

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 16
2020
№ 7 (187)
ИЮЛЬ

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф. В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф. А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф. О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.

В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.
Ян СУХАНЭК

Мариан СЧЕРЕК
Войтек ХОМИК

Редакция:

О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Щедрин А.В., Бекаев А.А., Краснова С.И. Комбинированные инструменты для протягивания тел вращения 291



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Кокорин В.Н., Подмарев Д.Р., Храмов М.А., Мишов Н.В., Шиллер Н.В. Исследование напряженно-деформированного состояния материала заготовки при нагружении клиновидным инструментом 297

Колганова Е.Н. Теоретические и экспериментальные исследования процесса удаления заусенца свободными абразивами 300



ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Бочков В.С. Повышение износостойкости рабочих органов экскаваторов 306



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Цих С.Г., Красуля А.А., Помельникова А.С. Исследование структуры и свойств стали 38ХНЗМФА после низкотемпературного жидкостного борирования 309

Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В. Влияние никеля на процессы формирования переходного слоя при жидкофазном алюминировании титана 313



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Паничев Е.В., Смоленцев В.П., Иванов В.В. Технология чистовой комбинированной обработки минералокерамических покрытий 318

Силаев Д.В., Сухочев Г.А., Гореликов Д.В., Гореликов В.Н. Технологические особенности регулирования процесса комбинированной обработки поверхности сложного профиля 324



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Афонин С.М. Механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора для наномехатроники 329

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 по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 16
2020
№ 7 (187)
July

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistant

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
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.V. SLEPTSOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS
Jan SUCHANEK
Marian SZCZEREK
Wojciech HOMIK

Edition:

O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269)
or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by
Roskomnadzor. The certificate
of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Krasnova S.I. Combined tools for broaching of bodies
of revolution 291

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Kokorin V.N., Podmarev D.R., Khramov M.A., Mishov N.V., Shiller N.V. Study of
strain-stress state of workpiece material when loaded with wedge-shaped tool 297

Kolganova E.N. Theoretical and experimental researches of deburring process by
loose abrasives 300

THERMAL PROCESSING

Bochkov V.S. Increasing in wear resistance of excavating machine elements 306

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Tsikh S.G., Krasulya A.A., Pomel'nikova A.S. Study of structure and properties of
steel 38KhN3MFA after low-temperature liquid borating 309

Kovtunov A.I., Khokhlov Yu.Yu., Myamin S.V. Effect of nickel on formation of transition
layer during liquid-phase aluminizing of titanium 313

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Panichev E.V., Smolentsev V.P., Ivanov V.V. Technology for finishing combined pro-
cessing of mineral-ceramic coatings 318

Silaev D.V., Sukhochev G.A., Gorelikov D.V., Gorelikov V.N. Technological features
of control of combined processing process of complex profile surface 324

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Afonin S.M. Mechanical and control characteristics of multilayer piezoactuator for nano-
mechatronics 329

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 according
to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical
and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology;
05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal
science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment;
05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



А.В. Щедрин, А.А. Бекаев
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана),
С.И. Краснова
(МОУ СОШ № 12, г. Орехово-Зуево)
E-mail: bekaev@list.ru

Комбинированные инструменты для протягивания тел вращения

С применением алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" синтезирована информационная база обрабатывающих модулей для системного формирования оптимально эффективного инструментального обеспечения перспективного метода комбинированного протягивания тел вращения.

Ключевые слова: комбинированное протягивание тел вращения, искусственный технологический интеллект.

The information base of processing modules for combined broaching of bodies of revolution, is created by based algorithmic procedures of "artificial technological intelligence" and the fundamental direction "tribology systems".

Keywords: combined broaching of bodies of revolution, artificial technological intelligence.

В настоящее время ведущие отечественные и зарубежные станкоинструментальные фирмы активно разрабатывают и внедряют перспективные технологии протягивания тел вращения, преимущественно шеек и щек балансиров двигателей внутреннего сгорания [1, 2].

С использованием алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" [3–5] синтезированы конкурентоспособные конструкции инструмента и оборудования для реализации методов комбинированного протягивания тел вращения.

На рис. 1 представлена сборная линейная комбинированная протяжка для обработки цилиндрической поверхности заготовки детали 1. Инструмент состоит

из следующих модулей, смонтированных на каретке протяжного станка 2: абразивно-режущей секции 3; деформирующе-режуще-выглаживающей секции 4; абразивно-режущей секции с лепестко-

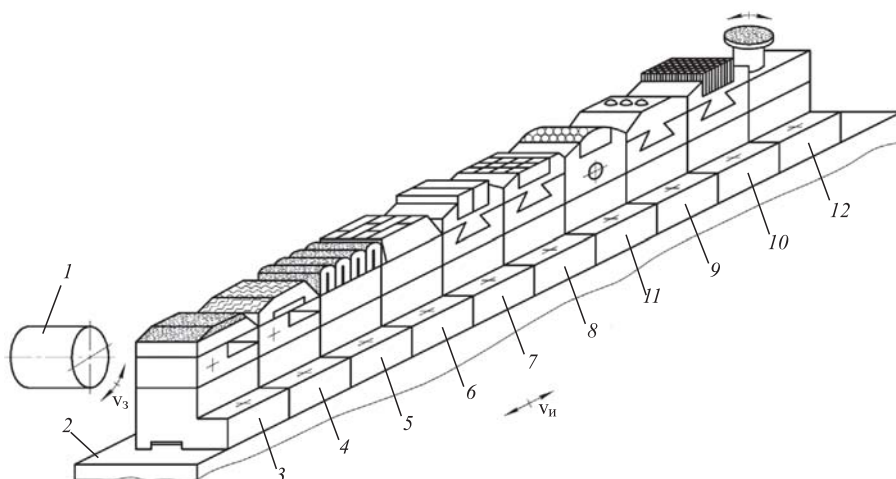


Рис. 1. Сборная линейная комбинированная протяжка:

v_3 — скорость вращения заготовки детали; $v_{н}$ — скорость поступательного движения протяжки

выми элементами 5; лезвийно-режущей секции 6; секций с осциллирующими головками 7–10, в которых соответственно установлены армирующие, абразивно-режущие, деформирующие и игольчатые режущие элементы; смазочной секции 11; секции с вращающейся головкой 12.

Абразивно-режущая секция (рис. 2, а) состоит из корпуса 1, одноплечевого рычага 2, упругого элемента 3. На одноплечевом рычаге 2 может быть закреплен абразивный элемент 4, имеющий сплошную 5 или прерывистую поверхность 6 за счет канавок 7 различной глубины и формы. Абразивный элемент 4 имеет заборный участок длиной L_3 и калибрующую ленточку длиной $L_{л1}$.

Перед началом обработки под действием упругого элемента 3 рычаг 2 находится в приподнятом положении (не показано). Горизонтальное положе-

ние калибрующей ленточки $L_{л1}$ в конце обработки (см. рис. 2) осуществляется регулировочным винтом 8 со сферической головкой и контргайкой 9. Высотное расположение калибрующей ленточки $L_{л1}$ при настройке на размер обработки $D_{д}$ осуществляется поворотом эксцентриковой оси 10.

Для расширения технологических возможностей абразивный элемент 4 может содержать соответствующие наполнители 11, например: частицы серы, вызывающей разупрочнение поверхностного слоя заготовки детали; термиты, увеличивающие тепловыделение, которое приводит к интенсивной горячей пластической деформации в срезаемом слое, или используемые для термообработки (закалки) и другие активные вещества.

На рис. 2, б, в показан внешний вид абразивно-режущей секции с рабочим элементом в виде абразивной ленты, опирающейся на упругий резиновый вспомогательный элемент.

Деформирующе-режуще-выглаживающая секция (рис. 3) аналогично состоит из корпуса 1, одноплечевого рычага 2, упругих элементов 3, 4. На одноплечевом рычаге 2 может быть закреплен съемный обрабатывающий модуль 5, имеющий заборный участок L_3 и калибрующую ленточку длиной $L_{л1}$.

На заборном участке L_3 и участке калибрующей ленточки длиной $L_{л1}$ в необходимом порядке выполняется деформирующий 6, режущий 7 или выглаживающий (не показан) регулярный микрорельеф [4]. Участок калибрующей ленточки длиной $L_{л2}$ не имеет рабочей поверхности для исключения искажения поперечного профиля обрабатываемой заготовки детали 8.

Горизонтальное положение калибрующей ленточки $L_{л1}$ в конце обработки устанавливается по винту 9 со сферической головкой и контргайкой 10. Горизонтальная фиксация калибрующей ленточки осуществляется подпружиненным клиновым фиксатором 11, который входит в соответствующую прорезь проушины одноплечевого рычага 2. Подъем одноплечевого рычага 2 перед

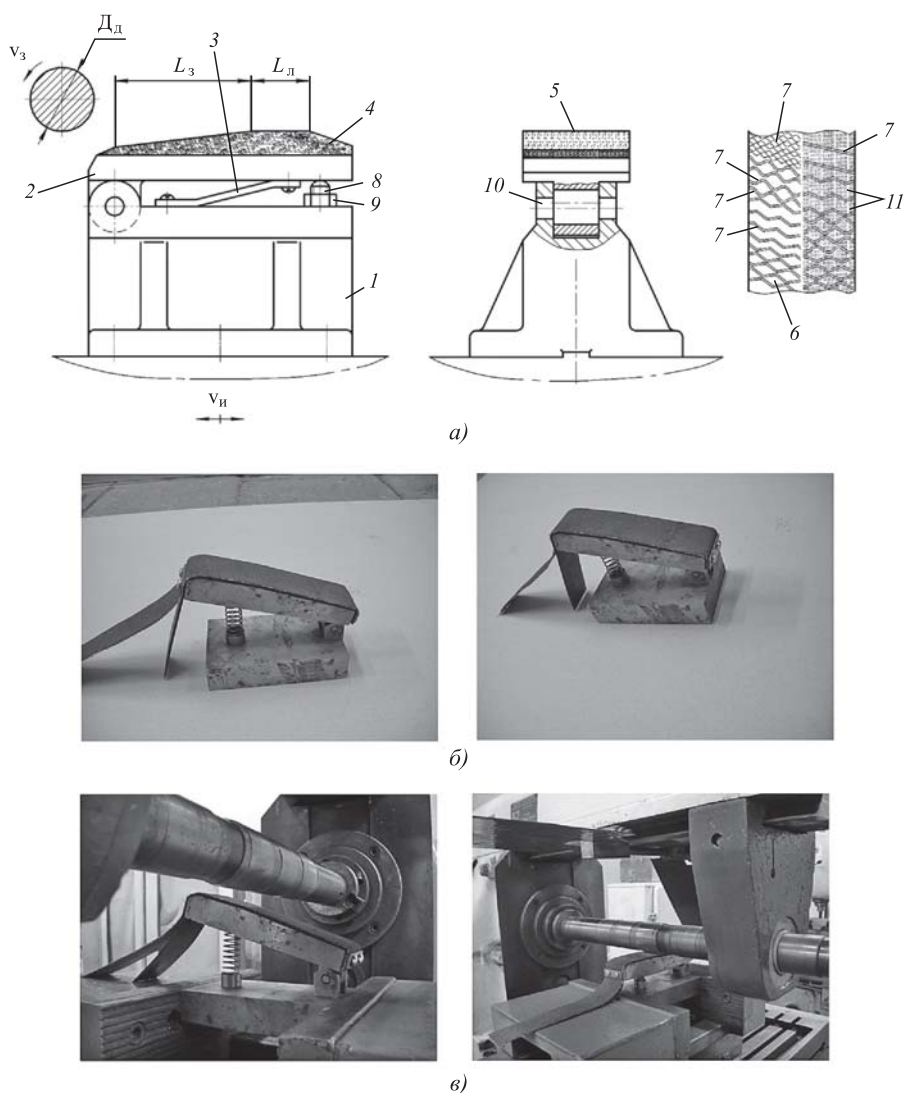


Рис. 2. Принципиальная конструкция абразивно-режущей секции (а), внешний вид секции (б), использование секции на универсальном фрезерном станке (в)

началом обработки в исходное положение под действием упругих элементов 3, 4 осуществляется расфиксацией путем нажатия на рукоятку 12. Наличие съемного обрабатывающего модуля 5, а также комплекта упругих элементов 3, 4 позво-

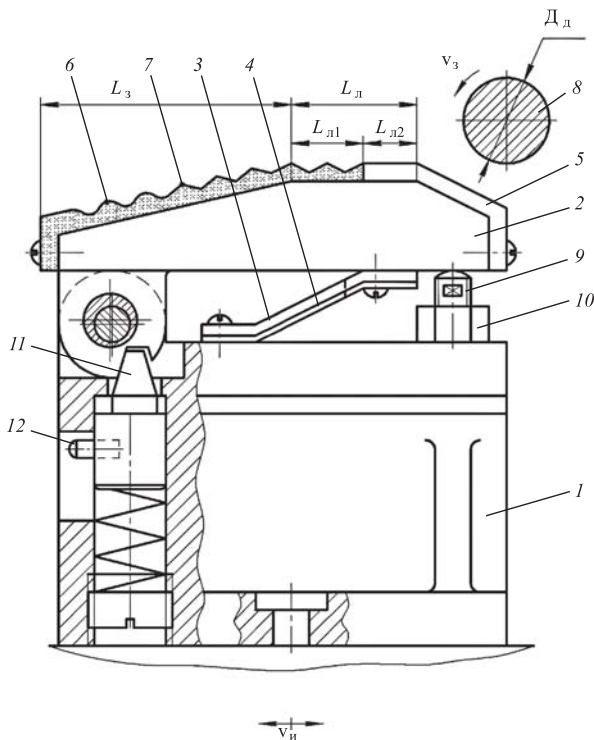


Рис. 3. Деформирующе-режуще-выглаживающая секция

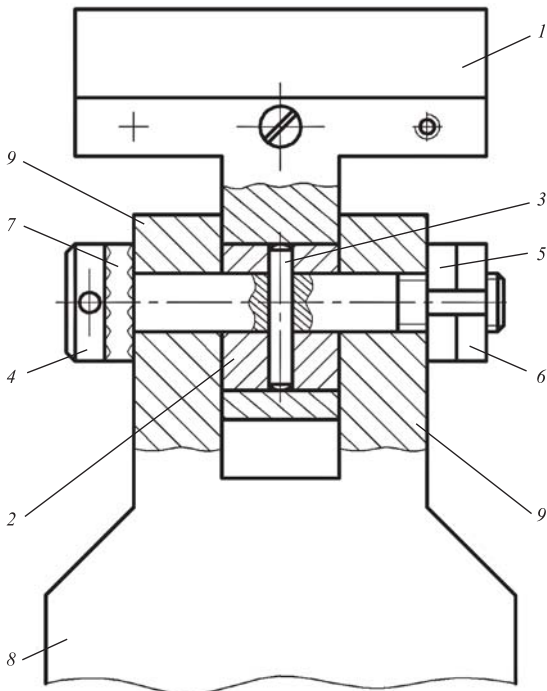


Рис. 4. Конструкция узла настройки на размер

ляет мобильно перестраивать данную секцию под конкретные технологические условия.

На рис. 4 представлен вариант конструкции узла настройки абразивно-режущей и деформирующе-режуще-выглаживающей секции на необходимый размер детали D_d . В отверстие проушины одноплечего рычага 1 устанавливается эксцентриковая втулка 2, которая посредством штифта 3 соединяется с осью 4, линейная и угловая фиксация которой соответственно осуществляется гайками 5, 6 и шайбой 7 с рифлеными торцами. Для крепления одноплечего рычага 1 секций на корпусе 8 он имеет элемент в виде "вилки" 9. Вращая ось 4 с эксцентриковой втулкой 2, можно поднимать или опускать одноплечевой рычаг 1, обеспечивая необходимый операционный размер детали D_d .

При больших усилиях обработки возможна составная конструкция одноплечего рычага (рис. 5). Рычаг состоит из основания 1, изготовленного из конструкционной стали, на котором выполнена наплавка инструментального материала в виде двух пересекающихся слоев 2 и 3. При этом наплавочные желобки 4 и 5 по форме соответствуют траектории главных напряжений, возникающих при обработке.

Такое техническое решение, как показали экспериментальные исследования, обеспечивает максимальную прочность соединения основания и наплавки инструментального материала.

Для дополнительного увеличения прочности соединения на поверхности наплавочных желобков 4 и 5 выполнены канавки 6 регулярного микрорельефа, которые увеличивают площадь контакта. Канавки регулярного микрорельефа 6 могут иметь радиусную форму или форму, аналогичную форме наплавочных желобков 4 и 5.

Конструкция абразивно-режущей секции с лепестковыми элементами представлена на рис. 6. Она включает в себя корпус 1, на котором с по-

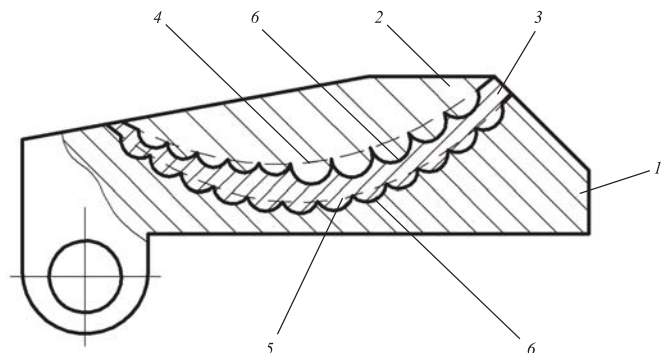


Рис. 5. Вариант конструкции составного одноплечего рычага

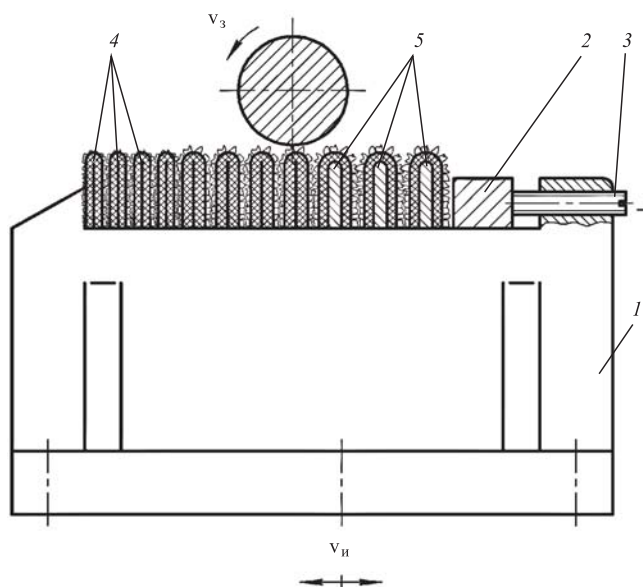


Рис. 6. Конструкция абразивно-режущей секции

мощью прижима 2 и винта 3 закреплен пакет лепестковых абразивных элементов 4, изгибающая жесткость которых может целенаправленно изменяться за счет пластинчатых вставок 5.

Лезвийно-режущая секция (рис. 7) состоит из отдельных реечных элементов 1, смещенных относительно друг друга, что обеспечивает равномерность обработки большую, чем режущие секции на основе многогранных сменных неперетачиваемых пластин [1, 2] (в контакте с заготовкой всегда находится не менее двух зубьев).

Для эффективного удаления стружки из полостей стружечных канавок рейки снабжены сопловыми отверстиями 2, через которые импульсно подается технологическая смазка (где T , ΔT — соответственно шаг зубьев и смещение по шагу).

Секция, предназначенная для регуляризации микрорельефа поверхности (рис. 8), состоит из корпуса 1, головки 2 с деформирующими элементами 3, коромысла 4, толкателя 5, тарельчатых пружин 6. Осциллирующее движение головки 2 обеспечивается через коромысло 4 и толкатель 5 прикладываемой силой F . Закон изменения последней задается копиром, регулируемым гидроприводом или системой ЧПУ, и определяет параметры формируемого регулярного микрорельефа 7 (площадь и форму канавок), необходимые в каж-

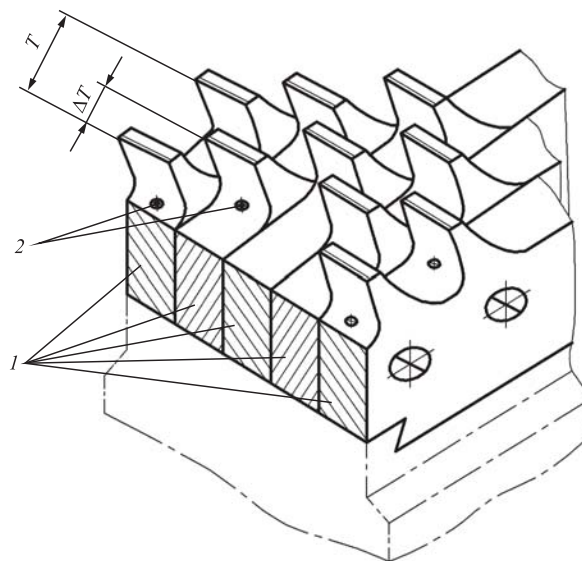


Рис. 7. Конструкция лезвийно-режущей секции

дом конкретном случае. Радиальную жесткость при обработке заготовки (например, коленчатого вала) обеспечивает роликовый люнет 8.

Помимо деформирующих элементов в осциллирующей головке 1 (рис. 9) в быстросменной кассете 2 с упругим демпфером 3 могут быть установлены игольчатые режущие элементы 4, эф-

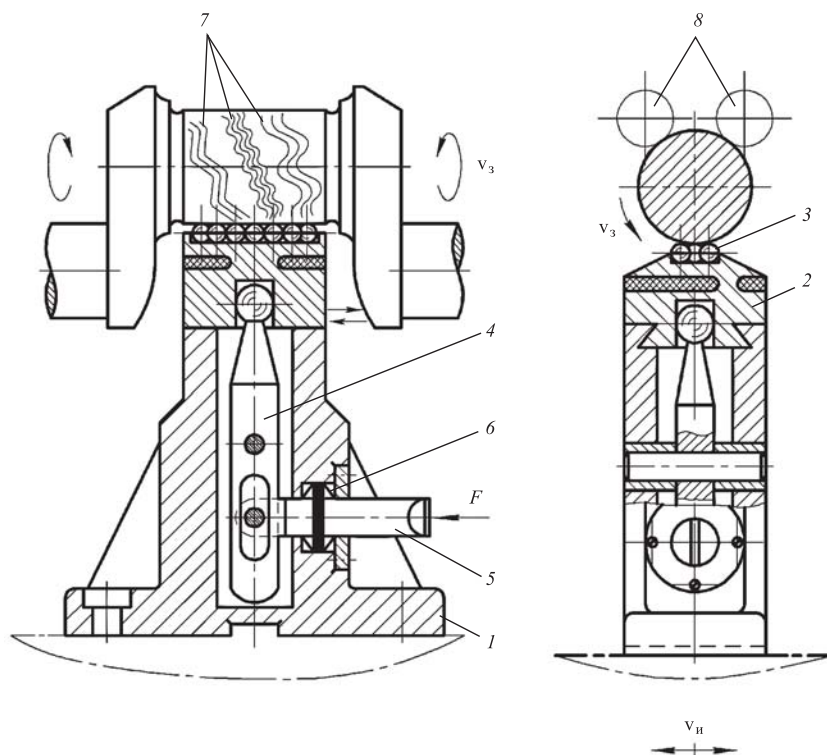


Рис. 8. Конструкция секции с осциллирующей головкой для нанесения регулярного микрорельефа

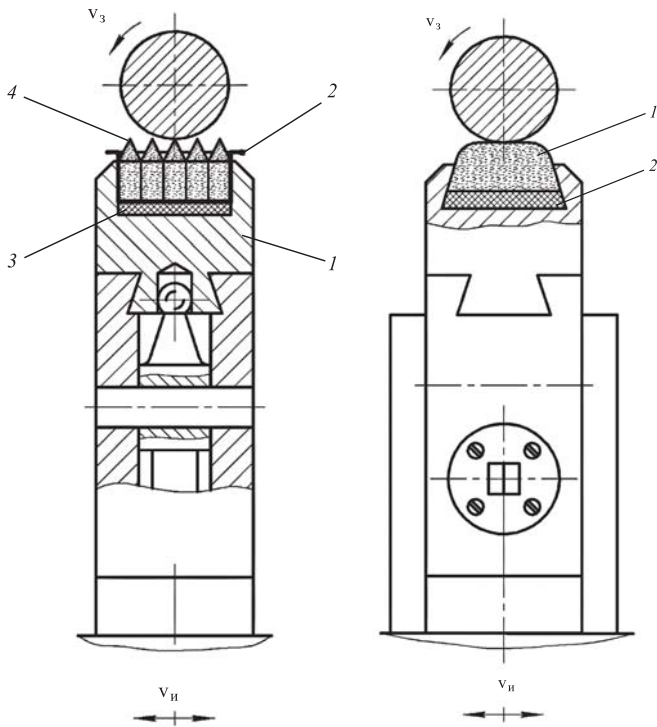


Рис. 9. Секция с осциллирующей головкой, оснащенной игольчатыми режущими элементами

Рис. 10. Секция с осциллирующей головкой, оснащенной абразивным режущим элементом

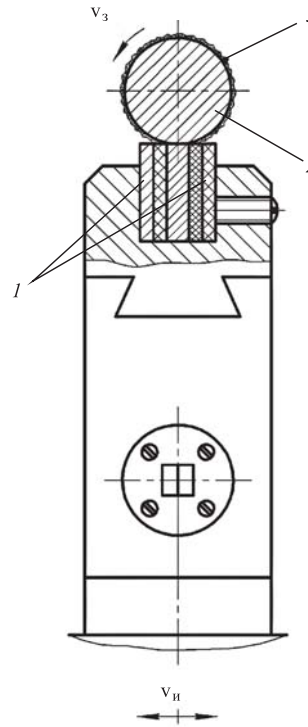


Рис. 11. Секция с осциллирующей головкой, оснащенной армирующими элементами из антифрикционных материалов

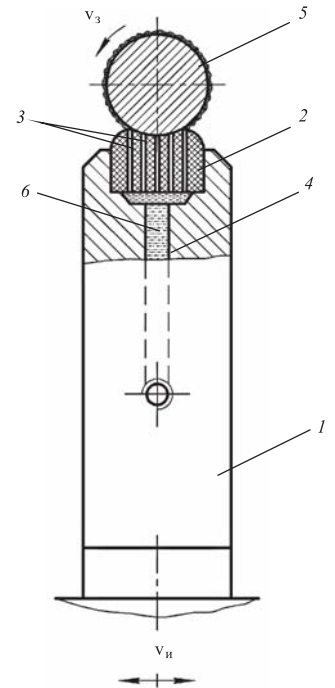


Рис. 12. Конструкция смазочной секции

фективно удаляющие дефектные слои (окалину, литейную корку и т.д.).

Другие решения — установка в осциллирующую головку абразивного элемента 1, опирающегося на упругий элемент — демпфер 2 (рис. 10), или закрепление пакета пластин 1 из различных антифрикционных материалов (рис. 11). Последнее решение позволяет создавать на поверхности исходной заготовки 2 тонкий модифицированный слой 3, уменьшающий трение и износ деталей при эксплуатации.

Нанесение специального материала на поверхность обрабатываемой заготовки детали реализует смазочная секция (рис. 12). В корпусе 1 закреплен элемент 2 с капиллярными каналами 3. Через отверстие 4 и элемент 2 на поверхность заготовки детали 5 подается материал 6, который может служить технологической смазкой, консервантом при упаковке детали и т.д.

Секция (рис. 13), в которой рабочие элементы могут совершать вращательное движение относительно обрабатываемой заготовки, состоит из корпуса 1 с установленным в нем на опоре 2 шпинделем 3. Шпиндель вращается через гибкий вал 4 от высокомоментного шагового двигателя 5, управляемого от системы ЧПУ.

На шпинделе могут закрепляться быстросменные головки с различными элементами: игольчатыми 6, деформирующими столбиковыми 7, шариковыми 8, проволочными 9, абразивными 10 и т.д. Такое конструктивное исполнение в сочетании с линейным перемещением $v_{н}$, также осуществляемым от привода с ЧПУ, позволяет реализовать достаточно разнообразную кинематику формообразования поверхности детали 11 как на макро-, так и на микроуровне.

На рис. 14 представлена перспективная конструкция унифицированного корпуса комбинированной линейной протяжки. Корпус состоит из основания 1, ассиметрично расположенной стойки 2, на которой могут быть установлены обрабатывающие модули 3. Такая конструкция позволяет вести обработку как на станках с горизонтальным шпинделем (например, универсальных консольных горизонтально-фрезерных), так и на станках с вертикальным шпинделем (например, универсальных вертикально-фрезерных). В обоих случаях вместо фрез на шпиндель устанавливается обрабатываемая заготовка детали, а на рабочий стол — протяжка. Возможна также обработка на стан-

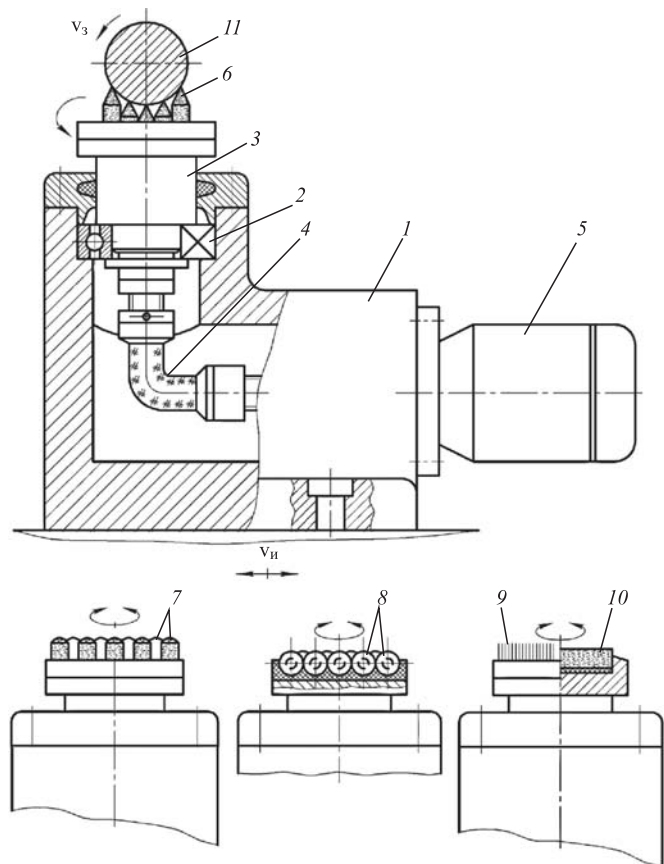


Рис. 13. Конструкция секции с вращающейся головкой

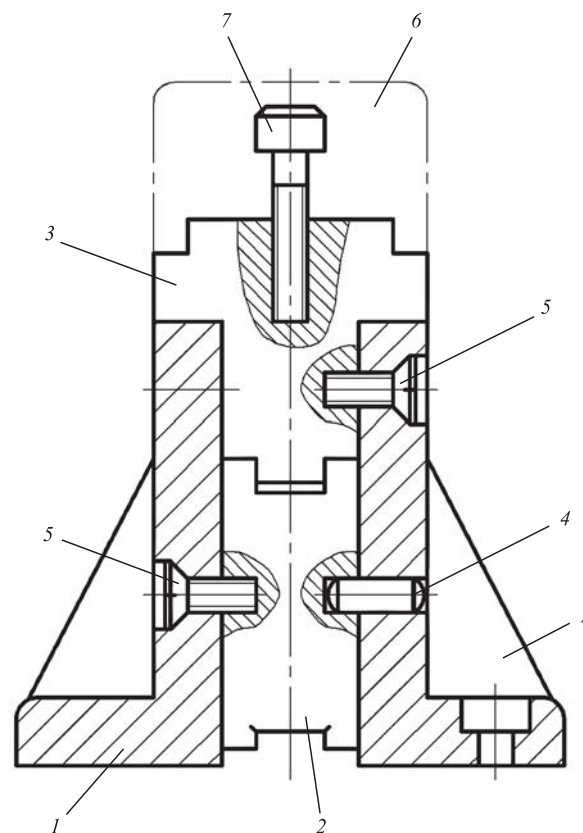


Рис. 15. Сборно-модульная конструкция корпуса линейной протяжки

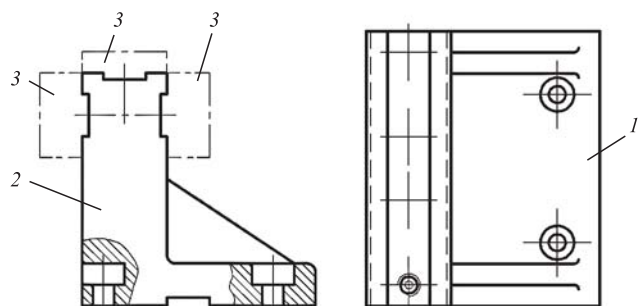


Рис. 14. Перспективная конструкция корпуса линейной протяжки

ках, имеющих одновременно горизонтальные и вертикальные шпиндели.

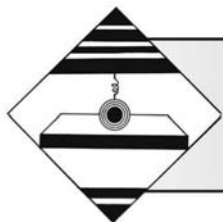
При выполнении требований мобильности, при переходе на другую продукцию, возможен вариант сборного корпуса линейной комбинированной протяжки (рис. 15). Такая конструкция состоит из унифицированных угольников 1, призм 2 и 3, соединяемых посредством штифтов 4 и винтов 5. Обрабатываемый модуль 6 фиксируется с помощью винтов 7.

Дальнейшее совершенствование методов комбинированного протягивания тел вращения и

развитие информационной базы будет осуществляться в адаптации синтезированных секций-модулей к инструменту круговой компоновки, обеспечивающему непрерывность обработки [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лейн А.М. Обработка фасонных тел вращения методом протягивания // Станки и инструмент. 1975. № 2. С. 16–17.
2. Рогов В.А., Кошеленко А.С. Современные методы обработки шеек коленчатых валов // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 53–59.
3. Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю. Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20–26.
4. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.
5. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / А.В. Щедрин и др. / Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 6. С. 18–25.



В.Н. Кокорин, Д.Р. Подмарев, М.А. Храмов, Н.В. Мишов, Н.В. Шиллер
(Ульяновский государственный технический университет)
E-mail: kokorinvn@mail.ru

Исследование напряженно-деформированного состояния материала заготовки при нагружении клиновидным инструментом

Рассмотрены вопросы моделирования процессов прокатки при возникновении деформационного упрочнения листового металлопроката. Установлены основные характеристики напряженно-деформированного состояния металла, определяющие особенности процесса формообразования и энергосиловые характеристики.

Ключевые слова: деформационное упрочнение, инструмент, валки, моделирование, напряжение.

The problems of rolling processes modeling in the event of strain hardening of sheet metal are considered. The main characteristics of the strain-stress state of the metal are determined, which determine the features of the forming process and energy-power characteristics.

Keywords: strain hardening, tool, rolls, modeling, stress.

При изучении процессов механической активации металлов и сплавов сотрудниками Ульяновского государственного технического университета была представлена реализация новой технологии контурной лазерной резки листового металлопроката с предварительной его активацией, заключающейся в холодном деформационном упрочнении обрабатываемого металла.

Были установлены технологические характеристики обработки и мероприятия, способствующие повышению эффективности данной технологии, в частности, использование клиновидных ребер на деформирующих валках, обеспечивающих локализацию деформационного упрочнения и, как следствие, снижение теплопроводности. Это обеспечивает повышение размерной точности изделий, уменьшение коробления и образования грата [1].

До настоящего времени отсутствует анализ деформационных характеристик локальных участков, где осуществляется силовое воздействие на металлопрокат, не изучено влияние формы и типоразмеров клиновидного ребра на уровень интенсификации процесса упрочнения как фактора, снижающего теплопроводность металла, и соот-

ветственно, повышающего качество поверхности разделения при снижении энергоемкости процесса лазерной контурной резки.

В рамках анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе деформационного упрочнения металла предложено рассматривать упрочнение исходного листового металлопроката 2 прокаткой между двух валков 1 одинакового диаметра, вращающихся в противоположных направлениях (рис. 1).

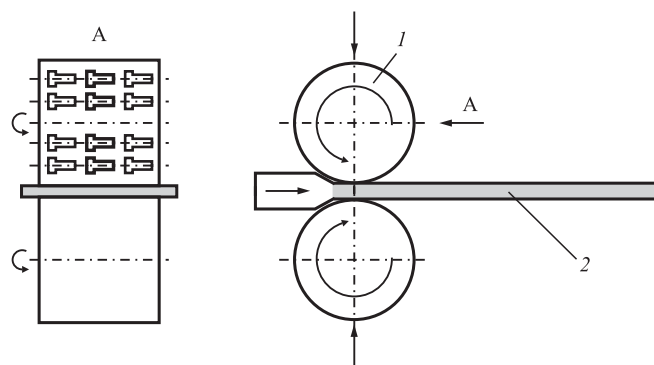


Рис. 1. Принципиальная схема прокатки листового металла

Валки снабжены клиновидными ребрами, траектория которых когерентна контуру вырезаемой детали, что обеспечивает локальное упрочнение узкой области обрабатываемого металла в зоне разделения при реализации схемы неравномерного всестороннего сжатия. Это позволяет сохранить высокий уровень пластичности металла по всей площади вырезаемой детали.

Произведен расчет НДС в очаге деформации при различных степенях осевого нагружения с использованием клиновидных ребер прямоугольной и конической форм. Моделировали НДС с помощью программы LS-DYNA с использованием нелинейного переходного динамического конечно-элементного кода с явным и неявным решателем.

Подготовку математической модели, а именно нанесение сетки на материал (инструмент, заготовка) и ввод исходных данных осуществляли в свободном препроцессоре LS-Pre/Post [2]. Задачу решали в плоскостной постановке с моделированием поперечного сечения деформируемого металла. Исходная толщина материала заготовки $S_0 = 3$ мм, материал заготовки — углеродистая сталь 45, модель материала заготовки 001_ELASTIC (материал типа 1 — упругий изотропный материал, который используется для балочных, оболочечных и объемных элементов программы LS-DYNA). Материал инструмента валков — легированная сталь 12X18H10T, модель материала инструмента

024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (материал типа 24, с помощью этой модели можно задать упругопластический материал с произвольной зависимостью между напряжением и деформацией, а также произвольной зависимостью от скорости деформации). Деформация проводится в холодном состоянии со степенями деформации $\varepsilon = 25$ и 50 % по толщине заготовки.

Перемещение инструмента задавали узловым набором с помощью карты PRESCRIBED_MOTION_SET. Заготовку разбивали на 31 250 четырехузловых трехмерных оболочечных элемента типа Shell 163 с определением мембранных свойств. Тип контакта — 2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE.

Основная задача — определение перемещения d^{n+1} во времени t^{n+1} . Все термины известны во временном состоянии n и таким образом могут быть решены явно.

В явном подходе внутренние и внешние силы суммируются в каждой узловой точке, и узловые ускорения вычисляются путем деления на массу узла. Решение осуществляется путем интегрирования этого ускорения во времени (рис. 2).

Последовательность расчета явного анализа:

1) в начальный момент времени ($t = 0$) напряжения, скорости, ускорения равны нулю или соответствуют заданным граничным условиям в момент времени $t = 0$;

2) проходит временной шаг $n + 1$;

3) рассчитываются скорости и перемещения в момент времени $n + 1/2$ для скорости и $n + 1$ для перемещения;

4) далее рассчитываются скорость деформации во время $n + 1/2$ от скорости и матрицы B (матрица напряжение—перемещение), рассчитывается напряжение во время $n + 1$ в зависимости от скорости деформации;

5) затем рассчитываются внутренние силы во время $n + 1$ в зависимости от напряжения и матрицы B ;

6) вычисляются внешние силы в момент времени $n + 1$ и ускорения, исходя из разницы сил и массы;

7) окончательно временной шаг увеличивается на $n + 1$ и цикл повторяется.

При анализе напряженно-деформированного состояния (рис. 3, 4, см. обложку) было зафиксировано пять характерных уровней напряжений (зон равного уровня напряжения). Сравнительная характеристика зонального распределения характерных

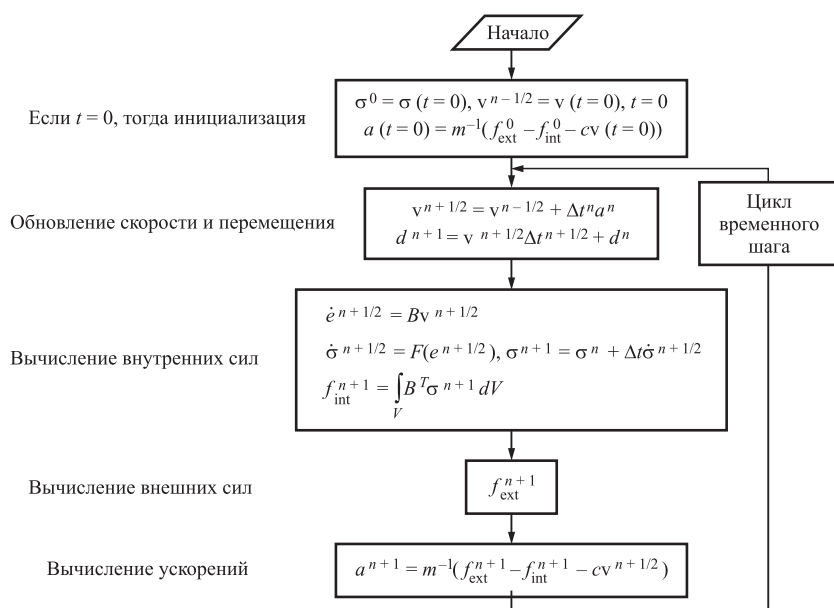


Рис. 2. Блок-схема для выполнения явного анализа:

v — скорость; m — масса; t — время; a — ускорение; c — параметр скорости деформации; σ — параметр механического напряжения; e — параметр деформации; F — сила; n — номер итерации

Условный коэффициент силового воздействия, учитывающий площади равного уровня напряжений

σ_i , МПа	ε , %	F_{\square} , мм ²	F_{∇} , мм ²	$K_{\square\text{усл}}$, %	$K_{\nabla\text{усл}}$, %
600	25	0	15 000	0	10
546		80 000	86 500	11,4	57,6
518		17 100	26 600	53,7	17,7
491		52 800	22 000	35,2	14,6
355	Исходная структура				
628	50	36 000	85 000	13,6	41,3
600		18 000	12 000	32	20,9
546		12 000	20 000	19,2	14,8
518		20 000	22 400	35,2	23
355	Исходная структура				

участков НДС при различных степенях деформации представлены в таблице.

Для оценки эффективности формы деформирующего инструмента (коническая и прямоугольная) было предложено использовать условный коэффициент силового воздействия ($K_{\text{усл}} = F_i/F_0$), определяемый как отношение площадей равного уровня напряжений (F_i) к площади (F_0), замыкающей границы деформационного воздействия при фиксированных степенях деформации (рис. 5).

Проведен расчет условных коэффициентов силового воздействия соответственно при степенях деформации 25 и 50 % в пяти зонах напряжений равного уровня, а также площадей участков, замыкающих границы деформационного воздействия.

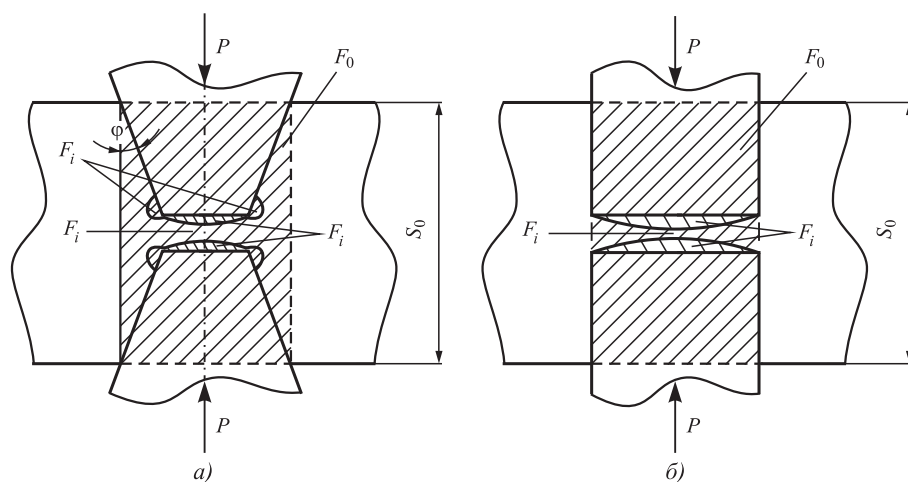


Рис. 5. К определению условного коэффициента силового воздействия при локализованном нагружении:

a — клиновидные ребра конической формы ($\varphi > 0$); *б* — прямоугольные ребра ($\varphi = 0$)

На рис. 6 (см. обложку) представлена оценка площадей равного уровня напряжений при использовании прямоугольных и конических клиновидных ребер.

Анализ представленных номограмм позволил установить интегральную площадь зон максимального упрочнения: при степени деформации 25 % зона напряжений уровня 600 МПа (зона 1) составляет 0 % (прямоугольный клин) и 10 % (конический клин); зона напряжений 546 МПа (зоны 1 и 2) соответственно 11,4 и 67,6 %.

При степени деформации 50 % зона напряжений уровня 628 МПа (зона 1) составляет 13,6 % (прямоугольный клин) и 41,3 % (конический клин); зона напряжений до 600 МПа (зоны 1 и 2) соответственно 45,6 и 62,2 %; зона напряжений до 546 МПа (зоны 1–3) соответственно 64,8 и 77 %.

Заключение

Таким образом, установлено наличие в очаге деформации пяти характерных зон, напряжения в которых отличаются не менее чем на 25 МПа. При этом применение клиновидной формы деформирующего инструмента позволит повысить уровень локализации участка силового воздействия на 20 % (при $\varepsilon = 25$ %); 40 % (при $\varepsilon = 50$ %).

Проведенные исследования позволяют установить технологическое преимущество использования конической клиновидной формы деформирующего инструмента за счет повышения уровня локализации участка силового воздействия при обеспечении повышения уровня деформационного упрочнения в зоне реза и, как следствие, снижение теплопроводности как фактора, определяющего эффективность контурной лазерной резки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кокорин В.Н., Илюшкин М.В., Подмарев Д.Р. и др. Моделирование процесса деформационного упрочнения листового металлопроката // Научные труды VI Международной научной конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". М.: ИМАШ РАН, 2019. С. 213–214.
2. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением: учебно-методическое пособие. Ульяновск: УлГУ, 2013. 112 с.

Е.Н. Колганова

*(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)**E-mail: elenkolg@list.ru*

Теоретические и экспериментальные исследования процесса удаления заусенца свободными абразивами

Представлены результаты исследований вибрационной обработки деталей радиоэлектронной аппаратуры в среде свободного абразива. Получена обобщенная модель заусенца, сформированного на заготовках в результате механической обработки. Проанализирован механизм контактного взаимодействия частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью, положенный в основу разработки теоретико-вероятностной модели удаления заусенцев. Проведен комплекс исследования влияния технологических факторов на продолжительность вибрационной обработки.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, среда органического происхождения, шероховатость, микронеровность поверхности, заусенцы, скругление кромок.*

The results of vibro-abrasive treatment of radio electronic equipment parts in free abrasive medium are presented. The principle model of burr formed on workpieces as result of mechanical treatment is obtained. The mechanism of contact interaction of processing medium particles with the treated surface is analyzed. The mechanism is used as the basis for the development of probability-theoretical model of deburring. Complex of researches of technological factors effect on the duration of vibration treatment is carried out.

Keywords: *vibration treatment, organic medium, roughness, microroughness, burrs, edge rounding.*

Введение

Развитие приборостроения неразрывно связано с созданием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) нового типа. Современные приборы должны обладать низкой массой и миниатюрностью размеров, более жесткими становятся требования к долговечности, надежности и точности таких приборов. В силу специфических условий эксплуатации, когда детали приборов подвергаются перепадам температуры, давлений и т.п., обеспечение абсолютной надежности прибора является жизненно необходимым требованием. Повышение эффективности финишной обработки такого рода деталей — важнейшая задача современного приборостроения.

Основным методом формообразования деталей различной конфигурации как в общем машиностроении, так и в приборостроении остается обработка резанием. Однако все виды механической обработки, в основе которых лежат процессы резания, сопровождаются образованием различного рода дефектов — заусенцев на кромках и микрочастиц на поверхностях деталей [1]. Даже применяя современные обрабатывающие центры и оптимизируя режимы обработки, избежать этих явлений невозможно, так как они являются про-

явлениями законов механики сплошных сред. Заусенцы — это излишки материала, выступающие на кромках и в углах поверхностей детали, в виде гребенок с рваными краями толщиной более 0,01 мм, образующиеся в результате сдвига металла при штамповке и обработке резанием.

Негативную роль заусенцев можно представить следующими аспектами:

— функциональный (затруднение сборки деталей, их позиционирования, ускорение коррозионных процессов, снижение сопротивления усталости, помехи в работе и др.);

— экономический (увеличение затрат на пригоночные работы, повышение опасности травматизма на производстве и др.);

— эстетический (снижение потребительской стоимости и ухудшение внешнего вида изделий).

Особые трудности вызывает отделочная обработка деталей, имеющих сложную конфигурацию наружных и внутренних поверхностей (рис. 1).

Все приведенное выше свидетельствует о необходимости проведения научно-исследовательских разработок, направленных на создание новых высокоэффективных технологических процессов отделочно-зачистной обработки, пригодных для массового и серийного производства деталей широкой номенклатуры.

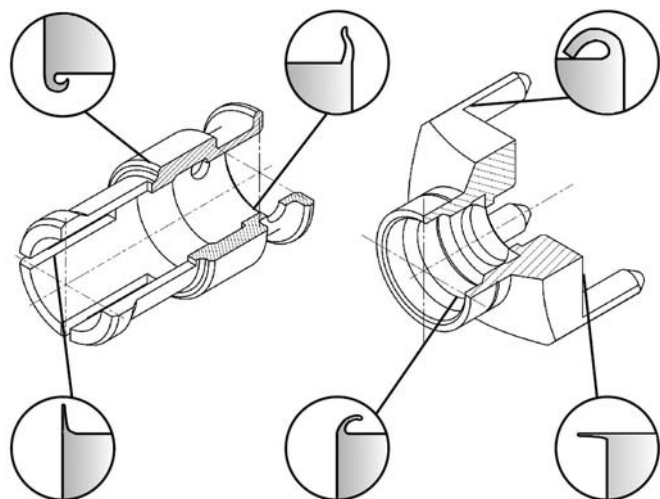


Рис. 1. Расположение и форма заусенцев на заготовках деталей РЭА

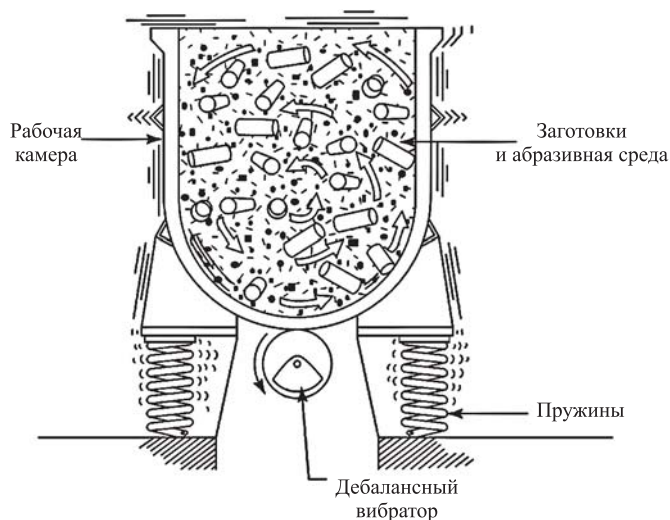


Рис. 2. Схема вибрационной обработки

В современном машиностроении известно более 220 методов удаления заусенцев, начиная от самых простых — удаление заусенцев ручным инструментом и заканчивая зачисткой в струе льда. Из всего многообразия способов наиболее перспективны методы, основанные на использовании гибких гранулированных сред — галтовка, струйно-абразивная, вибрационная, центробежно-ротационная, магнитно-абразивная обработки, обработка абразивными лентами, электрохимическая и термоокислительная обработки.

Проведенный анализ и сравнение существующих методов отделочно-зачистной обработки показали, что в случае массового производства вибрационная обработка в среде свободных абразивов (ВиО) имеет существенные преимущества

технического и экономического характера. Основные достоинства данного вида обработки — значительное снижение трудоемкости и стоимости при одновременной обработке элементов большого количества заготовок множеством гранул рабочей обрабатывающей среды.

Объемная вибрационная обработка основана на использовании колебательных движений рабочей камеры с рабочей загрузкой (рис. 2). Камере от вибропривода сообщают колебательное движение, в результате этого гибкая рабочая среда и детали перемещаются по сложным траекториям, зависящим от формы рабочей камеры и степени ее загрузки, характеристик рабочей среды и режимов вибраций.

ВиО может быть применена при удалении заусенцев, скруглении острых кромок, шлифовании и полировании.

Исследование геометрической формы и размеров заусенцев, сформированных в результате механической обработки деталей приборов РЭА

Объект исследования — детали, изготавливаемые на одном из приборостроительных предприятий Ставропольского края. Ежегодно на данном предприятии выполняются десятки заказов на новые изделия, при этом номенклатура деталей, входящих в отдельные новые изделия, более 400 наименований. Большинство деталей являются труднообрабатываемыми из-за наличия труднодоступных мелких отверстий, пазов и поверхностей.

Для разработки обобщенной модели заусенца, изготавливаемые детали были разделены на группы, исходя из их соизмеримости по габаритным размерам, родства материала, а также по конструктивным и технологическим признакам. В каждой группе были выделены наиболее типичные детали-представители.

Для исследования и контроля геометрической формы и размеров заусенцев применяли аппаратно-программный комплекс ThixometPro®, который включает программное обеспечение Thixomet® и инвертированный металлографический микроскоп отраженного света MEIJI IM 7200, оснащенный тринокулярной визуальной насадкой. Состояние обработанных кромок и размеры заусенцев изучали и измеряли на микрошлифах. Виды заусенцев исследуемых образцов представлены на рис. 3. Исследования микрошлифов образцов с заусенцами из различных материалов показали, что поперечное сечение заусенцев имеет треугольную форму с острым углом при вершине. При этом высота заусенцев деталей приборов в среднем превышает

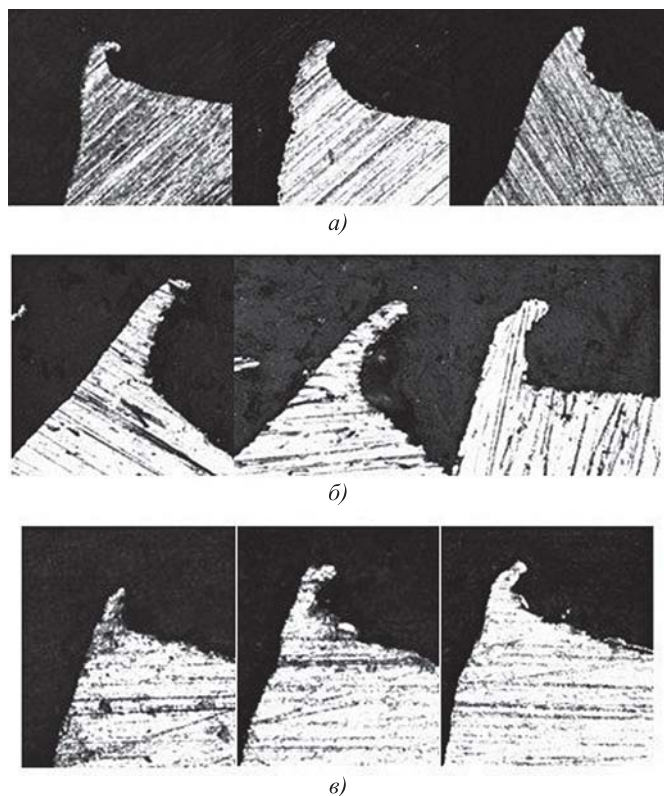


Рис. 3. Сечение профиля заусенцев у исследуемых образцов из различных материалов: а — БрОЦ4-3; б — ЛС-59-1; в — АМг6

толщину заусенца у основания в 2–3 раза, которая не превышает 0,3 мм.

Проведенный анализ геометрической формы и размеров заусенцев, сформированных в результате механической обработки деталей РЭА, позволяет смоделировать профиль поперечного сечения заусенца в виде прямоугольного треугольника, высота которого в среднем превышает величину его основания в 2–3 раза.

Теоретические исследования и их результаты

Процесс удаления заусенца во время вибрационной обработки в среде свободного абразива происходит, главным образом, в результате последовательного удаления мельчайших частиц металла и имеет аналогию с процессом уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности при виброабразивном шлифовании. Интенсивность протекания съема заусенца зависит от тех же параметров, что и съем металла. Таким образом, при решении технологических задач отделочно-зачистной обработки определение величины съема металла при единичном взаимодействии абразивной частицы с поверхностью детали имеет важное значение.

Анализ работ авторов, занимающихся исследованием механизма взаимодействия единичной гранулы рабочей среды с поверхностью заготовки [2–4], показал, что процесс удаления заусенца при объемной обработке изучен недостаточно полно.

В работе [2] предложена модель, которая раскрывает механизм взаимодействия единичной гранулы обрабатываемой среды с поверхностью заготовки.

Абразивная гранула, взаимодействуя с обрабатываемой поверхностью, оставляет на ней микроцарапину (рис. 4) глубиной h_{\max} . Большую a и малую b полуоси пятна контакта определим по выражениям:

$$a = \pi/2(\operatorname{ctg}\alpha - f)h_{\max} + b; \quad (1)$$

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}, \quad (2)$$

где α — угол соударения гранулы с поверхностью; f — коэффициент трения скольжения.

Для определения максимально возможной глубины царапины используем известное выражение [2]

$$h_{\max} = 2v_{\text{эф}}R \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3k_s c \sigma_s}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{эф}}$ — эффективная скорость частицы;

R — радиус частицы;

$\rho_{\text{ч}}$ — плотность материала частицы;

k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали;

c — коэффициент несущей способности контактной поверхности;

σ_s — предел текучести материала детали.

Объем металла, удаленного за один удар гранулы, можно определить по формуле [2]

$$V = 15,5k_c \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \times \left(k_m^{0,5} v_0 \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3c\sigma_s}} \right)^{5/2} (\operatorname{ctg}\alpha - f), \quad (4)$$

где k_c — коэффициент стружкообразования;

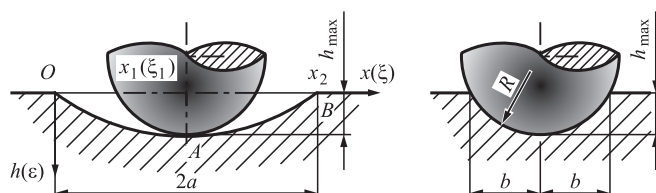


Рис. 4. Схема единичного взаимодействия гранулы с поверхностью

k_R — коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта;

k_m — коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке;

v_0 — скорость движения частицы рабочей среды.

Прогнозирование продолжительности обработки деталей играет важную роль в процессе формирования качества поверхностного слоя при обработке деталей сложной конфигурации. Общее время процесса ВиО определяется числом соударений (контактов) частиц обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемой детали. Полученные в работах [2, 3] зависимости для определения времени обработки действительны в случае, когда геометрическая вероятность P_1 того, что любая точка квадрата упаковки поверхности покрывается пятном контакта — величина постоянная:

$$P_1 = \frac{\pi ab}{DL_0}, \quad (5)$$

где D — диаметр обрабатывающей гранулы;

L_0 — толщина основания заусенца.

Также авторами получено выражение для оценки продолжительности виброотделки деталей свободным абразивом:

$$t_{\Delta L} = \frac{4R^2 \Delta L}{P_1 P_2 f_B V}, \quad (6)$$

где P_2 — вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию;

f_B — частота циклов воздействия массы абразивных частиц на поверхность детали;

ΔL — глубина удаляемого слоя металла.

Однако, учитывая принятую авторами обобщенную треугольную модель заусенца, во время обработки будет наблюдаться различная интенсивность его съема, и, как следствие, геометрическая вероятность будет величиной переменной, зависящей от площади участка обработки.

Определим геометрическую вероятность P_1 в произвольном сечении выделенного элемента модельного заусенца размером $L_0 < D$, высотой H и шириной, равной диаметру D обрабатывающей гранулы. Сечение расположено на расстоянии Δ_i от основания заусенца (рис. 5).

Исходя из геометрических соображений и с учетом того, что $\operatorname{ctg} \alpha = L_0/H$, найдем размер L_i произвольного сечения локального заусенца, расположенного на расстоянии Δ_i от основания, по выражению:

$$L_i = L_0(H - \Delta_i)/H. \quad (7)$$

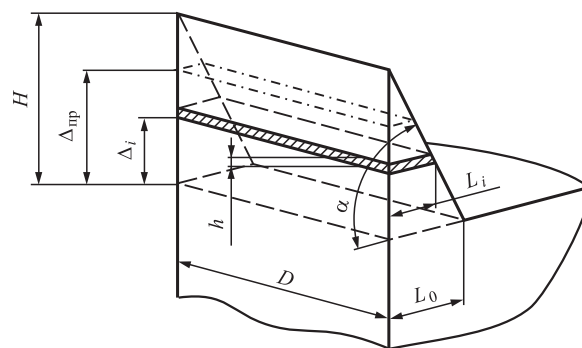


Рис. 5. Модельное представление элемента заусенца

Тогда, с учетом допущений, геометрическая вероятность, определяющая интенсивность удаления слоя металла в произвольном сечении модельного заусенца с поперечным сечением в виде треугольника будет определяться по формуле

$$P_{1i} = \frac{\pi abH}{DL_0(H - \Delta_i)}. \quad (8)$$

Учитывая данную геометрическую интерпретацию, можно сделать вывод, что процесс удаления заусенца при обработке в среде свободных абразивов можно разбить на два четко выраженных этапа. Первый этап характеризуется интенсивностью съема металла с геометрической вероятностью, равной $P_1 = 1$. На данном этапе удаление металла протекает в произвольном сечении размером меньшим большей оси эллиптического пятна контакта a , образованного на поверхности после соударения абразивной частицы.

Второй этап обработки характеризуется постепенным снижением геометрической вероятности $P_1 < 1$ и, как следствие, снижением интенсивности съема металла. Интенсивность падает в связи с ростом площади произвольного сечения заусенца в направлении от вершины к его основанию на величину, определяемую формой кривой, описывающей внутреннюю поверхность заусенца.

Таким образом, данное наблюдение можно представить следующим образом:

$$P_{1i} = \begin{cases} \frac{\pi abH}{DL_0(H - \Delta_i)}, & \Delta_i \in [0, \Delta_{\text{пр}}]; \\ 1, & \Delta_i \in [\Delta_{\text{пр}}, H]. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая, что $\pi abH = DL_0(H - \Delta_i)$, найдем сечение заусенца, представляющего "место пере-

хода" вероятностей — $\Delta_{\text{пр}}$, когда геометрическая вероятность $P_{li} = 1$:

$$\Delta_{\text{пр}} = H \left(1 - \frac{\pi ab}{DL_0} \right). \quad (10)$$

Выразив из зависимостей (9) и (10) время обработки и проинтегрировав данные выражения для каждого этапа, получим следующие расчетные выражения:

— в диапазоне высоты заусенца от $\Delta_{\text{пр}}$ до H :

$$t_1 = \int_{\Delta_{\text{пр}}}^H \frac{DhL_0(H - \Delta_i)}{P_2fVH} d\Delta_i = \frac{DhL_0(H - \Delta_{\text{пр}})^2}{2P_2fVH^2}; \quad (11)$$

— в диапазоне от 0 до $\Delta_{\text{пр}}$:

$$t_2 = \int_0^{\Delta_{\text{пр}}} \frac{D^2hL_0^2(H - \Delta_i)^2}{\pi abH^2P_2fV} d\Delta_i = \frac{D^2hL_0^2\Delta_{\text{пр}}(3H^2 - 3H\Delta_{\text{пр}} + \Delta_{\text{пр}}^2)}{3\pi abH^3P_2fV}. \quad (12)$$

В результате экспериментальных исследований установлено, что на продолжительность обработки значительное влияние оказывает расположение заусенца на детали. В связи с этим целесообразно в формулу для определения продолжительности обработки ввести коэффициент $k_{p,3}$, учитывающий влияние расположения заусенца на детали. Данный коэффициент требует экспериментального уточнения для каждого из расположений заусенца.

Таким образом, допуская, что $H^2\Delta_{\text{пр}} \approx H\Delta_{\text{пр}}^2$, в общем виде зависимость для определения времени удаления заусенца примет вид:

$$t_3 = k_{p,3} \frac{DhL_0}{P_2fVH^2} \left(\frac{(H - \Delta_{\text{пр}})^2}{2} + \frac{DL_0\Delta_{\text{пр}}^3}{3\pi abH} \right). \quad (13)$$

Воспользовавшись приведенными выше зависимостями, можно предложить методику оптимизации процесса отделочно-зачистной обработки деталей в гранулированных средах.

Результаты исследований и их обсуждение

Для проверки адекватности полученных зависимостей проведен значительный комплекс экспериментальных исследований процесса обработки в среде свободного абразива. В качестве образцов для исследований использовали заготовки промышленных изделий, выпускаемых одним из

приборостроительных предприятий. Заготовки имели дефекты в виде заусенцев и острых кромок. Для исследования выбрали детали из алюминиевого сплава АМг6 ($\sigma_s = 155$ МПа); бронзового сплава БрОЦ4-3 ($\sigma_s = 450$ МПа) и латуни ЛС59 ($\sigma_s = 300$ МПа). В качестве технологического оборудования использовали вибрационные станки СВТ-5 и УВГ-4х10. Эксперименты проводили со свободной загрузкой образцов в рабочую камеру. Объем загрузки рабочей среды и деталей (образцов) для первых двух этапов исследования составлял 80 % объема рабочей камеры. Все эксперименты проводили с непрерывной промывкой технологической жидкостью.

Теоретические зависимости определения времени обработки построены с помощью программы Mathcad и показаны сплошной линией. Точками показаны результаты экспериментальных исследований.

Проведены исследования по определению влияния грануляции рабочей среды на время удаления заусенца. Размеры удаляемых заусенцев: толщина L_0 заусенцев у основания — 0,05...0,20 мм; высота h заусенца — 0,125...1,250 мм. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6.

Также построены зависимости для определения времени удаления заусенца от частоты колебаний рабочей камеры станка и толщины заусенца у основания (рис. 7, 8).

Для определения влияния на время обработки расположения заусенца на детали определяли коэффициент расположения заусенца $k_{p,3}$. На рис. 9

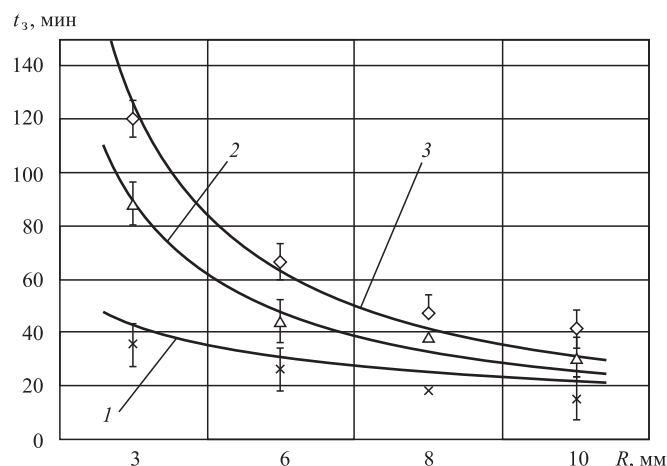


Рис. 6. Зависимость времени удаления заусенца от грануляции рабочей среды (абразивная среда: фарфоровые шары; частота колебаний $f = 33$ Гц; заусенец с наружным расположением; размеры заусенца $L_0 = 0,15$ мм): 1 — $\sigma_s = 155$ МПа; 2 — 300 МПа; 3 — 450 МПа

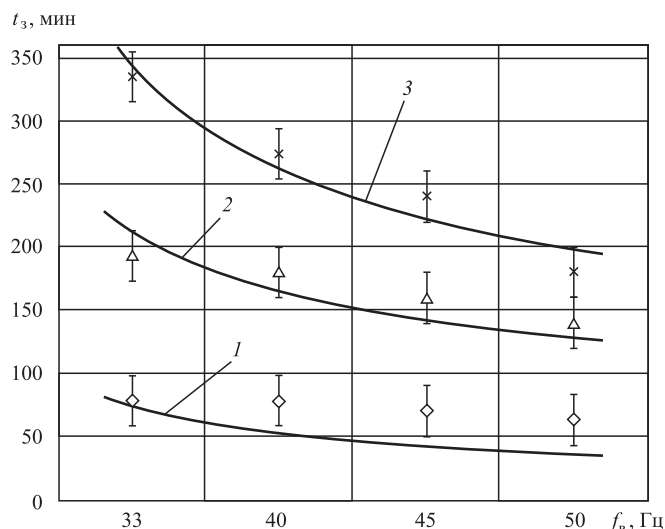


Рис. 7. Зависимость времени удаления заусенца от частоты колебаний рабочей камеры станка (абразивная среда: гранулят скорлупы грецкого ореха $D = 3...4$ мм; заусенец с наружным расположением; размеры заусенца $L_0 = 0,15$ мм):

1 — $\sigma_s = 155$ МПа; 2 — 300 МПа; 3 — 450 МПа

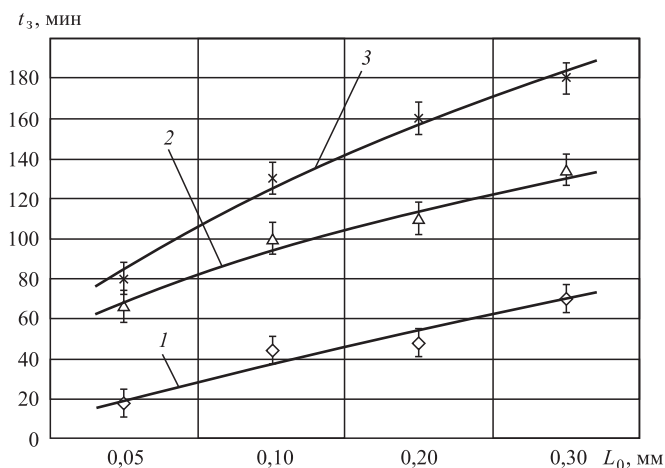


Рис. 8. Зависимость времени удаления заусенца от размера заусенца у основания (абразивная среда: фарфоровые шары; частота колебаний $f = 33$ Гц; заусенец с наружным расположением):

1 — $\sigma_s = 155$ МПа; 2 — 300 МПа; 3 — 450 МПа

(см. обложку) представлены обобщенные диаграммы, показывающие изменение времени обработки при различном расположении заусенца.

В результате проведения комплексных экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенных моделей съема заусенца при обработке свободным абразивом. Расхождение между экспериментальными и теоретическими данными не превышает 20 %.

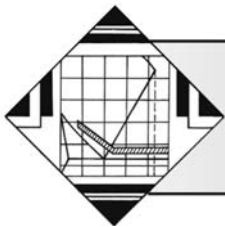
Заключение

Анализ полученных данных подтвердил адекватность теоретических моделей определения времени съема заусенца с учетом его расположения на детали. Созданы банки данных коэффициентов расположения заусенца при обработке деталей РЭА, полученные в результате проведения экспериментальных исследований.

Полученные результаты исследования процесса удаления заусенца, разработанные технологические рекомендации могут быть положены в основу рационального выбора схемы обработки, обоснования и оценки гранулометрических характеристик рабочей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Войтов В.Н., Чернобай С.П.** Современные технологии в машиностроении 2000: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2000.
2. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д., 1995.
3. **Бабичев А.П.** Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1974. 134 с.
4. **Димов Ю.В.** Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. Иркутск, 1987. 543 с.
5. **Бабичев А.П. и др.** Теория вероятности в решении технологических задач (на примере вибрационной обработки в гранулированных средах). Ростов н/Д.: центр ДГТУ, 2013. 126 с.

**В.С. Бочков***(Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург)**E-mail: bochkof@list.ru*

Повышение износостойкости рабочих органов экскаваторов

Проанализирована актуальность поиска решений по повышению износостойкости зубьев ковша экскаватора типа прямая лопата. Рассмотрены причины, влияющие на изнашивание зубьев. Определено, что при работе экскаваторов по породам VIII и IX категорий происходит ударно-абразивное изнашивание внутренней стороны зубьев и абразивное — внешней стороны. Доказано, что наклеп стали Гадфильда (материал зубьев), происходящий при работе зубьев экскаватора по породам VIII и IX категорий, снижает скорость ударно-абразивного изнашивания внутренней стороны зубьев и не влияет на абразивное изнашивание внешней. Предложена методика термомеханической обработки внешней стороны зуба экскаватора, способная повысить износостойкость стали Гадфильда (110Г13Л) до 1,7 раза и привести к эффекту самозатачивания зуба за счет выравнивания скорости изнашивания внешней и внутренней частей зуба. Экспериментально доказана эффективность термомеханической обработки для снижения скорости абразивного изнашивания стали Гадфильда.

Ключевые слова: экскаватор, прямая лопата, зубья, ковш, сталь Гадфильда, абразивность, изнашивание, наклеп, термомеханическая обработка, самозатачивание, срок эксплуатации, износостойкость.

The relevance of the search for solutions to increase the wear resistance of bucket teeth of excavating machine type front shovel is analyzed. The reasons for the wear of the teeth are considered. It is determined that when excavating machines work for rocks of VIII and IX categories, impact-abrasive wear of the inner side of the teeth and abrasive external wear occurs. It is proved that the cold-work hardening of Hadfield steel (the teeth material), which occurs during the excavating machine teeth work in the rocks of VIII and IX categories, reduces the impact-abrasive wear rate on the inner side of the teeth and does not affect the abrasive wear of the outer. The methods for thermomechanical treatment of the outer side of the excavating machine tooth is proposed. It can increase the wear resistance of Hadfield steel (110G13L) up to 1.7 times and lead to the self-sharpening effect of the tooth due to equalization of the wear rate of the outer and inner parts of the tooth. The efficiency factor of thermomechanical treatment to reduce the of abrasive wear rate of Hadfield steel is experimentally proved.

Keywords: excavating machine, front shovel, teeth, bucket, Hadfield steel, abrasiveness, wear, cold-work hardening, thermomechanical treatment, self-sharpening, service life, wear resistance.

Зубья ковшей экскаваторов являются рабочим органом, непосредственно взаимодействующим с добываемой горной породой. В результате этого взаимодействия с породами VIII и IX категорий [1] зубья интенсивно изнашиваются. Например, при добыче железной руды на Лебединском ГОКе зубья экскаваторов на отдельных участках изнашиваются через 2...7 суток. При экскавации гранита на ГОК "Семиреченское карьероуправление" комплект зубьев экскаватора ЭКГ-5 изнашивается после добычи 20 000 м³ породы, что соответствует

1,5...2 суткам непрерывной работы. При этом замена зубьев у экскаватора — трудоемкая задача, так как масса каждого зуба экскаватора ЭКГ-5 составляет 130 кг. Все эти сведения показывают актуальность и практическую необходимость поиска способов по увеличению срока эксплуатации зубьев экскаватора.

В процессе эксплуатации изменяется геометрическая форма зубьев, в частности, угол заострения увеличивается до 65...70° (рис. 1). В свою очередь, увеличение угла заострения приводит

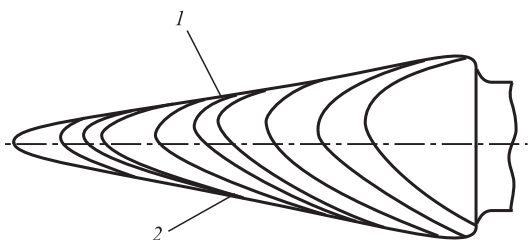


Рис. 1. Характер изменения формы зуба ковша экскаватора в процессе эксплуатации:

1 — внутренняя сторона зуба; 2 — внешняя сторона

к значительному повышению нагрузок на исполнительные органы экскаватора вследствие увеличения площади контакта зуба с добываемой горной породой. Работа при повышенных нагрузках ведет к уменьшению ресурса деталей экскаватора, в том числе и самих зубьев.

На скорость изнашивания влияют абразивность породы и сила сопротивления породы копанью [8]. Абразивность породы зависит в основном от твердости, формы и размеров минеральных зерен. Минералы, некоторые из которых содержатся в породах VIII и IX категорий, добываемых на перечисленных выше месторождениях (табл. 1), имеют твердость, значительно превышающую твердость стали Гадфильда, используемой для изготовления зубьев экскаватора (180 HV).

Сила прижатия минералов к зубьям зависит от сопротивления породы копанью $P_{сп}$, которая, в свою очередь, зависит от характеристик [8] добываемой породы и характеристик применяемого экскаватора, в данном случае ЭКГ-5А:

$$P_{сп} = K_F E (H_B K_p)^{-1},$$

Таблица 1

Твердость различных минералов

Материал	Твердость (микротвердость) HV
Кварцит	1100...1130
Кварц	1250
Топаз	1350
Плавленный оксид ZrO_2	1900
Корунд	2800 (2500...3000)
Карбид кремния	3500
Карбид бора	3700
Алмаз	8000

где K_F — коэффициент сопротивления породы копанью, кПа (1000...1200 кПа);

K_p — коэффициент разрыхления породы (1,2...1,3);

E — вместимость ковша, m^3 (5 m^3);

H_B — высота черпания, м (10,3 м).

Для заданных условий сила сопротивления копанью $P_{сп}$ составит 405...448 кН. Если отнести найденную силу $P_{сп}$ к площади оставляемых минералами на зубьях экскаватора отпечатков ($\approx 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$), то удельное давление составит 4050...4480 МПа, что значительно выше предела прочности стали Гадфильда 800...900 МПа [2].

Для уменьшения изнашивания зубьев экскаватора предлагаются различные способы, например, наплавки на зуб других материалов [3, 4], изменение конструктивного исполнения [5], применение различных видов обработки [3, 6], но все эти способы требуют значительных изменений технологии изготовления зубьев, что приводит к существенным затратам.

Предлагаем вариант решения этой проблемы, не требующий существенных капитальных вложений при производстве зубьев. В качестве объекта исследования были выбраны зубья экскаваторов типа ЭКГ, изготавливаемые из стали 110Г13Л (стали Гадфильда). Исходная твердость данной стали $\approx 180 \text{ HV}$, однако при работе экскаватора по твердым породам, например граниту, твердость стали увеличивается до $\approx 481...560 \text{ HV}$ [7] за счет наклепа, который снижает скорость ударно-абразивного изнашивания [8, 9], характерного для внутренней поверхности зубьев ковша экскаватора.

Разработан метод сегментированной термомеханической обработки зубьев ковша экскаватора. Заготовку зуба с внешней стороны зуба нагревают токами ТВЧ или газовой горелкой до температуры 1150 °С, подвергают пластической деформации (степень деформации подбирают в зависимости от типоразмера зуба) в интервале температур 1150...950 °С [10] и охлаждают в воде.

В целях выяснения эффективности термомеханической обработки стали 110Г13Л при абразивном изнашивании был проведен ряд экспериментов [11] на образцах, изготовленных из этой стали. Эксперименты проводили на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2.

Для проведения экспериментов было взято пять цилиндрических образцов 2 (см. рис. 2), которые были подвергнуты различной обработке (табл. 2). Далее образцы были подвергнуты абразивному изнашиванию с помощью электрокорунда.

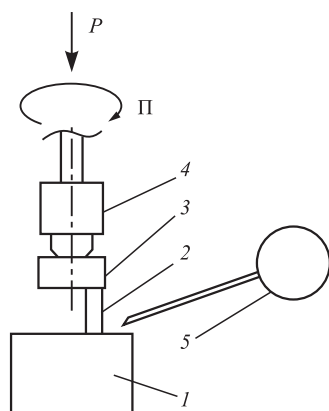


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для испытания образцов на абразивное изнашивание:

1 — диск абразивного материала; 2 — испытуемый образец; 3 — держатель; 4 — шпиндель вертикально-сверлильного станка; 5 — устройство подачи воды

Таблица 2

Характеристики износостойкости и твердости стали Гадфильда после различных обработок

Но-мер образца	Способ обработки образца	Степень уковки α	Твердость НВ	Потеря массы K_i , мг/(мм ² ·мин)
1	Нагрев и выдержка при 1150 °С с последующей закалкой (термическая обработка)	—	180	3,5
2				3,3
3	Нагрев до 1150 °С, ковка, закалка с температурыковки	1,56	228	3,0
4			254	2,9
5		2,25	228	2,7
6			264	2,1

Как показала математическая обработка экспериментальных данных, наименьшая скорость изнашивания K_i у образца № 6 (2,1 мг/(мм²·мин)), а наибольшая у образца № 1 (3,5 мг/(мм²·мин)), что свидетельствует об эффективности термомеханической обработки для повышения абразивной износостойкости материала для изготовления зубьев ковша экскаватора.

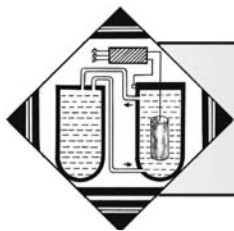
Выводы

Экспериментально доказана эффективность термомеханической обработки для снижения скорости абразивного изнашивания стали Гадфильда.

Термомеханическая обработка внешней стороны зуба экскаватора типа ЭКГ способна повысить износостойкость материала (стали 110Г13Л) до 1,7 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Подэрни Р.Ю.** Механическое оборудование карьеров: учебник для вузов. М.: Изд-во МГГУ, 2007. 680 с.
2. **Марочник** сталей и сплавов / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. М., 2014. 1216 с.
3. **Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н.** Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. Т. 14. № 1. С. 402—416.
4. **Singla S., Shibe V., Grewal J.S.** Performance evaluation of hard faced excavator bucket teeth against abrasive wear using MMAW process // International Journal of Mechanical Engineering Applications Research. 2011. Vol. 02. Iss. 02. P. 73—77.
5. **Кадошников В.И., Новиков В.И.** Разработка и внедрение защитных элементов навесного оборудования карьерной техники // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2016. Т. 1. № 1. С. 16—19.
6. **Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V. et al.** Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 4. P. 363—368.
7. **О целесообразности** изготовления зубьев ковшей экскаваторов из стали 110Г13Л / В.И. Болобов, В.С. Бочков, Ю.В. Лыков, А.П. Баталов // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения / Труды 10-й междунар. науч.-практич. конференции 11—13 апреля 2012 г. Воркутинский горный институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". Воркута, 2012. С. 319—322.
8. **Хрущов М.М.** Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И.Г. Горячева; предисл. И.Г. Горячевой; вступ. ст. И.А. Буяновского, М.М. Хрущова (мл.). М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.
9. **Бочков В.С.** Повышение износостойкости наклепом футеровок шаровых мельниц при проведении их технического обслуживания: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06; Горный университет. СПб., 2014. 119 с.
10. **Блюхер В.В., Парфенов Л.И., Волчок И.П.** Свойства пластически деформированной высокомарганцовистой стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 12. С. 32—33.
11. **О влиянии** режимов термомеханической обработки на износостойкость материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования / В.И. Болобов, В.С. Бочков, И.И. Мишин, А.А. Неструев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 1. С. 52—59.



¹С.Г. Цих, ²А.А. Красуля, ¹А.С. Помельникова
(¹АО "НПО "ЦНИИТМАШ", г. Москва,

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)
E-mail: krasulya230593@gmail.com

Исследование структуры и свойств стали 38ХНЗМФА после низкотемпературного жидкостного борирования

Исследовано влияние низкотемпературного жидкостного борирования на структуру и твердость стали 38ХНЗМФА. Установлено, что в процессе борирования при температуре 600...660 °С и длительности 8...32 ч на поверхности стали формируется боридное покрытие толщиной 6...19 мкм с поверхностной твердостью 1900...2000 НВ. Определены оптимальные режимы борирования, при которых формируется упрочненный слой при сохранении прочной сердцевины. Металлографическим, рентгеноструктурным и электронно-микроскопическим анализами установлено наличие в боридном слое двух боридных фаз FeB и Fe₂B.

Ключевые слова: низкотемпературное жидкостное борирование, сталь, микроструктура, микротвердость, бориды.

The effect of low-temperature liquid borating on the structure and hardness of steel 38KhN3MFA is studied. It is found that in the borating process at temperature 600...660 °C and duration 8...32 hours boride coating with thickness of 6...19 μm with surface hardness of 1900...2000 HV is formed on the steel surface. The optimal borating regimes are determined, in which hardened layer with solid core is formed. The presence of two boride phases FeB and Fe₂B in the boride layer is established by metallographic, X-ray and electron microscopic analyzes.

Keywords: low-temperature liquid borating, steel, microstructure, microhardness, borides.

Введение

Эксплуатационная стойкость узлов и деталей современного оборудования определяется способностью поверхностных слоев сопротивляться различным видам износа, усталостного разрушения и коррозии, так как поверхностные слои деталей при эксплуатации нагружаются более интенсивно, чем сердцевина.

При трении "металл по металлу" эффективны традиционные методы формирования износостойких покрытий — цементация, азотирование и нитроцементация (цианирование, карбонитрация) — но их эффективность снижается при наличии в контакте абразивных частиц, попадание которых в зазор пары трения, как правило, не удается предотвратить, несмотря на постоянное совершенствование средств защиты (воздушные и масляные фильтры, уплотнения).

В настоящее время для упрочнения деталей, подвергающихся разнообразным видам изнашивания — абразивному, трению качения и скольжения, а также работающих в условиях ударных нагрузок, широкое применение находит такой вид химико-термической обработки, как борирование.

Работоспособность борированных слоев во многом определяется условиями работы упрочненных деталей или инструментов. Основу долговечности деталей узлов трения с покрытиями определяет высокая прочность с некоторым запасом пластичности поверхностных слоев. Пластичность борированных слоев определяется совокупностью внутренних и внешних факторов, определяющих их формирование. В частности, большую роль играет так называемый масштабный фактор, заключающийся в зависимости пластичности и сопротивлении хрупкому износу слоя от его толщины.

Оптимальная толщина боридных слоев определяется их фазовым составом, свойствами матрицы и условиями эксплуатации и может колебаться в широких пределах — от 0,03 до 0,20 мм [1]. Важно, что для каждой конкретной стали и вида ее термической обработки существует такая толщина боридных слоев, при которой они имеют хорошую связь с матрицей и обладают некоторым запасом пластичности (не проявляется природная хрупкость боридов). При превышении оптимальной толщины боридного слоя нередко наблюдается самопроизвольное скалывание отдельных участков слоя за счет значительных сжимающих напряжений, возникающих в упрочненном слое [2].

При трении "металл по металлу" по данным исследований У.А. Икрамова [3] 90 % попадающей в зазор трибосопряжений кварцевой пыли имеет размер не более 16 мкм, причем ее изнашивающее действие определяется, главным образом, не ее твердостью, а прочностью на раздавливание, поскольку после дробления абразивной частицы до размера меньшего, чем минимальный зазор, ее изнашивающее воздействие на детали практически прекращается.

Как правило, борирование проводится при температурах выше 800 °С и практически всегда предусматривает последующие операции закалки с отпуском для придания требуемых прочностных характеристик сердцевине. Для деталей с жесткими допусками по изготовлению или с наличием тонкостенных участков такая температура процесса не приемлема из-за возможного коробления, следовательно, процесс необходимо вести при пониженных температурах. Но при этом необходимо избегать продавливания слоя в процессе эксплуатации, что достигается сохранением в сердцевине требуемой твердости и прочности.

Закалка после борирования приводит к резкому росту количества микротрещин в борированном слое и, как следствие, снижению его сопротивления усталости и коррозионной стойкости. В связи с этим проблема снижения охрупчивающего влияния традиционного борирования на эксплуатационные свойства стальной поверхности деталей является актуальной.

Известно, что при малой толщине упрочненного слоя для предотвращения его продавливания и выкрашивания необходимо, чтобы предел упругости основы превышал предел прочности частиц абразива [4]. Поэтому возникает задача сохранить под боридным слоем достаточную твердость и прочность сердцевины, что возможно

путем проведения процесса борирования легированных сталей при температуре не выше 660 °С.

Наиболее высокой устойчивостью к отпуску обладают стали, легированные хромом, молибденом, ванадием, вольфрамом и ниобием, образующими стойкие к коагуляции карбиды и интерметаллиды. Однако, как показано в работах [5—7], в присутствии указанных элементов скорость процесса борирования снижается.

В связи с этим в целях повышения поверхностной твердости и износостойкости деталей, работающих в условиях абразивного трения, предложена усовершенствованная технология борирования стали 38ХНЗМФА, заключающаяся в улучшении (закалка + высокий отпуск) и последующем низкотемпературном безэлектролизном жидкостном борировании.

Цель работы — исследование влияния режимов низкотемпературного жидкостного борирования на структуру и свойства стали 38ХНЗМФА, а также выбор оптимальных технологических параметров, позволяющих формировать требуемые структуры и свойства поверхностного слоя и сердцевины.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили для теплостойкой стали 38ХНЗМФА (0,38 % С; 1,6 % Cr; 0,4 % Mo; 0,1 % V; 3,0 % Ni; 0,21 % Si; 0,3 % Mn), которую подвергали низкотемпературному жидкостному борированию (НЖБ) по технологии "Рубонит", заключающейся в диффузионном насыщении поверхности бором из насыщающей среды, представляющей собой расплав легкоплавкой эвтектики солей Li—K—Na с добавками борсодержащего вещества [8]. Такой состав насыщающей среды обладает низкой вязкостью и высокой водорастворимостью. Процесс проводили при температуре 600...660 °С в течение 8...32 ч. Предварительную термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, выполняли по режиму: закалка от 900 °С и отпуск при 660 °С в течение 2 ч.

Металлографические исследования микроструктуры стали проводили на оптическом микроскопе Neophot 30 при увеличении $\times 800$.

Рентгеноструктурный анализ упрочненного слоя проводили на дифрактометре ДРОН-3М в Cu K_α -излучении с монохроматором, регистрацию и обработку данных — с помощью пакета программных средств GLRDIF.

Тонкую микроструктуру борированной поверхности изучали на электронном микроскопе

JEM 200СХ. Диффузионный слой боридов железа исследовали на поперечном шлифе после ионной полировки в среде аргона на установке PIPS II.

Микротвердость поверхностных слоев и сердцевины измеряли на микротвердомере DuraScan 20 при нагрузке 0,98 Н с использованием персонального компьютера, оснащенного программным обеспечением ecos Workflow CIS (Calibration Information System).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований выявлено, что при всех температурах процесса НЖБ с увеличением длительности процесса борирования толщина боридного слоя увеличивается, при этом твердость сердцевины остается неизменной (табл. 1).

Результаты исследования влияния температуры борирования на толщину боридного слоя и твердость сердцевины представлены в табл. 2. Видно, что с повышением температуры от 600 до 660 °С толщина боридного слоя увеличивается от 8...9 до 16...18 мкм. Твердость сердцевины при этом не изменяется вплоть до температуры борирования 640 °С и составляет 320 HV_{0,1}, и резко уменьшается до 270 HV_{0,1} при температуре 660 °С.

Поверхностная твердость боридного слоя при всех температурах процесса и времени выдержки составила 1900...2000 HV_{0,1}. Высокая твердость упрочненного слоя, по-видимому, объясняется наличием в структуре легированных боридов.

Таблица 1

Влияние длительности низкотемпературного жидкостного борирования на толщину и микротвердость стали 38ХНЗМФА ($T_{НЖБ} = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Длительность НЖБ, ч	8	14	16	24	32
Микротвердость сердцевины HV _{0,1}	323	320	320	319	318
Толщина слоя <i>h</i> , мкм	11...12	13...14	13...15	15...17	17...19

Таблица 2

Влияние температуры низкотемпературного жидкостного борирования на микротвердость сердцевины и толщину боридного слоя ($\tau_{НЖБ} = 16\text{ ч}$)

Температура НЖБ, °С	600	620	640	660
Микротвердость сердцевины HV _{0,1}	330	328	327	330
Толщина слоя <i>h</i> , мкм	8...9	10...11	13...15	16...18

На основе полученных результатов выбран оптимальный для данной марки стали режим НЖБ. Максимальная толщина упрочненного слоя и твердость сердцевины достигаются в процессе борирования при температуре 640 °С в течение 16 ч. Металлографические и рентгеноструктурные исследования после улучшения и борирования по указанному режиму показали, что на поверхности образцов из стали 38ХНЗМФА формируется упрочненный слой толщиной 13...16 мкм, не имеющий трещин и состоящий из двух зон (рис. 1, 2). При рентгеноструктурном анализе поверхности стали 38ХНЗМФА после борирования по оптимальным режимам выявляется пик от фазы FeB. После удаления с поверхности путем ионной полировки слоя толщиной 5 мкм в структуре борированного слоя выявляется борид Fe₂B (см. рис. 2). Общая толщина диффузионного слоя составляет

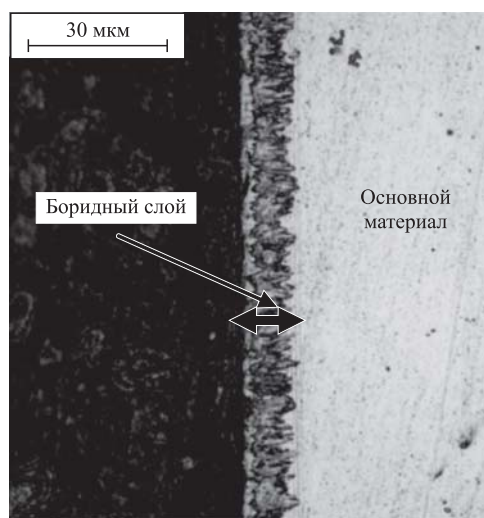


Рис. 1. Микроструктура стали 38ХНЗМФА после НЖБ при температуре 640 °С в течение 16 ч

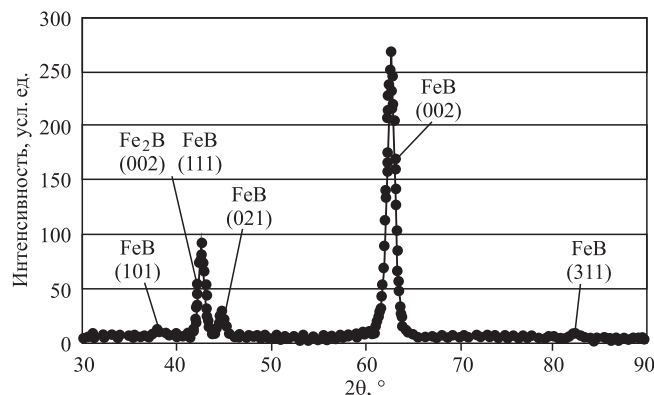


Рис. 2. Рентгенограмма борированной поверхности стали 38ХНЗМФА после удаления слоя толщиной 5 мкм

16...18 мкм, причем толщина слоя боридов FeB примерно 3...5 мкм, а Fe₂B — 9...11 мкм.

Электронно-микроскопическими исследованиями поверхности борированного слоя выявлены разориентированные иглы пластинчатого строения с нечеткими границами. На рис. 3, а показан диффузионный слой, снятый с поперечного шлифа после ионной полировки. Видно начало роста игл боридов от верхнего слоя и разориентированные "мятые" бориды на глубине 5 мкм. На рис. 3, б представлена рентгенограмма фазы Fe₂B.

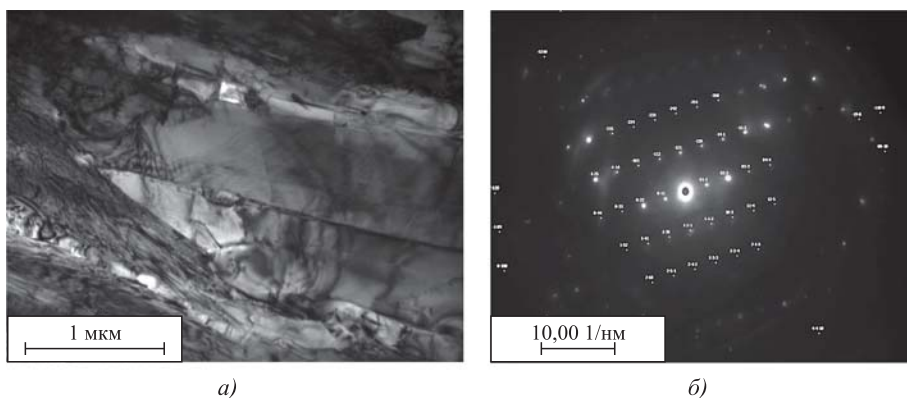


Рис. 3. Тонкая структура упрочненного слоя на стали 38ХНЗМФА после НЖБ

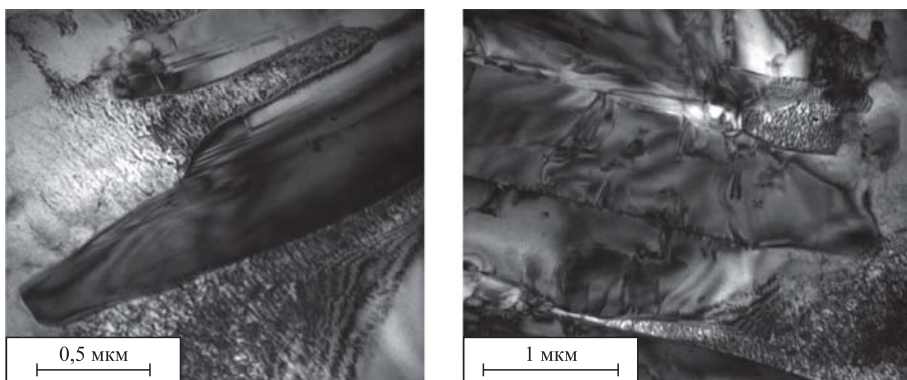


Рис. 4. Концы игл боридов, врастающие в кристаллическую решетку матрицы

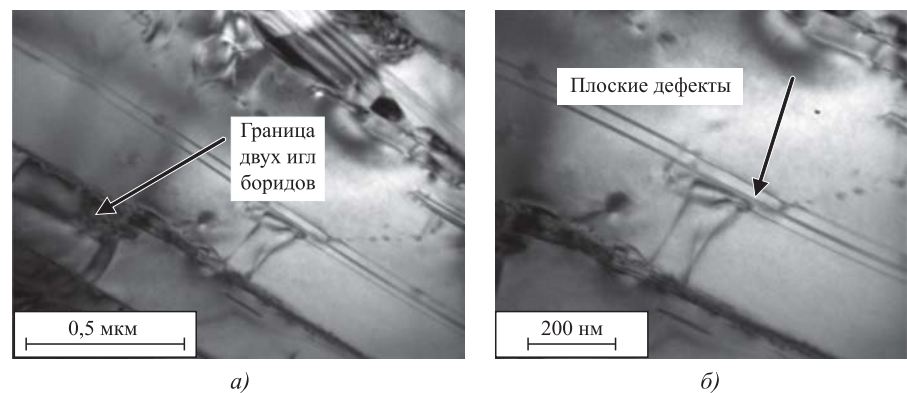


Рис. 5. Дефекты внутри игл боридов нижнего слоя (темная толстая линия — граница между двумя иглами боридов)

В переходной зоне в непосредственной близости к борированному слою образуются иглы шириной 0,2...0,8 мкм, они имеют отчетливые границы и ориентированы перпендикулярно к поверхности. В отличие от поверхности, переходная зона образована только одним рядом игл, ее толщина определяется длиной самих игл и составляет 6...7 мкм.

Исследованиями переходной зоны при большем увеличении показано, что иглы боридов врастают в матричную структуру. Они имеют закругленные более тонкие концы, между которыми находится твердый раствор бора и углерода в легированном Fe_α (рис. 4).

На рис. 5, а видны темные каемки вокруг игл, предположительно это наклонные межфазные границы двух различных боридов. На рис. 5, б видны плоские и линейные дефекты, в частности, двойники, ориентированные в направлении роста боридных игл.

Таким образом, низкотемпературное жидкостное борирование в разработанном составе "Рубонит" позволяет получать боридные слои толщиной до 18 мкм, состоящие из боридов железа FeB и Fe₂B.

Выводы

1. В процессе низкотемпературного жидкостного борирования при температуре 600...660 °С и длительности процесса 8...32 ч на поверхности стали 38ХНЗМФА формируется боридное покрытие толщиной 6...19 мкм с поверхностной твердостью 1900...2000 HV 0,1, причем твердость металлической основы сохраняется на достаточно высоком уровне 270...330 HV 0,1.

2. При оптимальных режимах НЖБ ($T = 640$ °С и $\tau = 16$ ч) формируется боридный слой твердостью до 2000 HV 0,1 и толщиной 13...15 мкм, при этом сердцевина сохраняется достаточно прочной, чтобы предотвратить продавливание боридного слоя.

3. Металлографическим, рентгеноструктурным и электронно-микроскопическим анализами установлено наличие в боридном слое двух боридных фаз FeB и Fe₂B.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
2. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
3. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
4. Протасевич В.Ф., Стасевич Г.В. Исследование особенностей формирования боридных покрытий на

карбонитрированной малоуглеродистой стали // Наука и техника. 2012. № 3. С. 7–10.

5. **Прогрессивные** методы химико-термической обработки / под ред. Г.Н. Дубинина, Я.Д. Когана. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.

6. **Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С., Панич Г.Г., Протасевич Г.Ф.** Структура сплавов системы Fe—В // Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 9. С. 14–17.

7. **Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С.** Борирование стали. М.: Металлургия, 1978. 239 с.

8. **Цих С.Г., Красуля А.А., Помельникова А.С.** Оптимизация режимов низкотемпературного жидкостного борирования с целью получения рациональных структур поверхностного слоя и сердцевины стали 30ХГСА // Материалы к XXIV Уральской школы металлоспециалистов. Актуальные проблемы физического металлоспециалистического знания и сплавов. 2018. С. 133–135.

УДК 669.018.672

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-7-313-317

А.И. Ковтунов, Ю.Ю. Хохлов, С.В. Мямин
(Тольяттинский государственный университет)
E-mail: akovtunov@rambler.ru

Влияние никеля на процессы формирования переходного слоя при жидкофазном алюминировании титана*

Композиционные материалы и биметаллы титан—алюминий, титан—пеноалюминий, получаемые жидкофазными способами, находят все более широкое применение в промышленности. При жидкофазных способах в результате реакционной диффузии титана и алюминия на границе фаз композита формируется переходный интерметаллидный слой, который снижает механические свойства титана и всего композиционного материала. Для снижения скорости роста интерметаллидного слоя между слоями композита и повышения его механических свойств предложено легировать алюминиевый расплав никелем. Исследования процессов взаимодействия титана и расплавленного алюминия, легированного никелем, позволили установить влияние температуры и времени алюминирования титановых образцов на толщину, химический и фазовый составы переходного интерметаллидного слоя. Испытания показали влияние температуры алюминиевого расплава, концентрации никеля в алюминии при взаимодействии с титаном на прочностные свойства биметалла титан—алюминий.

Ключевые слова: титан, композиционный материал, алюминиевый расплав, алитирование, интерметаллидная фаза, переходный слой, прочность при растяжении, температура расплава, химический состав, никель.

Titanium—aluminum, titanium—foam aluminum composites and bimetals obtained by liquid-phase methods, are increasingly used in industry. At the liquid-phase methods as result of the reaction diffusion of titanium and aluminum is formed transitional intermetallic layer at the phase boundary of the composite, which reduces the mechanical properties of titanium and composite. To reduce the growth rate of the intermetallic layer between the layers of the composite and increase its mechanical properties, it is proposed to alloy aluminum melt with nickel. The studies of the interaction of titanium and molten aluminum alloyed with nickel made it possible to establish the effect of temperature and aluminumizing time on the thickness, chemical and phase compositions of the transition intermetallic layer. The tests showed the effect of the temperature of the aluminum melt, the nickel concentration on the strength properties of titanium—aluminum bimetal.

Keywords: titanium, composite material, aluminum melt, aluminumizing, intermetallic phase, transitional layer, tensile strength, melt temperature, chemical composition, nickel.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 11.6065.2017/8.9.

Введение

Литые композиционные материалы с алюминиевой или пеноалюминиевой матрицей и титановой арматурой находят все более широкое применение в промышленности вследствие высоких показателей прочности и невысокой плотности. Для обеспечения адгезионной связи компонентов при литье композиционных материалов титановую арматуру зачастую предварительно покрывают слоем алюминия (алюминируют) [1–4].

Алюминирование сопровождается диффузионным насыщением поверхности титана алюминием и образованием в результате реакционной диффузии переходного слоя интерметаллидов [5, 6].

Толщина переходных слоев и их химический состав зависят от температуры жидкофазного процесса формирования композиционного материала, времени контакта титана и алюминиевого расплава и химического состава слоев композиционного материала [5]. Наличие интерметаллидных слоев на поверхности титана, напряженное состояние этих слоев и их свойства снижают механические и эксплуатационные свойства титана и всего композиционного материала [6–8]. Для повышения прочностных свойств композиционных материалов с алюминиевой матрицей и титановой арматурой было предложено легировать алюминиевый расплав при алюминировании титана компонентами, повышающими прочность переходного интерметаллидного слоя. В качестве легирующего элемента можно использовать никель, эффективно повышающий прочность и пластичность ряда алюминидов титана [9].

Цель работы — исследование влияния легирования никелем алюминиевого расплава на процессы формирования переходного слоя при жидкофазном алюминировании титана.

Методика проведения исследований

Алюминирование титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 22178–76) проводили жидкофазным способом в расплаве алюминия марки А7 (ГОСТ 11069–2019) и сплавов алюминия с никелем при температурах расплава 750, 850 и 950 °С. Алюминиевый сплав с никелем Н2 (ГОСТ 859–2014) с содержанием последнего 2,5; 5 и 10 % получали методом индукционного переплава под слоем защитного флюса. Размеры плоских титановых заготовок 210×20 мм при толщине 2 мм. Время нахождения титановых заготовок в алюминиевом расплаве составляло 3, 30 и 60 с. Варьирование временных параметров позволило оценить динамику роста слоя интерметаллида на поверхности титана. Об-

разцы титана предварительно травили в растворе, состоящем из 20...30 мл HNO_3 , 30...40 мл HCl на 1 л воды [10]. Для получения адгезионной связи между алюминием и титаном при алюминировании поверхность образцов активировали флюсом на основе системы $\text{KF}-\text{AlF}_3$ эвтектической концентрации (флюс Nocoloc) [10, 11].

Испытание на статическое растяжение проводили на образцах типа II (ГОСТ 11701–84 “Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент”). Образцы испытывали на универсальной испытательной машине Н50КТ.

Микрорентгеноспектральный анализ алюминиевого и переходного слоев выполняли на сканирующем электронном микроскопе LEO 1455 VP (ZEISS) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500 и на комплексе, состоящем из автоэмиссионного растрового микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss SUPRA 55VP, энергодисперсионного спектрометра Inca Energy 350, волнового спектрометра Inca Wave 500 и системы регистрации и анализа дифракции отраженных электронов HKL EBSD Premium System. Образцы для исследований представляли собой шлифованные поверхности поперечного сечения биметалла.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что при установленных температурах и времени выдержки в алюминиевом расплаве на поверхности образцов формируется сплошное покрытие с удовлетворительной адгезионной связью с титановой основой (рис. 1).

При алюминировании титана в нелегированном алюминиевом расплаве уже при температуре рас-

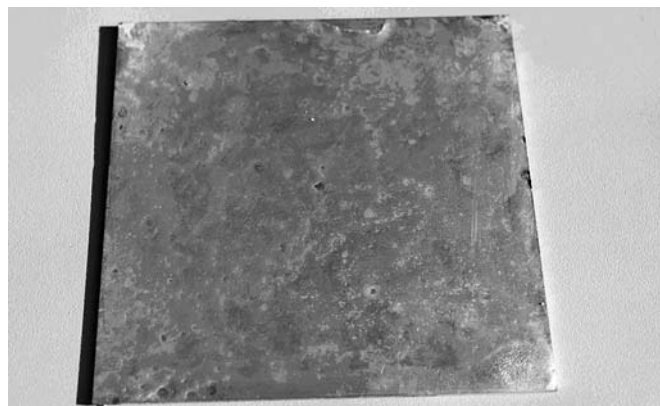


Рис. 1. Титановые образцы с алюминиевым покрытием

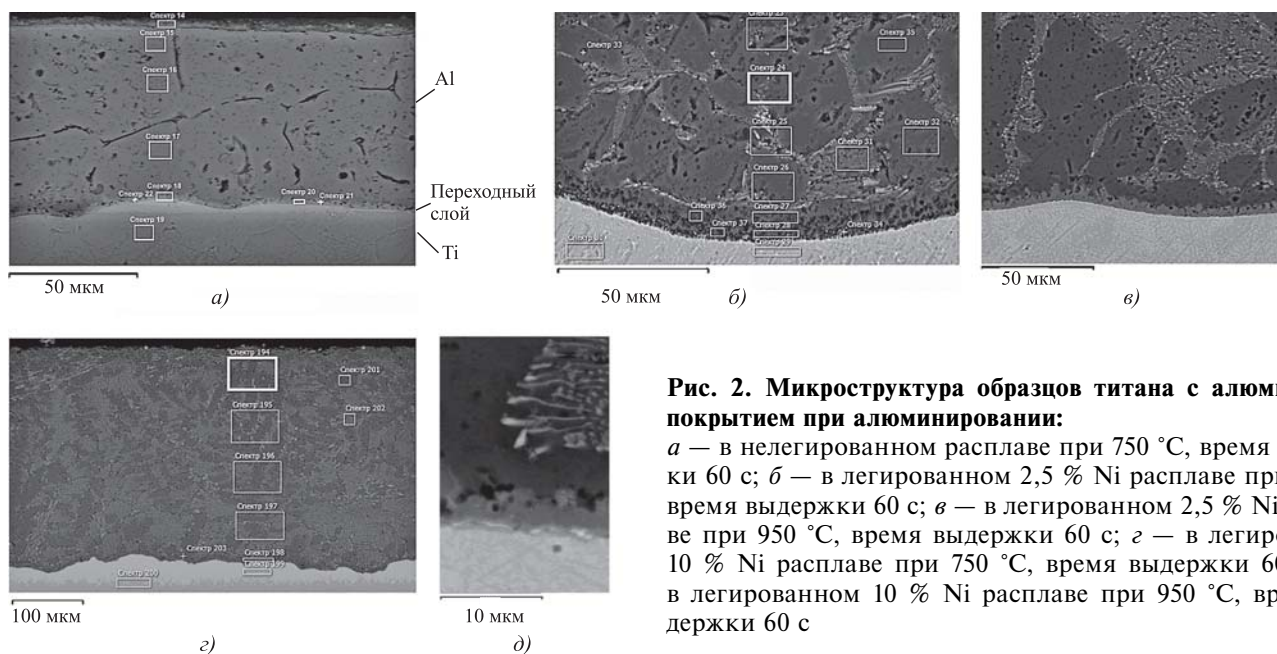


Рис. 2. Микроструктура образцов титана с алюминиевым покрытием при алюминировании:

a — в нелегированном расплаве при 750 °С, время выдержки 60 с; *б* — в легированном 2,5 % Ni расплаве при 750 °С, время выдержки 60 с; *в* — в легированном 2,5 % Ni расплаве при 950 °С, время выдержки 60 с; *г* — в легированном 10 % Ni расплаве при 750 °С, время выдержки 60 с; *д* — в легированном 10 % Ni расплаве при 950 °С, время выдержки 60 с

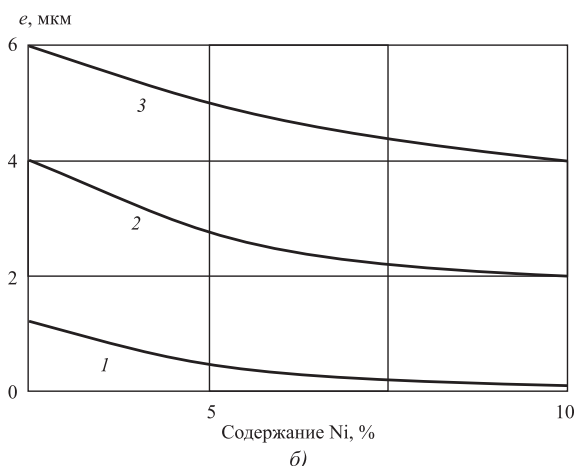
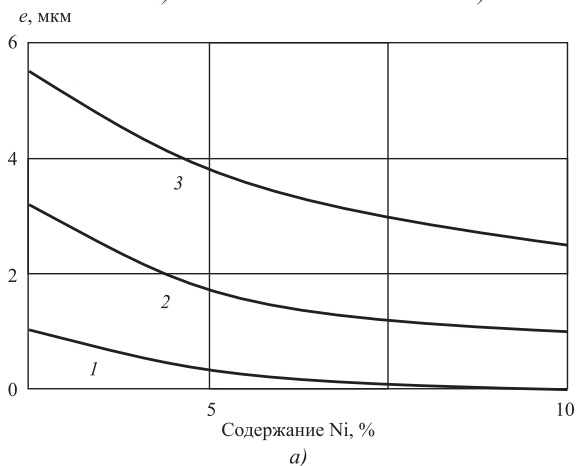


Рис. 3. Зависимость толщины интерметаллидного слоя *e* от концентрации никеля при различных температурах алюминиевого расплава:

a — 850 °С; *б* — 950 °С; время выдержки титановых образцов в алюминиевом расплаве: 1 — 3 с; 2 — 30 с; 3 — 60 с

плава 750 °С между основным металлом и покрытием образуется переходный интерметаллидный слой (рис. 2, *a*), а при легировании алюминия никелем переходный слой при температуре 750 °С не образуется (рис. 2, *б*, *г*). Переходный слой при алюминировании титана образуется при температурах алюминиевой ванны 850 °С и выше (рис. 2, *в*, *д*).

Толщина переходного слоя зависит от температуры и времени выдержки титановых образцов в алюминиевом расплаве. Толщина переходного слоя также зависит и от концентрации никеля в алюминиевом расплаве. Толщина переходного слоя при алюминировании в нелегированном алюминиевом расплаве составляет 0,5...6,0 мкм. Повышение температуры и времени выдержки в расплаве способствует увеличению толщины интерметаллида (рис. 3).

Легирование никелем в пределах 2,5...10,0 % уменьшает толщину слоя интерметаллидов. При температуре алюминиевого расплава 750 °С сплошного интерметаллидного слоя между титаном и алюминием не образуется. При алюминировании титана в расплаве с температурой 850 °С толщина интерметаллида не превышает 2,5 мкм, а при 950 °С — 5,5 мкм (см. рис. 3). Таким образом, легирование никелем снижает скорость роста переходного слоя при алюминировании титана, что положительно влияет на прочность сцепления слоев композита и прочность композита в целом [12, 13].

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что переходный слой на границе раздела титана и алюминия содержит 62...65 % Al, что соответствует,

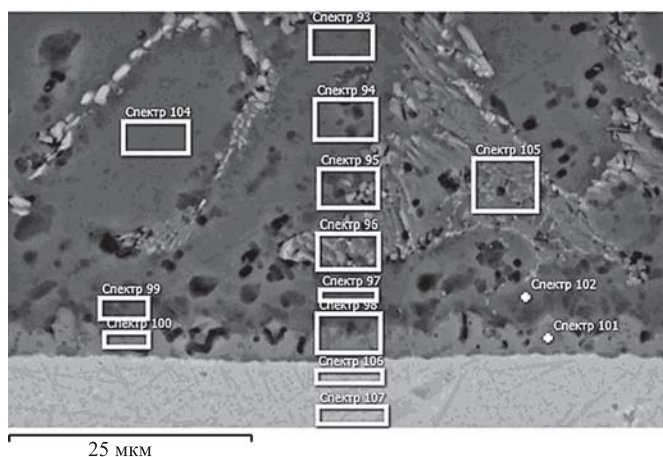


Рис. 4. Структура и химический состав титанового образца с алюминиевым покрытием. Температура алюминирования 950 °С, время выдержки 30 с

Химический состав, %, участков образца

Номер спектра	Al	Ti	Fe	Ni
93	99,57	0,15	—	0,28
94	99,38	0,36	—	0,25
95	95,31	0,33	0,24	4,13
96	88,60	0,50	0,35	10,55
97	98,92	0,94	—	0,15
98	75,61	24,11	—	0,28
99	97,07	2,81	—	0,12
100	62,71	37,11	—	0,18
101	62,13	37,70	—	0,17
102	98,47	1,25	—	0,28
104	99,04	0,81	—	0,15
105	90,18	0,26	0,44	9,13
106	0,60	99,40	—	—
107	0,25	99,75	—	—

исходя из диаграммы состояния, области существования фазы $TiAl_3$ [14, 15] (рис. 4, таблица). Легирование алюминиевого расплава никелем приводит к легированию при алюминировании титана переходного интерметаллидного слоя. Содержание никеля в переходном слое доходит до 0,3 %.

В процессе жидкофазного взаимодействия алюминия и титана при формировании биметаллов вследствие растворения титана алюминиевый слой насыщается титаном. Содержание титана в алюминиевом слое изменяется в зависимости от температуры и времени выдержки в расплаве

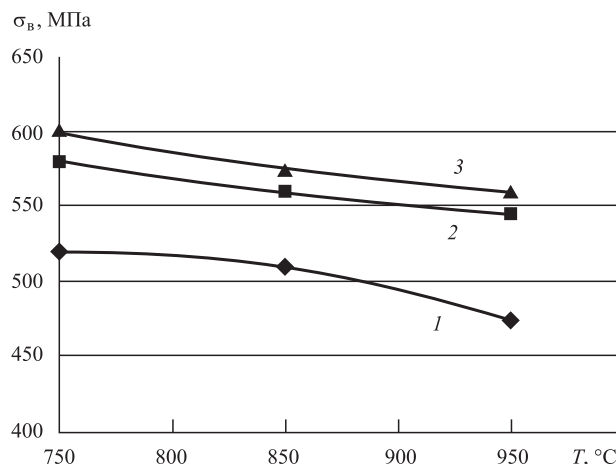


Рис. 5. Зависимость прочности биметалла титан—алюминий от температуры алюминирования при алюминировании:

1 — в нелегированном расплаве; 2 — в расплаве с содержанием 2,5 % Ni; 3 — в расплаве с содержанием 10 % Ni

от 0,2 до 3,0 %. По сечению алюминиевого слоя содержание титана неравномерно. Концентрация титана в алюминиевом слое повышается от внешней поверхности до границы переходного слоя. Увеличение температуры и времени выдержки приводит к увеличению содержания титана в алюминиевом слое биметалла.

Поверхностные слои титана вследствие диффузии насыщаются алюминием. Содержание алюминия в титане на расстоянии 5...10 мкм от границы переходного слоя в зависимости от температуры процесса и времени выдержки изменяется в пределах 0,2...1,0 % (см. рис. 4, таблица).

Легирование никелем алюминиевого расплава снижает толщину переходного слоя, а при температуре алюминирования 750 °С интерметаллиды практически не образуются, что снижает степень разупрочнения титана и повышает прочность композиционного материала (рис. 5). Легирование никелем переходного слоя из алюминиевого расплава увеличивает прочность интерметаллидного слоя и способствует повышению прочности биметалла [12].

Выводы

1. Легирование алюминиевого расплава никелем при жидкофазном алюминировании титана приводит к снижению скорости образования переходного интерметаллидного слоя и уменьшению его толщины.

2. Легирование алюминиевого расплава никелем при алюминировании обеспечивает легирова-

ние переходного слоя на основе интерметаллидной фазы $TiAl_3$ никелем в количестве 0,1...0,3 %.

3. Снижение толщины переходного интерметаллидного слоя на границе титана и алюминия и легирование никелем интерметаллидного слоя повышает прочность композиционного материала титан—алюминий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгун В.Г.** Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. М.: Металлургиздат, 2004. 230 с.

2. **Гуревич Л.М., Писарев С.П., Новиков Р.Е.** Моделирование поведения титано-алюминиевого композита с интерметаллидными включениями // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 25—29.

3. **Полькин И.С.** Пеноалюминий будущего — пенокомпозит // Технология легких сплавов. 2006. № 1—2. С. 210—211.

4. **Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В.** Технология формирования слоистых композиционных материалов системы титан—пеноалюминий // Металлург. 2015. № 4. С. 60—61.

5. **Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В.** Влияние кобальта на формирование и прочность сцепления композиционных материалов пеноалюминий—титан // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 2. С. 51—58.

6. **Даненко В.Ф., Гуревич Л.М.** Влияние алитирования на свойства углеродистой стали при высоких температурах // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 4. С. 92—99.

7. **Гурьев А.В., Кукса Л.В.** О роли микронеоднородной деформации в разрушении и формировании пластических свойств двухфазных поликристаллических сплавов // ФХОМ. 1968. № 4. С. 97—104.

8. **Кукса Л.В.** Микродеформации и механические свойства поликристаллических сплавов при статических, динамических и высокотемпературных испытаниях // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 1. С. 96—105.

9. **Выбор** легирующих элементов для сплавов на основе алюминидов титана / А.О. Деменюк, А.А. Ганеев, О.Б. Деменюк, Б.А. Кулаков // Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия". 2013. Т. 13. № 1. С. 95—102.

10. **Ковтунов А.И., Мямин С.В.** Жидкофазные способы производства слоистых композиционных материалов. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. 136 с.

11. **Шашкин О.В.** Вакуумная контейнерная пайка титановых и титано-алюминиевых конструкций припоями на основе алюминия: дис. ... канд. техн. наук. ТГУ — Тольятти, 2006. 164 с.

12. **Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В.** Влияние легирования никелем алюминиевого расплава на жидкофазные процессы формирования композиционных материалов пеноалюминий—титан // Сварочное производство. 2018. № 9. С. 29—33.

13. **Сварка** разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.

14. **Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.

15. **Диаграммы** состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.



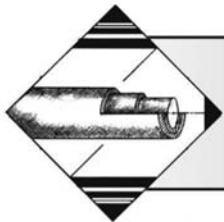
ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев

(Воронежский государственный технический университет),

В.В. Иванов

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: vsmolen@inbox.ru

Технология чистовой комбинированной обработки минералокерамических покрытий

Рассмотрены технологические приемы изготовления элементов охлаждения современных ракетных двигателей, которые разрабатываются с учетом возможности их многоразового использования. Существенное увеличение тепловой нагрузки на стенки камер сгорания жидкостных ракетных двигателей потребовало создания новых способов защиты поверхностного слоя горячей зоны от воздействия факела пламени в зоне горения топлива. Раскрыты возможности применения плазменного нанесения металлокерамических теплозащитных покрытий, обладающих хорошей эрозийной стойкостью и высоким тепловым сопротивлением в условиях интенсивного воздействия высокотемпературных продуктов сгорания. Приведен анализ влияния качества поверхностного слоя покрытий на эксплуатационные характеристики изделия. Обоснована необходимость локальной чистовой обработки нанесенных покрытий, в том числе на переходных участках камер сгорания и реактивного сопла, имеющих ограниченный доступ инструмента в зону обработки. Наиболее эффективным оказался комбинированный метод выравнивания микропрофиля с наложением электрического поля. Однако для его реализации необходимы комплекс исследований по изучению механизма удаления припуска, корректировка технологических режимов. Решена задача минимизации припусков на чистовую комбинированную обработку, что позволило выровнять толщину теплозащитного покрытия по длине тракта горения топлива, включая участки зачистки, в 1,5...2,0 раза повысить число безотказных пусков двигателя и обеспечить многоразовое применение изделий.

Ключевые слова: охлаждение, камера сгорания, покрытие, металлокерамика, комбинированная обработка, поверхностный слой.

Technological methods for manufacturing of cooling elements of modern rocket engines are considered, they are developed taking into account the possibility of reusable use. Significant increase in the thermal load on the walls of combustion chambers of liquid rocket engines required the creation of new ways to protect the surface layer of the hot zone from the effects of the flame in the fuel combustion zone. The possibilities for using of plasma application of metal-ceramic heat-protective coatings for these purposes, which have good erosion resistance and high thermal resistance in conditions of intense exposure to high-temperature combustion products, are revealed. The analysis of the effect of the quality of the coatings surface layer on the performance characteristics of the product is presented. The need for local finishing of the applied coatings is justified, including in the transition areas of the combustion chambers and the jet nozzle, which have limited tool access to the processing zone. The most effective method is the combined alignment of the microprofile with the imposition of electric field. But for its implementation, set of studies is needed to study the mechanism of allowance removing, and to adjust the technological modes. The task of minimizing allowances for finishing combined processing is solved, which allowed to align the thickness of the heat-protective coating along the length of the fuel combustion path, including the cleaning sections, to increase the number of trouble-free engine starts by 1.5...2.0 times and ensure reusable use of product.

Keywords: cooling, combustion chamber, coating, cermet, combined processing, surface layer.

Введение

Один из основных эксплуатационных показателей жидкостных ракетных реактивных двигате-

лей (ЖРД) — ресурс изделия, во многом зависящий от условий охлаждения камеры сгорания и реактивного сопла. Наиболее напряженный тепловой режим в изделиях с использованием в ка-

честве горючего жидкого водорода, вызывающего повышенный нагрев зоны горения. В последние годы ЖРД получили многократное использование, при котором двигатели повторно применяют для последующих пусков ракет. В настоящее время конструктивные и технологические мероприятия должны обеспечивать безаварийный пуск не менее 20—25 раз, а в ближайшей перспективе достичь 50 пусков. Это возможно при использовании для горячей зоны двигателя термостойких защитных покрытий, наносимых преимущественно лучевыми методами. Но при этом происходит возрастание шероховатости поверхностного слоя, вызывающее повышение сопротивления течению горючей смеси, торможение потока и местный перегрев тракта, снижающий ресурс изделия. Такое воздействие наиболее сильно проявляется на переходных участках с покрытием внутри камеры сгорания, где поток меняет направление течения и встречает местное торможение, для снижения которого требуется местная локальная зачистка поверхности.

Камеры сгорания могут иметь различные, в том числе малые, сечения, что затрудняет подвод инструмента в зону обработки и выполнение технологических перемещений для управляемого удаления припуска.

В целях эффективного выполнения операции потребовались нетрадиционные технологические процессы, одним из которых стала комбинированная электроабразивная обработка кругом и гибким инструментом с наложением электрического поля. Здесь процесс происходит при минимальных силах резания и износе электрода-инструмента с локальным перемещением инструмента для выноса продуктов обработки, что расширяет технологические возможности операции.

Современные способы тепловой защиты камер сгорания и реактивных сопел ракетных двигателей

Современные тепловые двигатели работают при больших давлениях горючей среды и температурах, превышающих температуры плавления материалов, из которых изготавливают камеры сгорания и реактивные сопла. В новых изделиях (в частности в ЖРД) для повышения импульса тяги постоянно поднимают показатели горения, одновременно создавая новые эффективные методы охлаждения стенок деталей. Это требует непрерывного совершенствования технологических процессов изготовления таких элементов конструкции, где наиболее перспективны ком-

бинированные технологические процессы, применяемые на этапах нанесения теплостойких покрытий, их эффективной чистовой обработки, без ухудшения защитных характеристик поверхностного слоя материала детали [1—3].

В двигателестроении используют два основных вида охлаждения: внешнее и внутреннее. При внешнем охлаждении обычно применяют топливо, протекающее через оболочку камеры сгорания. Предпочтительнее использовать горючее (в том числе, жидкий водород), хотя известны способы охлаждения обоими компонентами (горючее и окислитель).

При внешнем охлаждении обычно применяют протекание топлива по схеме противотока, при которой направление движения охлаждающего компонента противоположно движению газов в камере двигателя, что обеспечивает получение большего градиента температур и усиление интенсивности охлаждения. При этом к компонентам топлива, используемым в качестве охлаждающих жидкостей, предъявляются следующие требования: не вскипать и не распадаться под действием высокой температуры, не вступать в реакцию с материалом камеры сгорания.

При внутреннем охлаждении (рис. 1) огневую часть двигателя предохраняют от прогорания, создавая около стенки слой газа и жидкости пониженной температуры по сравнению с температурой ядра зоны горения. Этот слой обычно называют пристеночным слоем. В процессе охлаждения могут участвовать как горючее 1 (см. рис. 1), так и окислитель 2, образующие термозащитную среду 3.

При внутреннем охлаждении необходимо создать пристеночный слой 4 (см. рис. 1), для чего обычно используют горючее, и отжечь зону горения от огневой стенки 5 камеры сгорания.

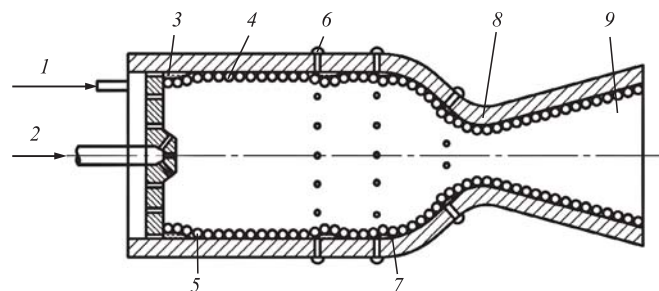


Рис. 1. Схема внутреннего охлаждения горячей зоны камеры сгорания двигателя:

1 — горючее; 2 — окислитель; 3 — жидкий слой термозащитной среды; 4 — парогазовый слой; 5 — стенка камеры сгорания; 6 — каналы для подачи топлива через стенку; 7 — термозащитная завеса на стенке камеры сгорания; 8 — переходный участок тракта камеры сгорания; 9 — реактивное сопло

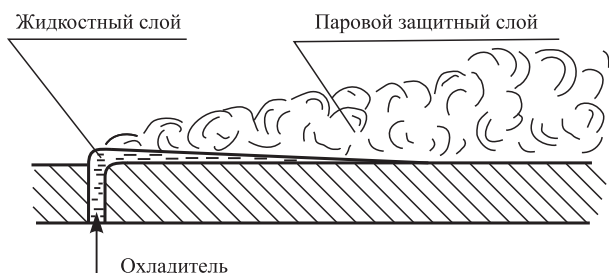


Рис. 2. Механизм удаления тепла за счет внутреннего охлаждения

Одновременно через каналы 7 (форсунки) горючее подается внутрь камеры сгорания и образует завесы 7, создающие несколько поясов по длине стенки 5. Далее горячий поток через сужение 8 поступает в реактивное сопло 9, охлаждаемое одним или обоими компонентами топлива.

На рис. 2 показан механизм удаления тепла со стенок деталей горячей зоны двигателя за счет работы системы внутреннего охлаждения. При этом поступающее в камеру сгорания горючее под воздействием потока продуктов горения растекается по стенке и под слоем жидкости создается защитный слой, сформированный из двух элементов: паров и жидкости. За счет испарения жидкости толщина парового слоя над жидкостью увеличивается по направлению движения потока продуктов сгорания. Процесс может протекать до утраты всей жидкости, что вызывает постепенное размывание паровой завесы. Это не мешает сохранять термозащитное действие парового слоя по длине трассы до 100 мм. Теплопроводность пара значительно меньше, чем у жидкости, поэтому термическое сопротивление парового компонента в несколько раз больше аналогичного параметра жидкого слоя и основным средством защиты от перегрева становится паровая составляющая, имеющая большую толщину по сравнению с жидким слоем.

При внутреннем охлаждении охладитель, дополнительно поступающий в камеру сгорания, не участвует непосредственно в процессе горения, и общий удельный расход топлива в этом случае увеличивается по сравнению с наружным охлаждением, что может ухудшить технико-экономические показатели двигателя. Анализ рис. 2 и опыт использования рассматриваемых систем охлаждения показывают, что наиболее целесообразным является применение защиты стенок 5 (см. рис. 1) с помощью комбинированной схемы охлаждения, при которой основное удаление тепла осуществляется внешним охлаждением, а в наиболее теплогрузженных местах дополнительно устраи-

ваются защитные завесы по схеме внутреннего охлаждения.

Показатели теплозащиты камер сгорания и реактивного сопла усиливают путем нанесения термозащитных покрытий, обладающих хорошей эрозионной стойкостью и высокой адгезией к стенкам изделия. Здесь требуется применять материалы более тугоплавкие, чем у стенок 5 (см. рис. 1). Так как тугоплавкие покрытия имеют обычно низкую теплопроводность, то их температура (а следовательно, защитные характеристики) значительно выше, чем у других используемых материалов. В настоящее время в качестве компонентов покрытий преимущественно используют карбиды и оксиды металлов, керамику и металлокерамику, обладающие низкими коэффициентами теплопроводности. Одним из перспективных покрытий является металлокерамика на основе диоксида циркония, наносимая плазменным напылением. Эти покрытия имеют толщину до 600 мкм и выдерживают температуру газов на их поверхности свыше 2000 К. Это обеспечивает непрерывную работу двигателя в течение более 400 с и более 25 его безотказных пусков.

Значительные технологические трудности вызывает чистовая обработка переходных участков 8 (см. рис. 1) с покрытиями, особенно при малом диаметре сечения участка сужения 9 камеры сгорания. Эта проблема решена путем использования комбинированных методов обработки [4, 5].

Отработка производственной технологичности поверхности под эксплуатационные требования к покрытиям

Стабильность работы элементов тепловой защиты обеспечивается в процессе отработки производственной технологичности поверхности деталей горячей зоны двигателя под эксплуатационные требования к покрытиям [6–9]. Теплозащита зависит главным образом от состояния покрытий, отслоение и скол которых могут вызвать нарушение работы термозащитной завесы, перегрев участков без покрытия и выход из строя изделия. Основным условием для получения качественного высокоресурсного покрытия является обеспечение его адгезионной стойкости относительно стенок камеры сгорания и (при необходимости) реактивного сопла. Это достигается путем создания искусственной шероховатости, получаемой струйно-абразивной обработкой, а также нанесением подслоя с высокой смачиваемостью относительно стенки сопла.

Технологический процесс нанесения покрытия

Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик камер сгорания перед нанесением на них покрытий их границы защищают съёмными экранами в форме разжимных колец (типа приведенных на рис. 3), обладающих пружинящими свойствами и оснащенных замками в виде косоугольного разреза. Последнее позволяет компенсировать изменение размеров стенок деталей горячей зоны, работающих при значительном градиенте температур: с наружной стороны от жидкого водорода и до температуры в зоне горения с внутренней стороны, а также при высоком давлении со стороны потока внутри магистралей. Установка защитных элементов усложняет разработку технологического процесса нанесения покрытий, так как при требуемом непрерывном процессе напыления на его границе (огневая стенка—защитный элемент) могут возникать поверхностные трещины, вызванные различием физических свойств материалов. Так, шероховатость огневой стенки из медного сплава (даже после совместной пескоструйной обработки сопрягаемых элементов) в 2...3 раза превышает шероховатость стального защитного элемента. Появление нерасчетного зазора приводит к нарушению равномерности плотного прилегания колец, вызывает выступание защитного элемента в зону протекания потока, что создает нежелательный экранирующий эффект. За счет этого в зоне, примыкающей к защитному элементу, возникает местное увеличение толщины покрытия (за счет отраженных от защитного элемента частиц порошкового материала) и может произойти нарушение качества покрытия (появление трещин и сколов). Устранение этого явления стало возможным при использовании разработанной с участием авторов технологии нанесения многослойных покрытий [2], обеспечивающей получение наружных слоев повышенной толщины, требуемой для увеличения ресурса изделия.

После нанесения применяемого многослойного покрытия (см. рис. 3) защитные элементы удаляют. Так в большинстве случаев были получены качественные переходные участки покрытий (рис. 4, а), но в отдельных случаях под действием эффекта экранирования или вследствие нарушения технологического процесса при механическом извлечении защитных элементов на поверхности огневой стенки в покрытии может наблюдаться недопустимый уступ типа приведенного на рис. 4, б, что может вызвать ухудшение эксплуатационных свойств покрытия. Кольцевой уступ на пути впрыскиваемого компонента топлива для охлаждения огневой стенки в сочетании со срывом равномерности протекания

потока продуктов горения по местам уступов и нарушение плавного перехода (рис. 5) могут приводить к возникновению критических температур огневой стенки и к ее разрушению. Проблема была

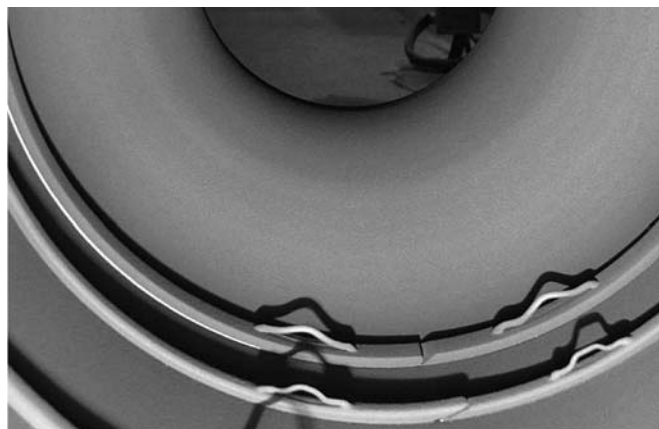
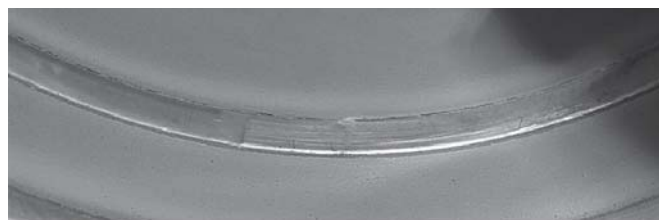
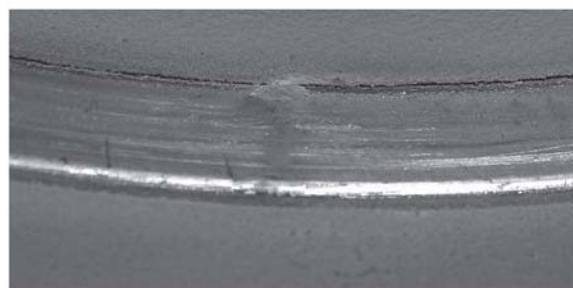


Рис. 3. Разжимные кольца на защитных элементах



а)



б)

Рис. 4. Состояние покрытия после удаления защитных элементов:

а — качественное; б — с нарушением толщины покрытия в форме уступа



Рис. 5. Местное разрушение покрытия после огневых испытаний камеры сгорания

решена путем отработки технологических режимов на образцах-свидетелях и применения операции комбинированной обработки для обеспечения плавного перехода от стенки к покрытию за счет размерной зачистки края уступа.

Технологический процесс обработки покрытия

Обычно используемый метод зачистки покрытий абразивными кругами из белого электрокорунда нередко вызывал эффект "засаливания" рабочей поверхности инструмента вязкими связующими компонентами многослойного покрытия (медный сплав, никелевый подслоя и нихромовая связка в покрытии). Кроме того, применение для чистовой обработки абразивных кругов с малыми размерами шлифовальных зерен приводит к увеличению трудоемкости зачистки эрозионно-стойкого покрытия, его перегреву и снижению характеристик изделия. При малых сечениях камеры сгорания доступ

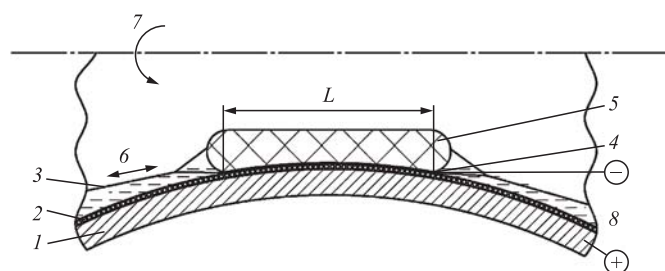


Рис. 6. Схема комбинированной обработки металло-керамического покрытия:

1 — обрабатываемая деталь; 2 — абразивная лента на металлической основе; 3 — гибкие натяжные элементы; 4 — зона прижима ленты к детали; 5 — прижимной элемент; 6 — линейные перемещения прижимного элемента; 7 — круговое перемещение детали; 8 — жидкая рабочая среда; L — рабочая длина зоны обработки детали

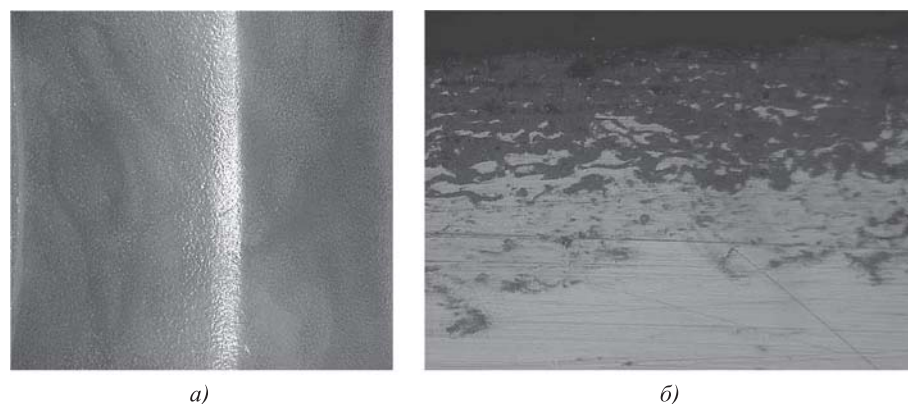


Рис. 7. Переходный участок детали после чистовой обработки:

a — внешний вид зоны зачистки; *b* — микрошлиф переходного участка ($\times 200$)

абразивного круга в зону обработки становится затруднительным или неосуществимым.

В работах [5, 6] предложены новые методы комбинированной обработки с наложением электрического поля, обеспечивающие допуск инструмента даже при его одностороннем подходе в зону обработки. Использование комбинированных методов обработки (рис. 6) совмещает процессы анодного растворения токопроводящей металлической связки покрытия с размерным удалением абразивными гранулами неровностей из выступов абразивных зерен, закрепленных связкой. Процесс размерного анодного растворения при комбинированной электроабразивной обработке позволяет снизить силы давления инструмента на обрабатываемую поверхность детали 1 и использовать гибкий инструмент в форме тонкой металлической ленты 2 с абразивным слоем со стороны детали (рекомендуемая зернистость слоя 12Н). Это позволяет одним инструментом выравнять микронеровности при любом профиле покрытия и удалении от приводов инструмента до зоны обработки 4 обрабатываемой поверхности.

Сила прижима обеспечивается прижимным элементом 5, выполненным в форме мешка, внутрь которого подается воздух под давлением 0,05...0,10 МПа. Прижимной элемент перемещается возвратно-поступательно вместе с лентой 2 гибкими натяжными элементами 3, которые регулируют режимы обработки (давление инструмента, скорости резания и др.). Лента 2 подключена к катоду источника питания напряжением 6...8 В. Анодом является деталь. Процесс протекает в растворе слабого электролита 8, подаваемого в зону L поливом. При отсутствии свободного доступа в зону обработки прижимной элемент 5 можно поворачивать в любом направлении 7 относительно ленты и зоны обработки детали. Комбинированный метод зачистки покрытий позволяет избежать "засаливания", прижогов, устраняет местное утонение слоя, обеспечивает плавное сопряжение участков, даже не имеющих свободного подхода инструмента к месту локальной обработки.

Комбинированный метод зачистки покрытий позволяет избежать "засаливания", прижогов, устраняет местное утонение слоя, обеспечивает плавное сопряжение участков, даже не имеющих свободного подхода инструмента к месту локальной обработки.

Контроль качества металлокерамических покрытий

Оценку качества зачистки переходных участков с покрытием, например, выполнения плавного

сопряжения, на первом этапе контроля проводят визуально с помощью гибких световодов. В качестве критерия принимают отсутствие видимой границы перехода между зачищенной поверхностью огневой стенки и краем подслоя покрытия, видимого в форме тонкой темной полосы.

Качество покрытия после зачистки оценивают по образцам или путем стандартного измерения высоты микронеровностей. На рис. 7, *a* показан переходный участок после зачистки, на рис. 7, *б* — микрошлиф этого элемента. Здесь приведен переходный участок покрытия, на котором за счет применения новых технологических процессов удалось выравнять припуски. При этом слой, удаленный с детали, не превышает 100 мкм, а параметр шероховатости поверхности после зачистки снизился до $Ra = 0,63$ мкм, что отвечает заданным показателям.

Стандартные испытания образцов деталей горячей зоны двигателя показали, что адгезионная прочность покрытия составляла не менее 6 МПа при заданном значении 4 МПа.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить качественные и количественные показатели влияния состояния поверхностного слоя переходных участков наносимых теплозащитных покрытий на эксплуатационные характеристики изделий. Показаны преимущества [11] применения новой схемы комбинированной обработки гибким инструментом с наложением электрического поля взамен традиционного шлифования. Установлено, что использование гибкого инструмента в форме токопроводящей абразивной ленты позволяет расширить технологические возможности чистовой обработки металлокерамических по-

крытий, заменить алмазный инструмент на более доступный абразивный, исключить прижоги на детали и повысить эксплуатационные показатели тепловых двигателей, выпускаемых для ракетной техники, в том числе повысить возможности многократного использования изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паничев Е.В., Смоленцев В.П. Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 11. С. 517–522.
2. Смоленцев В.П., Портных А.И., Паничев Е.В. Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия // Вестник ВГТУ. 2019. Т. 15. № 1. С. 96–99.
3. Иванов В.В., Смоленцев В.П., Лебедев В.А. Химико-механические основы нанесения покрытий в вибрационных технологических системах // Гальваника и обработка поверхности. 2019. Т. XXV. № 2. С. 49–58.
4. Научные технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
5. Справочник технолога / под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
6. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. 224 с.
7. Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Иванов В.В. Проектирование технологических процессов получения высокоресурсных комбинированных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 6. С. 273–281.
8. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973. 398 с.
9. Балдаев Л.Х. Геотермическое напыление. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
10. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
11. Организационные и экономические исследования в машиностроении / под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ, 2006. 73 с.

Д.В. Силаев, Г.А. Сухочев
(Воронежский государственный технический университет),
Д.В. Гореликов
(Машиностроительное производственное объединение имени И. Румянцева, Москва),
В.Н. Гореликов
(Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, Москва)
E-mail: suhotchev@mail.ru

Технологические особенности регулирования процесса комбинированной обработки поверхности сложного профиля

Приведены результаты исследований комбинированной обработки поверхностей деталей сложного профиля лопаточных машин в целях активации под напыление защитных покрытий, технологические методы и схемы комбинированной обработки.

Ключевые слова: комбинированная обработка, микровыступы, токопроводящая среда, анодное растворение, активация.

The results of the combined processing of complex profile parts surface of blade machines in order to activate protective coatings by spraying, technological methods and schemes of combined processing are presented.

Keywords: combined processing, microprotrusions, conductive medium, anodic dissolution, activation.

Известно, что большая часть лопаточных деталей силовых энергоустановок, авиационных и ракетных двигателей подвержены знакопеременным термодинамическим циклическим нагрузкам. Высокий градиент температур и многовекторное сложнапряженное состояние вызывают макродефекты и микротрещины на поверхности лопаточных деталей. Подобные воздействия приводят к отказам при работе агрегатов с лопаточными деталями [1].

Одним из действенных направлений получения деталей с заданными эксплуатационными свойствами на рабочих поверхностях сложного профиля считается нанесение функциональных, в том числе, плазменных теплозащитных покрытий. Надежное сцепление таких покрытий с основой возможно только при получении активированного микропрофиля бездефектной поверхности с параметром шероховатости не менее $Ra = 60$ мкм с выступами анкерного типа. Однако наличие в конструкции турбин труднодоступных поверхностей лопаток при угле раскрытия межлопаточного канала не более 45° не позволяет в зоне обработки разместить инструмент для выполнения специализированной обработки при подготовке и активации поверхностей лопаток под покрытия [2].

Поэтому необходима разработка принципиально новых подходов при проектировании тех-

нологии получения требуемой шероховатости под нанесение покрытий на сложнопрофильные поверхности лопаточных деталей. Одним из таких подходов предлагается эрозионно-химико-термическая обработка поверхности сложного профиля лопаток турбин для выравнивания микрорельефа с одновременной его активацией электро-химико-механической комбинированной обработкой под плазменное покрытие.

Первоначально при выборе материала инструмента, поскольку цинк является доступным материалом, было предложено изготавливать электроды-инструменты из него. Однако по сравнению с электродами-инструментами из медных сплавов износ инструмента увеличился на порядок. Это вызвало большие погрешности при обработке и сделало процесс неконкурентоспособным. Кроме того, был полностью утрачен эффект кумулятивного воздействия, что можно объяснить теплофизическими свойствами цинка (энергии обратной полуволны недостаточно для зажигания монолитного объекта). Подобное явление наблюдалось и при использовании для электродов магниевых сплавов. Они интенсивно горят в мелкодисперсном виде, но при применении их для изготовления инструмента его износ может достигать до 200...300 % к объему снятого материала, а кумулятивный эффект не наблюдается. Поэтому было

Таблица 1

Износ инструмента в зависимости от тока разряда

Ток разряда, А	Износ инструмента, мкм, для материалов	
	М1	Л62
0,5	2,0	5,6
1,0	4,7	13,0
1,5	7,3	21,8
2,0	10,4	28,7
2,5	13,6	35,4
3,0	15,2	43,6
4,0	21,7	58,6
5,0	26,4	73,9

предложено наносить цинковое покрытие толщиной 60 мкм на электроды. Кумулятивный эффект в данном случае стабилен и такой инструмент работоспособен [3].

В эксперименте были исследованы электроды из латуни Л62 и меди М1. Электроды из меди имеют лучшие показатели по качеству обработки, но показатели геометрической точности оказались сопоставимыми. Несмотря на очевидно меньший износ электродов из меди (табл. 1), инструменты из более дешевой и конструкционно жесткой латуни, защищенные покрытием, более подходят для эрозионно-термической обработки. В итоге для инструмента выбрана латунная основа с цинковым покрытием [3].

При эрозионно-химико-термической обработке лопаток сложного профиля было выявлено, что скорость удаления припуска для электродов с термоактивным покрытием из цинка на порядок выше, чем без покрытия. Этот показатель регулируется энергией импульса и ограничен необходимостью получения минимально возможной глубины микротрещин поверхностного слоя при технологическом достижении развитой шероховатости с вершинами до 80 мкм.

Изменение производительности эрозионно-химико-термической обработки профильным латунным электродом без покрытия и с покрытием при различной энергии импульса без принудительной прокачки жидкости показано на рис. 1. Электрод, профиль которого рассчитан с учетом покрытия цинком с переменной толщиной (до 300 мкм на сторону на начальном участке с торца инструмента), позволяет интенсифицировать

процесс, увеличивая подачу до 5–6 раз даже при малых энергиях разряда (0,2...0,6 Дж).

Неровность поверхностного слоя при интенсификации процесса возрастает за счет глубины единичных лунок. При использовании электродов с покрытием часть лунки на детали формируется за счет импульса энергии, другая — из-за кумулятивного действия теплового факела. В результате по мере увеличения энергии импульса возникает углубление с гораздо большим, чем при использовании электрода без покрытия, диаметром и глубиной неровностей [4].

На рис. 2 показана зависимость высоты неровностей от изменения энергии импульса. Из анализа графика очевидно, что высота неровностей при

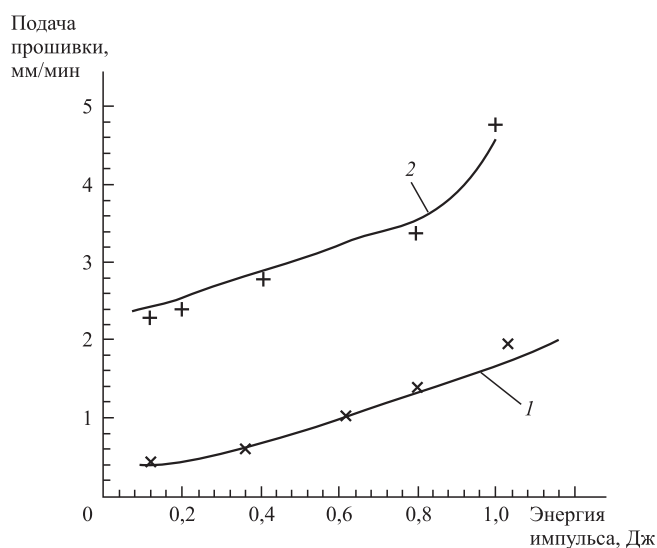


Рис. 1. Изменение производительности прошивки электродами из латуни без покрытия (1) и с покрытием (2)

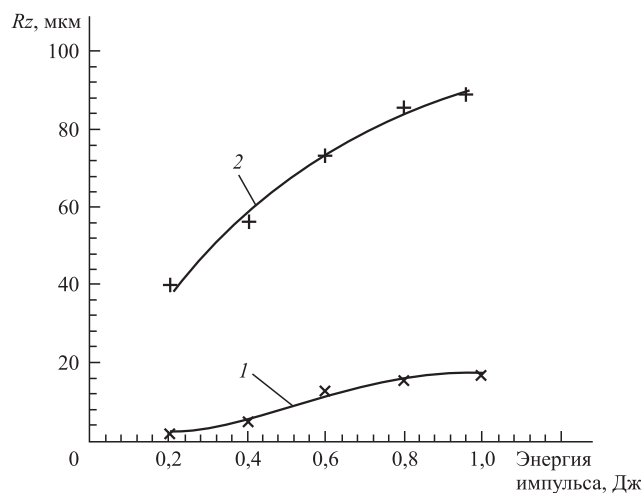


Рис. 2. Изменение высоты неровностей при обработке электродами из латуни без покрытия (1) и с термоактивным покрытием цинком (2)

обработке электродами с покрытием значительно превышает параметр шероховатости, полученный на режимах обработки электродами без покрытия, и достигает 80 мкм, что является достаточным для подготовки поверхности под покрытие.

Глубину неизбежных при электроэрозионной обработке микротрещин предлагается снижать до 2...3 мкм или практически устранять последующим комбинированным электро-химико-механическим воздействием стальными микрошариками в токопроводящей газожидкостной среде [5].

При подготовке поверхности очень важно обеспечить заданную форму лопатки. Во время электроэрозионной обработки основные отклонения от геометрии профиля лопатки появляются из-за износа электрода-инструмента. Величина износа зависит от многих причин, но основное влияние оказывают теплофизические характеристики материала. Для латунного электрода износ составляет 10...30 % от объема снятого материала. При использовании латунного электрода с цинковым покрытием износ инструмента снижается, так как до 80 % материала заготовки снимается за счет кумулятивного эффекта, а повышенная эрозия цинкового покрытия, отнесенная к общему съему материала с заготовки-анода, имеет износ инструмента относительно материала детали не более 22 %, так как рассеивание обратного потока энергии при экранировании в межэлектродном зазоре достаточно велико в условиях факельного характера сгорания покрытия.

За счет высокой точности электроэрозионной прошивки межлопаточного канала до операции эрозионно-термической обработки погрешность при обработке специальным профильным ин-

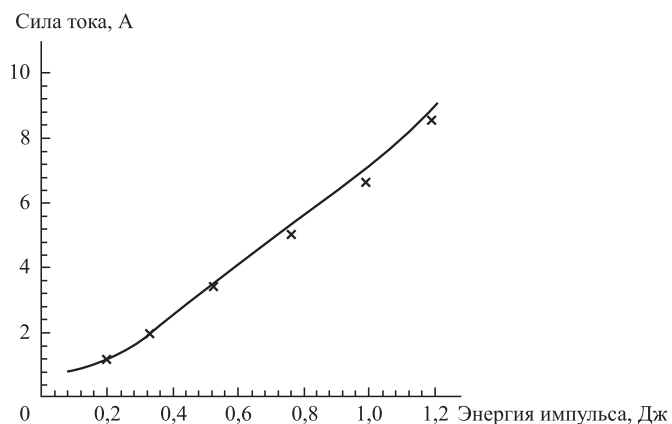


Рис. 3. Сила тока в импульсе при различной энергии разряда

струментом на копировально-прошивочных станках с ЧПУ не превышает 0,01 мм. При допуске на отклонение профиля межлопаточного канала в пределах 0,1...0,2 мм возможности реализации эрозионно-термической обработки даже с учетом повышенного износа электрода-инструмента обеспечивают получение лопаточных деталей с заданной точностью.

Экспериментально установлено, что для цинкового покрытия энергия импульса, достаточная для появления кумулятивного эффекта, должна быть более 0,1 Дж. На рис. 3 показано изменение силы тока при использовании импульсов, ограниченных, с одной стороны, началом эффекта сгорания цинкового покрытия, с другой — возможностью получения заданных показателей поверхностного слоя, реализующегося в промышленных условиях при энергии импульса 0,5...1,2 Дж.

Известно, что технически покрытие цинком можно получить любой толщины (горячее цинкование, электродуговая металлизация, плазменное напыление, селективное лазерное спекание на 3D-принтерах и т.д.). Расчет сечения электрода с покрытием выполняется в зависимости от формы канала. В ряде случаев, исходя из геометрических параметров с учетом толщины покрытия.

Для реализации эрозионно-химико-термической обработки нет необходимости проводить модернизацию копировально-прошивочных станков. Тем не менее при использовании электрода-инструмента с покрытием необходимо следить за правильной эксплуатацией системы очистки рабочей среды, так как повышенная загрязненность приводит к нарушению стабильности процесса. Это может существенно изменить энергетические составляющие цикла и вызвать появление местных дефектов. Корректировка настройки требуется только при изменении площади обработки. При этом потребуются уточнить рекомендации, приведенные в паспорте станка для обработки профильным инструментом без покрытия.

После выбора профиля электрода-инструмента для формирования межлопаточного пространства турбин турбонасосного агрегата методами эрозионно-химико-механической обработки требуются:

- разработка технологической схемы прошивки;
- технологическая отработка специальных электродов-инструментов с покрытием;
- выбор оптимальных режимов прошивки;
- разработка и апробирование управляющих программ.

Так как область межлопаточного канала, подлежащая прошивке, является условно открытой,

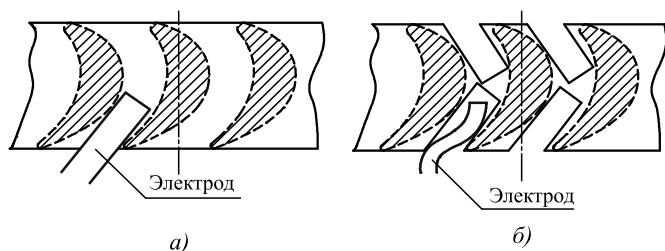


Рис. 4. Схема формообразования межлопаточных каналов турбин электродами без покрытия:
 а — черновая прошивка прямоугольным электродом;
 б — окончательная прошивка профильным электродом

то формообразование возможно только в одном направлении и применение обычных электродов, используемых при электроэрозионной обработке турбин без бандажа, технологически не реализуется. Вследствие этого процесс формообразования технологически разделяем на два этапа: черновая прошивка и чистовые проходы, окончательно формирующие геометрию поверхности лопаток турбины. На рис. 4 приведена схема использования профильных электродов, определяющая этапы получения межлопаточных каналов при сложной кинематике перемещений.

Согласно такой схеме обработки на начальной стадии проведения работ используются черновые электроды с сечением в форме прямоугольника, при этом объем удаленного металла из межлопаточного канала составляет до 60 % всей выборки при прошивке (см. рис. 4, а). Введение на втором переходе специально спрофилированного электрода, имеющего в плане дугообразную форму усредненной окружности (см. рис. 4, б), позволяет окончательно удалить материал из зоны прошивки, оставляя лишь припуск на окончательную эрозионно-термическую обработку. Это дает возможность снизить время работы электродов, а также уменьшить их износ, что в конечном итоге значительно сокращает технологический цикл обработки, поскольку черновой проход ведется при повышенных значениях тока разряда 5 А. При прошивании узких каналов применяется один профильный электрод (рис. 5) и более сложное программное обеспечение.

В результате проведенной серии экспериментов были установлены оптимальные параметры прошивки, позволившие уменьшить суммарное время электроэрозионной обработки при заданном качестве поверхности и точности обработки. Данные по изменению параметра шероховатости поверхности и глубине микротрещин в зависимости от тока разряда на входе в канал при исполь-

зовании электродов с термоактивным покрытием из цинка приведены в табл. 2.

В итоге ток разряда был выбран в пределах 5...10 А. Для участка траектории, обеспечивающего заход в канал электрода с термоактивным покрытием, это значение равнялось ≈ 10 А. Износ электродов при этом составлял 0,08...0,10 мм на проход одного межлопаточного канала. Параметры шероховатого слоя соответствуют требованиям по подготовке поверхности для плазменного покрытия.

По результатам экспериментов были разработаны рекомендации по выбору оборудования, например, установок и устройств для нанесения теплозащитных покрытий на наружные и внутренние поверхности лопаточных деталей [6]. Обоснование рабочих диапазонов комбинированной обработки микрошариками в слабопроводящей газожидкостной среде при анодном растворении измененного слоя в условиях канала с углом раскрытия не более 45° позволило разработать режимы процесса, обеспечивающие удаление де-



Рис. 5. Электрод для прошивки каналов турбин

Таблица 2

Изменение качества поверхности в зависимости от тока разряда

Ток разряда, А	Ra, мкм	Глубина микротрещин, мкм
0,5	2,0	4,5
2,0	4,7	6,6
3,0	15,2	9,0
4,0	21,7	12,3
5,0	26,4	14,0
6,0	32,3	16,7
7,0	46,4	21,0
8,0	53,6	23,5
9,0	62,4	25,4
10,0	76,0	27,0

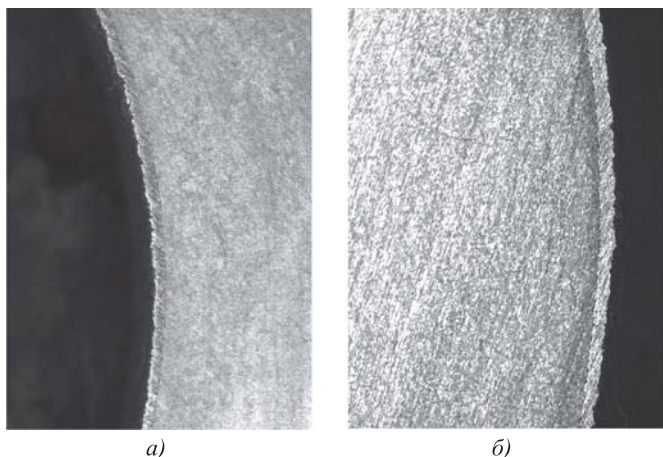


Рис. 6. Покрyтия, нанесенные на вогнутую (а) и выпуклую (б) поверхность

фектов с микровыступов поверхности после эрозионно-термической обработки для обеспечения показателей, недостижимых ранее, за счет увеличения скорости анодного растворения дефектного слоя в месте микровыступа в момент контакта шарика с деталью в 2—3 раза. После обработки всей поверхности в течение 10 мин получен параметр шероховатости поверхности $Ra = 60$ мкм с выступами анкерного типа, степень равномерно распределенного наклепа составила 1,4...2,3 %.

На рис. 6 приведены примеры нанесенных покрытий на поверхность сложного профиля.

Результаты исследований подтвердили возможность и целесообразность модуляции электрических параметров при нанесении износостойких

покрытий на наружные и внутренние рабочие поверхности деталей различного профиля, в том числе деталей, испытывающих циклические знакопеременные и ударные нагрузки. Таким образом, металлографические исследования не выявили отслоений покрытия от основы по всему профилю лопатки. Усталостные испытания в условиях знакопеременных нагрузок показали снижение числа отказов лопаточных машин на 7 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 287 с.
2. Сухочев Г.А. Основы технологии комбинированной обработки непрофилированным инструментом винтовых поверхностей / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, В.Н. Гореликов // Металлообработка. 2008. № 1. С. 12—16.
3. Пат. 2680333 РФ. Способ подготовки поверхности сложного профиля под газоплазменное напыление / Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев, С.Н. Коленцев. 2019.
4. Сухочев Г.А. Интенсификация электроэрозионной обработки поверхностей гидрооборудования под напыление покрытий / Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 1 (18). С. 33—40.
5. Сухочев Г.А. Процесс отделочно-упрочняющей обработки поверхностей лопаточных деталей с учетом технологической наследственности / Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы. 2015. № 2 (15). С. 22—33.
6. Сухочев Г.А., Кадырметов А.М., Силаев Д.В. Технологическое обеспечение качества газотермических покрытий на поверхностях сложной формы // Вестник РГТУ имени П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 26—32.



**С.М. Афонин**

(НИУ "Московский институт электронной техники")

E-mail: eduems@mail.ru

Механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора для наномехатроники

Исследованы механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора для наномехатроники. Получены жесткость и упругая податливость многослойного пьезоактюатора с учетом вида управления. Определены в статическом и динамическом режимах характеристики многослойного пьезоактюатора.

Ключевые слова: многослойный пьезоактюатор, механические и регулировочные характеристики, упругая податливость, наномехатроника.

The mechanical and control characteristics of multilayer piezoactuator for nanomechanics are studied. The stiffness and elastic compliance of the multilayer piezoactuator are obtained taking into account the type of control. The characteristics of multilayer piezoactuator are determined in static and dynamic modes.

Keywords: multilayer piezoactuator, mechanical and control characteristics, elastic compliance, nanomechanics.

Применение пьезоактюатора для наномехатроники перспективно в нанотехнологии, микроэлектронике, нанобиологии, энергетике. Пьезоактюатор является пьезомеханическим устройством, предназначенным для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэффекта и для преобразования электрических сигналов в механические перемещения и силы. Точность оборудования нанотехнологии обеспечивается наномехатронными системами с пьезоактюаторами [1–8]. Увеличение диапазона перемещения от единиц нанометров до сотни микрометров достигается за счет использования многослойного пьезоактюатора. Многослойный пьезоактюатор имеет чувствительность менее 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н, полюсу пропускания до 100 Гц [1–16].

Статические характеристики многослойного пьезоактюатора для наномехатроники при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению находим из уравнения обратного пьезоэффекта [3–11, 15, 16]

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3, \quad (1)$$

где S_3 — относительная деформация по оси 3;
 d_{33} — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте;
 $E_3 = U/\delta$ — напряженность электрического поля по оси 3;
 U — напряжение на электродах многослойного пьезоактюатора;
 δ — толщина пьезослоя;
 $l = n\delta$ — длина многослойного пьезоактюатора;
 n — число пьезослоев в многослойном пьезоактюаторе;
 s_{33}^E — упругая податливость при продольном пьезоэффекте при $E = \text{const}$;
 $T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение по оси 3;
 F — внешняя сила;
 S_0 — поперечное сечение многослойного пьезоактюатора.

Рассмотрим в статическом режиме характеристики многослойного пьезоактюатора. Соответственно, статические характеристики $S_3(T_3)$ или $\Delta l(F)$ многослойного пьезоактюатора определены как механические характеристики, где Δl — относительное перемещение, а статические характеристики $S_3(E_3)$ или $\Delta l(U)$ установлены как регулиро-

вочные характеристики. Уравнение механической характеристики жесткости многослойного пьезоактюатора для наномехатроники при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению получаем из уравнения (1) в виде:

$$\Delta l = d_{33}nU - s_{33}^E Fl/S_0 = d_{33}nU - F/C_{33}^E, \quad (2)$$

где $C_{33}^E = S_0/(s_{33}^E l)$ — жесткость многослойного пьезоактюатора при управлении по напряжению.

В статике при управлении по напряжению максимальное перемещение Δl_{\max} при $F = 0$ имеем в виде

$$\Delta l_{\max} = d_{33}nU_m,$$

где Δl_{\max} — максимальное перемещение многослойного пьезоактюатора;

U_m — максимальное напряжение на электродах многослойного пьезоактюатора.

Максимальную рабочую силу F_{\max} при $\Delta l = 0$ имеем в виде:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= d_{33}nU_m S_0/(s_{33}^E l) = d_{33}nU_m C_{33}^E = \\ &= d_{33}U_m S_0/(s_{33}^E \delta) = d_{33}E_3 S_0/s_{33}^E. \end{aligned}$$

Из уравнения (2) механическую характеристику $\Delta l(F)$ многослойного пьезоактюатора при управлении по напряжению получаем в виде:

$$\Delta l = \Delta l_{\max}(1 - F/F_{\max}). \quad (3)$$

Максимальное механическое напряжение по оси 3:

$$T_{3\max} = d_{33}E_3/s_{33}^E.$$

На прессе УММ-5 экспериментально исследован многослойный пьезоактюатор из пьезокерамики ЦТС с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, спеченный из пьезопластин $D = 15$ мм, $\delta = 0,6$ мм, $n = 25$, где D , δ , n — соответственно диаметр, толщина, число пьезопластин. Результаты измерений упругих податливостей для многослойного пьезоактюатора $s_{33}^D = 2,7 \cdot 10^{-11}$ м²/Н при разомкнутых электродах и постоянной индукции D и $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11}$ м²/Н при замкнутых электродах и постоянной напряженности электрического поля E . Механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора получены, соответственно, при напряженности электрического поля $E_3 = 200; 400$ кВ/м для характеристик 1 и 2 на рис. 1 и при механических напряжениях $T_3 = 0$;

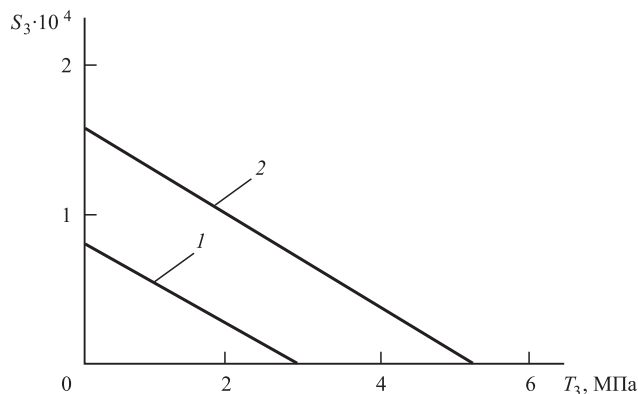


Рис. 1. Механическая характеристика многослойного пьезоактюатора для наномехатроники при продольном пьезоэффекте

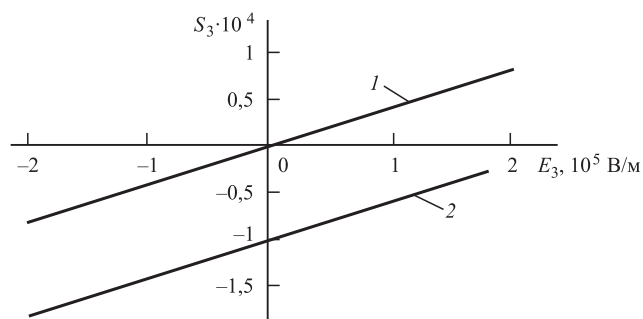


Рис. 2. Регулировочная характеристика многослойного пьезоактюатора для наномехатроники при продольном пьезоэффекте

3,3 МПа для характеристик 1 и 2 на рис. 2. Отклонение расчетных статических характеристик от экспериментальных характеристик многослойного пьезоактюатора не превышает 5 %.

Для многослойного пьезоактюатора для наномехатроники находим максимальные силу F_{\max} и механическое напряжение $T_{j\max}$, которые развывает многослойный пьезоактюатор при обобщенном пьезоэффекте при питании от источника напряжения:

$$F_{\max} = U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E};$$

$$T_{j\max} s_{ij}^E = E_m d_{mi}.$$

Следовательно, имеем выражения:

$$F_{\max} = E_m d_{mi} S_0 / s_{ij}^E;$$

$$T_{j\max} = E_m d_{mi} / s_{ij}^E.$$

В общем виде для многослойного пьезоактюатора для наномехатроники коэффициент электромеханической связи [3–11]:

$$k_{mi} = d_{mi} / \sqrt{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E},$$

где d_{mi} — пьезомодуль; ε_{mi}^T — диэлектрическая проницаемость при $T = \text{const}$; s_{ij}^E — упругая податливость при $E = \text{const}$; $i = 1, 2, \dots, 6$; $j = 1, 2, \dots, 6$; $m = 1, 2, 3$ — индексы.

При поперечном, продольном и сдвиговом пьезоэффекте в многослойном пьезоактюаторе имеем выражения для коэффициента электромеханической связи в виде:

$$k_{31} = d_{31} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{11}^E};$$

$$k_{33} = d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E};$$

$$k_{15} = d_{15} / \sqrt{\varepsilon_{11}^T s_{55}^E}.$$

Соответственно, максимальную силу F_{\max} многослойного пьезоактюатора с учетом прямого пьезоэффекта при питании от источника тока определяем по формуле

$$F_{\max} = U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E} + F_{\max} \frac{1}{S_0} d_{mi} n S_p \frac{1}{\varepsilon_{mk}^T n S_p / \delta} \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E},$$

где S_p — поперечное сечение обкладки конденсатора пьезослоя многослойного пьезоактюатора.

Следовательно, получаем выражения:

$$\frac{F_{\max}}{S_0} s_{ij}^E \left(1 - \frac{d_{mi}^2}{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E} \right) = E_m d_{mi};$$

$$k_{mi}^2 = \frac{d_{mi}^2}{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E};$$

$$T_{j \max} s_{ij}^D = E_m d_{mi};$$

$$s_{ij}^D = (1 - k_{mi}^2) s_{ij}^E = k_s s_{ij}^E;$$

$$k_s = 1 - k_{mi}^2 = s_{ij}^D / s_{ij}^E, k_s > 0;$$

$$F_{\max} = E_m d_{mi} S_0 / (s_{ij}^E k_s) = E_m d_{mi} S_0 / s_{ij}^D;$$

$$T_{j \max} = E_m d_{mi} / s_{ij}^D,$$

где k_s — коэффициент изменения упругой податливости.

Значения упругих податливостей жесткостей многослойных пьезоактюаторов для наномехатроники соответствуют неравенствам

$$s_{ij}^E > s_{ij}^D, C_{ij}^E < C_{ij} < C_{ij}^D, s_{ij}^E / s_{ij}^D \leq 1, 2,$$

где $C_{ij}^E = S_0 / (s_{ij}^E l)$ — жесткость многослойного пьезоактюатора с управлением по напряжению;

$C_{ij}^D = S_0 / (s_{ij}^D l)$ — жесткость многослойного пьезоактюатора с управлением по току;

$C_{ij} = S_0 / (s_{ij} l)$ — жесткость многослойного пьезоактюатора в общем виде.

Получаем максимальную силу многослойного пьезоактюатора при управлении многослойного пьезоактюатора от источника питания с конечным сопротивлением:

$$F_{\max} = U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E} + F_{\max} \frac{1}{S_0} d_{mi} n S_p \frac{1}{\varepsilon_{mk}^T n S_p / \delta} k_u \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E},$$

следовательно, имеем выражения:

$$\frac{F_{\max}}{S_0} s_{ij}^E \left(1 - \frac{d_{mi}^2 k_u}{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E} \right) = E_m d_{mi};$$

$$T_{j \max} (1 - k_{mi}^2 k_u) s_{ij}^E = E_m d_{mi}, 0 \leq k_u \leq 1,$$

где k_u — коэффициент управления от электрического источника питания, при управлении многослойного пьезоактюатора от источника тока $k_u|_{R \rightarrow \infty} = 1$, и при управлении пьезоактюатора от источника напряжения $k_u|_{R \rightarrow 0} = 0$.

Соответственно, формула для определения упругой податливости имеет вид:

$$s_{ij} = (1 - k_{mi}^2 k_u) s_{ij}^E = k_s s_{ij}^E;$$

$$k_s = 1 - k_{mi}^2 k_u, k_s > 0;$$

$$(1 - k_{mi}^2 k_u)|_{R \rightarrow \infty} \leq k_s \leq 1|_{R \rightarrow 0},$$

$$k_s|_{R \rightarrow \infty} = 1 - k_{mi}^2, k_s|_{R \rightarrow 0} = 1.$$

Из уравнения обратного пьезоэффекта (1) получаем относительное перемещение многослойного пьезоактюатора, армированного упругим элементом, при управлении по напряжению в виде:

$$\Delta l / l = d_{33} U / \delta - s_{33}^E F / S_0. \quad (4)$$

Перемещение многослойного пьезоактюатора, армированного упругим элементом:

$$\Delta l = d_{33} n U - F / C_{33}^E,$$

$$F = F_0 + C_a \Delta l + C_e \Delta l, F_0 = T_a S_0,$$

где F — внешняя сила;

F_0 — сила предварительного начального поджатия упругим элементом;

T_a — механическое напряжение первоначально-
го армирования в многослойном пьезоактуаторе;
 C_a — жесткость армирующего элемента;
 C_e — жесткость нагрузки.

Для многослойного пьезоактуатора получаем выражение

$$\Delta l [1 + (C_a + C_e) / C_{33}^E] = d_{33} n U - F_0 / C_{33}^E.$$

Соответственно, выражение для перемещения армированного многослойного пьезоактуатора с управлением по напряжению при упругой нагрузке имеет вид:

$$\Delta l = \frac{\Delta l_{\max}}{1 + (C_a + C_e) / C_{33}^E} - \Delta l_0, \quad (5)$$

$$\Delta l_0 = \frac{T_a s_{33}^E l}{1 + (C_a + C_e) / C_{33}^E},$$

где Δl_0 — начальное перемещение торца многослойного пьезоактуатора.

Из уравнения (5) перемещение армированного многослойного пьезоактуатора при упругой нагрузке после начальной юстировки:

$$\Delta l = \frac{\Delta l_{\max}}{1 + (C_a + C_e) / C_{33}^E}.$$

Перемещение армированного многослойного пьезоактуатора без нагрузки при $C_e = 0$ получаем в виде:

$$\Delta l = \frac{\Delta l_{\max}}{1 + C_a / C_{33}^E}.$$

При применении армирующего элемента в виде шпильки, пружины или мембраны жесткостью $C_a = 0,1 C_{33}^E$ имеем перемещение армированного многослойного пьезоактуатора $\Delta l = 0,9 \Delta l_{\max}$, а при использовании армирующего элемента жесткостью $C_a = C_{33}^E$ получаем $\Delta l = 0,5 \Delta l_{\max}$.

Рассмотрим характеристики многослойного пьезоактуатора в динамическом режиме. В результате применения преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях к волновому уравнению [4, 6, 11, 15] записываем обыкновенное дифференциальное уравнение для пьезоактуатора

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \gamma^2 \Xi(x, p) = 0, \quad (6)$$

где $\Xi(x, p)$ — преобразование Лапласа перемещения пьезоактуатора;

x — координата;

p — оператор;

$\gamma = p/c^E + \alpha$ — коэффициент распространения;
 c^E — скорость звука при $E = \text{const}$;
 α — коэффициент затухания волны.

Из уравнения (6) при одном закрепленном торце многослойного пьезоактуатора при $x = 0$, $M_1 \rightarrow \infty$ и $\Xi_1(p) = 0$ получаем выражения

$$\Xi(x, p) = \frac{\Xi_2(p) \text{sh}(x\gamma)}{\text{sh}(l\gamma)};$$

$$\left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{\Xi_2(p)\gamma}{\text{th}(l\gamma)},$$

где $\Xi_2(p)$ — преобразование Лапласа перемещения второго торца пьезоактуатора.

Соответственно, для многослойного пьезоактуатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке записываем выражение

$$\frac{\Xi_2(p)\gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi_2(p)s_{33}^E M_2 p^2}{S_0} + \frac{\Xi_2(p)s_{33}^E C_e}{S_0} = d_{33} E_3(p), \quad (7)$$

где $E_3(p)$ — преобразование Лапласа напряженности электрического поля по оси 3.

Из уравнения (7) получаем передаточную функцию многослойного пьезоактуатора

$$W_E(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} =$$

$$= \frac{d_{33}}{s_{33}^E M_2 p^2 / S_0 + \gamma \text{th}(l\gamma) + s_{33}^E C_e / S_0}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) с учетом жесткости многослойного пьезоактуатора при продольном пьезоэффекте записываем передаточную функцию многослойного пьезоактуатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке

$$W_E(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} =$$

$$= \frac{d_{33} l}{M_2 p^2 / C_{33}^E + l \gamma \text{cth}(l\gamma) + C_e / C_{33}^E}. \quad (9)$$

Из уравнения (9), используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем выражение передаточной функции пьезоактуатора при продольном пьезоэффекте для $M_2 \gg m$ и упругоинерционной нагрузке для диапазона частот $0 < \omega < 0,01 c^E / l$

$$W_U(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} =$$

$$= \frac{d_{33} n}{(1 + C_e / C_{33}^E) (T_{33}^2 p^2 + 2T_{33} \xi_{33} p + 1)}, \quad (10)$$

$$T_{33} = \sqrt{M_2 / (C_e + C_{33}^E)},$$

$$\xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}^E}{3c^E \sqrt{M_2 (C_e + C_{33}^E)}},$$

где $U(p)$ — преобразование Лапласа напряжения на электродах многослойного пьезоактюатора;

n — число пьезослоев в пьезоактюаторе;

T_{33} , ξ_{33} — постоянная времени и коэффициент затухания многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Из уравнения (10) получаем переходную характеристику многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте:

$$\xi_2(t) = \xi_m \left(1 - \frac{e^{-\frac{\xi_{33} t}{T_{33}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}} \sin(\omega_{33} t + \varphi_{33}) \right),$$

$$\xi_m = \frac{d_{33} n U_m}{(1 + C_e / C_{33}^E)}, \quad \omega_{33} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{T_{33}},$$

$$\varphi_{33} = \arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{\xi_{33}} \right),$$

где t — время.

Для многослойного пьезоактюатора из пьезо-керамики ЦТС при $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В; $n = 12$; $U_m = 50$ В; $M_2 = 1$ кг; $C_{33}^E = 2 \cdot 10^7$ Н/м; $C_e = 0,4 \cdot 10^7$ Н/м имеем $\xi_m = 200$ нм, $T_{33} = 0,2$ мс. Отклонение расчетных характеристик перемещения многослойного пьезоактюатора от экспериментальных характеристик не превышает 5 %.

В работе определены механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора для наномехатроники. Получены в статическом и динамическом режимах характеристики многослойного пьезоактюатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Афонин С.М.** Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41—42.

2. **Многослойные** пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения / В.К. Казаков, В.М. Климашин, В.Г. Никифоров и др. // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 62—65.

3. **Физическая акустика.** Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

4. **Афонин С.М.** Структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора нано- и микроперемещений // Наноинженерия. 2014. № 9. С. 33—40.

5. **Афонин С.М.** Структурно-параметрическая модель многослойного электромагнитоупругого актюатора пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Наноинженерия. 2014. № 10. С. 27—34.

6. **Afonin S.M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement // Chapter 9 in the book. Editor I.A. Parinov. Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications. New York: Nova Science Publisher. 2015. P. 225—242.

7. **Никольский А.А.** Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.

8. **Панич А.Е.** Пьезокерамические актюаторы. Ростов на Дону: Южный федеральный университет, 2008. 159 с.

9. **Ленк А.** Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 286 с.

10. **Schultz J., Ueda J., Asada H.** Cellular actuators. Oxford: Butterworth-Heinemann Publisher, 2017. 382 p.

11. **Afonin S.M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system // Chapter 8 in the book. Editors Z. Bartul, J. Trenor. Advances in Nanotechnology. Vol. 19. New York: Nova Science Publisher, 2017. P. 259—284.

12. **Афонин С.М.** Статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 5. С. 230—234.

13. **Афонин С.М.** Оптимальное управление пьезоактюатором нано- и микроперемещений // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. № 7. С. 329—332.

14. **Афонин С.М.** Статические и динамические характеристики секционного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. № 5. С. 237—240.

15. **Афонин С.М.** Пьезопривод нано- и микроперемещений. М.: МИЭТ, 2003. 84 с.

16. **Афонин С.М.** Прецизионные электромеханические системы. М.: МИЭТ, 2005. 120 с.

**Третья Международная научно-техническая конференция
"Павловские чтения",
посвященная 120-летию со дня рождения
члена-корреспондента АН СССР
ПАВЛОВА Игоря Михайловича**

Дата проведения:

26—27 ноября 2020 года

Место проведения:

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН)

Вопросы, рассматриваемые в рамках конференции:

1. Общие вопросы обработки металлов давлением
2. Прогрессивные технологии пластической деформации
3. Создание новых материалов методами пластической деформации

Организаторы конференции:

- Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
- НИТУ "МИСиС"
- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, ОХНМ РАН, РФФИ

Материалы конференции будут опубликованы на электронном носителе и выданы участникам конференции при регистрации.

Лучшие доклады участников будут рекомендованы к публикации в ведущих научно-технических и производственных журналах, рекомендованных ВАК РФ: "Заготовительные производства в машиностроении", "Металлы", "Сталь", "Технология металлов", "Известия вузов", "Черная металлургия", "Цветные металлы", "Перспективные материалы", "Деформация и разрушение".

Контакты:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: Москва, 119334, Ленинский проспект, д. 49

Телефоны: +7 (499) 135-96-62, (499) 135-86-51

Сайт: <https://www.pavlov.imetran.ru>

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 07.05.2020 г. Подписано в печать 23.06.2020 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru

Министерство науки и высшего образования РФ
Донской государственный технический университет
Брянский государственный технический университет
Воронежский государственный технический университет

Научный симпозиум
технологов-машиностроителей

Фундаментальные основы физики, химии и механики научноёмких технологических систем формообразования и сборки изделий

п. Дивноморское
22—26 сентября 2020 г.



Направления работы симпозиума:

1. Научные основы научноёмких и виброволновых технологий обработки, сборки и нанесения покрытий высокотехнологичных изделий
2. Интеллектуальные технологии в машиностроении
3. Технологическое обеспечение качества изделий в условиях комбинированного механо-физико-химического воздействия
4. Проблемы прочности, надёжности и разрушения деталей машин, элементов конструкций и технологических систем
5. Подготовка и повышение квалификации специалистов для научноёмких технологий в машиностроении

Адрес организационного комитета:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ,
кафедра "Технология машиностроения"
НИИ "Вибротехнология", к. 2-309
Тел. (863)2738-725, 2738-360,
E-mail: vibrotech@mail.ru; va.lebidev@yandex.ru

RUS WELD

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



19-22.10.20

Международная специализированная выставка
«Оборудование, технологии и материалы
для процессов сварки и резки»

www.rusweld-expo.ru

Организатор



Под патронатом



При поддержке



Реклама 12+

