка" // Металлообработка. 2007. № 2. С. 15–21.

38. **Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б.** и др. Анализ технологических решений при изготовлении штампов для горячей объемной штамповки // Металлообработка. 2009. № 6. С. 23–28.

39. **Каширский Ю.В., Колосков М.М.** Информационный банк по машиностроительным материалам и режимам обработки // Технология машиностроения. 2000. № 1. С. 44–54.

40. **Строшков В.П., Пшеничников В.А., Кожевников В.Л.** Способ электрохимического формообразования турбинных лопаток и устройство для его осуществления. Пат. 2283735. Россия. МПК B23H3/00. Опубл. 20.09.2006.

41. **Mediliuegedara T., De Silva A., Harrison D., McGeough J.** An intelligent pulse classification system for electrochemical-discharge machining // J. Mater. Process. Technol. 2004. 149. № 1–3. P. 499–503.

УДК 621.9.047

Г.Б. Саушкин, Ю.А. Моргунов *(МГТУ "МАМИ", г. Москва)*
Тел.: (495) 223-05-23 доб. 1068
E-mail: 6582434@mail.ru

Электрохимическое нанесение информации на поверхность деталей машин

Рассмотрены физико-химические и технологические аспекты электрохимического маркирования изделий из авиационных материалов на серийно выпускаемом оборудовании. Проанализировано влияние состава электролита на качество знака. Предложены составы электролитов, обеспечивающие высокое качество маркировки.
Ключевые слова: *электрохимическое маркирование, операция маркирования, качество маркирования.*

Some physical, chemical and technological aspects of electrochemical marking of the parts produced from aircraft materials under using of industrial equipment are considered. Influence of chemical composition of electrolyte on the mark quality performance is found and analyzed. Electrolyte compositions based on water solutions of mineral salts supplied with high quality marking are proposed.
Keywords: *electrochemical marking, engraving, manufacturing guality of electrochemical marking.*

Операции электрохимического маркирования получили широкое распространение на машиностроительных предприятиях благодаря следующим технологическим достоинствам [1]:

– отсутствие или минимальная степень негативного воздействия на свойства поверхностного слоя детали при нанесении знаков;

– возможность регулирования в широких пределах количественных и качественных параметров изображения;

– относительно высокая производительность и низкая себестоимость операции маркирования.

Этот метод обеспечивает необходимую долговечность нанесенной информации [2], не требует для своей реализации сложного оборудования, не сопровождается техногенной нагрузкой на окружающую среду. Теоретическое описание процесса [3–5] позволяет достаточно точно решить задачу электрохимического формообразования применительно к указанной операции.

Все вышесказанное предопределяет заметный интерес к технологиям электрохимического маркирования и активность ряда фирм на рынке соответствующего оборудования. Фирмы Marking Methods Inc. (США), UMS Ltd (Англия), Ostling Marksystem AB (Швеция) поставляют универсальное автоматизированное оборудование для маркирования изделий из различных материалов с комплектом рабочих жидкостей, состав которых не разглашается.

Для маркирования используют трафаретные маски, изготовленные с помощью специальных принтеров. Принцип работы маркировочного устройства представлен на рис. 1. Кассета *1* служит для закрепления разделительной ткани *2*, поджимающей влагона-

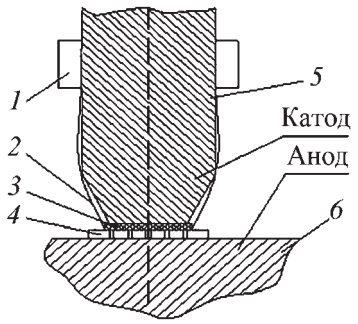


Рис. 1. Схема маркирования с глубиной знака 2...5 мкм

копитель *3* в виде кусочка фетра к торцу графитового электрода *5*. Предварительно подготовленный трафарет *4* накладывается на очищенную и обезжиренную поверхность детали *6*. Шероховатость поверхности, подготовленной для нанесения информации, должна быть не ниже Ra = 6,3 мкм. Высота шрифта наносимой информации не менее 1 мм.

В работе приведены результаты исследования качества маркирования изделий авиационной техники на указанном оборудовании с использованием электролитов на основе минеральных солей. Цель исследования заключается в замене дорогостоящих рабочих сред, поставляемых производителями оборудования, на простые, дешевые и удобные в эксплуатации электролиты.

Информацию наносили на шлифованные пластины из титанового сплава ВТ20, жаропрочного сплава ХН60ВТ, высоколегированной хромистой стали 15Х16К5Н2МВФАВ-Ш. Для предварительного подбора электролитов и режимов электролиза наносили знак квадратной формы с внешней стороной квадрата 4 мм (см. рис. 2) и позволяющий оценить качество горизонтальных и вертикальных элементов изображения и области перехода между ними. Такая оценка производилась путем анализа поперечных и продольных профилограмм линий отпечатка, определения значений ширины b и глубины h отпечатка. Для выяснения возможных дефектов поверхности производили анализ поперечных шлифов. Цвет изображения оценивали визуально. Очевидно, поле рассеяния размера b (Δ) однозначно определяет четкость изображения в пределах исследуемой линии знака. Погрешность измерения размера b не превышала 2 % номинального значения, что при b = 500 мкм составляет 10 мкм.

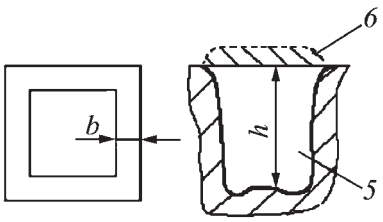


Рис. 2. Форма и размеры наносимого знака

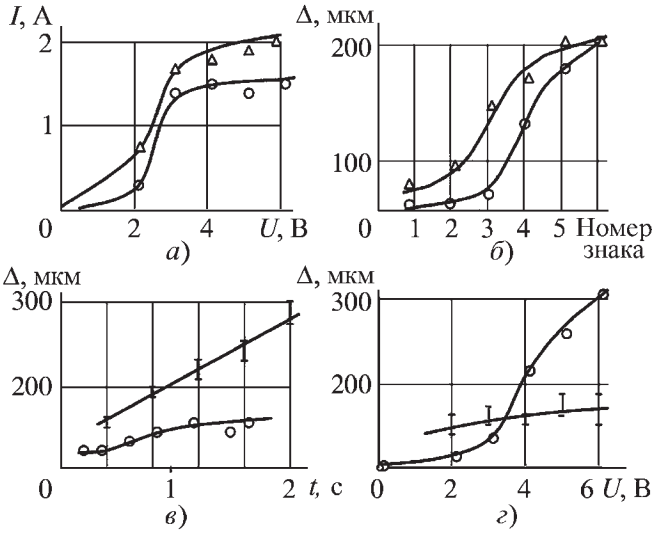


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (*а*) и зависимости величины поля рассеяния Δ от порядкового номера знака, маркируемого одним трафаретом (*б*), времени электролиза (*в*), напряжения на электродах (*г*) (*1* – раствор NaCl; *2* – раствор $NaNO_3$; анод – сталь 15Х16К5Н2МВФА-Ш)

Предварительные эксперименты выполняли в водных растворах NaCl и $NaNO_3$ с целью выявления области оптимальных значений основных регулируемых параметров электролиза: рабочего напряжения U и времени обработки t. Использовали установку EU Classic 300/500 с соответствующей технологией подготовки маски-трафарета. На рис. 3, *а* показаны вольт-амперные характеристики рабочего промежутка, полученные в указанных средах. Как видно, вольт-амперные характеристики имеют идентичный характер с некоторым смещением в область больших значений напряжения для нитратного раствора по отношению к хлоридному. Величина этого смещения примерно соответствует разности потенциалов активации при растворении данного материала в растворах хлорида и нитрата натрия [6]. Далее наблюдается быстрый рост тока, который хорошо согласуется с данными поляризационных измерений. Однако дальнейшее повышение напряжения приводит к появлению площадки тока в исследованных средах. Наличие такой площадки может быть следствием замедленности стадии массопереноса суммарной электродной реакции в отсутствие конвекции рабочего раствора. Однако тот факт, что предельные значения тока примерно одинаковы в исследованных растворах, несмотря на существенное отличие анодного поведения стали в них, заставляет выдвинуть иную причину отмеченной нелинейности вольт-амперной характеристики.

По-видимому, в данном случае существенную роль в балансе напряжения в *межэлектродном проме-*

жутке (МЭП) играет падение напряжения в пористой трафаретной маске в условиях интенсивного газовыделения и отсутствия конвекции. Это предположение согласуется с представлениями о физической модели трафаретной маркировки, изложенными в [3]. Таким образом, на используемом оборудовании целесообразно производить маркирование в диапазоне напряжений 4...6 В, так как дальнейшее повышение этой величины не приводит к интенсификации процесса и повышает вероятность пробоя МЭП с частичной эрозией поверхности наносимого знака.

Очевидно, в условиях локального нагрева и интенсивного газо- и шламовыделения возникают тепловой и силовой факторы, в результате действия которых физические свойства пористой маски должны изменяться. Поэтому следует ожидать, что качество маркирования будет зависеть от порядкового номера наносимого знака, что подтверждено экспериментальными данными (рис. 3, *б*). Видно, что качественное изображение (четкий рисунок) получается при использовании одного трафарета не более 2–3 раз. Дальнейшее использование трафарета приводит к ухудшению качества знака.

Анализ показал, что состав раствора существенно влияет на характер зависимостей поля рассеяния Δ размера *b* от напряжения и времени электролиза (рис. 3, *в*, *г*). Так, в нитратных растворах точность отпечатка мало зависит от напряжения и времени электролиза. В отличие от этого в хлоридном электролите величина Δ быстро увеличивается с возрастанием как напряжения, так и времени обработки. Такое различие связано, по-видимому, с особенностями анодного поведения стали в исследуемых средах. Действительно, анодное газовыделение, свойственное обработке в растворах кислородсодержащих солей, должно в соответствии с [1] приводить к быстрому экранированию анодной поверхности. Соответствующее снижение тока и низкие значения выхода по току реакции растворения металла определяют слабое влияние параметров процесса на степень локализации процесса растворения.

Таким образом, предварительные эксперименты позволили установить диапазон изменения параметров режима, обеспечивающих высокое качество знака и подтвердить сильное влияние состава электролита на качество маркирования.

Дальнейшие эксперименты выполняли с целью более подробного исследования роли рабочей среды в формировании показателей качества знака. С этой целью были приготовлены 10 %-ные водные растворы галоидных и кислородсодержащих солей щелочных металлов: NaCl, NaBr, NH_4Cl, $NaNO_3$, $NaNO_2$, Na_2CO_3, $NaClO_4$, $KClO_3$, $KMnO_4$. Полученные растворы обладают необходимыми эксплуатационными свойствами [6] и могут быть использованы в механосборочных цехах. В качестве базового электролита применяли раствор, рекомендованный и поставленный фирмой – изготовителем оборудования. В указанных электролитах осуществляли маркирование образцов при напряжении 5 В и времени обработки 1 с. Полученные изображения исследовали под микроскопом с увеличением ×10 и ×200. Установлено, что четкость, цвет, форма профиля знака сильно зависят как от материала детали, так и от состава электролита.

Анализ полученных данных показывает, что в зависимости от материала анода, состава раствора и параметров режима электролиза возможно травление поверхности образца с образованием канавки или формирование на поверхности полиоксидной окрашенной пленки (см. рис. 2). В первом случае цвет изображения определяется конечными продуктами суммарной электродной реакции, а во втором – толщиной оксидной пленки.

Знаки, нанесенные на поверхность стальных образцов, характеризуются следующим. В галоидных средах формируются знаки за счет травления поверхности на глубину примерно 3...5 мкм. Достаточно четкие отображения получены в растворах NH_4Cl и NaBr. В растворах кислородсодержащих солей контрастность выше, однако наблюдаются участки нетравленой поверхности, покрытые пленкой. Наилучшие результаты достигнуты в хлоратном растворе, что связано с высокой локализующей способностью этого электролита по отношению к сталям.

Кратковременный характер поляризации титана приводит к тому, что при формировании топографии поверхности на первый план выдвигается механизм роста и разрушения (пробоя) поверхностных оксидных пленок [7]. Это выражается в островковом характере травления поверхности, на которой наряду с травленными участками наблюдаются нетравленые островки, покрытые окрашенной пленкой (рис. 4). В галоидных растворах доля оксидных островков относительно невелика (см. рис. 4, *б*). В растворах кислородсодержащих солей процессы формирования и разрушения поверхностных пленок сильно зависят от природы аниона (см. рис. 4, *а*, *в–е*). Так в перхлоратном растворе образуется практически полностью травленая поверхность знака, а в содовом электролите вся поверхность знака покрыта оксидной пленкой синего цвета с коричневым ореолом. При маркировании жаропрочных сплавов во всех исследованных растворах образуется светлая поверхность знака. Обобщенные данные результатов маркирования материалов в различных средах и рекомендации по применению этих сред сведены в таблицу.

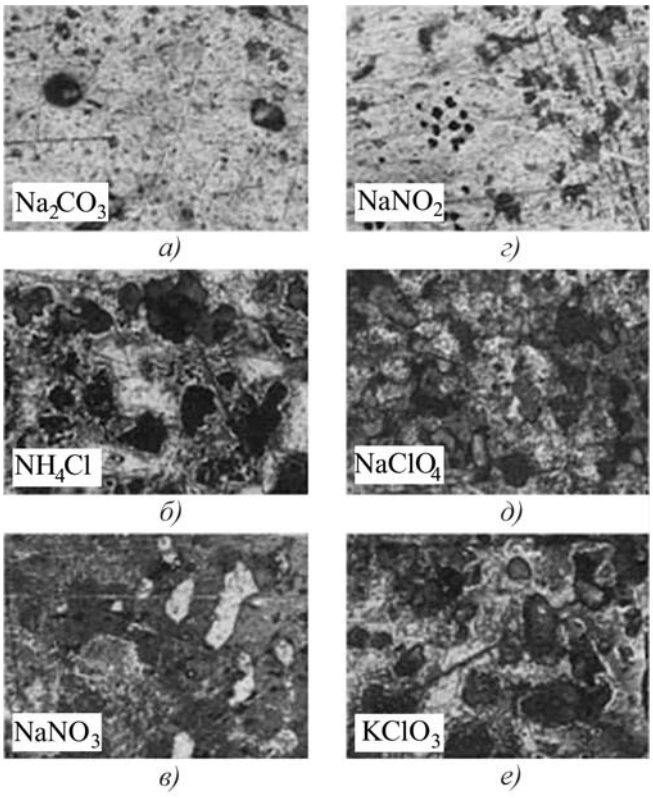


Рис. 4. Морфология поверхности знака, полученного на сплаве ВТ20 в различных электролитах (×200)

При маркировании деталей авиационной техники необходимо исключить появление такого специфического дефекта поверхностного слоя, как растравливание по границам зерен. Для проведения исследований выбран жаропрочный сплав ХН60ВТ, наиболее склонный к появлению данных дефектов. После нанесения знака на образец изготавливали поперечные шлифы и производили металлографический анализ. Полученные данные показали, что в данных условиях при глубине знака 3...5 мкм растравливание поверхности не наблюдается.

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при использовании простых однокомпонентных водных растворов солей, обладающих целым рядом эксплуатационных преимуществ, можно добиться удовлетворительного качества нанесенной информации при электрохимическом маркировании на современном серийном оборудовании. Сравнительный анализ качества знаков, полученных в различных средах по приведенной выше методике, легко осуществить в цеховых условиях.

Сводные данные качества маркировки материалов в различных электролитах

Электролит	Материал	Контрастность знака	Цвет знака	Характер поверхности	Рекомендации по применению
NaCl	СТ, ЖС	3	Темный	Неровная, следы питтингов	–
	ТС	3	Темно-коричневый	Островковое травление	–
$NaNO_3$	СТ, ЖС	3	Темный	Неровная, следы питтингов	–
	ТС	3	Темно-голубой	Травленые участки, питтинги, размывы с пленкой коричневого цвета	–
$KClO_3$	СТ	5	Темно-серый	Ровная, гладкая	+
	ЖС	4	Темно-серый	Ровная, гладкая	+
	ТС	5	Серо-коричневый	Островковое травление: присутствуют продукты реакций и голубая пленка	+
$NaClO_4$	СТ	3	Светло-серый	Малый съем, питтинг	–
	ЖС	4	Светло-серый	Равномерное травление	+
	ТС	5	Темно-коричневый	Равномерное травление, мелкие питтинги	+
NH_4Cl	СТ	4	Темный	Неровная, питтинг	+
	ЖС	3	Темно-серый	Неровная, питтинг	–
	ТС	4	Темно-коричневый	Островковое травление, следы растравливания	+
Na_2CO_3	СТ	5	Светло-серый	Ровная, малый съем	+
	ЖС	4	Светло-серый	Ровная, малый съем	+
	ТС	3	Синий	Травления нет, коричневый ореол (размыв)	–

Электролит	Материал	Контрастность знака	Цвет знака	Характер поверхности	Рекомендации по применению
NaBr	СТ	4	Черный	Достаточно ровная, питтинг	+
	ЖС	4	Темно-серый	Достаточно ровная, питтинг	+
	ТС	4	Темно-серый	Островковое травление, пятна синей пленки	+
$NaNO_2$	СТ	4	Темно-серый	Ровная, малый съем	+
	ЖС	3	Светлый	Малый съем	–
	ТС	4	Голубой	Пятна продуктов травления на фоне голубой пленки	+

Примечание: СТ – сталь, ЖС – сплав на никелевой основе, ТС – титановый сплав. Контрастность оценивали по пятибалльной системе (электролит, рекомендованный фирмой – изготовителем оборудования, – оценка 5).

Современное оборудование для электрохимического маркирования обладает высокой степенью гибкости, высоким уровнем автоматизации, обеспечивает быструю подготовку трафаретных масок. Использование простых и дешевых рабочих сред и расходуемых трафаретных материалов обеспечивает низкую себестоимость операции маркирования при высоком качестве наносимой информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б.** Электрохимическое маркирование деталей. М.: Машиностроение, 1983. 72 с.

2. **Едемский Н.Н., Смоленцев В.П.** Долговечность информации, наносимой электрохимическим методом // Сб. науч. работ: "Проблемы долговечности материалов и рабочих сред". Тула: ТПИ, 1985. С. 61–64.

3. **Смоленцев Г.П., Коптев И.Т., Смоленцев В.П.** Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме. Воронеж: ВГТУ, 2000. 103 с.

4. **Келоглу О.Ю., Мустяцэ А.Н., Дикусар А.И.** О различных формах полостей, образующихся в условиях электромикрообработки при наличии изолирующих слоев (масок) на анодной поверхности // сб. тр. ВНТК "Современная электротехнология в машиностроении". Тула: ТГУ, 1997. С. 64–68.

5. **Редкозубова О.О., Келоглу О.Ю., Дикусар А.И.** Локализация растворения при больших толщинах изолирующих масок в условиях электрохимической микрообработки меди в нитратных растворах // Электронная обработка материалов. 1999. № 5. С. 4–19.

6. **Физико-химические** методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, А.А. Митрофанов и др., под общ. ред. Б.П. Саушкина. М.: "Дрофа", 2002. 656 с.

7. **Саушкин Б.П., Петров Ю.Н., Нистрян А.З.** Электрохимическая обработка изделий из титановых сплавов. Кишинев: Штиинца, 1987. 200 с.

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Ю.И. Головин

2009. 312 с.: ил. ISBN: 978-5-94275-476-1

Цена 693 р. с НДС

Описаны принципы, методы и средства для реализации испытаний и определения механических свойств в наношкале, которые получили в последние годы большое распространение под общим названием “наноиндентирование”. Обсуждены информационные возможности этого большого и многофункционального семейства методов нано- и микромеханических испытаний. Рассмотрены различные аспекты и особенности поведения твердых тел в условиях сильно стесненной деформации, возникающей при локальном нагружении поверхности микронагрузкой. Описаны способы извлечения механических характеристик тонких приповерхностных слоев разнообразных материалов, пленок и многослойных покрытий при локальном нагружении. Особое внимание уделено физическим механизмам деформации и разрушения в этих условиях.

Книга адресована научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся созданием, исследованием и аттестацией новых наноструктурных материалов и систем, полезна студентам, обучающимся по направлениям нанотехнологии и наноматериалов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.787

В.М. Виноградов *(МГТУ "МАМИ", г. Москва)*
Тел.: (495) 223-05-23, доб. 1068

Особенности высокопроизводительных станков для калибрования зубьев цилиндрических колес средних модулей

Рассмотрены вопросы производства зубчатых колес автомобилей с использованием высокопроизводительных зубоприкатных станков, работающих по способу холодного калибрования зубьев одним, двумя и тремя накатниками, а также варианты автоматизации этих станков при обработке колес–дисков и колес–валов.
Ключевые слова: *цилиндрические зубчатые колеса, холодное калибрование, точность обработки.*

Questions of gears production with efficient machines working by cold calibration cogs method by one, two and three tools are considered. Variants of automation of these machines for treatment of gear–disks and gear–shafts are considered.
Keywords: *spur gears, cold calibration, precision of treatment.*

В условиях серийного и массового производства цилиндрических зубчатых колес средних модулей, используемых в трансмиссиях и двигателях автомобилей, снижение себестоимости обработки этих колес может быть достигнуто за счет применения методов, основанных на пластическом деформировании металла в холодном состоянии.

Станки для отделочной обработки зубьев по методу холодного калибрования изготавливают по схемам с одним, двумя и тремя накатниками. Наиболее широкое применение получили станки с двумя накатниками, преимуществом которых является то, что диаметр и ширина обрабатываемых колес не лимитируется размерами накатников. Эти станки позволяют калибровать зубчатые колеса небольших размеров, а усилия, создаваемые накатниками в процессе обработки, уравновешены между собой.

В настоящее время накоплен значительный опыт эксплуатации зубоприкатных станков различных фирм на отечественных и зарубежных заводах по производству автомобилей. Анализ этого опыта позволяет выявить специфические особенности конструкции этих станков и учесть их при разработке новых моделей и модернизации работающих станков.

В процессе холодного калибрования инструмент-накатник (один или несколько) обкатывает заготовку зубчатого колеса с предварительно нарезанными зубьями, сглаживая неровности на профиле зубьев путем пластического деформирования металла.

Во время рабочего цикла накатник и изделие сначала вращаются в одном направлении, а затем в обратном. Такой принцип работы обеспечивает одинаковые условия калибрования обеих боковых сторон зубьев и способствует улучшению их качества.

Станки с одним накатником предназначены для обработки зубчатых колес широкого диапазона как небольших, так и крупных партий, включая колеса большого диаметра (порядка 230 мм), а также тогда, когда необходима частая и быстрая переналадка станка с использованием более экономичной оснастки. Изготавливают такие станки на базе шевинговальных или как специальные. Примером могут служить станки моделей RGE и GFC фирмы "Нейшил Броуч" (США).

Обрабатываемое зубчатое колесо устанавливают между двумя бабками, одна из которых при ручной загрузке станка от гидроцилиндра поворачивается горизонтально на 90° к оператору для загрузки и выгрузки деталей.

При установке заготовки на станке в позиции калибрования накатник, закрепленный в прецизионных подшипниках шпинделя станка, вращается на уменьшенных оборотах, что обеспечивает свободное зацепление обрабатываемого колеса с накатником.

Учитывая значительные усилия, возникающие в процессе холодного калибрования зубьев, для обеспечения высокой точности и однородности зубчатых колес, важное значение имеет способ установки и за-

крепления зубчатого колеса на станке во время обработки.

Оригинальным элементом конструкции станков является технологическая оснастка для закрепления заготовки на рабочей позиции. Одна из двух опорных бабок, перемещаясь вдоль оси заготовки, центрирует ее выступающим концом оправки и зажимает ее по торцам ближе к зубьям между двумя гладкими роликами, имеющими точные и концентрично расположенные наружные поверхности относительно заготовки обрабатываемого зубчатого колеса. Эти ролики опираются на роликовые опоры стола станка и выполняют роль люнета в процессе калибрования зубьев, уравновешивая значительные силы (порядка 15...30 кН), возникающие при пластическом деформировании металла накатником.

При использовании указанной схемы установки заготовки на прикатном станке радиальное биение, которое имелось в зубчатом колесе до калибрования, можно уменьшить до 75 %.

После центрирования и зажима детали между правой и левой бабками станка стол с роликовыми опорами начинает быстро перемещаться вверх, заставляя обрабатываемое зубчатое колесо внедряться в накатник. Перед началом калибрования обороты инструмента увеличиваются до соответствующей частоты. А стол переключается на медленную подачу, после чего начинается процесс обработки.

При изменении размера обрабатываемой детали и угла наклона зубьев головку накатника можно регулировать в нужном направлении.

Холодное калибрование зубьев производится на параллельных осях, накатник вращается в одном направлении. При минимальном межосевом расстоянии пары – обрабатываемого колеса и накатника – продольная подача на некоторое время выключается, а обкатывание продолжается.

В условиях массового производства зубчатых колес используется высокопроизводительный метод Монороллл, при котором усилия калибрования снижаются за счет использования оригинальных накатников с зубчиками на боковых поверхностях зубьев инструмента.

При разработке прикатных станков, работающих по этому методу, предусматривается повышенная жесткость, независимая регулировка осей и положения накатников, синхронное их вращение, возможность автоматизации. Примером повышения жесткости является станок RGB фирмы "Нейшил Броуч", имеющий стальную сварную раму с толщиной стенок 60 мм, выдерживающую нагрузку до 45 кН.

Профильное накатывание одним накатником может также осуществляться на станке фирмы "Хурт" модели Monoroll ZRA-7 (ФРГ) (рис. 1). Этот станок обладает достаточной жесткостью, что позволяет использовать его для обработки зубчатых колес с модулем до 6 мм и шириной зубчатого венца до 50 мм. Время накатывания на нем сравнительно невелико (от 3 до 9 с) и сильно зависит от качества процесса чернового зубонарезания.

Накатник закрепляют на шпинделе станка, имеющего три опоры. Он может изменять положение оси для коррекции угла наклона зуба, так как устанавливается на салазках. Технические характеристики станка представлены в таблице. Станок сконструирован таким образом, чтобы к нему могла быть присоединена автоматическая загрузочная система.

Для облегчения перемещения салазок с накатной головкой и исключения люфта между винтом подачи и гайкой используется гидропривод. За счет применения салазок можно с высокой точностью регулировать межосевое расстояние, так как после перемещения салазки накатника фиксируют через гидравлическую систему станка и силы, возникающие при накатывании, замыкаются на станине. Все детали прикатного станка, влияющие на положение осей инструмента и заготовки, находятся вне зоны обработки и неподвержены температурному влиянию.

Регулировку межосевого расстояния сознательно производят на салазках накатника с целью обеспечения постоянства расстояния от центра заготовки до основания стола станка. Это необходимо для установки специального автоматического загрузочного

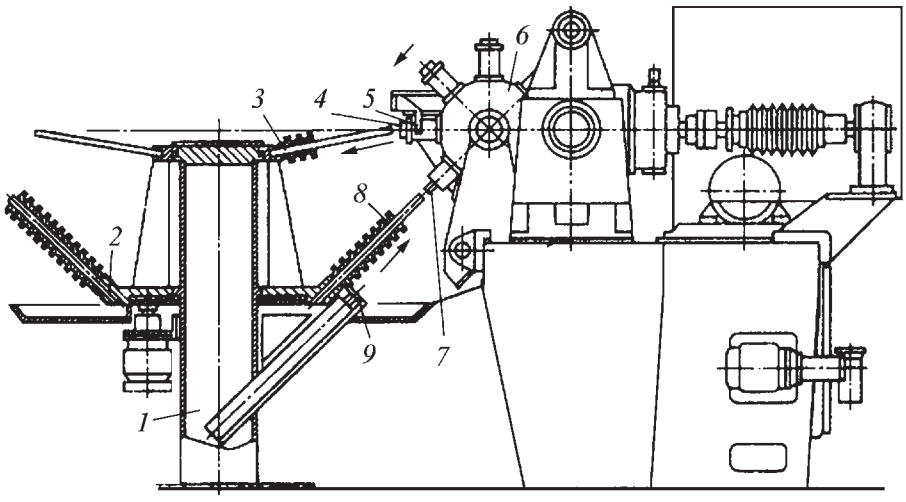


Рис. 1. Схема зубоприкатного станка ZRA-7 с автоматической загрузкой заготовок

Техническая характеристика станка Monoroll ZRA-7

Заготовка	Диаметр обрабатываемого колеса, мм	20...220
	Модуль, мм	До 6
	Ширина зубчатого колеса, мм	До 50
	Длина заготовки, мм	280
	Возможность исправления:	
	наклона	±30′
	конусности	±24′
Инструмент	Диаметр, мм	200...300
Число оборотов	Плавное регулирование, об/мин	50...180
Двигатели	Гидронасоса, кВт	7,5
	Системы охлаждения, кВт	0,55
	Системы смазки, кВт	0,06
Полная потребляемая мощность, кВт	~ 12,5	
Масса станка, кг	~ 4500	
Габариты станка, мм	2560×1800×2290	

устройства, которое необходимо при малом времени калибрования зубьев.

Все предлагаемые фирмой "Хурт" загрузочные системы для прикатных станков работают по проходному принципу (см. рис. 1), т.е. заготовки подаются сквозь станок. Загрузочное устройство проталкивает заготовку в зажимной блок, где она гидравликой зажимается в специальном приспособлении. В зависимости от конфигурации обрабатываемых зубчатых колес загрузочные системы могут быть двух типов – для заготовок в виде дисков и для валообразных заготовок. Обычно загрузочные системы выполняют по принципу цепного магазина-накопителя. В начале загрузочной системы заготовки укладывают в несущий лоток вручную или автооператором. Транспортировку заготовок осуществляют на цепях без соприкосновения их между собой, что исключает повреждение заготовок при перемещении.

Широко распространенная схема профильного накатывания зубьев среднемодульных колес двумя накатниками реализуется на прикатных станках компаний "Лэндис", "Мичиган Тулл" (США), "Лоренц" (ФРГ), "Мицубиси" (Япония) и др. Они производят простые по своему принципу и конструкции станки с одной неподвижной и другой подвижной накатными головками.

Основным требованием к станку является прерывистое вращение заготовки для преодоления инерции и выравнивания скорости вращения заготовки и накатников, чтобы обеспечивалось их плавное зацепление в начале работы.

Более высокое качество изготовления зубчатых колес и большая однородность размера обеспечивается при применении гладких роликов для ограничения расстояния между осями двух накатников или между накатником и обрабатываемым колесом во время калибрования. Гладкие ролики устанавливают на каждом шпинделе рядом с накатником и на оправке для обрабатываемого колеса. Требуемый размер зубчатого колеса во время калибрования определяется, когда все три гладких ролика под действием прикатного усилия приходят в соприкосновение. Схема с двумя накатниками и гладкими роликами позволяет уменьшить радиальное биение до 40 %.

Характерным примером зубоприкатного станка с двумя накатниками является автомат фирмы "Лоренц" модели "Микро Фло" (ФРГ) (рис. 2). Технические характеристики станка схожи с характеристиками станка "Мичиган Микро-Фло" (США): максимальный обрабатываемый модуль 5 мм, диаметр обрабатываемого колеса 25...125 мм, наибольший диаметр накатника 220 мм, максимальное расстояние между шпинделями 345 мм, минимальное расстояние между шпинделями 185 мм, масса станка 4000 кг, наибольшая ширина обрабатываемого зубчатого венца 75 мм, ход накатников в радиальном направлении 75 мм, максимальный угол разворота накатника 45°, радиальная подача (бесступенчатая) 10...100 мм/мин, радиальный ускоренный ход 2500 мм/мин, коррекция направления зуба max на 1 мм ширины, число оборотов накатника 80 об/мин.

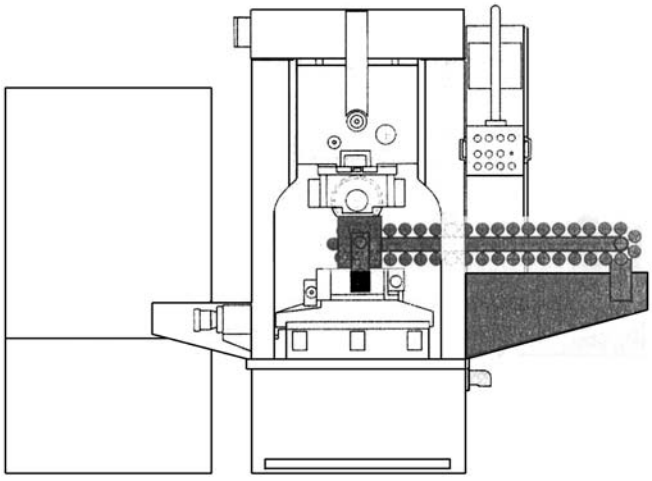


Рис. 2. Схема автомата для холодного калибрования зубьев двумя накатниками

Штыревой магазин-накопитель *1* станка (см. рис. 1), имеющий два яруса, рассчитан на 150 заготовок (каждый ярус). На верхнем ярусе с 15 штырями *3* размещаются обработанные зубчатые колеса, а на штырях *2* нижнего яруса – зубчатые колеса после зубофрезерования перед калиброванием. Между магазином и зоной обработки с накатниками находится восьмипозиционная поворотная револьверная головка *6*. Толкатель *9* подает заготовки *8* на свободную позицию *7* револьверной головки, а толкатель *5* снимает обработанные заготовки *4* и устанавливает их на штыри *3* верхнего яруса. Револьверная головка *6*, вращаясь, поочередно устанавливает заготовки в зону обработки между синхронно вращающимися накатниками.

До зацепления с накатником заготовка зубчатого колеса вращается от специального пневмомотора со скоростью несколько меньшей или большей частоты вращения накатников. Благодаря этому обеспечивается свободное зацепление зубьев обрабатываемого колеса с накатником.

Подвижная бабка станка, перемещаясь, вводит вращающийся накатник в зацепление с вращающейся заготовкой, а затем вместе с ним продолжает перемещаться к накатнику, закрепленному в неподвижной бабке. При достижении беззазорного зацепления накатников с заготовкой начинается пластическое деформирование зубьев заготовки под определенным усилием. Расстояние между осями накатников постепенно уменьшается до получения требуемого размера зубьев колеса.

Процесс холодного калибрования зубьев среднемодульных колес может также осуществляться на профиленакатных станках моделей UPW 25X100 и UPW 50X200 фирмы "МИМ" (ФРГ) (рис. 3). Особенности конструкции этих станков: бесступенчатое регулирование усилия накатывания и числа оборотов шпинделей с помощью гидравлической системы; электронное управление временем накатывания; высокая износоустойчивость направляющих салазок подвижной бабки, оснащенных планками из текстолита; централизованная смазка, обеспечивающая смазывание механизма червячной передачи и направляющих салазок; сокращение вспомогательного времени вследствие того, что перемещение салазок подвижной бабки вперед и обратно производится на ускоренном ходу.

Благодаря использованию различных дополнительных устройств (поворотных накатных шпинделей, трехроликового устройства, устройства для установки деталей в центрах, загрузочно-разгрузочных устройств и т.п.) повышается производительность станков, расширяются их технологические возможности.

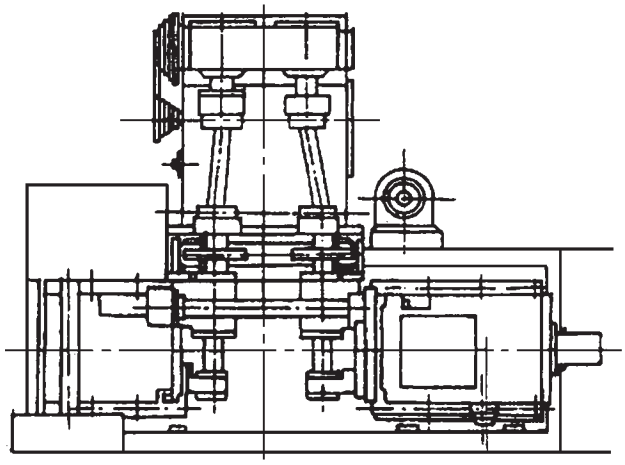


Рис. 3. Профиленакатной станок модели UPW 25X100

При массовом производстве деталей профиленакатные станки UPW 25X100 снабжают бункерами роторного типа, цепными конвейерами и магазинами. Эти устройства способствуют использованию станков в поточных линиях и допускают обслуживание нескольких станков одним рабочим-оператором.

В МГТУ "МАМИ" совместно с Мытищинским машиностроительным заводом (ЗАО "Метровагонмаш") с целью существенного повышения точности, производительности, стабильности и экономической эффективности зубообработки цилиндрических колес холодным калиброванием выполнена модернизация профиленакатного станка UPW 25X100 путем снабжения его узлом стабилизации припуска под отделочную обработку зубьев [1]. В процессе модернизации были учтены специфические особенности процесса холодного калибрования зубьев в условиях массового производства зубчатых колес и конструкция самого станка.

В настоящее время многие фирмы, выпускающие шевинговальные станки, которые по-прежнему востребованы на рынке, также освоили производство и прикатных станков, преимущественно с тремя накатниками. Также они предлагают услуги по переоборудованию шевинговальных станков в прикатные. Примером такого переоборудования может служить станок модели Red Ring Gearoll RGA (ФРГ).

Примером же самостоятельной конструкции является продукция немецкой фирмы "Роде Дюрренберг", в частности, станок модели MAY ZW-125 (рис. 4), работающий по полностью автоматическому циклу и способный калибровать косозубые зубчатые колеса до модуля 4 мм, наружным диаметром до 125 мм и шириной зубчатого венца от 10 до 40 мм.

Загрузка прикатного станка-автомата модели ZW-125 осуществляется из магазина-накопителя,

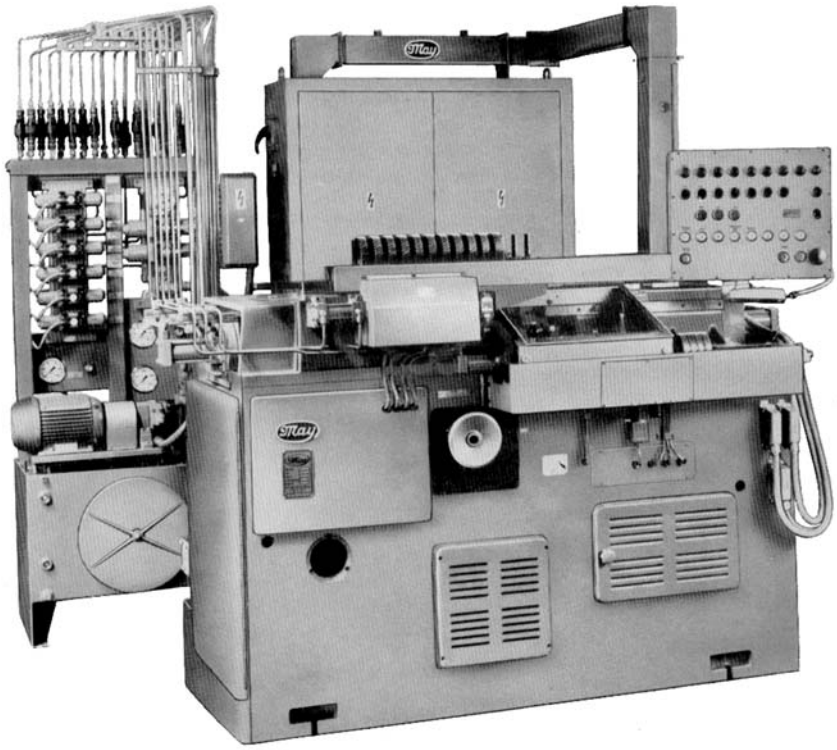


Рис. 4. Зубоприкатной станок-автомат модели ZW-125 с тремя накатниками

предварительно заполненного заготовками колес после зубофрезерования. Через барабанный питатель заготовка сначала перемещается радиально в пространство между ведущим и направляющим зубчатыми колесами (накатниками) и ориентируется по профилю зуба с помощью установленного ниже синхронизирующего зубчатого колеса относительно зубчатого венца ведущего колеса. Затем обрабатываемое зубчатое колесо аксиально зажимается между направляющим и ведущим зубчатыми колесами и вводится в позицию накатывания. Планетарное расположение трех накатников из специальной инструментальной стали надежно гарантирует не только точное центрирование детали, но и выгодный режим силового воздействия при холодном калибровании зубьев.

Накатники приводятся во вращательное движение общим ведущим зубчатым колесом, шаг зубьев которого точно соответствует шагу зубьев обрабатываемого колеса. Холодное калибрование зубьев продолжается несколько секунд (порядка 3 с) с правым или левым вращением накатников при одновременном радиальном подводе инструментов. Рабочий такт заканчивается отводом накатников и выгрузкой окончательно обработанного зубчатого колеса на поддон.

Станки модели ZW-125 нашли наибольшее применение при обработке зубчатых колес коробки передач и системы газораспределения двигателей легковых автомобилей.

Заключение

В настоящее время станкостроением освоен выпуск целой гаммы станков для холодного калибрования зубьев цилиндрических колес средних модулей, реализующих все три известных способа калибрования зубьев одним, двумя и тремя накатниками. При создании прикатных станков выявлены специфические особенности их конструктивного исполнения в зависимости от количества задействованных накатников и параметром обрабатываемых зубчатых колес. Проработаны вопросы автоматизации загрузки-выгрузки деталей и возможности рационального встраивания этих станков в поточные и автоматические линии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Виноградов В.М., Черепахин А.А.** Холодное калибрование зубьев цилиндрических колес с предварительной стабилизацией припуска под обработку // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 25–29.

ООО "Издательство МАШИНОСТРОЕНИЕ" выпускает
новые книги

Полетаев В.А., Волков Д.И.

П49 Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2009. — 272 с.: ил.

ISBN 978-5-94275-494-5

Изложена теория процесса глубинного шлифования. Проанализированы преимущества данного способа обработки в сравнении с маятниковым шлифованием. Рассмотрены кинематика и термодинамические процессы глубинного шлифования, формирование поверхностного слоя деталей при данном виде обработки и теория размерного изнашивания абразивного инструмента.

Представлены практические аспекты использования процесса глубинного шлифования в условиях автоматизированного производства лопаток турбин ГТД. В частности, описаны все известные технологические схемы обработки, металлорежущее оборудование для их реализации, специальная технологическая оснастка и инструмент. В том числе приведены конкретные практические рекомендации по выбору характеристик режущего и правящего инструментов, методов правки кругов, подачи и очистки смазочно-охлаждающих жидкостей, оптимизации режимов шлифования.

Для инженерно-технических работников, аспирантов, студентов, исследующих процессы резания, а также технологов, разрабатывающих технологические процессы обработки лопаток турбин в условиях автоматизированного производства.

УДК 621.923
ББК 31.363

❑ ❑ ❑ ❑ ❑

Давыдов Н.И.

Д13 Литейные противопригарные покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2009. 240.: ил.

ISBN 978-5-94275-438-9

Систематизирован практический материал по литейным противопригарным покрытиям, используемым для получения качественных отливок.

Рассмотрена природа пригара (наиболее распространенного дефекта отливок) и дано обоснование эффективности применения покрытий как средства предотвращения указанного дефекта.

Описаны свойства покрытий и методы их испытаний, а также некоторые сведения о современных приборах и оборудовании, в том числе используемых за рубежом. Представлены справочные данные об исходных материалах и составах покрытий, рекомендуемых для изготовления в условиях потребителя, а также о марках, свойствах и области применения промышленно выпускаемых противопригарных композиций. Приведены сведения о покрытиях, используемых за рубежом. Дана необходимая информация, касающаяся оборудования для изготовления покрытий, а также технологии их нанесения и отверждения.

Для инженерно-технических работников литейного производства, может быть полезен аспирантам и студентам.

УДК 621.744.37(058)
ББК 34.663я2

Внимание!

В последнее время участились случаи контрафактно изданных журналов нашего издательства с нарушением технических стандартов полиграфии.

Нередко покупателями некачественных изданий становятся бюджетные организации, заключившие договор с недобросовестными поставщиками в результате тендера.

ООО "Издательство Машиностроение" обладает исключительными правами на выпуск и реализацию своих периодических изданий, поэтому для оформления подписки у нас не требуется участие в тендерах. Издательство предоставляет все документы, которые необходимы государственным учреждениям.

Издательство "Машиностроение" предоставляет журналы
по минимальной отпускной цене.
Постоянным подписчикам предоставляет скидку – 3 %.

Ежемесячная отправка заказной бандеролью осуществляется за счет издательства.

Приглашаем Вас оформить подписку на журналы издательства "Машиностроение"
в отделе продаж, маркетинга и рекламы:
107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98. Факс (499) 269-48-97.
e-mail: realiz@mashin.ru www.mashin.ru

Обращайте внимание на качество журналов, получаемых по подписке!
Издательство не несет ответственности за низкое качество журналов, приобретенных у недобросовестных поставщиков, и не принимает их к обмену.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.
Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.*
Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 29.09.09 г. Подписано в печать 07.12.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,39. Заказ 990. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15