ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13
2017
№ 5 (149)
май

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.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
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.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
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.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.

Редакция:
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159,** "Пресса России" **39269,** "Почта России" **60252)** или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
Факс: (499) 269-48-97.
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

Гадалов В.Н., Ковалев С.В., Ворначева И.В., Филонович А.В., Розин А.Ю. Повышение износостойкости порошковых титановых сплавов выбором состава легирующих элементов 195

Нафиков М.З., Загиров И.И., Юнусбаев Н.М., Наталенко В.С., Шакиров И.Р. Контактная приварка растянутой присадочной проволоки 198

Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Данилюк К.А. Математическая модель движения частицы в металлическом расплаве 205

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации 213

Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Кошман В.П. Применение порошков ВЗК для плазменной наплавки уплотнительных и трущихся поверхностей арматуры АЭУ 218

Тарасова Т.В., Кузьмин С.Д., Белашова И.С., Прокофьев М.В., Белоконь Т.Д. Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали 221

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Гибкий технологический модуль для модификации свойств поверхностного слоя малоразмерных деталей 226

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Афонин С.М. Статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов 230

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Влияние кинематики процессов поверхностного пластического деформирования на качество упрочненного слоя 235

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, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2017

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 13
2017
№ 5 (149)
May

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
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
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. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.A. SHULOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159,** "Pressa Rossii" **39269,**"Pochta Rossii" **60252)** or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
Fax: (499) 269-48-97
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

Gadalov V.N., Kovalev S.V., Vornacheva I.V., Filonovich A.V., Rozin A.Yu. Increase of wear resistance of powder titanic alloys by a choice of composition of alloying elements ... 195

Nafikov M.Z., Zagirov I.I., Yunusbaev N.M., Natalenko V.S., Shakirov I.R. Contact welding of a stretched filler wire ... 198

Yachikov I.M., Vdovin K.N., Danilyuk K.A. Mathematical model of motion of particles in a metal melt ... 205

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V., Pleshakova E.S. Composite structures, formed at the low temperature plasma hardening, self-organization during operation ... 213

Vytnov Yu.V., Aleksandrin A.G., Golubev S.V., Gerasimov E.A., Koshman V.P. Application of V3K powders for plasma surfacing of sealing and friction surfaces of nuclear power unit valves ... 218

Tarasova T.V., Kuzmin S.D., Belashova I.S., Prokofiev M.V., Belokon T.D. Research of the influence of the laser radiation effect on the microstructure and properties of corrosion-resistant steel ... 221

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Gruzdev A.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. The flexible technological module for modification of properties of the blanket of small-sized details ... 226

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Afonin S.M. Statics and dynamic characteristics of piezoactuators for nano- and micro-manipulators ... 230

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Zaides S.A., Ngo Cao Cuong. Influence of kinematics of surface plastic deformation on surface layer quality ... 235

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, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2017

УДК 621.791.4

[1]В.Н. Гадалов, [2]С.В. Ковалев, [1]И.В. Ворначева, [1]А.В. Филонович, [1]А.Ю. Розин
([1]Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
[2]Курская государственная сельскохозяйственная академия)
E-mail: gadalov_vn@yandex.ru

Повышение износостойкости порошковых титановых сплавов выбором состава легирующих элементов

Изложен принцип повышения износостойкости титанового сплава, заключающийся во введении специальных легирующих элементов, не оказывающих отрицательного влияния на прочность и пластичность и повышающих износостойкость в результате образования при трении оксидных пленок, предотвращающих схватывание трущихся поверхностей.

Ключевые слова: *титановый сплав, износостойкость, термическая обработка, легирующий элемент.*

The principle of improving the wear resistance of titanic alloy, comprising administering to a special alloying elements do not adversely impact on the strength and ductility and increase the wear resistance as a result of education is set out in friction oxide films to prevent seizure of rubbing surfaces is described.

Keywords*: titanic alloy, wear resistance, heat treatment, alloying element.*

Современная промышленность испытывает возрастающую потребность в материалах с заранее заданными свойствами. В значительной мере это относится к композиционным материалам с металлической порошковой матрицей с нанесенными на нее покрытиями. Интерес к ним обусловлен повышенной износостойкостью, низким коэффициентом трения и возможностью придания ряда других необходимых эксплуатационных свойств.

В общей проблеме надежности и долговечности машин и механизмов одно из главных мест принадлежит вопросам трения и износа. Особенно эти вопросы важны для титана. Титан при трении склонен к схватыванию и образованию задиров, что обусловливает высокие коэффициент трения и износ. Высокий износ титана объясняется прочностью его естественных оксидных пленок, а также высокой ползучестью [1].

Известные способы повышения износостойкости титана сводятся главным образом к повышению его твердости, что достигается химико-термической обработкой поверхностных слоев либо введением в материал легирующих элементов и твердых включений.

Проведено исследование процесса электроискрового легирования титана электродами из различных сплавов, результаты которого открывают значительные перспективы для формирования покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами [2].

Высокая хрупкость твердых слоев не допускает применение больших нагрузок при трении.

Введение в титан легирующих элементов и повышение за счет легирования твердости в пределах 32...41 HRC почти не влияют на улучшение его износостойкости. Среди серийных литых титановых сплавов нет материала, который удовлетворял бы требованиям повышенной износостойкости.

К настоящему времени созданы износостойкие титановые порошковые материалы путем введения противозадирных добавок (твердых включений) и обеспечения режима изготовления материала, при котором исключается или ограничивается взаимодействие вводимых включений с титаном.

В исследовании [3] показана связь механических свойств титанового сплава Ti—6Al—6V—2Sn с его структурой, измененной путем термообработки. Отмечается значительное повышение прочности, достигнутое путем подбора оптимальных температур закалки и старения.

Известен патент [4] на износостойкий титановый материал, содержащий от 10 до 60 % мас. твердого вещества и 40...90 % мас. титана или титанового сплава,

up_517.indd 195 27.04.2017 12:10:04

обладающего твердостью выше 50 HRC, предпочтительно 60...70 HRC. Под твердым веществом понимают карбиды, нитриды, бориды, оксиды металлов. Твердое вещество должно повышать износостойкость и твердость титанового сплава, но не должно реагировать при спекании с титаном и легирующими элементами сплава. Изготовление титанового сплава осуществляется прессованием смеси титана (или его сплава) и твердого вещества, спеканием прессовок в вакууме. Высокая твердость данного материала определяет область его применения как твердого сплава.

На Украине [5] разработаны порошковые износостойкие титановые материалы конструкционного назначения ИТ20 и ИТ16М с повышенной прочностью (450...550 и 500...550 МПа соответственно) и удовлетворительной пластичностью (70...80 и 90...110 кДж/м^2 соответственно).

Материалы получали из шихты на основе порошка титана методом однократного холодного прессования и спекания в вакууме. При последующей дополнительной обработке спеченных заготовок давлением — гидроэкструзией, горячей штамповкой — могут быть получены более высокие механические свойства.

Характерной особенностью данных материалов является невысокая твердость (180...220 НВ) наряду с высокой износостойкостью при работе в паре с более твердыми материалами (закаленными сталями, азотированным и борированным титаном).

В работе [6] даны рекомендации по режимам лазерной обработки электроискровых покрытий с последующей поверхностной пластической деформацией для порошковых титановых сплавов.

Исходя из изложенного и результатов предварительных собственных исследований нами в основу создания порошкового титанового сплава положен принцип повышения износостойкости материала, заключающийся во введении легирующих элементов, не оказывающих отрицательного влияния на прочность и пластичность титана и повышающих износостойкость материала в результате образования при трении оксидных пленок, предотвращающих схватывание трущихся поверхностей. Основное требование к легирующему элементу — его высокое сродство к кислороду (по значению близкое сродству титана к кислороду), что необходимо для участия легирующего элемента в образовании оксидных пленок при трении в целях изменения состава, а следовательно, и свойств хрупких естественных оксидных пленок на титановых поверхностях. Такими легирующими элементами являются Mo, V, Cr, Zr и Al. Введение молибдена в титановый сплав сопровождается образованием при трении оксидов и гидрооксидов молибдена, обеспечивающих повышенную износостойкость материала при повышенных температурах [7].

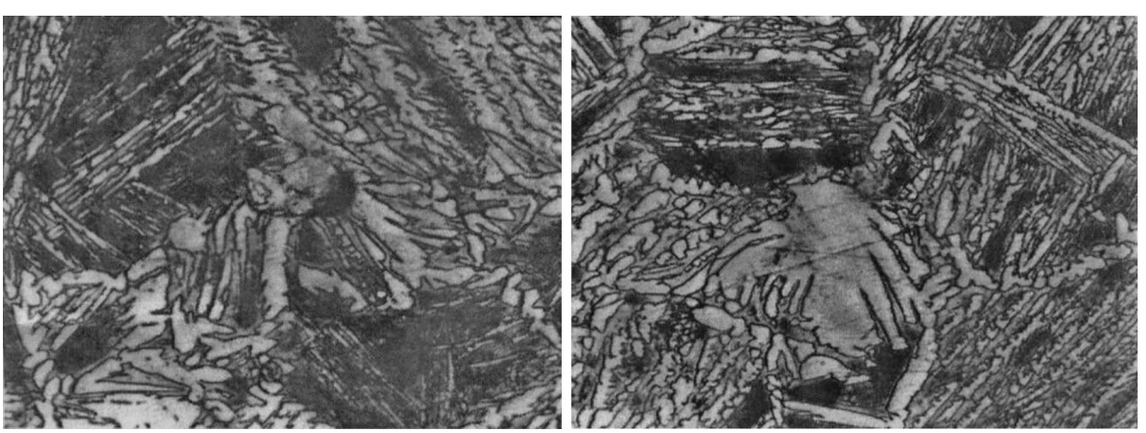
Участие хрома в формировании вторичных структур при трении титанового сплава описано в [8, 9].

Ванадий, являясь, как и Mo, Fe, Cr, β-стабилизатором, понижает температуру аллотропического превращения, расширяет область β-фазы, а алюминий, повышая эту температуру, расширяет область α-фазы, образует α-твердый раствор алюминия в Ti_α.

Роль циркония как нейтрального материала для упрочнения сводится к модифицирующему воздействию при переплавке сплавов: взаимодействуя с остаточным кислородом, Zr при спекании образует оксид ZrO_2, что улучшает жаропрочные свойства, одновременно уменьшая пластичность. Такое действие оксидов, вероятно, связано со стабилизирующим влиянием кислорода и металла оксидов на α-фазу, которая является более жаростойкой и термически стабильной, но хрупкой.

В предотвращении схватывания трущейся пары при увеличении давления возрастает роль оксидных пленок в узком поверхностном слое [1].

Исходной композицией для холодного прессования и последующего спекания служила шихта следующего химического состава, % мас.: Al — 5,5...7,0; Zr — 1,4...2,5; Mo — 0,5...1,8; V — 0,8...2,3; Ti — остальное.



Микроструктура спеченного сплава ТЮ7М2Ф2Ц2, фрагменты центральных участков (×500)

up_517.indd 196 27.04.2017 12:10:06

После прессования порошка на оптимизированном режиме [10]: при давлении 1200 МПа и спекании при температуре 1523 К в течение 3 ч в вакууме 0,0133 МПа размер частиц составил от 0,5 до 0,3 мкм. В соответствии с принятыми стандартами спеченный титановый сплав данного химического состава маркируется как сплав типа ТЮ7М2Ф2Ц2. Микроструктура сплава после спекания представлена на рисунке.

Режимы термических обработок титановых сплавов, как компактных, так и спеченных, разработаны в основном на эмпирической основе. При проведении термической обработки спеченного материала преследуют две цели: снять внутренние напряжения (особенно в деталях с толстым сечением) и создать микроструктуры, определяющие повышенные свойства по сравнению с исходными микроструктурами.

Исходя из общих принципов термической обработки титановых сплавов для спеченного сплава ТЮ7М2Ф2Ц2 приняли следующий режим термической обработки: отжиг при температуре 723...823 К 1,5 ч и охлаждение с печью до комнатной температуры. После этого сплав имеет следующие механические свойства при комнатной температуре: $\sigma_в$ = 1460 МПа, δ = 12 %, ψ = 28 %, ударную вязкость 540 кДж/м^2 и относительную плотность 98...99,6 %, что позволяет использовать его для специзделий в различных отраслях машиностроения.

Структура сплава после такой термообработки представлена мартенситной α- и ω-фазой с размером областей когерентного рассеяния от 300 до 600 Å. Хотя возникновения мартенситной α-фазы обычно избегают, в тех случаях, когда внутренние закалочные напряжения не вызывают опасений, такую структуру можно подвергать отпуску-отжигу.

В то же время спеченный титановый сплав ТЮ7М2Ф2Ц2 имеет ряд недостатков: кроме пористости 0,2...0,4 % он обладает низкой шероховатостью ($Ra \approx$ 3,7...6,2 мкм) и склонен к "налипанию" при трении, что требует нанесения "гибридных" покрытий [11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М., МИСИС, 2001. 416 с.

2. **Электроискровое** легирование поверхности сплавов на основе никеля и титана / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Н.М. Игнатенко и др. // Изв. Юго-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 9—20.

3. **Влияние** термообработки на структуру и механические свойства сплава Ti—6Al—6V—2Sn / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, С.В. Ковалев и др. // Изв. Юго-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии. 2016. № 3 (20). С. 37—42.

4. **Пат. 2046614 ФРГ, 40 В-15/00, С 22 С 15/0.** Титановый сплав, полученный методом порошковой металлургии / Фирма FFGT. Опубл. 17.08.72.

5. **Радомысельский И.Д., Петрова А.М., Титаренко С.В.** Износостойкие материалы на основе титана // Информ. письмо № 3. Киев, ИПМ АН УССР, 1976. 3 с.

6. **Комбинированная** электрофизическая обработка порошковых титановых сплавов / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева и др. // XXVI Междунар. конф. "Лазеры в науке, технике, медицине": Сб. науч. тр. Т. 27. М., МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2016. С. 45—50.

7. **Структурные** и фазовые превращения, происходящие в спеченных титановых материалах при трении / И.Д. Радомысельский, В.Н. Климченко, А.М. Петрова и др. // Порошковая металлургия. 1982. № 5. С. 66—70.

8. **Изучение** трения и износа спеченных титановых материалов / И.Д. Радомысельский, С.В. Титаренко, А.М. Петрова и др. // Порошковая металлургия. 1977. № 6. С. 73—78.

9. **Петрова А.М., Полотай В.В.** Влияние содержания хрома на триботехнические свойства титаново-хромовых сплавов // Порошковая металлургия. 1987. № 5. С. 51—56.

10. **Исследование** и оптимизация процессов порошковой металлургии титановых сплавов по данным упругого последействия и внутреннего трения / В.Н. Гадалов, И.В. Павлов, Ю.В. Болдырев и др. // Изв. Курского гос. техн. ун-та. 2004. № 2 (13). С. 27—30.

11. **Улучшение** служебных характеристик порошковых титановых сплавов гибридными покрытиями / В.Н. Гадалов, И.В. Павлов, М.И. Руднев и др. // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: Рег. сб. тр. Вып. 5. Курск: КГТУ, 2003. С. 197—206.

up_517.indd 197 27.04.2017 12:10:06

УДК 621.791/.792

М.З. Нафиков, И.И. Загиров, Н.М. Юнусбаев, В.С. Наталенко, И.Р. Шакиров
(Башкирский государственный университет, г. Уфа)
E-mail: nafikovmz@rambler.ru

Контактная приварка растянутой присадочной проволоки

Предлагается приваривать присадочную проволоку к поверхности детали в растянутом состоянии. Показано, что проволока получает дополнительную осевую деформацию до 38...40 %, увеличивается на 40...50 % размер участка контакта, на котором образуется сварное соединение. Пропорционально увеличению размера зоны образования соединения растет скорость приварки присадочной проволоки. Увеличенная степень относительного перемещения присадочного металла по ранее нанесенному смежному валику позволяет устранить недостаток процесса электроконтактной приварки стальных проволок — непровар в стыках сварных швов.

Ключевые слова: *приварка, проволока, контакт, усилие, деформация, сварное соединение.*

It is proposed to weld a filler wire on the surface of the part in the stretched condition. It is shown that the wire receives an additional axial deformation to 38...40 %, increasing the size of the contact area to 40...50 %, in which the welded joint is formed. Proportionally with the increasing size of the zone connection increases the speed of welding of a filler wire. Increased relative motion of the filler metal previously deposited to the adjacent weld bed eliminates the disadvantage of the process of electrocontact welding of wires — lack of fusion in the joints of the welds.

Keywords: *welding, wire, contact, forcing, deformation, welded joint.*

Введение

Электроконтактная приварка стальных проволок (ЭКПП) — эффективный способ восстановления наружных цилиндрических поверхностей с небольшими (не более 0,8...1,0 мм на сторону) износами [1—3]. Этот технологический процесс дает возможность формировать термомеханически упрочненное металлопокрытие с минимальными припусками на последующую механическую обработку. Проволоки недороги и недефицитны, выпускаются в широком ассортименте по химическому составу и диаметрам.

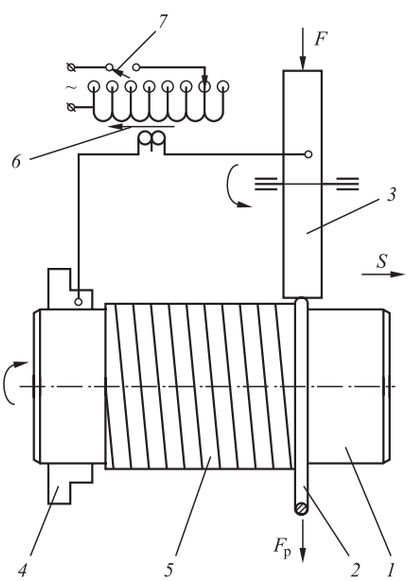


Рис. 1. Приварка по винтовой линии растянутой присадочной проволоки:
1 — деталь; *2* — присадочная проволока; *3* — ролик-электрод; *4* — патрон; *5* — металлопокрытие; *6* — сварочный трансформатор; *7* — прерыватель тока; *F* — усилие на ролике-электроде; $F_р$ — дополнительная растягивающая сила

При ЭКПП образование сварного соединения покрытия с деталью происходит в твердой фазе, поэтому прочность приварки определяется интенсивностью происходящих в стыке деформационных процессов. Сама восстанавливаемая деталь при приварке деформируется несущественно, поэтому прочность сварного соединения определяется деформацией присадочной проволоки. Увеличить деформацию присадочной проволоки можно путем воздействия на нее дополнительного усилия.

Цель исследования — теоретически оценить влияние дополнительного растяжения проволоки при приварке на прочность формируемого сварного соединения и разработать рекомендации по проектированию новых технологических процессов (способов) ЭКПП.

Использовались преимущественно аналитические методы исследования.

Оборудование и материалы

Приварку проволоки 1,8 ПК-2 ГОСТ 9389—75 диаметром 1,8 мм на цилиндрические образцы диаметром 50 мм из стали 45 ГОСТ 1050—2013 проводили на установке электроконтактной наплавки 011-1-02 конструкции ГОСНИТИ. Однозаходную приварку проволоки осуществляли по винтовой линии в соответствии с технологической схемой, показанной на рис. 1. Режим

up_517.indd 198 27.04.2017 12:10:06

приварки выбирался из условия обеспечения максимально достижимой (44...45 %-ной) осевой деформации присадочной проволоки, что позволяет получить прочность сварного соединения, равную прочности основного металла вала [2, 4].

Для изучения контактов присадочного и основного металлов из пластичного металла (свинца) изготавливали модели присадки цилиндрической формы.

Наличие трещин и непроваров в сварных швах выявляли магнитопорошковым методом по методике, описанной в работе [5], а также металлографическими исследованиями по общепринятой методике.

Результаты исследования

Зависимость прочности сварного соединения от пластической деформации присадочной проволоки. Разогретая импульсом тока проволока осаживается под действием усилия ролика-электрода, при этом присадочный металл испытывает трехмерную пластическую деформацию. Некоторая часть присадки выдавливается из-под инструмента в обратную направлению затягивания проволоки сторону, в результате чего длина сформированного сварного валика оказывается существенно больше длины, затраченной на формирование этого шва проволоки. Движение находящегося в пластическом состоянии присадочного металла по поверхности детали приводит к разрушению и выносу из зоны контакта плотных гидрооксидных пленок, формирующих барьер для образования металлических связей свариваемых материалов. Оптимальным по критерию прочность сварного соединения режимам соответствуют значения осевой деформации 44...46 %.

Относительная осевая деформация присадочной проволоки

$$\varepsilon_z = (L_в - L_{пр})/L_{пр}, \qquad (1)$$

где $L_в$ — длина сварного валика (шва); $L_{пр}$ — длина проволоки, затраченной на формирование валика.

Уравнения зависимостей связей между осевой деформацией присадочной проволоки и прочностью сварного соединения, полученные после обработки показанных на рис. 2 результатов экспериментов, имеют вид [2, 6]

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= 3,28\varepsilon_z - 0,55; \\ \bar{\sigma} &= 3,04\varepsilon_z^{0,70} - 0,922, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\bar{\sigma}$ — относительная безразмерная прочность соединения, равная отношению предела прочности сварного соединения σ при конкретном исследуемом режиме ЭКПП к максимально возможной прочности σ_{max}, т. е. к пределу прочности на разрыв основного металла детали.

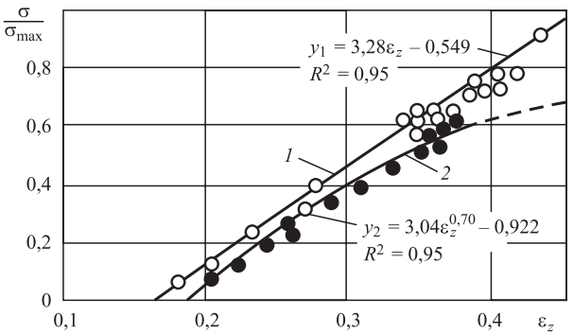


Рис. 2. Зависимости прочности сцепления металлопокрытия с основой от осевой деформации присадочной проволоки:
1 — углеродистые стали; *2* — сталь 30ХГСА

На основе установленных зависимостей разработан оперативный неразрушающий способ контроля прочности сварного соединения при ЭКПП.

Осевую деформацию можно существенно увеличить, если к присадочной проволоке при приварке прикладывать дополнительную растягивающую силу.

Толщина металлопокрытия. Толщина формируемого по винтовой линии металлопокрытия δ может быть определена без непосредственного ее измерения расчетным путем по зависимости, основанной на законе сохранения массы [1, 3],

$$\delta = \frac{\pi d^2}{4S(1+\varepsilon_z)}, \qquad (3)$$

где d — диаметр присадочной проволоки; S — шаг приварки по винтовой линии.

Площадка контакта присадочного металла с цилиндрической поверхностью детали. Приготовленные свинцовые модели размещали между деталью и инструментом и осаживали. О форме контактных площадок можно судить по фотографиям, приведенным на рис. 3, *а...в*. Видно, что при наварке цилиндрических поверхностей контактные площадки имеют четко очерченные контуры. Мы считаем, что контуры контактных площадок соответствуют полуэллиптическим кривым; такое же заключение о форме контактных площадок сделано в работах [2—4].

Размеры контактных площадок (полуоси эллипсов) определяются аналитически следующим образом. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 4, имеем очевидные геометрические соотношения

$$\cos(L_{1,2}/R_{1,2}) = (R_{1,2} - t_{1,2})/R_{1,2}; \;\; t_1 + t_2 + \delta = d. \qquad (4)$$

При больших деформациях присадочной проволоки, т. е. при режимах приварки, обеспечивающих высокую прочность сварного соединения, поперечные размеры контактных площадок со стороны детали и со

up_517.indd 199 27.04.2017 12:10:08

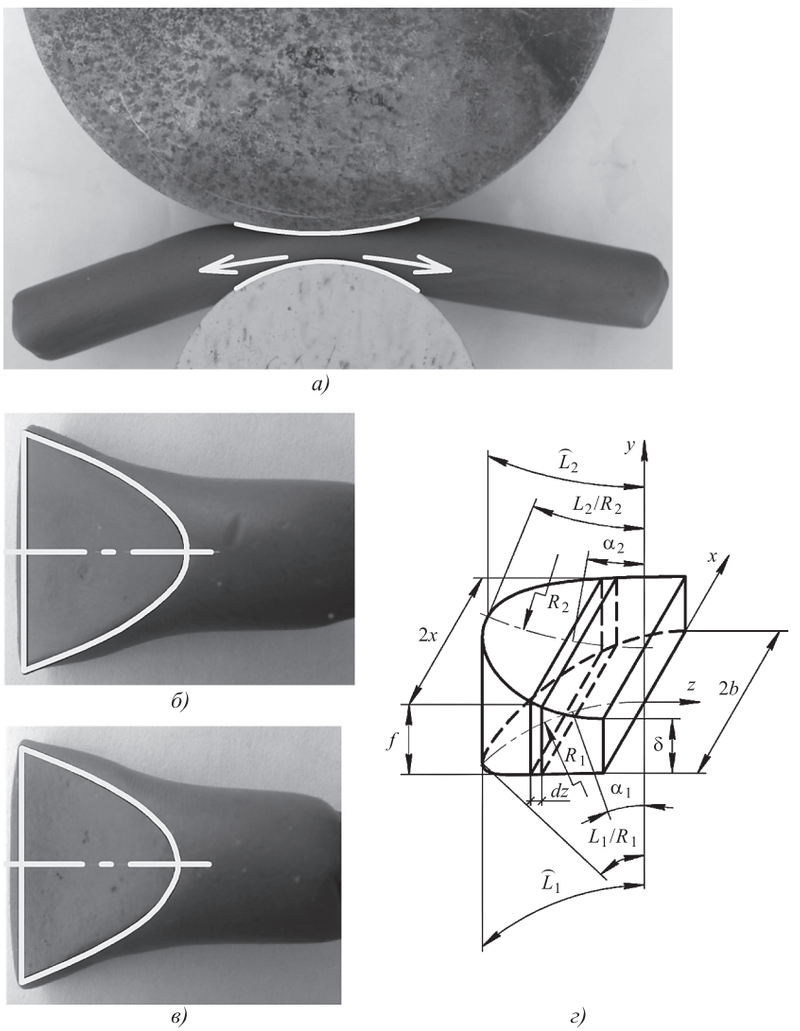


Рис. 3. Формирование контактных площадок при приварке проволоки на цилиндрическую поверхность:
а — схема осадки проволоки; *б* — контактная площадка со стороны инструмента; *в* — контактная площадка со стороны вала; *г* — единичная площадка металлопокрытия

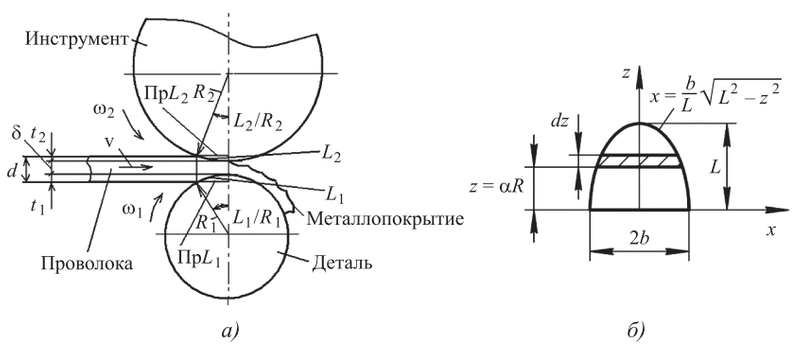


Рис. 4. Схема к расчету параметров осадки присадочной проволоки:
а — схема пластической деформации проволоки; *б* — развертка контактной площадки и боковая поверхность единичной площадки; ПрL_1, ПрL_2 — проекции дуг L_1 и L_2 контактных площадок

стороны ролика-электрода практически равны между собой, $2b_1 \approx 2b_2$.

Получить достаточно точное теоретическое решение задачи поперечной деформации присадочной проволоки не удается. Поэтому уширение присадочной проволоки определяли экспериментально и получили результаты, показанные на рис. 5.

В этих экспериментах на образцы из стали 45 различного диаметра приваривали по винтовой линии проволоки ПК-2 ГОСТ 9389—75 диаметрами *d* 1,6; 1,8; 2,2 мм. Подбором технологических режимов ЭКПП обеспечивали предельно достижимые значения относительной осевой деформации присадочных проволок ε_z = 0,44...0,46. Значения ширины сварного валика 2*b* измеряли на последнем, не перекрытом витке сварного шва.

Установлено, что ширина сварного шва зависит от диаметра восстанавливаемого вала. Искомая зависимость описывается уравнением

$$2b/d = -0{,}723\ln D_2 + 4{,}79. \qquad (5)$$

Известно [2, 4], что при равновесии единичной площадки металлопокрытия проекции площадей контактов присадочного металла со стороны вала и со стороны инструмента на плоскость *xz* между собой равны. С учетом соотношения $2b_1 = 2b_2 = 2b$ можно заключить, что проекции продольных полуосей эллиптических контактов на ось *z* между собой равны, $\text{Пр}_z L_1 = \text{Пр}_z L_2$. Тогда условие равновесия для разогретого до пластического состояния присадочного металла между деталью и инструментом будет иметь вид

$$R_1 \sin(L_1/R_1) = R_2 \sin(L_2/R_2). \qquad (6)$$

Решая совместно уравнения (4) с уравнением равновесия (6), можно определить длины дуг L_1 и L_2 и площади A_1 и A_2 контактов:

$$A_1 = \pi L_1 b/2;\ A_2 = \pi L_2 b/2. \qquad (7)$$

Применение компьютерной программы [7] облегчает расчеты.

Длины контактных дуг определяются по зависимостям (4), (6) в предположении, что деталь не вращается. Фактиче-

up_517.indd 200 27.04.2017 12:10:08

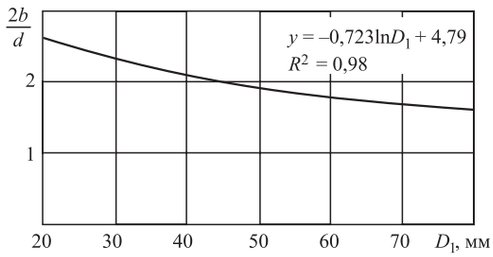


Рис. 5. Экспериментальные значения относительной ширины $2b/d$ наваренного валика при ЭКПП валов различных диаметров (при $\varepsilon_z = 0{,}44...0{,}48$; $D_2 = 300$ мм):
D_1, D_2 — диаметры вала и инструмента соответственно

ски же длины сварных площадок $L_{св}$ больше вычисленных длин L_1 и L_2 на величину $v_o t_и$:

$$L_{св} = L_1 + v_o t_и, \qquad (8)$$

где v_o — окружная скорость детали; $t_и$ — продолжительность импульса тока.

Давление по контактам на присадочный металл. На единичную площадку со стороны детали и со стороны ролика-электрода действуют усилия давления p, направленные при отсутствии трения нормально к поверхностям контактных площадок. По контактам в присадочном металле образуются сжимающие нормальные напряжения $\sigma = p$. Выясним характер распределения этих напряжений по дугам контактов.

На рис. 3, *г* изображена единичная площадка металлопокрытия, в которой выделена элементарная призма. Ее положение определяется центральными углами α_1 и α_2, причем

$$R_1 \sin\alpha_1 = R_2 \sin\alpha_2. \qquad (9)$$

Боковая поверхность элементарной призмы показана штриховкой на развертке контактной площадки, приведенной на рис. 4, *б*.

Можно предположить, что давление по контактным площадкам распределяется неравномерно. В наиболее деформированной зоне контактной площадки (правой на рис. 3, *г*, т. е. при $\alpha = 0$) оно максимальное. Давление постепенно уменьшается по дуге контактной площадки и сходит на нуль в крайней левой точке (при $\alpha = \alpha_{max} = L/R$). Характер распределения давления по дуге контактной площадки соответствует графику на рис. 6, *б*, и оно может быть описано экспоненциальным законом:

$$p = A + B\mathbf{e}^{\alpha}. \qquad (10)$$

Определим коэффициенты A и B в уравнении эвольвенты. При $\alpha = 0$ давление в контакте имеет максимально большое значение, которое обозначим как p_0. При $\alpha = \alpha_{max}$ давление $p = 0$. С учетом этих граничных условий уравнение экспоненты (10) запишется в виде

$$p = p_0 \frac{\mathbf{e}^{\alpha_{max}} - \mathbf{e}^{\alpha}}{\mathbf{e}^{\alpha_{max}} - 1}. \qquad (11)$$

В соответствии с зависимостью (11) построена приведенная на рис. 6, *б* эпюра давлений. В реальности для большинства режимов ЭКПП такая эпюра является неточной. Расчеты показывают, что при пластической деформации присадочной проволоки в наиболее деформированной части контакта контактное давление на металл присадки достигает предельно воспринимаемой разогретым металлом величины $\sigma_т$ — предела текучести стали при данной температуре ее нагрева.

Уточненная с учетом изложенного (действительная) эпюра распределения нормальных контактных напряжений по дуге контактной площадки показана на рис. 6, *в*.

Эта эпюра имеет две зоны. В нижней ее части (площадью A_1) при $0 \leqslant \alpha \leqslant \alpha_т$ нормальные напряжения постоянные,

$$\sigma = \sigma_т. \qquad (12)$$

В верхней части площадью A_2 при $\alpha_т \leqslant \alpha \leqslant \alpha_{max}$ напряжения соответствуют экспоненциальному закону:

$$\sigma = \sigma_т \frac{\mathbf{e}^{\alpha_{max}} - \mathbf{e}^{\alpha}}{\mathbf{e}^{\alpha_{max}} - \mathbf{e}^{\alpha_т}}. \qquad (13)$$

Предел текучести, равный для присадочной стали 65Г в холодном состоянии $\sigma_{т0} = 800$ МПа, уменьшается при повышении температуры нагрева проволоки и может быть определен по известной из работы [8] зависимости

$$\sigma_т = \sigma_{т0}(1 - T/T_{пл})^2, \qquad (14)$$

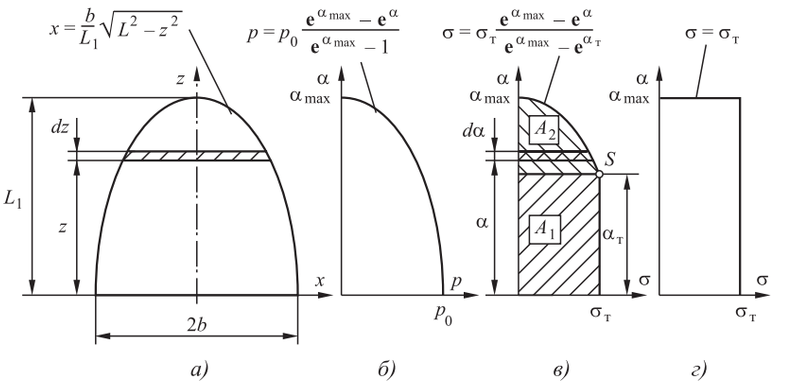


Рис. 6. Эпюры усилий на контактной площадке:
а — форма контактной площадки; *б* — эпюра давления на контактной площадке; *в* — нормальные напряжения в зоне контакта (действительная зависимость); *г* — эпюра напряжений при оптимальном режиме приварки, соответствующем $\varepsilon_z = 0{,}44...0{,}46$

up_517.indd 201 27.04.2017 12:10:08

где T — температура нагрева (≈1160...1180 °С); $T_{пл}$ — температура плавления стали. Вычисления по формуле (14) дают значения $\sigma_т = 60...65$ МПа.

Выполненные расчеты показывают, что на режимах приварки, оптимальных или близких к оптимальным по критерию прочность сварного соединения, т. е. обеспечивающих значительную осевую деформацию присадочных проволок $\varepsilon_z \geqslant 0{,}38...0{,}40$, расхождения центральных углов $\alpha_т$ и α_1^{max} несущественные. В этом случае вполне допустимо считать, что давления на контактных площадках постоянные и равны пределу текучести присадочного металла, а эпюру поверхностных напряжений на контактных площадках можно изображать как график постоянной величины (рис. 6, *г*).

Напряжения в поперечных сечениях единичных площадок. Условия образования сварного соединения. Кроме сжимающих напряжений, присадочный металл испытывает и напряжения растяжения по оси z. На рис. 3, *г* показана выделенная в объеме единичной площадки металлопокрытия элементарная призма объемом $dV = f \cdot 2xdz$. Положение выделенного элемента определяется углами α_1 и α_2. Верхняя и нижняя площадки элементарной призмы имеют площади $dA_{1,2} = dz \cdot 2x/\cos\alpha_{1,2} = R_{1,2}d\alpha_{1,2} \cdot 2x$ (см. рис. 4, *б*).

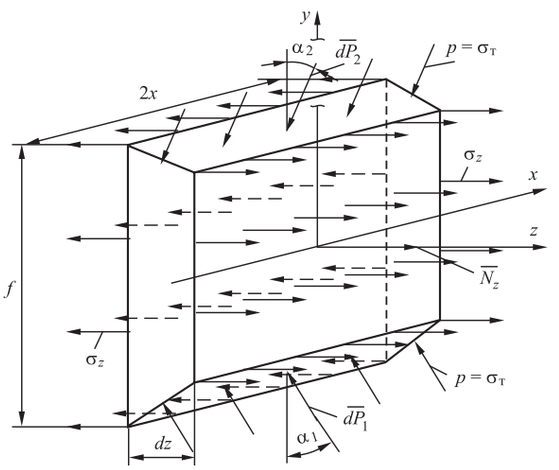


Рис. 7. Напряженное состояние элементарного объема единичной площадки металлопокрытия

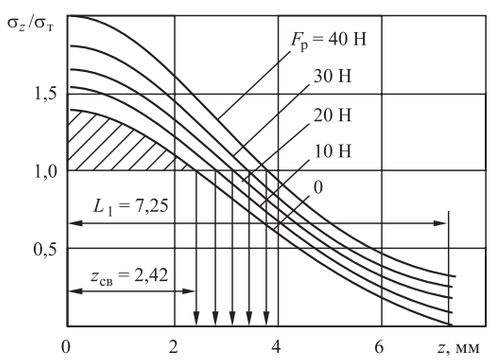


Рис. 8. Продольные растягивающие напряжения в различных сечениях контактных площадок

По верхней и нижней поверхностям выделенного элементарного объема в результате давления со стороны детали и инструмента на присадочный металл этого элемента действуют сжимающие напряжения $p = \sigma_т$.

Проекция на вертикальную ось y малой силы $dP = \sigma_т dA$, действующей на выделенный элемент единичной площадки,

$$dP_y = \sigma_т \cdot 2\frac{bR^2}{L}\sqrt{(L/R)^2 - \alpha^2}\cos\alpha d\alpha. \qquad (15)$$

Условие равновесия для присадочного металла между деталью и инструментом можно сформулировать отличным от условия (6) образом. Суммы вертикальных составляющих элементарных сил (15) на площадях контактов с деталью и с инструментом равны как между собой, так и усилию F на ролике-электроде, т. е.

$$F = 2\sigma_т \frac{b_{1,2}R_{1,2}^2}{L_{1,2}} \int_0^{L_{1,2}/R_{1,2}} \sqrt{(L_{1,2}/R_{1,2})^2 - \alpha^2}\cos\alpha d\alpha. \qquad (16)$$

По правой и левой плоскостям элементарной фигуры, показанной на рис. 7, действуют нормальные растягивающие напряжения σ_z.

Для определения действующей в сечении растягивающей силы N_z спроецируем на горизонтальную ось z элементарные силы dP и просуммируем их горизонтальные составляющие dP_z в пределах частей площадок контактов присадочного металла с деталью и инструментом, находящихся левее проведенного на рис. 3, *г* сечения:

$$\begin{aligned} dP_z &= \sigma_т \cdot 2\frac{bR^2}{L}\sqrt{(L/R)^2 - \alpha^2}\sin\alpha d\alpha; \\ N_z &= 2\sigma_т \frac{b_1R_1^2}{L_1} \int_{\alpha_1}^{L_1/R_1} \sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2}\sin\alpha_1 d\alpha_1 + \\ &+ 2\sigma_т \frac{b_2R_2^2}{L_2} \int_{\alpha_2}^{L_2/R_2} \sqrt{(L_2/R_2)^2 - \alpha_2^2}\sin\alpha_2 d\alpha_2. \end{aligned} \qquad (17)$$

Размеры f, $2x$ и площадь A_α поперечного сечения единичной площадки зависят от координаты сечения и могут быть определены по зависимостям

$$\begin{aligned} f &= R_1(1 - \cos\alpha_1) + R_2(1 - \cos\alpha_2) + \delta; \\ 2x &= 2b_1\sqrt{L_1^2 - \alpha_1^2R_1^2}/L_1; \quad A_\alpha = f \cdot 2x. \end{aligned} \qquad (18)$$

Считаем, что нормальные растягивающие напряжения σ_z равномерно распределены по поперечному сечению единичной площадки, и определяем их как

$$\sigma_z = N_z/A_\alpha. \qquad (19)$$

График зависимости распределения напряжений σ_z в различных поперечных сечениях единичной площадки металлопокрытия имеет вид, показанный на рис. 8.

up_517.indd 202 27.04.2017 12:10:08

Наибольшие растягивающие напряжения действуют в крайнем правом на рис. 3, *г* сечении сварной площадки (при $\alpha_1 = 0$), в крайнем левом поперечном сечении (при $\alpha_1 = \alpha_{1max} = L_1/R_1$) $\sigma_z = 0$. По эпюре нормальных напряжений $\sigma_z - z$ также видно, что существует зона, ограниченная участком $z_{св}$, где действующие напряжения превышают предел текучести присадочного материала при данной температуре его нагрева. Но присадочный металл, находящийся в пластическом состоянии, не может воспринимать напряжения, превышающие его предел текучести. Объяснение отсутствия разрушения присадочного металла в этой зоне наибольшей деформации и наибольших напряжений может быть только одно: на участке контактной площадки размерами $0 \leqslant z \leqslant z_{св}$ между соединяемыми поверхностями установились металлические связи, воспринимающие излишнюю растягивающую нагрузку [3, 4]. Таким образом, условие формирования сварного соединения при ЭКПП имеет вид

$$\sigma_z \geqslant \sigma_т. \qquad (20)$$

Влияние дополнительного растяжения присадочной проволоки на параметры процесса. Если, как показано на рис. 1, присадочную проволоку при приварке дополнительно растягивать силой $F_р$, осевая деформация увеличится на ε'_z по сравнению с приваркой без дополнительного усилия. Полученная экспериментально и показанная на рис. 9 зависимость $\varepsilon'_z - F_р$ близка к линейной. Замеры также показали, что при приложении растягивающей силы, не превышающей 40...50 Н, увеличение ширины $2b$ сварного валика пренебрежимо мало. Из-за уменьшения площади поперечного сечения сварного шва при действии силы $F_р$ толщина металлопокрытия δ несущественно уменьшается, длины дуг контактных площадок также увеличиваются незначительно.

В целом можно сделать заключение, что геометрические параметры сварного шва и контактов при дополнительном растяжении присадочной проволоки существенно не изменяются, что подтверждается данными таблицы.

Вычисления показали, что существенно изменяется в сторону увеличения лишь размер $z_{св}$ зоны формирования сварного соединения в пределах контактной площадки. При подсчетах пользовались выражениями (17)...(20), но формулу (17) несколько изменили, добавив в ее правую часть третье слагаемое $F_р$:

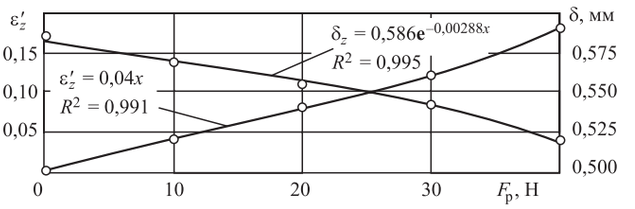


Рис. 9. Влияние растягивающего усилия на дополнительную осевую деформацию присадочной проволоки ε'_z и толщину металлопокрытия δ (приварка проволоки ПК-2 диаметром 1,8 мм на оптимальном по критерию прочность сварного соединения режиме)

$$N_z = 2\sigma_т \frac{b_1 R_1^2}{L_1} \int\limits_{\alpha_1}^{L_1/R_1} \sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2}\sin\alpha_1 d\alpha_1 +$$

$$+ 2\sigma_т \frac{b_2 R_2^2}{L_2} \int\limits_{\alpha_2}^{L_2/R_2} \sqrt{(L_2/R_2)^2 - \alpha_2^2}\sin\alpha_2 d\alpha_2 + F_р.$$

Проследить влияние увеличения параметра $z_{св}$ на скорость приварки проволоки (одновременно и на производительность процесса ЭКПП) можно по схемам нанесения металлопокрытия, приведенным на рис. 10.

Для формирования на поверхности детали сплошного, без непроваров, металлопокрытия необходимо, чтобы зоны образования сварного соединения перекрывали друг друга как по длине, так и по ширине (рис. 10). Согласно исследованиям [3, 4], оптимальные значения коэффициентов перекрытия по длине $П_z$ и по ширине $П_b$ составляют 0,05...0,1.

Коэффициент перекрытия зон образования соединения по их длине

$$K_z = \frac{П_z}{z_{св}} = \frac{z_{св} - v_о t_ц}{z_{св}} = 1 - \frac{v_о t_ц}{z_{св}},$$

где $t_ц$ — длительность одного цикла приварки.

Отсюда скорость приварки (восстановления)

$$v_о = \frac{1 - K_z}{t_ц} z_{св}, \qquad (21)$$

Геометрические параметры пластической деформации присадочной проволоки и размер зоны образования сварного соединения в пределах контактов

$F_р$, Н	ε_z	δ, мм	$b_1 = b_2$, мм	L_1, мм	L_2, мм	α_{1max}, рад	α_{2max}, рад	A_1, мм^2	A_2, мм^2	$z_{св}$, мм
0	0,45	0,585	1,74	7,25	7,15	0,290	0,048	19,8	19,9	2,42
10	0,49	0,569	1,75	7,30	7,20	0,292	0,048	20,1	19,8	2,81
20	0,53	0,559	1,75	7,33	7,24	0,294	0,048	20,2	19,9	3,08
30	0,57	0,542	1,76	7,38	7,30	0,295	0,049	20,4	20,1	3,43
40	0,63	0,520	1,77	7,44	7,34	0,298	0,049	20,7	20,4	3,77

up_517.indd 203 27.04.2017 12:10:09

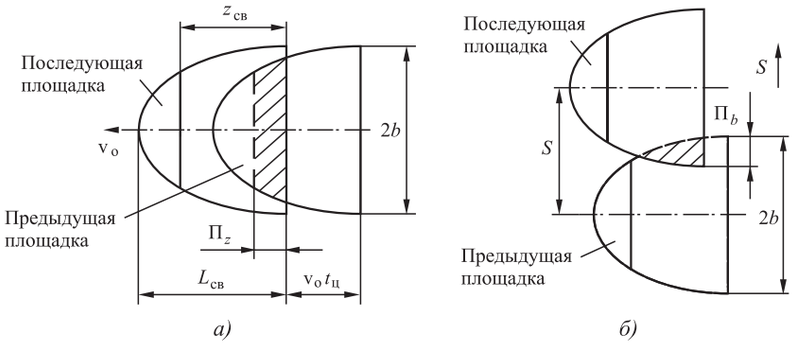


Рис. 10. Формирование сплошного металлопокрытия, без непроваров:
а — перекрытие зон образования сварного соединения по длине сварного валика; *б* — перекрытие сварных валиков по их ширине

Рис. 11. Выявленные магнитопорошковым методом микротрещины в металлопокрытии при больших значениях растягивающей силы

т. е. скорость приварки прямо пропорциональна размеру $z_{св}$ зоны образования сварного соединения.

Дополнительным растяжением присадочной проволоки можно увеличить производительность процесса ЭКПП до 40...50 %.

Дальнейшее увеличение растягивающей силы свыше 60...70 Н приводит к образованию в сварном шве мелких трещин. Микротрещины, образующиеся в стыках смежных сварных валиков, направлены поперек сварного шва. На фотографии, приведенной на рис. 11, видно, что магнитный порошок также концентрируется вдоль стыков сварных валиков.

Увеличение растягивающего усилия $F_р$ свыше значений, указанных в таблице, по этой причине нецелесообразно.

При повышенной пластической деформации присадочной проволоки отсутствуют непровары в стыках смежных сварных валиков.

Заключение

1. Дополнительное растяжение присадочной проволоки 1,8 ПК-2 усилием до 40 Н позволяет увеличить значение относительной осевой составляющей пластической деформации на 38...40 % по сравнению с приваркой без дополнительного растяжения. При этом ширина сварного валика не изменяется, толщина покрытия уменьшается незначительно. Практически не изменяется в результате действия дополнительного растяжения и геометрия контактов, но увеличивается на 40...50 % размер участка контакта, в котором образуется сварное соединение. Пропорционально увеличению размера зоны образования соединения растет скорость приварки присадочной проволоки.

Увеличение растягивающей силы $F_р$ ограничивается образованием в сварном шве поперечных микротрещин [6].

2. На основе проведенных теоретических исследований разработан способ формирования металлопокрытия [8] с увеличенной степенью относительного перемещения присадочного металла по ранее нанесенному смежному валику, что позволяет устранить недостаток процесса ЭКПП — непровар в стыках сварных швов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Нафиков М.З.** Электроконтактная наплавка — эффективный способ восстановления валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 11. С. 21—24.

2. **Латыпов Р.А.** Выбор компактных и порошковых металлических материалов и управление качеством покрытий при упрочнении и восстановлении деталей электроконтактной приваркой: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 48 с.

3. **Nafikov M.Z.** Formalized description of the process of formation of the welded joint in resistance welding of wires // Welding International. 2015. Vol. 29. Nos. 4—6. P. 466—471.

4. **Нафиков М.З., Загиров И.И.** Расчет параметров формирования соединения при электроконтактной наплавке (наварке) проволоки // Сварочное производство. 2008. № 8. С. 15—20.

5. **Особенности** формирования структуры металлопокрытий, нанесенных электроконтактной наплавкой проволокой из углеродистых и легированных сталей / М.З. Нафиков, И.И. Загиров, Э.Л. Левин, Р.Н. Сайфуллин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 6. С. 31—37.

6. **Сайфуллин Р.Н., Левин Э.Л., Наталенко В.С.** Трещиностойкость покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочных материалов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 8. С. 21—23.

7. **Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006614259.** Зона образования соединения в пределах контактных площадок / М.З. Нафиков, Р.Н. Сайфуллин, И.И. Загиров. Регистр. 13.12.06.

8. **Пат. 2578874 РФ**, МПК B 23 K 11/06, B 23 K 35/02. Способ формирования металлопокрытия одновременной электроконтактной приваркой двух стальных проволок / Нафиков М.З., Шакиров И.Р., Загиров И.И. и др.; Заявл. 27.11.2014; Опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9; 6 с.

up_517.indd 204 27.04.2017 12:10:09

УДК 669.18:539.215

И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, К.А. Данилюк
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)
E-mail: vdovin@gmail.com

Математическая модель движения частицы в металлическом расплаве

Созданы математическая модель движения частиц в металлическом расплаве и компьютерная программа, позволяющая определять важные для инженерной практики параметры процесса внедрения дисперсных и мелкодисперсных тугоплавких порошков в расплав жидкого металла. Установлено, как влияют начальная скорость частиц, их размер и плотность на гидродинамические и тепловые характеристики.

Ключевые слова: *математическая модель, жидкий металл, наночастица, центробежная машина, карбиды.*

A mathematical model of the motion of particles in a metal melt and a computer program that allows for the engineering practice to determine the important parameters of the process of implementation and fine dispersed refractory powders into the liquid metal melt are created. It is established as the initial velocity of the particles, their size and density influences the hydrodynamic and thermal characteristics.

Keywords: *mathematical model, liquid metal, nanoparticle, centrifugal machine, carbides.*

Введение

Процессы раскисления и модифицирования металла связаны с проникновением вводимых материалов в объем расплава, и часто этот процесс является определяющим их эффективность. Черные металлы имеют высокую плотность, а раскислители и модификаторы, как правило, — меньшую (алюминий, кремний и др.). Из-за этого, чтобы увеличить степень усвоения вводимых материалов, применяют много способов раскисления и модифицирования.

Процессы раскисления сталей подразделяют на осаждающие, диффузионные, вакуумные [1]. Модифицирование, особенно чугуна, осуществляется в открытом ковше лигатурами, в ковше с плотной крышкой, в открытом ковше проволокой с лигатурой, в герметизированном ковше металлическим магнием, в автоклаве и другими методами [2]. По мнению В.И. Жучкова с сотрудниками Института металлургии УрО РАН, модификаторы можно вводить в сталь методом выстреливания пуль (пневматический пулемет), продувкой порошком и т.д.

Заменить эти дорогостоящие процессы может введение нанопорошков тугоплавких металлов, которые могут обеспечить дисперсионное твердение металла [3]. Обычно это карбиды, оксиды, нитриды, твердые сплавы. Стали, полученные по такой технологии, обладают набором высоких механических свойств (твердостью, прочностью, износостойкостью и др.). Введение порошков необходимо проводить на стадии разливки, но данный процесс связан с теми же трудностями, что указаны выше, — разными плотностями вводимых материалов и металла. Это приведет к неравномерному распределению вводимых частиц (нанопорошков) в объеме металла и непредсказуемым свойствам готового металла. Необходимо разработать математическую модель, описывающую погружение наночастиц в расплав. Особенно трудно это сделать для случая центробежного литья валков.

Цель работы — создание математической модели для определения кинетики движения частицы при ее попадании в расплав, учитывающей "намерзание" на нее металла, при этом плотность частицы может быть ниже плотности расплава, и проведение математического моделирования одномерного внедрения твердых тугоплавких частиц в металлический расплав чугуна в условиях центробежной машины.

Математическая модель движения частицы в металлическом расплаве

Рассмотрим поведение частицы реагента при ее попадании в жидкий металл с начальной скоростью $V_{0ч}$. При моделировании был принят ряд допущений и ограничений:

1. Кинетическая энергия частицы не переходит в тепловую, а расходуется на приведение расплава в движение.

2. Частица имеет шарообразную форму, поверхность расплава металла расположена нормально к направлению движения частицы.

3. Отсутствует химическое взаимодействие между реагентом и расплавом.

up_517.indd 205 27.04.2017 12:10:09

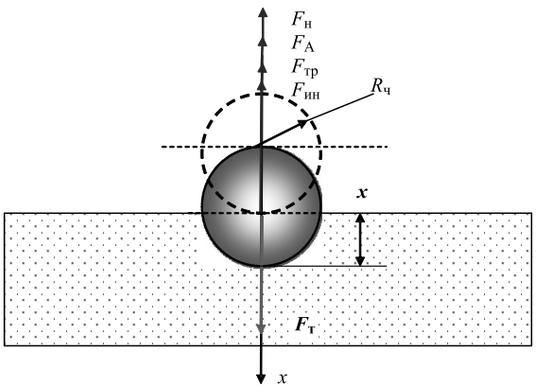


Рис. 1. Силы, действующие на твердую частицу в расплаве

4. Движение частицы в расплаве происходит в одном направлении. Уравнение движения частицы в расплаве вдоль оси x (рис. 1) [4, 5]:

$$m_ч \frac{d^2x}{d\tau^2} = -F_н - F_{тр} - F_A + F_т - F_{ин}, \qquad (1)$$

где x — расстояние от поверхности расплава до лобовой точки частицы; τ — время; $m_ч$ — масса частицы; $F_н$ — сила поверхностного натяжения расплава металла; $F_{тр}$ — сила трения (лобового сопротивления); F_A — сила Архимеда; $F_т$ — сила тяжести; $F_{ин}$ — сила инерции.

Математическое описание сил поверхностного натяжения, лобового сопротивления, Архимеда и инерции подробно рассмотрено в работах [3, 5]. Особенность поведения порошка в центробежной машине прежде всего состоит в том, что к силе тяжести, действующей на частицу, добавляется центробежная сила инерции, поэтому кажущаяся суммарная сила тяжести, действующая на частицу, может быть определена по формуле [6]

$$F_{тΣ} = m_ч(g\cos(\omega\tau) + \omega^2 R_ц), \qquad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T = \pi n/30$; n — частота вращения центробежной машины, мин$^{-1}$; T — период; $R_ц$ — расстояние от поверхности расплава до оси центробежной машины, $R_ц = R_к - \delta_ч$; $R_к$ — внутренний радиус кокиля; $\delta_ч$ — толщина рабочего слоя чугуна.

Для реальной центробежной машины центробежная сила инерции существенно больше силы тяжести. Частота вращения кокиля n определяет силу центростремительного ускорения, возникающего во время центробежного процесса, которая прижимает жидкий металл к стенке металлической формы (кокиля). Практика центробежного литья показала, что во избежание капания металла на внутренней поверхности отливки центростремительное ускорение должно быть не менее чем в 60 раз большее, чем ускорение свободного падения ($60g$).

Однако чтобы избежать появления подтеков на отливке во время вращения кокиля, которые снижают качество рабочего слоя валков (особенно индефинитных), необходима такая скорость вращения, при которой сила центростремительного ускорения становится равной приблизительно $(100...110)g$. Такую высокую частоту вращения целесообразно устанавливать также и для высокохромистых валков. В экстремальных случаях центробежное ускорение может снижаться до $(80...90)g$. При этом существует определенный риск снижения качества готовых валков [7, 8].

В цехе изложниц ЗАО "МРК" ОАО "ММК" (МРК) технология центробежного литья валков предполагает вращение машины с частотой для листовых валков не ниже 500...550 мин$^{-1}$, для сортовых — не ниже 600...650 мин$^{-1}$. При частоте вращения n = 600 мин$^{-1}$ и $R_к$ = 0,42 м отношение сил $F_{тΣ}/(m_ч g)$ составляет 169 (рис. 2). Видно, что в этих условиях гармонической составляющей силы тяжести можно пренебречь.

Запишем выражения для удельных величин всех сил в зависимости от координаты в расплаве. Масса частицы шарообразной формы (радиусом $R_ч$) $m_ч = 4/3(\pi R_ч^3 \rho_ч)$; площадь поверхности контакта реагент—металл $S = \pi x(4R_ч - x)$; $\frac{dS}{dx} = 2\pi(2R_ч - x)$; сила поверхностного натяжения $F_н = 2\pi(2R_ч - x)$, где $\rho_ч$ — плотность материала частицы; $\sigma_м$ — коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла.

Удельная сила поверхностного натяжения

при $x \leqslant 2R_ч$

$$\frac{F_н}{m_ч} = c_0(2R_ч - x);$$

при $x > 2R_ч$

$$\frac{F_н}{m_ч} = 0,$$

где $c_0 = \frac{3\sigma_м}{2\rho_ч R_ч^3}$.

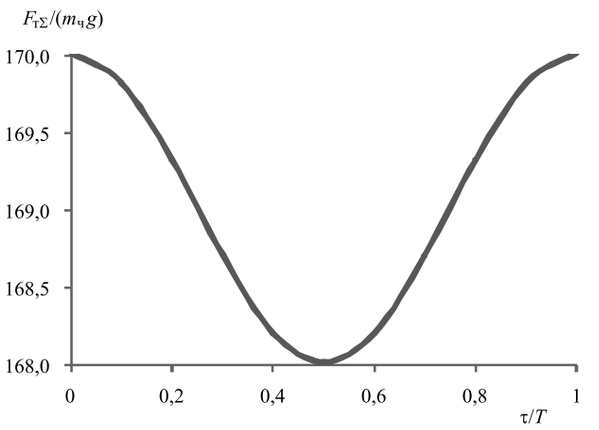


Рис. 2. Зависимость от безразмерного времени τ/T отношения суммарной силы, действующей на частицу, к силе тяжести

up_517.indd 206 27.04.2017 12:10:11

Введем функцию

$$\zeta(x, x_0) = \begin{cases} x \text{ при } x \leqslant x_0; \\ x_0 \text{ при } x > x_0. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда

$$\frac{F_н}{m_ч} = c_0(2R_ч - \zeta(x, 2R_ч)). \quad (4)$$

Сила трения (или сопротивления) [9]

$$F_{тр} = \frac{k\rho_м S_ч}{2}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2,$$

где $S_ч = \pi x(2R_ч - x)$ — площадь максимального поперечного сечения поверхности контакта реагент—металл (миделевого сечения); $\rho_м$ — плотность жидкого металла; k — коэффициент лобового сопротивления, обычно принимают $k = 1{,}3$ [4, 10]. Отсюда получаем выражение для силы трения

при $x \leqslant R_ч$

$$F_{тр} = \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)\frac{k\rho_м \pi x}{2}(2R_ч - x)\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2;$$

при $x > R_ч$

$$F_{тр} = \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)\frac{k\rho_м \pi R_ч^2}{2}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2.$$

Удельная сила трения (сопротивления)

при $x \leqslant R_ч$

$$\frac{F_{тр}}{m_ч} = \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)\frac{3k\rho_м x(2R_ч - x)}{8R_ч^3\rho_ч}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 =$$

$$= \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right) b_0 x(2R_ч - x)\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2;$$

при $x > R_ч$

$$\frac{F_{тр}}{m_ч} = \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right) b_0 R_ч^2\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2,$$

где $b_0 = \dfrac{3k\rho_м}{8R_ч^3\rho_ч}$.

Окончательно выражение для удельной силы трения можно записать как

$$\frac{F_{тр}}{m_ч} = \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{d\tau}\right) b_0\zeta(x, R_ч)(2R_ч - \zeta(x, R_ч))\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2. \quad (5)$$

Зная объем заглубленной части частицы $v_м = \dfrac{1}{3}\pi x^2 \times (3R_ч - x)$, можно найти массу вытесненного жидкого металла: $m_м = \dfrac{1}{3}\pi x^2(3R_ч - x)\rho_м$ и далее удельную силу Архимеда:

при $x \leqslant 2R_ч$

$$\frac{F_A}{m_ч} = g\frac{m_м}{m_ч} = g\frac{x^2(3R_ч - x)\rho_м}{4R_ч^3\rho_ч} = a_0 x^2(3R_ч - x);$$

при $x > 2R_ч$

$$\frac{F_A}{m_ч} = g\frac{\rho_м}{\rho_ч},$$

где $a_0 = g\dfrac{\rho_м}{4R_ч^3\rho_ч}$.

Выражения для удельной силы Архимеда можно записать как

$$\frac{F_A}{m_ч} = a_0\zeta(x, 2R_ч)^2(3R_ч - \zeta(x, 2R_ч)). \quad (6)$$

При нахождении расплава в центробежной машине удельная сила тяжести

$$\frac{F_т}{m_ч} = g\cos(\omega\tau) + \omega^2 R_ц. \quad (7)$$

Удельная сила инерции

при $x \leqslant R_ч$

$$\frac{F_{ин}}{m_ч} = \frac{1}{4R_ч^3\rho_ч}x^2(3R_ч - x)\rho_м\frac{d^2x}{d\tau^2} =$$

$$= d_0 x^2(3R_ч - x)\frac{d^2x}{d\tau^2};$$

при $x > R_ч$

$$\frac{F_{ин}}{m_ч} = 2d_0 R_ч^3\frac{d^2x}{d\tau^2},$$

где $d_0 = \dfrac{\rho_м}{4R_ч^3\rho_ч}$.

Выражения для удельной силы инерции можно записать как

$$\frac{F_{ин}}{m_ч} = d_0\zeta(x, R_ч)^2(3R_ч - \zeta(x, R_ч))\frac{d^2x}{d\tau^2}. \quad (8)$$

Записывая уравнение (1) с учетом (2)...(8), получим

$$\frac{dV_ч}{d\tau} = -c_0(2R_ч - \zeta(x, 2R_ч)) -$$

$$-\operatorname{sgn}(V_ч) b_0\zeta(x, R_ч)(2R_ч - \zeta(x, R_ч))V_ч^2 -$$

$$-a_0\zeta(x, 2R_ч)^2(3R_ч - \zeta(x, 2R_ч)) + \left(g\cos(\omega\tau) + \omega^2 R_ц\right) -$$

$$-d_0\zeta(x, R_ч)^2(3R_ч - \zeta(x, R_ч))\frac{dV_ч}{d\tau},$$

где $V_ч(\tau)$ — функция скорости частицы.

Необходимо отметить, что если плотность частицы $\rho_ч$ меньше, чем плотность металла $\rho_м$, то под действием силы Архимеда она может выталкиваться из жидкости

up_517.indd 207 27.04.2017 12:10:11

($x < 0$). В этом случае на частицу действует только удельная сила тяжести $\frac{dV_ч}{d\tau} = g\cos(\omega\tau) + \omega^2 R_ц$ и она может совершать колебательные движения.

Запишем окончательную систему дифференциальных уравнений в каноническом виде с начальными условиями, описывающую гидродинамику внедрения в расплав металла твердой частицы реагента:

$$\frac{dV_ч}{d\tau} = -\Big[c_0(2R_ч - \zeta(x, 2R_ч)) + \\ + \operatorname{sgn}(V_ч) b_0 \zeta(x, R_ч)(2R_ч - \zeta(x, R_ч))V_ч^2 + \\ + a_0 \zeta(x, 2R_ч)^2 (3R_ч - \zeta(x, 2R_ч)) - \\ - \left(g\cos(\omega\tau) + \omega^2 R_ц\right)\Big] / \left(1 + d_0 \zeta(x, R_ч)^2 \times \right. \\ \left. \times \left(3R_ч - \zeta(x, R_ч)\right)\right); \quad (9)$$

$$\frac{dx}{d\tau} = V_ч; \quad (10)$$

$$V_ч(0) = V_{0ч}; \quad (11)$$

$$x(0) = 0, \quad (12)$$

где $V_{0ч}$ — начальная скорость частицы (в момент времени $\tau = 0$).

При попадании частицы в жидкий металл кроме гидродинамических сил на нее оказывают влияние тепловые процессы, а размер частицы определяется процессами "намерзания" на нее корочки металла.

Математическая модель теплообмена при внедрении тугоплавкой частицы в расплав металла

Рассмотрим математическую модель теплового состояния тугоплавкой частицы радиусом $r_ч$ при ее внедрении в расплав с начальной температурой T_0. Радиус частицы для тепловой задачи $r_ч$ отличается от радиуса частицы в задаче ее движения $R_ч$, так как при внедрении частиц в расплав происходят процессы "намерзания" металла ($R_ч \geqslant r_ч$).

При моделировании теплообмена частицы реагента кроме ограничений, рассмотренных ранее, дополнительно сделаем ряд допущений:

1. Температура расплава металла постоянна и равна $T_м$.

2. Эффект разрыва оболочки твердого металла на поверхности частицы под действием внутреннего давления отсутствует.

3. Температура частицы $T_ч$ во всех ее точках одинакова и изменяется с течением времени (рассматриваем частицу как термически тонкое тело, Bi < 1).

4. Имеет место гладкая граница раздела твердой и жидкой фаз металла (задача Стефана), определяемая температурой кристаллизации $T_к < T_м$ и имеющая координату X.

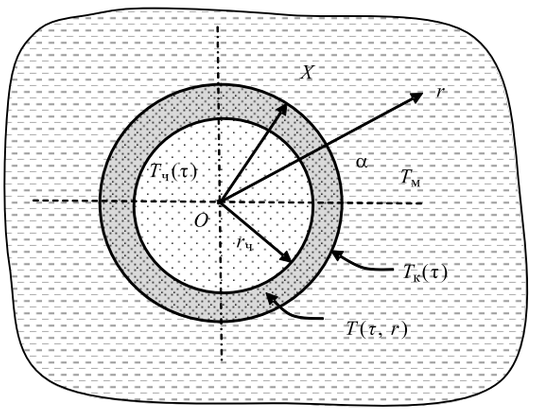


Рис. 3. К расчету теплообмена при внедрении тугоплавкой частицы в расплав металла

5. Температурное поле в твердом металле одномерное, $T(r)$, через сферическую стенку (рис. 3).

Считаем, что процессы "намерзания" металла на поверхности частицы и плавление корочки описываются условиями на границе тел. Тепловой поток, переданный частице, складывается из теплового потока, получаемого за счет кристаллизации металла и теплоотдачи от жидкого металла:

$$\lambda_т \frac{dT_ч}{dr}(\tau, X) = \frac{L}{S}\frac{dm_т}{d\tau} + q_S, \quad (13)$$

где τ — время; L — удельная теплота плавления; $\lambda_т$ — теплопроводность твердого металла; α — коэффициент теплоотдачи к жидкому металлу; $S = 4\pi r_ч^2$ — поверхность теплообмена; q_S — тепловой поток на частицу со стороны жидкого металла.

На границе частицы и металла

$$\lambda_ч \frac{dT_ч}{dr} = \lambda_т \frac{dT}{dr}(\tau, r_ч); \quad (14)$$

$$T_ч(\tau) = T(\tau, r_ч), \quad (15)$$

где $\lambda_т$ — теплопроводность материала частицы.

Принимаем, что распределение температур в оболочке твердого металла описывается законами стационарной теплопроводности через шаровую стенку [11]

$$T(\tau, r) = T_ч + \frac{T_к - T_ч}{X - r_ч} X r_ч \left(\frac{1}{r_ч} - \frac{1}{r}\right).$$

Производная температуры $\frac{dT}{dr} = \frac{T_к - T_ч}{X - r_ч} X r_ч \frac{1}{r^2}$, и ее значения на границах

$$\frac{dT}{dr}(\tau, X) = \frac{T_к - T_ч}{X - r_ч}\frac{r_ч}{X}; \quad (16)$$

$$\frac{dT}{dr}(\tau, r_ч) = \frac{T_к - T_ч}{X - r_ч}\frac{X}{r_ч}. \quad (17)$$

up_517.indd 208 27.04.2017 12:10:12

Тепловой поток на частицу со стороны жидкого металла можно определить как тепловой поток через сферическую стенку:

$$q_S = \frac{4\pi(T_м - T_ч)}{\frac{1}{\alpha X^2} + \frac{1}{\lambda_т}\left(\frac{1}{r_ч} - \frac{1}{X}\right)} \frac{1}{4\pi r_ч^2} = \\ = \frac{T_м - T_ч}{\frac{r_ч^2}{\alpha X^2} + \frac{r_ч^2}{\lambda_т}\left(\frac{1}{r_ч} - \frac{1}{X}\right)}. \quad (18)$$

Запишем дифференциал массы оболочки твердого металла с плотностью $\rho_т$: $dm_т = 4\pi r^2 \rho_т dX$ и с учетом уравнений (13) и (18) получим

$$\frac{dX}{d\tau} = \\ = \frac{r_ч^2}{L\rho_т X^2}\left[\lambda_т \frac{T_к - T_ч}{X - r_ч}\frac{r_ч}{X} - \frac{T_м - T_ч}{\frac{r_ч^2}{\alpha X^2} + \frac{r_ч^2}{\lambda_т}\left(\frac{1}{r_ч} - \frac{1}{X}\right)}\right], \quad (19)$$

причем при $X \leqslant r_ч$ имеем $\frac{dX}{d\tau} = 0$.

Исходя из теплового баланса твердой частицы можно записать

$$\frac{m_ч c_ч}{4\pi r_ч^2}\frac{dT_ч}{d\tau} = q_S,$$

где $m_ч = 4\pi\rho_ч r_ч^3/3$ — масса частицы; $c_ч$ — удельная теплоемкость материала частицы. Рассматривая это уравнение совместно с (18), получим

$$\frac{dT_ч}{d\tau} = \frac{3(T_м - T_ч)}{c_ч\rho_ч r_ч^3\left[\frac{1}{\alpha X^2} + \frac{1}{\lambda_т}\left(\frac{1}{r_ч} - \frac{1}{X}\right)\right]}. \quad (20)$$

Для постановки краевой задачи Коши уравнения (19) и (20) дополняем начальными условиями

$$X(0) = r_ч, \quad (21)$$
$$T_ч(0) = T_0. \quad (22)$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по эмпирической формуле Б.Д. Кацнельсона и Ф.А. Тимофеевой-Агафоновой, описывающей теплообмен при обтекании сферы с учетом теплопроводности и вынужденной конвекции [11],

$$\mathrm{Nu} = 2 + 0{,}03\mathrm{Pr}^{0{,}33}\mathrm{Re}^{0{,}51} + 0{,}35\mathrm{Pr}^{0{,}35}\mathrm{Re}^{0{,}58}, \quad (23)$$

где $\mathrm{Re} = \frac{2XV_ч}{\nu_м}$; $\mathrm{Nu} = \frac{2X\alpha}{\lambda_м}$; $\mathrm{Pr} = \frac{\nu_м c_м \rho_м}{\lambda_м}$; $\nu_м, c_м, \lambda_м$ — кинематическая вязкость, удельная теплоемкость и теплопроводность жидкого металла соответственно.

Математическая модель (19)...(23) позволяет найти изменение температуры частицы и координату фронта кристаллизации расплава металла, определяющую текущий радиус частицы в процессе ее внедрения в жидкость. Уравнения теплового взаимодействия (19)...(22) при внедрении реагента в расплав решаются совместно с уравнениями гидродинамики (9)...(12).

Исходные параметры для расчета гидродинамики и теплообмена при внедрении тугоплавкой частицы в расплав чугуна

Рассмотренная математическая модель предназначена для изучения поведения шарообразной частицы при ее попадании в жидкий чугун с некоторой скоростью, нормальной к его поверхности. Причем модель учитывает и случай воздействия на частицу в расплаве центробежной силы, возникающей в условиях работы центробежной машины.

В качестве теплофизических характеристик металла отливаемого валка принимали характеристики высоколегированного хромоникельмолибденового чугуна. Значения температур ликвидуса $T_{лик}$ и солидуса $T_{сол}$ для него брали из экспериментальных данных, полученных на приборе "ЛИТИС". Для металла рабочего слоя полагали $T_{лик}$ = 1215 °С и $T_{сол}$ = 1115 °С. Для рассматриваемой задачи Стефана температура кристаллизации металла определена как $T_к = (T_{лик} + T_{сол})/2$.

Геометрические и технологические параметры процесса при моделировании проникновения частиц в расплав приведены в табл. 1. Теплофизические харак-

Таблица 1

Геометрические и технологические параметры моделирования проникновения частиц в расплав

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Радиус частиц порошка карбида вольфрама WC	$R_ч$	мкм	1...10
Радиус частиц порошка карбида кремния SiC	$R_ч$	мкм	100...400
Начальная скорость частицы при ее попадании в расплав	$V_{0\,ч}$	м/с	15...100
Внутренний радиус кокиля центробежной машины	$R_к$	мм	420
Толщина рабочего слоя чугуна	$\delta_ч$	мм	70
Частота вращения центробежной машины	n	мин$^{-1}$	500...650
Начальная температура частицы	T_0	°С	30...400
Начальная температура заливаемого металла	$T_м$	°С	1390
Температура кристаллизации металла	$T_к$	°С	1165

up_517.indd 209 27.04.2017 12:10:12

Таблица 2

Теплофизические характеристики затвердевающего белого чугуна

Наименование характеристики	Обозначение	Единица измерения	Значение
Плотность жидкого металла	$\rho_м$	кг/м^3	7200
Кинематическая вязкость	$\nu_м$	м^2/с	$7 \cdot 10^{-7}$
Удельная теплоемкость жидкого металла	$c_м$	Дж/(кг · °С)	585
Теплопроводность жидкого металла	$\lambda_м$	Вт/(м · °С)	46,5
Коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла	$\sigma_м$	Н/м	1,8
Теплота плавления металла	L	Дж/кг	$2{,}72 \cdot 10^5$
Плотность твердого металла	$\rho_т$	кг/м^3	7400
Теплопроводность твердого металла	$\lambda_т$	Вт/(м · °С)	40
Удельная теплоемкость твердого металла	$c_т$	Дж/(кг · °С)	600

теристики белого чугуна, используемого при центробежном литье валков, представлены в табл. 2.

Теплофизические характеристики карбида кремния при разной его температуре взяты из работы В.С. Чиркина [12], и на их основе получены уравнения аппроксимации для плотности, теплоемкости, теплопроводности в диапазоне температур 30...1300 °С и далее среднеинтегральные значения характеристик, которые были использованы при компьютерном моделировании.

Используемые для внедрения в металл порошки карбида вольфрама содержат 5,8...6,1 % углерода. Теплофизические характеристики WC взяты из работы [13].

Результаты моделирования внедрения порошков карбидов в расплав чугуна

Рассмотренная выше задача Коши (19)...(22) позволяет описать динамику изменения температуры частицы и координаты фронта кристаллизации расплава металла, определяющей текущий радиус частицы в процессе ее внедрения в расплав. Уравнения теплового взаимодействия решаются совместно с уравнениями гидродинамики (9)...(12). За текущий радиус частицы принимается координата фронта кристаллизации: $R_ч = X$.

По разработанной математической модели создана компьютерная программа "Расчет гидродинамики и тепломассообмена при внедрении твердой частицы в расплав", позволяющая проводить компьютерное моделирование кинетики внедрения тугоплавких частиц в расплав и их теплового состояния с учетом "намораживания" и расплавления на их поверхности твердой корочки [14].

Проведено моделирование внедрения частиц карбида кремния в расплав чугуна и их теплового состояния при начальной температуре частиц $T_0 = 400$ °С и других исходных данных, приведенных в табл. 1. Теплофизические характеристики белого чугуна брали из табл. 2. Теплофизические параметры материала частицы задавали как среднеинтегральные для рабочего диапазона температур согласно [12, 13].

Рассмотрим случай, когда кокиль не вращается ($n = 0$) и частица внедряется в расплав, как показано на рис. 1. Плотность карбида кремния меньше плотности жидкого металла, поэтому частица проникает в расплав на некую глубину X_{max} и далее всплывает на его поверхность. Динамика внедрения частицы карбида кремния радиусом 100 мкм в течение первых 25 мс при разной ее начальной скорости показана на рис. 4. Видно, что при увеличении начальной скорости частиц в 6,7 раза глубина проникновения увеличилась только в 1,5 раза. Скорость всплытия частиц не зависит от их начальной скорости, а определяется их свойствами и для рассмотренных частиц составляет 12 мм/с.

С помощью компьютерного моделирования получены зависимости максимальной относительной глубины проникновения частиц $X_{max}/R_ч$ от их радиуса (рис. 5). Видно, что увеличение радиуса частиц в 8 раз приводит

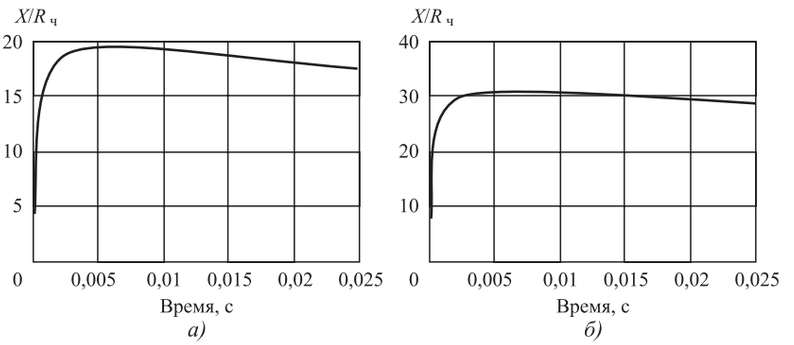


Рис. 4. Динамика проникновения частиц карбида кремния радиусом 100 мкм в расплав чугуна при различной начальной скорости:
а — $V_{0\,ч} = 15$ м/с; *б* — $V_{0\,ч} = 100$ м/с

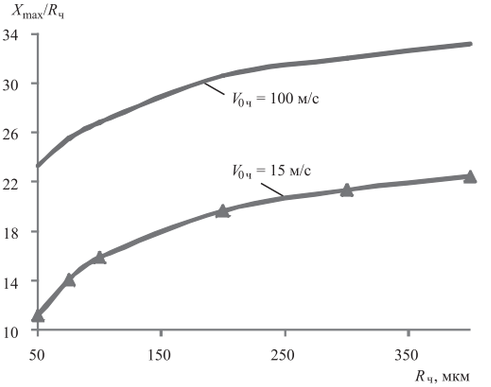


Рис. 5. Зависимость максимальной глубины проникновения частицы X_{max} в расплав от ее радиуса при различной начальной скорости

up_517.indd 210 27.04.2017 12:10:12

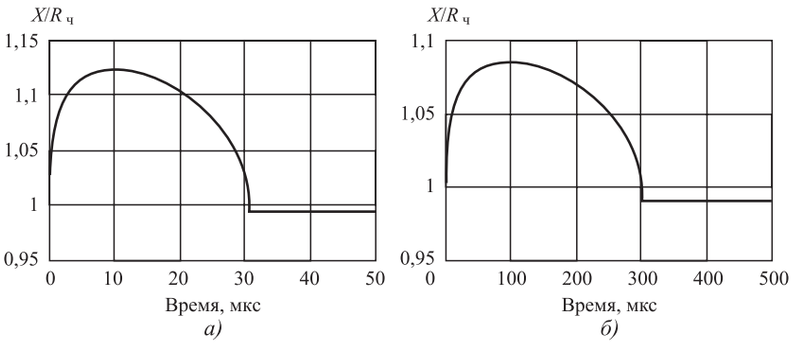


Рис. 6. Динамика "намерзания" металла на частицу карбида кремния и его расплавления:
а — $R_ч$ = 100 мкм; *б* — $R_ч$ = 400 мкм

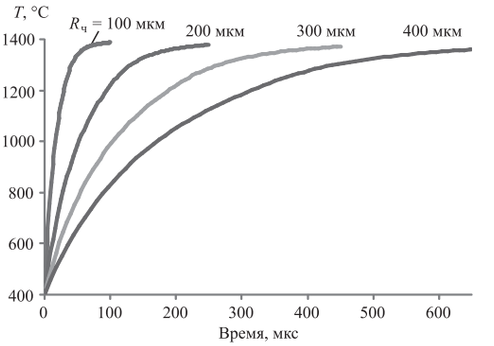


Рис. 7. Зависимость температуры частицы от времени пребывания в расплаве при различных ее радиусах

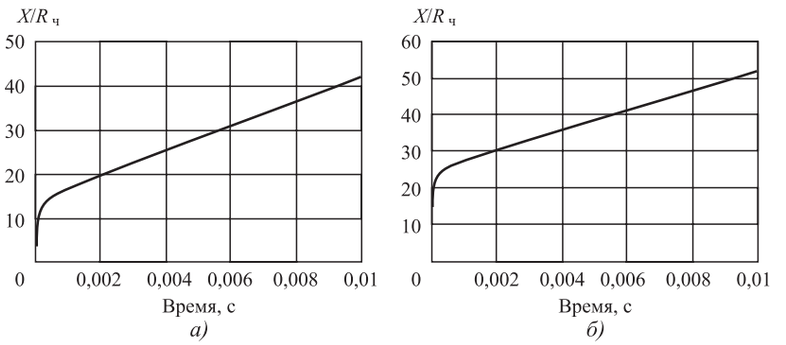


Рис. 8. Динамика проникновения частиц карбида кремния радиусом 100 мкм в расплав чугуна в центробежной машине (n = 500 мин$^{-1}$) при начальной их скорости 15 м/с (*а*) и 100 м/с (*б*)

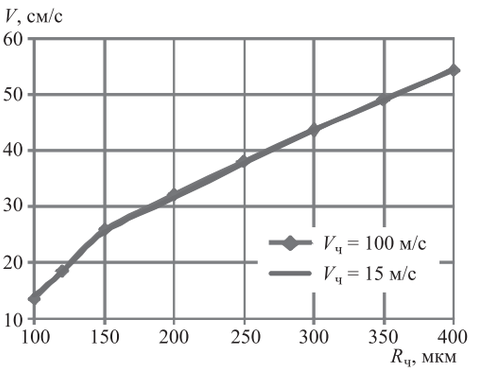


Рис. 9. Зависимости установившейся через 10 м/с скорости V внедрения частицы в расплав чугуна в центробежной машине (n = 500 мин$^{-1}$) от радиуса частицы при ее различных начальных скоростях

к увеличению максимальной глубины их проникновения в расплав в 1,5...2,0 раза.

Проанализировано тепловое состояние частиц при их внедрении в расплав металла. На рис. 6 показана динамика "намерзания" и расплавления металла при различных радиусах частиц карбида кремния. Процесс этот относительно быстрый и протекает за время, меньшее 1 мс, которое зависит от радиуса частицы.

Проанализирована кинетика нагрева частицы при различных ее радиусах (рис. 7). Время нагрева частицы до температуры расплава относительно небольшое — не превышает 0,5 мс.

Рассмотрим случай, когда кокиль вращается с частотой n = 500 мин$^{-1}$ и частицы порошка внедряются в расплав под действием дополнительной центробежной силы. Тогда даже "легкая" частица уже не всплывает на поверхность. На рис. 8 показана динамика проникновения частиц карбида кремния радиусом 100 мкм в расплав чугуна при различной их начальной скорости. Через 0,5...1,0 мс скорость частицы устанавливается постоянной и составляет 13,5...14,0 см/с.

Установившаяся (через 10 мс) скорость зависит от радиуса частицы и практически не зависит от ее начальной скорости (рис. 9). Частица в зависимости от ее радиуса преодолеет толщину рабочего слоя чугуна $\delta_ч$ = 70 мм за 0,13...0,50 с.

Выводы

Созданы математическая модель и компьютерная программа, позволяющие определять важные для инженерной практики параметры процесса внедрения дисперсных и мелкодисперсных тугоплавких порошков в расплав вращающегося жидкого металла. Установлено, как влияют начальная скорость частиц, их размер и плотность на гидродинамические и тепловые характеристики процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Производство** стальных отливок: учебник для вузов / Л.Я. Козлов, В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин и др. М., МИСИС, 203. 352 с.

up_517.indd 211 27.04.2017 12:10:13

2. **Производство** чугунных отливок: учебник для вузов / В.Д. Белов, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. Магнитогорск, ГОУ ВПО "МГТУ", 2009. 521 с.

3. **Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Ларина Т.П.** Моделирование гидродинамики и теплообмена при внедрении тугоплавких частиц в расплав металла // Сб. трудов: Наука и производство Урала. 2014. № 10. С. 163—167.

4. **Сидоренко М.Ф.** Теория и практика продувки металла порошками. М.: Металлургия, 1978. 232 с.

5. **Семкин И.Г., Коптев А.П., Морозов А.П.** Внепечная плазменная металлургия. Магнитогорск, МГТУ, 2000. 490 с.

6. **Прокатные** валки / К.Н. Вдовин, Р.Х. Гималетдинов, В.М. Колокольцев, С.В. Цыбров. Магнитогорск, МГТУ, 2005. 543 с.

7. **Особенности** производства прокатных валков / В.В. Бахметьев, С.В. Цыбров, И.В. Круглов и др. // Сталь. 2007. № 1.

8. **Цыбров С.В.** Разработка технологии изготовления крупнотоннажных центробежно-литых двухслойных валков для листопрокатных станов // Литейное производство. 2006. № 8. С. 7—8.

9. **Повх И.Л.** Техническая гидродинамика. Л.: Машиностроение, 1976. 504 с.

10. **Гордон Г.М., Пейсахов И.Л.** Пылеулавливание и очистка газов. М.: Металлургия. 1968. 499 с.

11. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

12. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

13. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1959. 356 с.

14. **Рогаткина Д.К., Ячиков И.М.** Расчет гидродинамики и тепломассообмена при внедрении частицы в расплав / Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015663132. 2015.

Продолжается подписка на журнал "Упрочняющие технологии и покрытия"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

up_517.indd 212 27.04.2017 12:10:13

УДК 621.9.048.7:621.9.025

Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова
(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина)
E-mail: bmbsar85@mail.ru

Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации*

Представлены описание и результаты экспериментального исследования процесса самоорганизации структуры, формируемой в поверхностном слое изделий воздействием низкотемпературной плазмы, в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *композитная структура, кластеры, аморфная связка, контактные взаимодействия, самоорганизация.*

The results of the experimental study and the description of the process self-organization of structure, formed in the surface layer of products by low-temperature plasma exposure, during operation are represented.

Keywords: *composite structure, clusters, amorphous binder, contact interactions, self-organization.*

Введение

Поверхностное упрочнение используется для формирования на поверхности рабочей части изделий износостойкого модифицированного слоя. Существует большое число методов поверхностного упрочнения, в том числе плазменных [1—7], к которым относится и упрочнение воздействием на изделие низкотемпературной плазмой комбинированного разряда пониженного давления [8]. В результате в поверхностном слое изделия формируется химически нейтральная композитная структура, имеющая толщину ~5 мкм и состоящая из кластеров, соединенных между собой аморфной связкой (рис. 1). Кластеры представляют собой жесткие

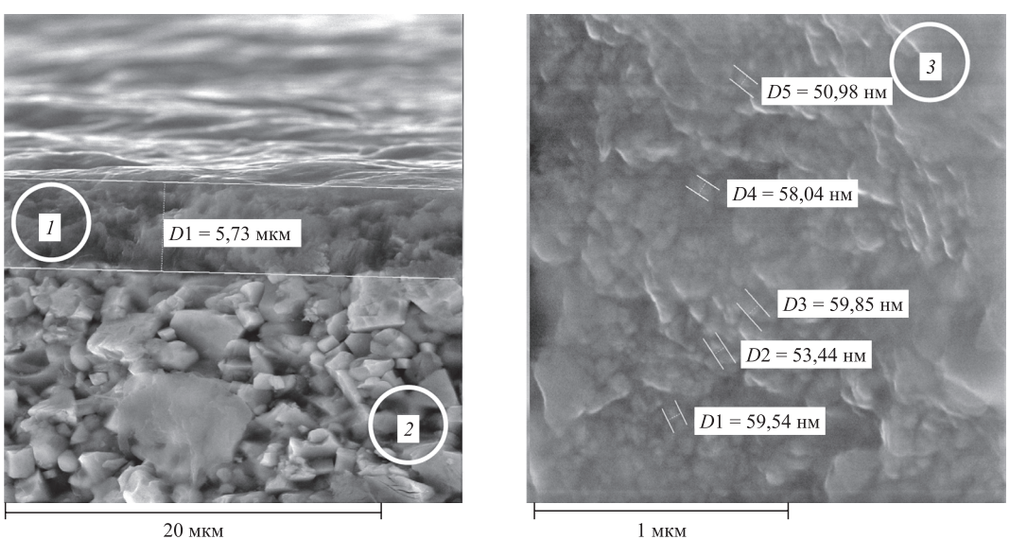


Рис. 1. Композитная ионно-плазменная структура:
1 — покрытие; *2* — матрица; *3* — кластеры в аморфной связке; *D*1...*D*5 — размер отмеченных линиями элементов структуры

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00030).

up_517.indd 213 27.04.2017 12:10:13

шары диаметром ~20...100 нм, способные устойчиво противодействовать внешнему силовому воздействию до достижения предела прочности, а при его превышении, разрушаясь, переходить в аморфную связку. Аморфная связка, размеры частиц которой составляют менее 10 нм, образует прослойку, способную перестраиваться в направлении действующей силы с постепенным уменьшением свободного объема в виде пустот между ее атомами. Другими словами, аморфная связка является гомогенной (несущей) фазой, а кластеры — гетерогенной фазой, дисперсность которой характеризуется функцией распределения числа кластеров различных размерных диапазонов в единице объема структуры.

Постановка задачи исследования

В процессе эксплуатации композитной структуры (далее — структуры) происходит постепенное изменение ее свойств и, как следствие, значений параметров, характеризующих свойства количественно. При достижении параметрами критических (пороговых) значений возникает качественный скачок, в результате которого может сформироваться новая структура с новыми свойствами. Этот процесс называется самоорганизацией [9], и его результативность в данном случае будет зависеть от того, насколько поведение структуры, содержащей кластеры и аморфную связку (т. е. двухфазной структуры), в условиях контактных взаимодействий будет проявлять характерные особенности поведения и свойства каждой фазы в отдельности.

Для изучения процесса самоорганизации примем следующие исходные предпосылки:

в теории упругости и пластичности тела рассматриваются как "сплошные". При этом понятие сплошности относится и к элементарным объемам, на которые можно мысленно разбить тело, в частности к его поверхностному слою. Это означает, что все процессы, протекающие в теле в целом, аналогично протекают и в любой его части;

наличие в структуре аморфной связки повышает ее способность к локальной перестройке под действием сжимающих и растягивающих напряжений за счет наличия некоторого свободного объема в виде пустот между элементами (атомами) ввиду их хаотичного расположения и, как следствие, большей занимаемой ими площади и нарушения постоянства потенциала межэлементного взаимодействия. В отличие от ядра дислокации в кристаллических материалах свободный объем в композитной структуре может изменяться от нуля до объема, занимаемого несколькими элементами;

наличие в структуре кластеров и подслоя, обладающих повышенной плотностью и, соответственно, твердостью и имеющих минимальную пористость, усиливает прочностные свойства структуры и снижает подвижность зерен материала основы детали или изделия (матрицы);

реакция структуры в процессе контактных взаимодействий будет определяться суммарной реакцией, вносимой обеими фазами, и зависеть от их объемных долей. Реакция возникает при контакте структуры с поверхностью некоторого твердого тела (назовем его контртелом) под действием обобщенной силы, имеющей периодический характер в направлении, нормальном к поверхности структуры, и характер постоянной величины в направлении, касательном к поверхности;

микрорельеф поверхности контртела носит случайный характер, однако число выступающих элементов значительно меньше числа остальных элементов, т. е. один выступающий элемент приходится на некоторую элементарную площадь поверхности, занимаемую N элементами. При внедрении этого элемента в структуру глубина внедрения зависит от соотношения диаметров выступающего и невыступающих элементов. При касании поверхности структуры невыступающими элементами происходит только их скольжение, поскольку внешняя нагрузка на один элемент снижается в $1/(N-1)$ раз в результате ее перераспределения на $N-1$ элементах.

Решение задачи

Рассмотрим ситуацию внедрения элемента контртела в поверхностный слой структуры. В этом случае в поверхностном слое возникнет объемное напряженное состояние. Если напряжения не превышают предела упругости аморфной связки, реакция структуры будет носить упругий характер в виде ее колебаний на некоторой обобщенной частоте (поскольку кластеры связаны аморфной связкой). Если же напряжения превысят предел упругости аморфной связки, реакция будет носить характер вначале упругопластической (при превышении предела упругости), а затем пластической (при превышении предела текучести) деформации и выражаться в вытеснении некоторого элементарного объема материала структуры (микрообъема) и его частичном или полном смещении за счет вначале сжатия, а затем растяжения аморфной связки. Результатом перемещения будет образование следа за фронтом движения элемента контртела и валика перед ним. Напряжения и деформации вокруг отпечатка изменяются от нуля до очень больших значений, но никаких предельных состояний (например, разрушений) при этом не достигается.

Поскольку выступающих элементов значительно меньше, чем остальных элементов на поверхности контртела, за выступающим элементом на элементарную площадь структуры с большей вероятностью попадет невыступающий элемент и произойдет контактирование его края с валиком. Результатом станет частичное разрушение валика путем его деформирова-

up_517.indd 214 27.04.2017 12:10:15

ния, смятия, распределения по поверхности структуры и внедрения в нее.

Таким образом, после прохождения невнедряющегося элемента контртела по следу, оставленному внедрившимся элементом, на поверхности структуры сформируется рельеф, образованный следами от локального вытеснения, перемещения и частичного смятия элементарного микрообъема структуры. Общим же результатом прохождения пары (а в общем случае — пар) "внедряющийся элемент — невнедряющийся элемент" станет цепочка (цепочки) следов, образующих волнообразный рельеф на поверхности структуры. При этом для перемещения каждого следующего вытесненного микрообъема потребуется переместить и предыдущий смещенный микрообъем. Основным результатом станет постепенное уплотнение структуры, приводящее к образованию устойчивых обтекаемых форм на ее контактных поверхностях (рис. 2). Другими словами, образование этих форм и представляет собой результат самоорганизации структуры, приводящий к снижению интенсивности изнашивания за счет снижения внешнего трения, поскольку материал с более плотной (и, следовательно, однородной) структурой более устойчив к локальным перемещениям.

Формирование устойчивых обтекаемых форм на контактных поверхностях структуры увеличивает ее твердость и, как следствие, упругое трение, во-первых, за счет уменьшения расстояния между кластерами, т. е. смещения межфазных границ, во-вторых, за счет интенсификации при росте температуры диффузионных процессов на самих границах, повышающих вязкость, в-третьих, за счет ослабления связей компонентов на границах вследствие проскальзывания при знакопеременной нагрузке. Со временем это будет приводить к частичному разрушению и вдавливанию кластеров в поверхностный слой или вырыву из него, т. е. уменьшению их среднего размера, изменению соотношения между объемами кластеров и аморфной связки, появлению свободного объема и, как следствие, к новой самоорганизации. И так будет продолжаться до момента исчерпания возможностей воспроизводства свободного объема, вследствие чего начнется постепенное истирание структуры.

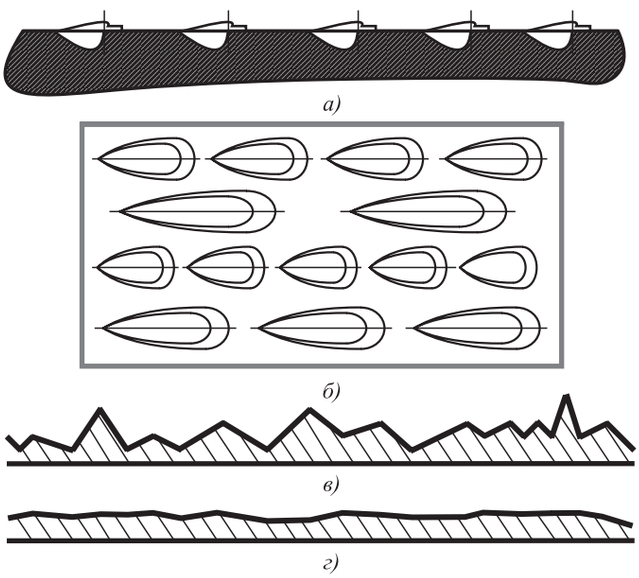


Рис. 2. Топография процесса самоорганизации:
а — прохождение пары "внедряющийся элемент — невнедряющийся эдемент"; *б* — прохождение нескольких пар элементов; *в* — исходный микрорельеф; *г* — сформированный микрорельеф

Для подтверждения достоверности представленных положений были выполнены сравнительные испытания металлорежущих инструментов, оснащенных обычными и упрочненными сменными многогранными пластинами из вольфрамокобальтового сплава RX-10. Испытания проводили в условиях реального производства при обработке легированных (хромистых и хромокремнемарганцевых) сталей, которые инструментом из вольфрамокобальтовых сплавов обрабатывать не рекомендуется даже справочной литературой. Обработку выполняли с помощью операций точения, растачивания и контурного фрезерования при обычных сочетаниях значений параметров технологических режимов. Результаты испытаний показали, что параметры точности обработанных поверхностей во всех случаях соответствовали требованиям технической документации, но у упрочненного инструмента зафиксировано повышение времени стойкости в 1,5...2,7 раза и производительности обработки в 1,43...2,5 раза.

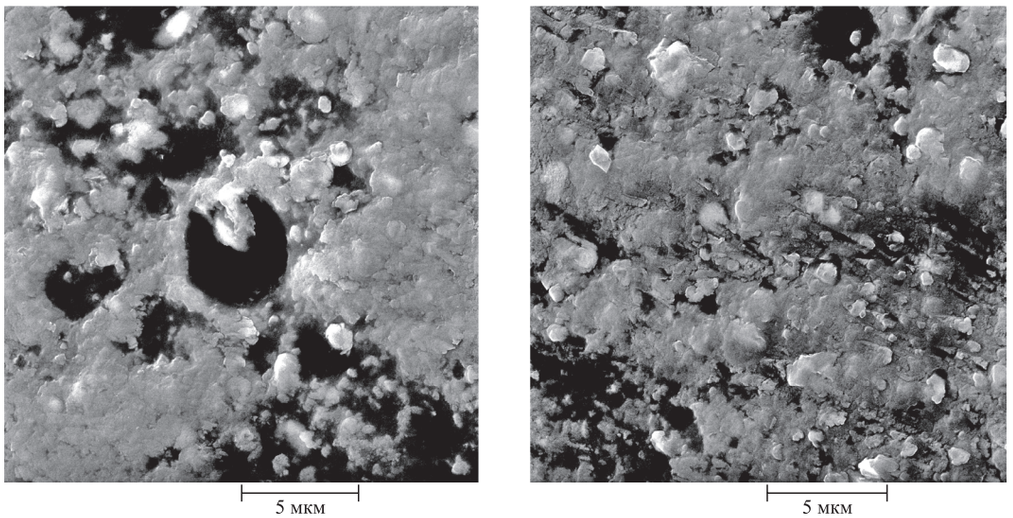
Анализ результатов исследования

Для объяснения полученных результатов был проведен анализ микрофотографий поверхностей двух упрочненных пластин, использовавшихся на операции контурного фрезерования в составе сборной фрезы. Фотографии получены на растровом электронном микроскопе MIRA\\ TESCAN LMU в направлении к режущей кромке на различных расстояниях от границы исходной структуры, которая не участвовала в процессе резания и изменения на которой поэтому не произошли.

Вначале провели визуальное исследование фотографий (рис. 3), которое позволило установить следующее.

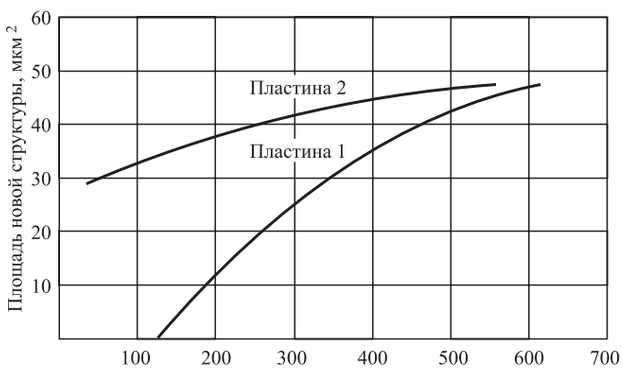
1. В процессе обработки происходило послойное смещение кромочных микрообъемов структуры покрытия в направлении от режущей кромки с постепенным образованием новых структур (притертых поверхностей и пустот). Распределение новых структур на различных удалениях от зоны исходной структуры в направлении к режущей кромке неравномерно и количественно может быть охарактеризовано занимаемой

up_517.indd 215 27.04.2017 12:10:15

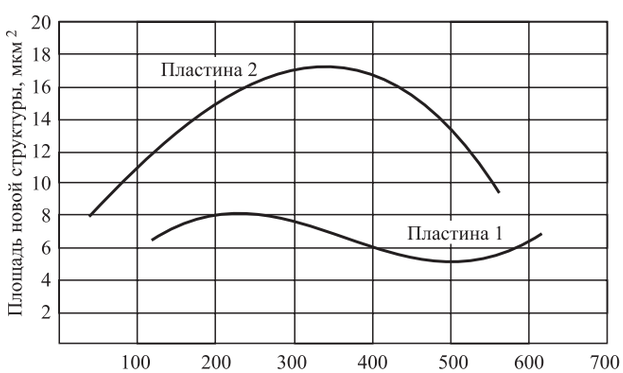


а) *б)*

Рис. 3. Новые структуры на постэксплуатационных поверхностях упрочненных пластин из твердого сплава RX-10: *а* — пустоты; *б* — притертости



а)



б)

Рис. 4. Тенденции изменения площадей притертостей (*а*) и пустот (*б*) на постэксплуатационных поверхностях упрочненных пластин из твердого сплава RX-10

ими площадью (рис. 4). Величина этой площади несет в себе информацию о причинах неравномерности, которые могут быть связаны с погрешностями установки пластин на державку сборного инструмента; биениями шпиндельного узла станка, в котором вращался инструмент; неперпендикулярностью оси вращения плоскости к поверхности, на которую устанавливалось приспособление с заготовкой; колебаниями припуска и физико-механических свойств материала заготовки.

Для того чтобы определить какая из структур является результатом самоорганизации упрочненной поверхности, был рассчитан коэффициент корреляции между площадями, занимаемыми каждой структурой и расстояниями, на которых они были определены. Результаты, представленные в таблице, показали, что для притертостей значения коэффициентов (по модулю) больше 0,9, а для пустот — меньше 0,3. С точки зрения математической статистики это означает, что притертости имеют к самоорганизации прямое отношение, а пустоты — нет. Другими словами, образование притертых поверхностей есть основной результат поведения структуры в ходе процесса эксплуатации пластин, а величина их площади, по сути, является интегральной характеристикой степени взаимосвязи между самоорганизацией и условиями эксплуатации структуры;

Коэффициенты корреляции между площадями структур и расстояниями, на которых они измерялись

Структура	Пластина 1	Пластина 2
Притертости	0,907	0,915
Пустоты	–0,256	0,210

up_517.indd 216 27.04.2017 12:10:15

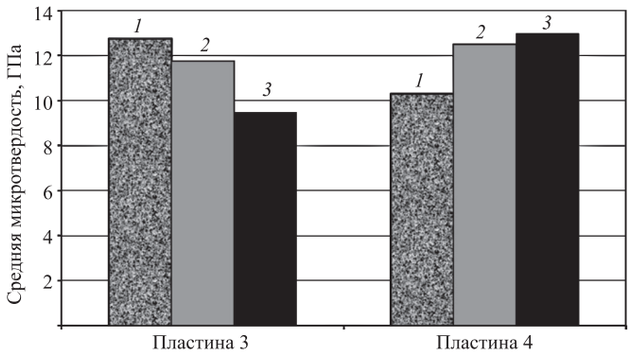


Рис. 5. Постэксплуатационная микротвердость упрочненных пластин из твердого сплава RX-10:
1 — обнаженная на режущей кромке матрица; *2* — подслой на границе с матрицей; *3* — композитная структура на границе с подслоем

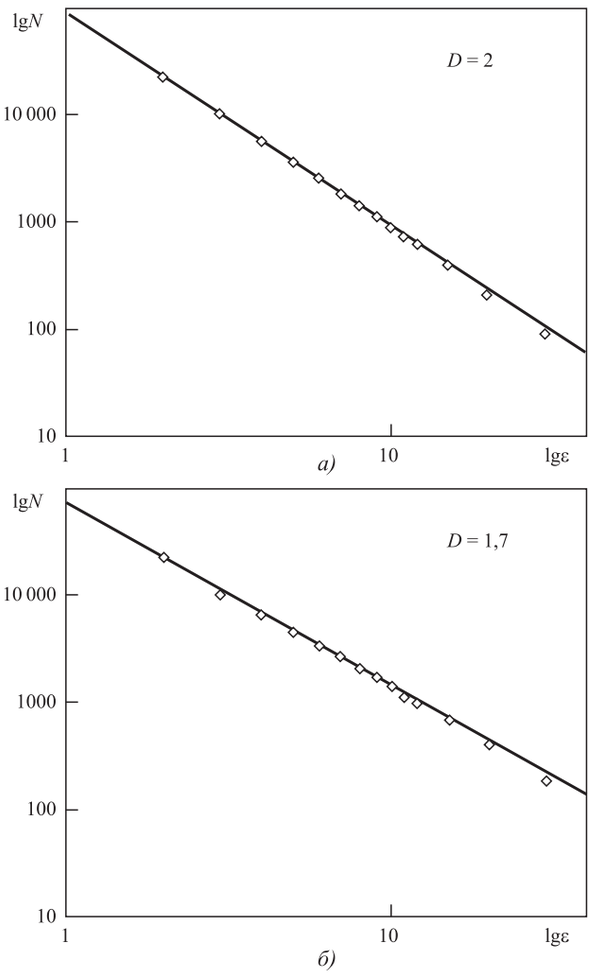


Рис. 6. Результаты определения фрактальных размерностей *D* на постэксплуатационных поверхностях (*а*) и матрице упрочненных пластин (*б*)

при этом большему времени эксплуатации (времени стойкости) в условиях равномерного контакта каждой пластины с заготовкой будет соответствовать большая площадь притертой поверхности.

2. Износ пластин носил характер постепенного истирания упрочненного слоя до состояния потери устойчивости режущего клина. Количественно этот процесс может быть охарактеризован микротвердостью, измерение которой позволяет не только оценить степень изменения состояния пластин, но и установить характер изменения. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты измерения микротвердости двух других пластин (3 и 4), которые показывают, что у пластины 3 состояние изменилось в меньшей степени, поскольку микротвердость матрицы имеет большее значение, чем микротвердость матрицы у пластины 4. Это означает бóльшую продолжительность самоорганизации на контактных поверхностях пластины 3, поскольку ее микротвердость изменилась в большей степени, чем у пластины 4. Причиной может быть неравномерность внешнего силового воздействия, поскольку, во-первых, исходная микротвердость у пластин была практически одинаковой, во-вторых, значение вычисленного коэффициента корреляции (–0,841) показало наличие значимой обратно пропорциональной связи между распределениями микротвердости пластин.

3. Структуры, образующиеся в процессе самоорганизации, обладают свойством масштабной инвариантности. Количественной характеристикой инвариантности является фрактальная размерность. Результаты ее вычисления для притертой структуры и структуры, образовавшейся в процессе изнашивания обнаженной матрицы (рис. 6), показали, что в первом случае значение размерности *D* оказалось равным 2, а во втором — 1,7. Поскольку известно, что большему (и целочисленному) значению соответствует большая плотность (и однородность) структуры, можно констатировать, что такая структура будет обладать и большей устойчивостью, определяющей ее способность, с одной стороны, сопротивляться растягивающим напряжениям, а с другой — воспринимать сжимающие напряжения.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Формирование композитной структуры на рабочих поверхностях изделий при низкотемпературном плазменном упрочнении и выполнение ею работы по самоорганизации обеспечивают повышение износостойкости изделий за счет изменения механизма изнашивания только в случае проявления характерных особенностей поведения и свойств как кластерами, так и аморфной связкой.

up_517.indd 217 27.04.2017 12:10:15

2. Вычисление площадей, занимаемых новыми структурами, их микротвердостей и фрактальных размерностей может использоваться для оценивания качества процесса эксплуатации изделий с измененным поверхностным слоем в целях оптимизации конструкций и условий их эксплуатации, причем не только по критерию повышения показателей эксплуатационной надежности, но и по критерию расширения области практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **The Industrial** Applications of Ion Beam Processes, Surface Alloying by Ion, Electron and Laser Beams / J.K. Hirvonen, L.E. Rehn, S.T. Picraux H. Wiedersich // Ed., ASM International, 1987. P. 373—388.

2. **Алиаскеров Р.К., Буранбаев М.Ж., Кайполдаев О.** Углеродистые пленки, полученные методом ионно-плазменного напыления // http://sci-article.ru/stat.php?i = 1430720490 (дата обращения: 10.02.2017).

3. **Плазменно-иммерсионная** имплантация азота в быстрорежущую сталь. Фазовый состав и механические свойства / В.В. Углов, А.К. Кулешов, Ю.А. Федотова и др. // Физика и химия обработки материалов. 1999. № 5. С. 18—25.

4. **Электронно-пучковая** модификация плазменных металлокерамических покрытий / Ю.А. Иванов, Ю.А. Колубаева, С.Ю. Филимонов, В.Е. Овчаренко // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 17—22.

5. **Dearnaley G.** Ion Implantation and Ion Assisted Coatings for Wear Resistance in Metals // Surf. Eng. 1986. Vol. 2. P. 213—221.

6. **Применение** микроплазменного метода для упрочнения приповерхностного слоя образцов из стали 45 / В.А. Иванов, Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, М.Е. Коныжев // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 84—89.

7. **Edenhofer B., Jacobs M.H., George J.N.** Industrial Processes, Applications and Benefits of Plasma Heat Treatment, Plasma Heat Treatment, Science and Technology // PYC Edition, 1987. P. 399—415.

8. **Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П.** Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Саратов, Саратовский гос. техн. ун-т, 2009. 176 с.

9. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.

УДК 621.039.53

Ю.В. Вытнов, А.Г. Александрин, С.В. Голубев, Е.А. Герасимов, В.П. Кошман
(АО "ОКБМ Африкантов")
E-mail: golubevsv@okbm.nnov.ru

Применение порошков В3К для плазменной наплавки уплотнительных и трущихся поверхностей арматуры АЭУ

Рассмотрено применение порошков для плазменной наплавки износостойких покрытий уплотнительных и трущихся поверхностей запорной арматуры атомных энергетических установок (АЭУ). Представлены характеристики наплавочных порошков, приведены значения твердости наплавки, описан процесс наплавки и методы контроля. Отмечены преимущества применения автоматической плазменной наплавки по сравнению с ручными способами.

***Ключевые слова**: автоматическая плазменная наплавка, наплавочный порошок, уплотнительная и трущаяся поверхности.*

Application of powders for plasma surfacing of wear-resistant coatings of sealing and friction surfaces of nuclear power unit valves, are considered. Characteristics of surfacing materials are presented; surfacing hardness values are given; surfacing process and inspection methods are described. Advantages of automated plasma surfacing application as compared with hand methods are emphasized.

***Keywords:** automated plasma surfacing, surfacing powder, sealing and friction surfaces.*

Для наплавки износостойких покрытий уплотнительных и трущихся поверхностей паровой запорной арматуры атомных энергетических установок (АЭУ), эксплуатирующихся при температуре до 350 °С в среде "вода—пар", широко применяют аргонодуговую наплавку стеллитовыми прутками марки В3К (ПР-КХ30ВС) и электродуговую наплавку электродами ЦН-2 со стержнями из данного сплава. Такие наплавки обладают высокой твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

up_517.indd 218 27.04.2017 12:10:15

Таблица 1

Химический состав порошка В3К

Материал	Массовая доля элементов*, %												
	C	Cr	Si	Ni	W	Fe	S	P	Mo	Mn	Al	Cu	B
						не более							
Исследуемый порошок В3К	1,07	31,08	2,13	0,73	4,11	0,35	0,013	0,003	0,073	0,056	0,05	0,002	0,002
Требования ГОСТ 21449—75	1,0...1,3	28,0...32,0	2,0...2,7	0,5...2,0	4,0...5,0	2,0	0,020	0,020	1,0	0,50	0,05	0,10	0,10
*Со — основа.													

Таблица 2

Химический состав и твердость наплавленного порошком В3К металла

Материал	Массовая доля элементов*, %								Твердость HRC
	C	Cr	Si	Ni	W	Fe	S	P	
						не более			
Металл, наплавленный порошком В3К	1,08	29,93	2,05	0,74	4,23	0,36	0,011	0,012	44...45
Требования нормативных документов	0,09...1,30	27,0...32,0	1,9...2,7	0,4...2,5	4,0...5,0	2,0	0,020	0,025	42...48
*Со — основа.									

АО "ОКБМ Африкантов" совместно с ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей" (г. Санкт-Петербург) и ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" (г. Москва) провели работы по созданию порошков на базе стеллита В3К для плазменно-порошковой наплавки, разработке технических условий (ТУ) на порошки и отработке технологии наплавки данными порошками.

Переход на плазменно-порошковую наплавку существенно увеличивает производительность наплавочных работ, снижает трудозатраты и зависимость качества наплавки от квалификации сварщика.

ОАО "Полема" (г. Тула) производит наплавочные порошки марки В3К по разработанным ТУ. Данный порошок по химическому составу соответствует прутка В3К и обеспечивает получение наплавленного металла, твердость и качество поверхности которого соответствуют требованиям нормативных документов.

Рис. 1. Внешний вид технологического сварного соединения, наплавленного порошком марки В3К

В соответствии с утвержденной программой межведомственных испытаний использовали партию наплавочного порошка марки В3К (табл. 1). В качестве материала для наплавочных образцов применяли сталь 12Х18Н10Т.

Наплавку вели на автоматической установке непрерывно в 2—3 слоя до достижения толщины 4...5 мм на предварительно подогретых наплавочных образцах силой тока 140...180 А. После этого выполняли термическую обработку наплавленных образцов (табл. 2).

Твердость наплавленного металла, измеренная в десяти точках, равномерно распределенных по поверхности, стабильная (44...45 HRC).

При визуальном и капиллярном контроле наплавленной поверхности трещин и других недопустимых наружных дефектов не обнаружено, поверхность наплавки имеет равномерную чешуйчатость (рис. 1).

Металлографические исследования, проведенные на поперечных макрошлифах, подтвердили отсутствие дефектов и высокое качество наплавленного металла и зоны сплавления (рис. 2).

Для проведения стендовых испытаний изготовлены и наплавлены штатные детали клапана Ду 80 из стали марки 12Х18Н10Т. Для наплавки применяли порошок марки В3К (рис. 3).

Наплавленные поверхности контролировали неразрушающими методами в соответствии с требованиями нормативных документов:

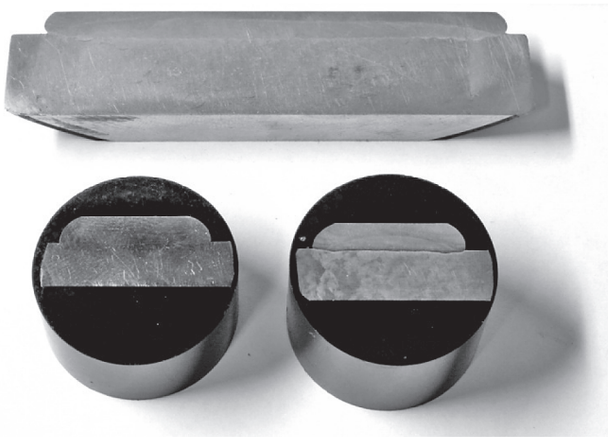
визуальный и измерительный контроль (до и после механической обработки) — дефектов не обнаружено;

капиллярная дефектоскопия в объеме 100 % всех наплавленных поверхностей, включая боковые поверхности и зону сплавления, — дефектов не обнаружено.

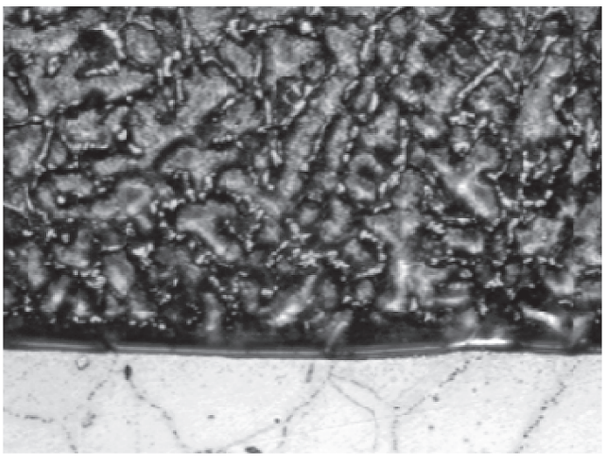
up_517.indd 219 27.04.2017 12:10:17

Клапан Ду 80 в сборе прошел стендовые испытания по программе типовых испытаний с положительными результатами (табл. 3).

Результаты испытаний, в том числе стендовых, свидетельствуют о высоком качестве и работоспособности

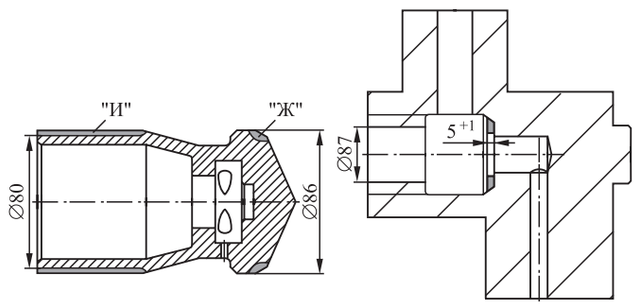


а)



б)

Рис. 2. Макрошлифы (*а*), изготовленные из технологического сварного соединения, наплавленного порошком марки ВЗК, и микроструктура (*б*) зоны сплавления (×500)



а) *б)*

Рис. 3. Детали клапана Ду 80:
а — золотник; *б* — корпус; поверхности "И", "Ж" — наплавка аттестуемым порошком

Таблица 3

Результаты стендовых испытаний

Параметр	Данные испытаний
1. Прочность, плотность и герметичность	Течи воды через металл корпуса, сильфонную сборку и наплавку нет. Остаточных деформаций и разрывов металла корпуса и сильфонной сборки не обнаружено
2. Герметичность затвора	Течи воды нет
3. Работоспособность и проверка хода клапана	Клапан выдержан в течение 4 ч при $t = 250$ °С, $P = 8{,}2$ МПа и $Q = 40$ м^3/ч. Выполнено 250 циклов "закрыто-открыто" от пневмопривода и 5 циклов от ручного привода. Замечаний нет. Время срабатывания: $\tau_{закр} = 3{,}5$ с; $\tau_{откр} = 2{,}9$ с. При работе все подвижные части перемещались свободно, плавно без заеданий
4. Герметичность затвора после испытаний на работоспособность	Течи воды нет
5. Работоспособность на режимах, имитирующих условия эксплуатации	Выполнено два термоброска. После каждого клапан выдержан в течение 4 ч при $t = 250$°С, $P = 8{,}2$ МПа и $Q = 40$ м^3/ч. Замечаний нет. Течи воды через металл корпуса, сильфонной сборки и сварные швы нет. Видимых остаточных деформаций, разрывов металла корпуса и сильфонной сборки нет
6. Герметичность затвора после испытаний на работоспособность на режимах, имитирующих условия эксплуатации	Течи воды нет
7. Целостность золотника, доступных для осмотра внутренних поверхностей корпуса с горловиной, состояния их направляющих и уплотнительных поверхностей после испытаний, определяемые визуальным осмотром в целях выявления видимых остаточных деформаций, механических повреждений, коррозионного разрушения и других дефектов	На уплотнительных поверхностях и поверхности золотника видимых остаточных деформаций, механических повреждений не обнаружено
8. Состояние наплавленных поверхностей золотника и корпуса, контролируемое методом капиллярной дефектоскопии по ОСТ 5.9537-81 (класс чувствительности II) после испытаний	Дефектов не обнаружено
9. Твердость наплавленных поверхностей после испытаний (см. рис. 3)	Поверхность "И" — 45 HRC; поверхность "Ж" — 40,5...47 HRC

up_517.indd 220 27.04.2017 12:10:17

наплавки, выполненной плазменным способом с применением порошка марки ВЗК, и отвечают требованиям нормативных документов применительно к условиям эксплуатации АЭУ.

Выводы

1. Наплавочный порошок марки ВЗК поставки ОАО "Полема" по химическому составу, твердости и качеству наплавленного металла отвечает требованиям нормативной документации для наплавок уплотнительных и трущихся поверхностей арматуры АЭУ.

2. Работы по освоению технологии автоматической плазменно-порошковой наплавки наплавочным порошком показали положительное качество наплавки:

хорошее формирование наплавочных валиков;

отсутствие дефектов в наплавленном металле;

уменьшение числа слоев наплавленного металла до 2—3 (при ручной наплавке прутками ВЗК — 6—8 слоев) с обеспечением требуемой высоты наплавки.

3. По разработанной совместно с ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей" программе комиссионных испытаний изготовлен и испытан опытный образец запорной арматуры "Клапан Ду 80". По результатам испытаний порошок марки ВЗК рекомендован межведомственной комиссией для плазменно-порошковой наплавки износостойкого покрытия уплотнительных и трущихся поверхностей запорной арматуры АЭУ и внесения в отраслевые нормативные документы по наплавке.

УДК 669

[1]Т.В. Тарасова, [2]С.Д. Кузьмин, [3]И.С. Белашова, [2]М.В. Прокофьев, [1]Т.Д. Белоконь
([1]Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ),
[3]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))
E-mail: belokon_td@mail.ru

Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали*

Показано влияние излучения волоконного лазера на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали 95Х18. Исследованы закономерности изменения структуры обработанной лазером поверхности методами рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Установлена высокая эффективность лазерной термической обработки стали 95Х18 с последующим отпуском для повышения триботехнических свойств поверхностных слоев.

Ключевые слова: *лазерная термическая обработка, коррозионно-стойкие хромистые стали, упрочнение стали 95Х18, повышение свойств поверхностных слоев, выделение мелкодисперсной карбидной фазы.*

The influence of the fiber laser radiation on the microstructure and properties of the corrosion-resistant steel 95X18 has been shown. The changes regularities of the laser-treated surface structure by the methods of the X-ray and micro X-ray diffraction analyses have been researched. The high efficiency of the laser heat treatment of the steel 95X18 with the following tempering for the improvement of the tribotechnical properties of the surface layers has been identified.

Keywords: *laser heat treatment, corrosion-resistant chromium steels, hardening of the steel 95X18, increase of the properties of the surface layers, selection of the fine-dyspersated carbide phase.*

Введение

Совершенствование и внедрение современных методов упрочнения деталей направлены на увеличение износостойкости рабочих поверхностей и срока службы изделий. В работе исследована коррозионно-стойкая сталь ледебуритного класса 95Х18. Данная марка стали находит широкое применение в различных отраслях машиностроения, где предъявляются высокие требования к прочностным характеристикам и коррозионной стойкости рабочих поверхностей. Использование современных методов упрочнения, главным образом методов, в основе которых лежит воздействие на материал концентрированных источников энергии, в том числе лазерного излучения, позволяет получить на заданных глубине и траектории обработки уникаль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

up_517.indd 221 27.04.2017 12:10:17

ные свойства поверхности [1, 2]. Использование излучения современных волоконных лазеров позволяет эффективно обрабатывать детали сложной формы по различным траекториям и с разными принципами воздействия на материал [3—5]. Для эффективного применения методов лазерной обработки требуется комплексное исследование влияния различных факторов обработки на упрочняемую поверхность.

Цель работы — показать влияние выбранных режимов лазерного излучения на микроструктуру и свойства стали 95Х18.

Методика исследований

Для исследования изготовили образцы из коррозионно-стойкой стали 95Х18 после стандартной термической обработки и после лазерной термической обработки (ЛТО).

Стандартная термическая обработка стали 95Х18 представлена в табл. 1. Исследование процессов ЛТО стали 95Х18 проводили после облучения поверхности образцов, подвергнутых предварительной термической обработке (режим: неполный отжиг, твердость 28 HRC). ЛТО проводили на волоконном лазере с длиной волны 1,07 мкм [6]. Обработку проводили в импульсном режиме генерации излучения. Плотность мощности, необходимую для достижения требуемой температуры в зоне обработки материала, достигали подбором режима: энергии излучения, частоты импульсов, продолжительности облучения и диаметра пятна лазерного луча. Выбранный преимущественный режим обработки: энергия импульса E = 2,25 Дж; длительность импульса τ = 10 мс; частота импульсов f = 10 Гц; диаметр пятна лазерного луча d = 0,4 мм; скорость перемещения излучения V = 5 мм/с.

Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя определяли по стандартной методике согласно ГОСТ 9450—76. Испытания проводили на микротвердомерах Durascan 80, ПМТ-3 и Qness Q30A при массе нагрузки 50 г (для исследований на установках Durascan 80, ПТМ-3) и 100 г (для исследований на установке Qness Q30A) на шлифах в направлении, перпендикулярном к поверхности, с шагом 25 мкм.

Были проведены дополнительные исследования образцов на теплостойкость в трубчатой вакуумной печи ПТ-1600 при температурах 300, 500 и 800 °С.

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на рентгеновском аппарате для структурного анализа ALR X'TRA (фирмы Thermo-Fisher Scientific, Швейцария) "9-9" методом сканирования с фокусировкой рентгеновских лучей по Брегту—Брентано [7]. На рентгенограммах, полученных с образца после ЛТО с оплавлением поверхности, кроме линий α-фазы появились линии γ-фазы.

Для оценки механических характеристик упрочненных образцов проводили измерения предела прочности, условного предела текучести, относительного удлинения (на разрывной машине MTS Insight 100, методика проведения испытаний соответствует ГОСТ 1497—84, размеры и форма образцов соответствуют ГОСТ 1497—84) и ударной вязкости (на копре марки Walter and Bai PH50, методика испытания и размеры образцов соответствуют ГОСТ 9454—78).

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования микротвердости и теплостойкости поверхности. В результате ЛТО по режиму, указанному выше, в зоне лазерного влияния (рис. 1, *а*) образуются зона плавления и зона термического влияния. Зона плавления имеет структуру с ярко выраженным расположением дендритов, кристаллизующихся в направлении максимального отвода тепла (рис. 1, *б*). Наибольшее значение микротвердости наблюдается на границе зоны плавления и зоны термического влияния (рис. 1, *б*). В зоне термического влияния наблюдаются растворение крупных карбидов эвтектического происхождения, появление мартенсита отпуска и уменьшение количества остаточного аустенита.

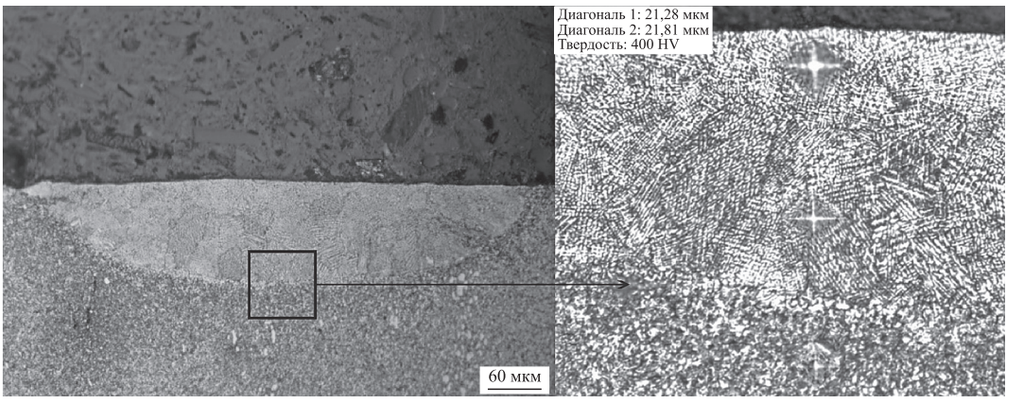
Распределение микротвердости образца после лазерной обработки представлено на рис. 2, *а*.

Таблица 1

Стандартная термическая обработка стали 95Х18

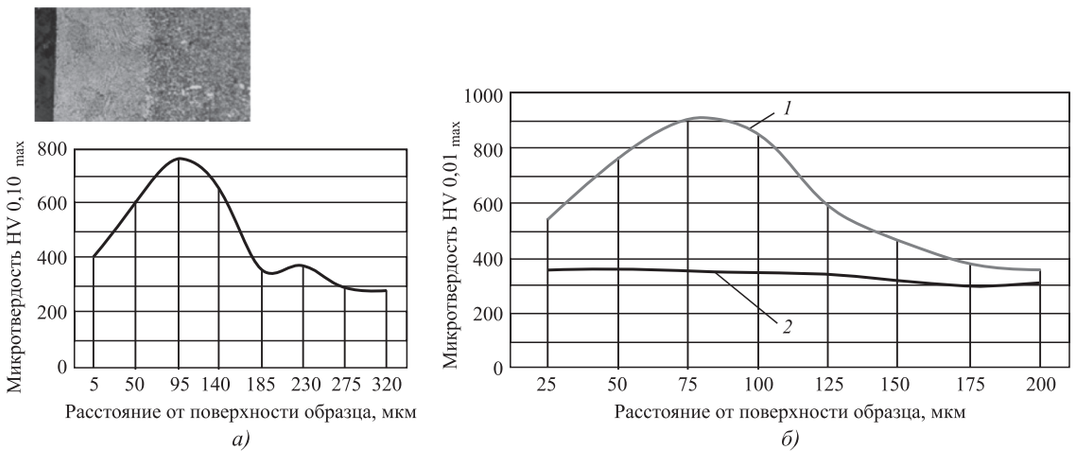
Операция	Температура, время	Примечания
Предварительный нагрев	800...850 °С	Для снижения перепада температур и риска образования трещин при последующей закалке
Закалка с охлаждением в масло или на воздухе	1050...1060 °С	После закалки количество остаточного аустенита достигает 34 %
Обработка холодом	–70 °С, 1 ч	Обработка холодом приводит к снижению остаточного аустенита до 9 %
Низкий отпуск	100/150/200 °С	Твердость равна 60...61/59...61/57...59 HRC

up_517.indd 222 27.04.2017 12:10:19



а) *б)*

Рис. 1. Микроструктура зоны лазерного влияния стали 95Х18 (режим: E = 2,25 Дж; τ = 10 мс; f = 10 Гц; d = 0,4 мм; V = 5 мм/с): *а* — ×60; *б* — ×500



а) *б)*

Рис. 2. Распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя стали 95Х18 (*а*) и в зоне лазерного воздействия после ЛТО (E = 2,2 Дж; τ = 10 мс; f = 10 Гц; d = 0,4 мм; V = 5 мм/с) и неполного отжига (*б*) при температурах 300 (*1*) и 800 °С (*2*)

Широкое применение исследуемой стали 95Х18 для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, накладывает дополнительное требование к теплостойкости поверхности. Анализ полученных результатов исследования образцов на теплостойкость показал, что после неполного отжига при температуре 300 °С наблюдается увеличение микротвердости поверхности образца после ЛТО до значений 910 HV (рис. 2, *б*).

Данное изменение микротвердости, как показали результаты испытаний, связано с уменьшением количества остаточного аустенита и выделения мелкодисперсной карбидной фазы [8]. Такое изменение структуры обеспечивает дополнительное упрочнение и снижение нежелательных напряжений, которые в процессе эксплуатации изделия способны привести к образованию трещин. При температуре отжига 800 °С произошли коагуляция карбидной фазы и распад мартенсита, что привело к разупрочнению поверхности.

Результаты исследования фазового состава. Для подтверждения предположения о причинах изменения качественной характеристики поверхности образцов после лазерной обработки были проведены комплексные исследования структуры материала. Методом рентгеноструктурного анализа установлен фазовый состав стали 95Х18 после ЛТО по выбранному режиму (E = 2,25 Дж; τ = 10 мс; f = 10 Гц; d = 0,4 мм; V = 5 мм/с).

Количество аустенита в сталях определяли методом измерения интенсивностей линий α- и γ-фазы по стандартной методике. В результате сравнения дифрактограммы сплава с эталонными рентгенограммами базы Pdf-2 установлено, что образец является трехфазным: основная фаза (γ-фаза, аустенит) в количестве более 75 % мол. (Pdf Number 010-71-4649) кристаллизуется в ГЦК-решетке Fm3m с параметром элементарной ячейки a = 0,3613 нм; вторая (α-фаза, мартенсит) — в количестве менее 20 % мол. (Pdf Number 010-71-4648) кристаллизуется в ОЦК-решетке с параметром эле-

up_517.indd 223 27.04.2017 12:10:19

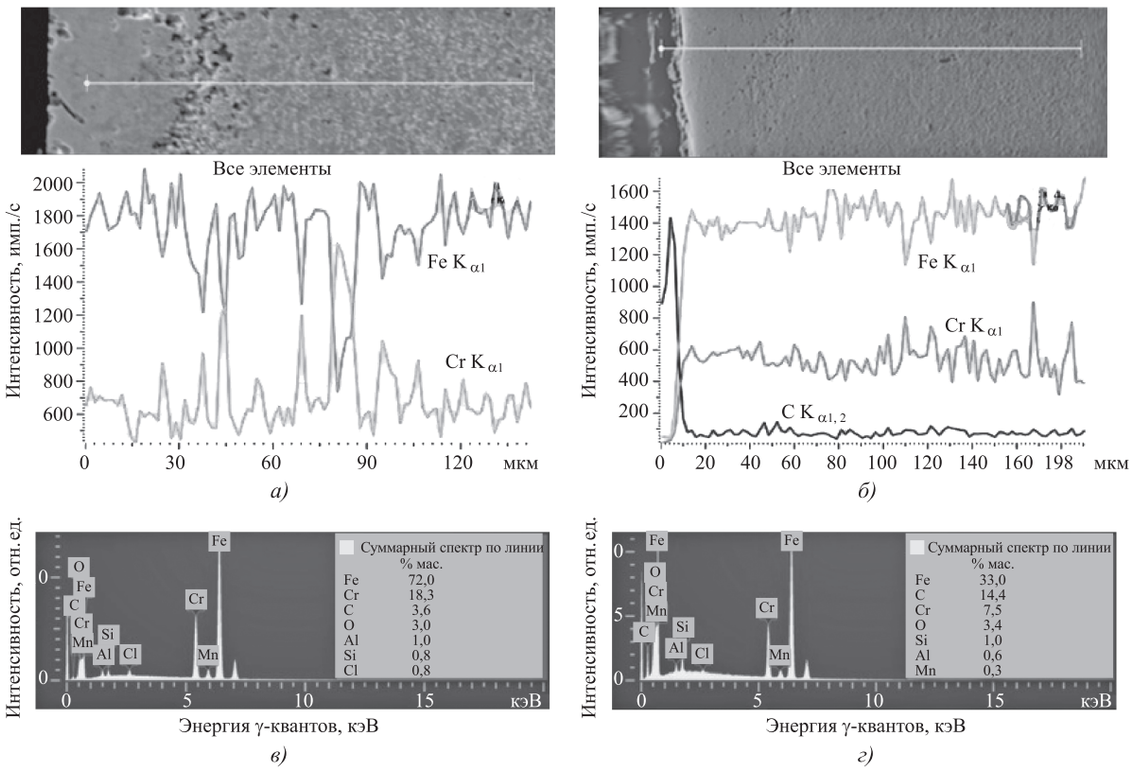


Рис. 3. Распределения концентраций элементов по глубине упрочненного слоя образца из стали 95Х18 после ЛТО и после ЛТО и отжига при температуре 300 °С, а также спектральные изображения этих распределений (режим: *E* = 2,25 Дж; τ = 10 мс; *f* = 10 Гц; *d* = 0,4 мм; *V* = 5 мм/с)

ментарной ячейки a = 0,2875 нм. Также присутствует фаза карбида хрома состава $Cr_{15,58}Fe_{7,42}C_6$ в количестве менее 5 % мол. (Pdf Number 010-78-1502). Выявленная программой Crystallographica Search-Match фаза карбида хрома хорошо совпадает с рентгеновскими данными по параметрам элементарной ячейки и интенсивности линий, кроме того, на дифрактограмме видны линии малой интенсивности (рис. 3), что указывает на достаточно высокую вероятность корректного определения этой фазы.

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ образцов подтвердил данные металлографического исследования и предположение о выделении мелкодисперсной карбидной фазы в зоне лазерного влияния. Установлено увеличение неоднородности растворения железа и хрома в местах скопления карбидной фазы.

Распределение концентраций элементов по глубине упрочненного слоя после ЛТО представлено на рис. 3, *а*, после ЛТО и отжига при температуре 300 °С — на рис. 3, *б*. Спектральное изображение распределения элементов в зоне лазерного воздействия после ЛТО приведено на рис. 3, *в*, после ЛТО и отжига при температуре 300 °С — на рис. 3, *г*.

Таким образом, результаты микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного и металлографиче-

Таблица 2

Режимы лазерной обработки образцов для механических испытаний

Режим	Энергия импульса *E*, Дж	Длительность импульса τ, мс	Частота импульсов *f*, Гц	Диаметр пятна лазерного луча *d*, мм	Скорость перемещения излучения *V*, мм/с
1.1	22	10	12	1	1,2
1.2	1,5	10	12	1	1,2
1.3	16	10	12	3	0,4
2.1	0,9	10	25	0,4	0,5
2.2	2,25	10	10	0,4	0,5

up_517.indd 224 27.04.2017 12:10:19

Таблица 3

Механические характеристики стали 95Х18 после лазерной обработки по выбранному режиму и после неполного отжига

Режим обработки	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	*KCU*, Дж/см^2
Неполный отжиг	720	329	18,3	15,2
ЛТО	732	394	16,4	14,4

ского анализов показали наличие в зоне термического влияния образцов, обработанных лазерным излучением, карбидов, значительно более мелких в сравнении с исходным материалом, что связано с частичным растворением карбидной фазы в зоне термического влияния.

Результаты исследования механических свойств. Исследование механических свойств проводили при различных режимах лазерного воздействия (табл. 2).

Для образцов, обработанных по выбранному оптимальному режиму, наблюдалось небольшое повышение предела прочности и условного предела текучести по сравнению с аналогичными характеристиками стали после неполного отжига, что связано с повышением твердости поверхностного слоя после ЛТО (табл. 3). Значения относительного удлинения и ударной вязкости уменьшились незначительно.

Выводы

1. Лазерная термообработка коррозионно-стойкой хромистой стали лазерным импульсным излучением приводит к упрочнению поверхности. Основной эффект упрочнения стали 95Х18 обусловлен образованием мелкодисперсной мартенситной структуры с равномерно распределенными измельченными карбидами (твердость 765 HV).

2. Установлена высокая эффективность лазерной термической обработки стали 95Х18 с последующим отпуском при температуре до 500 °С для повышения триботехнических свойств поверхностных слоев за счет дополнительного уменьшения количества остаточного аустенита и выделения мелкодисперсной карбидной фазы. Такое изменение структуры обеспечивает дополнительное упрочнение и снижение нежелательных напряжений (увеличение микротвердости поверхности до 910 HV).

3. Микрорентгеноспектральный и металлографический анализы показали уменьшение количества остаточного аустенита в зоне термического влияния по сравнению с зоной плавления, а также наличие карбидов, значительно более мелких, чем в исходном материале, без обработки.

4. Рентгеноструктурный анализ показал наличие в зоне плавления трех фаз: γ-фазы, аустенита (70 %); α-фазы, мартенсита (20 %) и карбидной фазы $Cr_{15,58}Fe_{7,42}C_6$ (5 %).

5. Сравнительное исследование механических характеристик обработанных образцов, упрочненных по выбранным режимам, показало рост предела прочности (на 1,7 %) и относительного предела текучести (на 19,8 %) при незначительном снижении пластичности (на 3,8 %) и ударной вязкости (на 2,6 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Задачи технического перевооружения промышленности // Вестник МГТУ "Станкин". 2008. № 1. С. 5—7.

2. **Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.** Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.

3. **Тарасова Т.В.** Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионностойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов, 2010. № 6. С. 54—58.

4. **Коррозионно-стойкие**, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы / А.П. Шлямнев и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 232 с.

5. **Тарасова Т.В., Назаров А.П., Прокофьев М.В.** Влияние режимов селективного лазерного плавления на структуру и физико-механические свойства жаропрочных кобальтовых сплавов // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 6. С. 636—641.

6. **Голубенко Ю.В., Богданов А.В., Иванов Ю.В.** Волоконные технологические лазеры: учеб.-метод. пособие. // Моск. гос. техн. ун-т радиотехники, электроники и автоматики, МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 31 с.

7. **Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Тихонова Е.П.** Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 2. С. 140—143.

8. **Тарасова Т.В., Филатова А.А.** Технологические проблемы и перспективы внедрения метода селективного лазерного плавления для изготовления элементов конструкций летательных аппаратов // Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении (МТЕТ-2014): Труды междунар. науч.-техн. конф., 2014. СПб.: Изд-во Политех. ун-та. С. 255—265.

up_517.indd 225 27.04.2017 12:10:19

УДК 66.086/.087

А.А. Груздев, Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин
(Московский политехнический университет)
E-mail: gryzdandrey@yandex.ru

Гибкий технологический модуль для модификации свойств поверхностного слоя малоразмерных деталей

Показана актуальность создания унифицированных технологий на основе применения электроразрядных явлений в системе "электролит—металл". Сформулированы требования к переналаживаемым технологическим модулям для реализации таких технологий. Описана многоцелевая унифицированная установка для выполнения различных операций электролитной обработки.

Ключевые слова: *электролитическое покрытие, модификация свойств поверхностного слоя, электроразрядные процессы в электролитах, многоцелевая унифицированная установка.*

High priority aspect of the making out of the unified technologies based on electro discharge processes in the system "electrolyte—metal" is shown. Some demands related to the flexible technological equipment for realization of such technologies are discussed. Multipurpose unified machine tool system designed for this technologies realization is described.

Keywords: *electrolyte coating, surface layer properties modification, electro discharge processes in electrolytes, multipurpose unified machine tool unit.*

Введение

Среди многочисленных электрофизических и электрохимических методов обработки изделий, широко применяемых в различных отраслях машиностроения [1—3], заслуженное внимание уделяется методам, предназначенным для нанесения функциональных покрытий и модификации свойств поверхностного слоя (МСПС) деталей машин и позволяющим существенно повысить эксплуатационные показатели изделий.

Разработан широкий спектр технологий, основанных на различных физико-химических процессах [4]. Отдельную группу составляют технологии, в которых обработка деталей осуществляется в рабочих жидкостях — электролитах [5]. Так, в электролитах реализуют технологии термической и химико-термической обработки [6], микродугового оксидирования [7], электролитно-плазменного полирования [8], анодного оксидирования и катодного осаждения покрытий. Пионерские работы в этом направлении выполнены в 60—80-х гг. прошлого века в Институте прикладной физики АН Молдовы и Физико-техническом институте АН Белоруссии [8, 9].

Необходимость создания гибкого многоцелевого оборудования и требования к нему

В условиях мелкосерийного и единичного производства, а также при выполнении НИОКР на стадии технологической подготовки применение приведенных выше технологий сдерживается из-за отсутствия гибкого многоцелевого оборудования, характеризуемого высоким коэффициентом загрузки и минимальным временем, затрачиваемым на переналадку. Такое оборудование особенно востребовано в приборостроении при обработке деталей небольших размеров, в инструментальном производстве (осевой инструмент: сверла, метчики, плашки и др.), в опытно-экспериментальном производстве. Его создание осложняется тем, что перечисленные выше электрохимические и электрофизические электролитные процессы протекают в широком диапазоне электрических параметров, в них используются различные виды тока и напряжения, различные по составу и свойствам рабочие жидкости [10].

Изложенное подтверждается данными табл. 1, в которой представлены характеристики некоторых технологий электролитной обработки. Видно, что технологические процессы электролитной обработки протекают в диапазоне напряжений от 8 до 450 В, при наложении постоянного, импульсного или знакопеременного тока, различной полярности электрода-детали, в растворах минеральных солей, щелочей или кислот различной концентрации. В них решаются разные технологические задачи. Поэтому для создания унифицированной многоцелевой технологической установки необходимо разработать универсальный источник питания, обеспе-

up_517.indd 226 27.04.2017 12:10:19

Таблица 1

Характеристики некоторых технологий МСПС

Наименование технологии	Параметры режима	Рабочие среды	Достигнутые результаты
Электролитный нагрев под термообработку	Напряжение 150...300 В, плотность тока 1...4 А/см^2	Водные растворы (5...20 %) NH_4CL, NaCl, NaOH	Нагрев небольших деталей или их элементов до температур 600...1000 °С за время 10...15 с
Химико-термическая обработка:	Напряжение 150...300 В, плотность тока 1...4 А/см^2		Диффузионное насыщение поверхностного слоя С, N, В и др.
● азотирование	600...800 °С, 5...10 мин	15 % NH_4Cl + + 5 % NH_4OH + H_2O	Максимальная концентрация азота достигает 5 %, глубина слоя 0,2...0,3 мм
● науглероживание	900...1000 °С, 5...10 мин	15 % NH_4Cl + + 10 % C_2H_6CO + H_2O	Максимальная концентрация углерода 0,9...1,2 %, глубина слоя 0,2...0,3 мм
● нитроцементация	800...1100 °С, 5...10 мин	15 % NH_4Cl + 10 % C_2H_6CO + + 5 % HCl + H_2O	Глубина упрочненного слоя 0,2...0,7 мм в зависимости от марки стали
● борирование	1000...1200 °С, 10...12 мин	100 г/л NaOH + + 30 г/л $Na_2B_4O_7$ + H_2O	Упрочнение поверхностного слоя, повышение износостойкости в 2...4 раза, снижение шероховатости поверхности стали 45
Микродуговое оксидирование с последующей термообработкой	Гальваностатический режим: ток 10...100 А, напряжение до 400 В, плотность тока 20...40 А/дм^2, последующий отжиг	4 г/л KOH + 6 г/л H_2O_2 + + 2 г/л Na_2SiO_3 + H_2O (оксидный слой на АК7 толщиной (11 ± 2 мкм))	Формирование термомодифицированной оксидной пленки толщиной до 300 мкм с высокой коррозионно-, жаро- и износостойкостью
Электролитно-плазменное полирование	Напряжение 200...420 В, плотность тока 0,2...1 А/см^2, температура электролита 60...90 °С, время обработки 1...10 мин	(4...6) %-ный водный раствор $(NH_4Cl)_2SO_4$ с различными добавками	Очистка, обезжиривание, активация поверхности, снижение шероховатости до *Ra* = 0,05 мкм, удаление заусенцев, скругление кромок (стали, титановые сплавы)
Гальваническое осаждение покрытий:	Напряжение 8...24 В, плотность тока 2...40 А/дм^2	Водные растворы солей с различными добавками	Получение металлических и композиционных покрытий различного назначения
● композиционное никель-алмазное покрытие	Напряжение 20 В, плотность тока 10...20 А/дм^2, температура 60 °С, перемешивание раствора. Суспензия детонационных алмазов	30 г/л $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ + + 90 г/л $(NH_4)_2C_2O_4$ + + 15 г/л NaF + + 20 г/л CH_3COONa + + 2 г/л NaBr, pH = 8	Никелевое покрытие толщиной 5...15 мкм с графитоалмазными включениями
Комбинированная обработка	Гальваническое осаждение + электроискровое легирование электродами из графита, хрома или никеля + цементация в электролите	Рабочие среды и параметры режима в соответствии с рекомендациями	Повышение толщины и показателей качества покрытия

чивающий широкий диапазон регулирования тока и напряжения, способный работать в режиме как источника тока, так и источника напряжения, оснащенный системой управления с быстрой перенастройкой параметров режима. Необходима также система быстрого приготовления и замены рабочей жидкости.

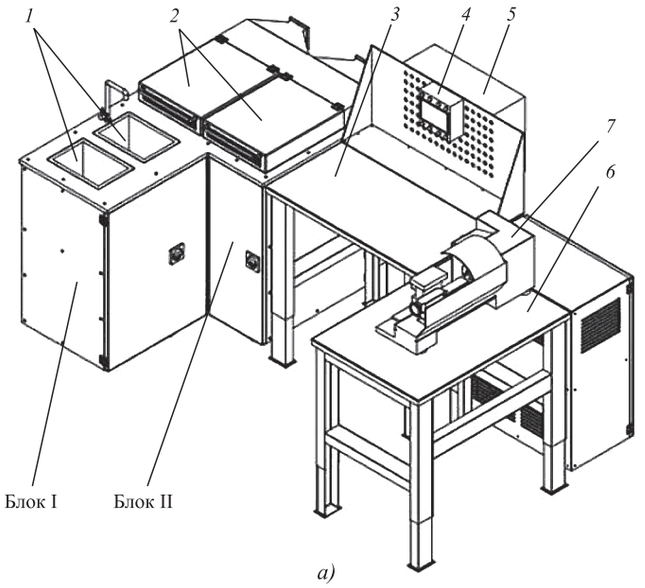
Гибкий технологический модуль для МСПС деталей машин

Разработанный модуль для МСПС деталей представлен на рисунке. В базовой комплектации он состоит из следующих функциональных элементов: блоков I и II для подготовительно-заключительных операций, стола подготовки деталей к загрузке *3*, панели управления с устройством управления *4*, универсального блока питания *5*, стола *6* с установкой для электроискрового легирования *7*.

Блок I представляет собой закрытый корпус, в верхней части которого установлены две ванны *1* объемом 20...25 л каждая, а внутри смонтированы баки, фильтры и устройство подогрева или охлаждения рабочей жидкости. Ванны блока предназначены для промывки деталей горячей и холодной водой и обезжиривания их поверхностей.

Блок II конструктивно подобен блоку I, но отличается размерами. В его верхней части смонтированы рабочие ванны *2* объемом 35...50 л с системой принудительной вентиляции (боковой отсос). Предусмотрена возможность подогрева или охлаждения рабочей жидкости перед подачей в ванну с контролем температуры ванны в автоматическом режиме и монтирования на ванне излу-

up_517.indd 227 27.04.2017 12:10:21



а)

б)

Основные функциональные элементы (*а*) и общий вид промышленного образца (*б*) модуля для МСПС деталей

чателя ультразвуковых колебаний. При необходимости на рабочей ванне устанавливается устройство опускания траверсы для подвески деталей с регулируемой подачей. Баки для хранения и подготовки рабочих жидкостей изготовлены из химически стойких материалов и вместе с насосами и трубопроводами смонтированы в корпусе блока II под рабочими ваннами.

При необходимости число рабочих или вспомогательных ванн может быть увеличено путем добавления блоков типа I или II в состав установки.

На столе *3* смонтирован кронштейн с устройством и панелью управления *4*. Устройство управления позволяет установить и поддерживать требуемый режим обработки деталей в течение рабочего цикла. Графический интерфейс состоит из различных графических объектов, имитирующих реальные исполнительные и сигнализирующие устройства, а также цифровой панели для ввода установок.

Универсальный источник питания *5* снабжен тремя выходными каналами, предназначенными для выполнения различных видов работ. Его технические характеристики приведены в табл. 2. Источник управляется от встроенного пульта с сенсорным дисплеем.

Таблица 2

Техническая характеристика универсального источника питания

Наименование параметра	Числовое значение
Максимальная выходная мощность источника питания, кВт	25
КПД силового блока, %	Не менее 85
Питание источника	3 × 380 В, 50 Гц
Габаритные размеры силового блока, мм	650 × 650 × 230
Класс защиты корпуса источника питания	1Р20
Число каналов	3 (А, В, С)
Канал А (70 В × 10 А)	
Среднее значение выходного тока, А	0,1...10
Выходное напряжение (шаг регулирования 10 В), В	1...70
Амплитудное значение импульсного тока, А	До 300
Погрешность автоматической стабилизации тока (источник тока), %	Не более 3
Погрешность автоматической стабилизации напряжения (источник напряжения), %	Не более 3
Длительность импульса, мкс	10...2000
Энергия импульса, Дж	0,01...3
Частота следования импульсов, Гц	10...5000
Канал В (30 В × 40 А)	
Выходной ток, А	0,4...40
Выходное напряжение, В	1...30
Коэффициент пульсации выходного тока на частоте преобразования 300 Гц, %	Не более 3
Погрешность автоматической стабилизации тока (источник тока), %	Не более 3
Погрешность автоматической стабилизации напряжения (источник напряжения), %	Не более 3
Канал С (500 В × 50 А)	
Режим работы	При постоянном напряжении; при импульсном знакопеременном асимметричном напряжении
Выходной ток при напряжении 500 В	0,2...20
Выходной ток при напряжении 200 В	0,5...50
Коэффициент асимметрии	0...0,5
Коэффициент пульсации выходного тока на частоте преобразования 300 Гц, %	Не более 3
Погрешность автоматической стабилизации тока (источник тока), %	Не более 3
Дискретность установки тока, А	1
Выходное напряжение, В	1...500
Дискретность регулирования напряжения, В	10
Погрешность автоматической стабилизации напряжения (источник напряжения), %	Не более 3

up_517.indd 228 27.04.2017 12:10:21

Универсальный блок питания дает возможность проводить описанные выше технологические процессы в электролитах при соответствующем выборе их состава.

На столе *6* расположены установка и оснастка *7* для электроискрового легирования. В зависимости от назначения и характера операции используют оснастку для ручного или механизированного легирования поверхности. Операция электроискрового легирования используется в качестве отдельной операции модификации свойств поверхностного слоя или как одна из операций технологии нанесения многофункционального многослойного покрытия.

Модуль должен эксплуатироваться в условиях, предусмотренных действующими санитарными нормами для работ с использованием растворов минеральных солей, кислот и других веществ, соответствующих номенклатуре выполняемых операций, а также нормами работ на промышленных электроустановках с напряжением до 1000 В. В конструкции установки предусмотрены необходимые блокировки типа "открыта крышка ванны — нет рабочего напряжения".

Работа на модуле включает следующие этапы:

подготовительные работы, связанные с приготовлением рабочих жидкостей, соответствующих характеру выполняемых операций; расчетом или выбором параметров режима в зависимости от площади обрабатываемой поверхности, массы и материала загружаемой партии деталей; подготовкой и наладкой оснастки;

выполнение операций подготовки поверхности (очистки, промывки, обезжиривания, катодной обработки и др.);

загрузка партии деталей в одну из основных ванн *2*, подключение электродов ванны к требуемому каналу универсального источника питания, настройка параметров режима, включение рабочего цикла;

выполнение заключительных операций (мойки, пассивирования, сушки);

контроль качества выполненных работ, передача изделий на склад или на следующую операцию.

В процессе отладки модуля на нем апробированы и освоены следующие технологии:

гальваническое нанесение композиционного никель-алмазного покрытия толщиной 10...20 мкм на изделия из титана и стали;

нанесение покрытий на титановую подложку микродуговым оксидированием;

электролитное борирование стальных изделий;

электролитно-плазменное полирование мелкоразмерных изделий из коррозионно-стойкой стали.

Разработанная установка не имеет отечественных и зарубежных аналогов.

Выводы

1. Разработан и апробирован гибкий технологический модуль, обеспечивающий реализацию на одном рабочем месте различных технологий нанесения покрытий и модификации свойств поверхностного слоя малоразмерных изделий с использованием методов электролитной обработки и электроискрового легирования.

2. Базовая конструкция позволяет оснащать модуль дополнительным оборудованием и создать на его основе гибкий производственный участок физико-химической модификации свойств поверхностного слоя.

3. Модуль предназначен для использования в единичном и мелкосерийном производстве приборостроительных и машиностроительных предприятий, эффективен в условиях опытно-экспериментального производства при проведении НИОКР и может быть использован высшими техническими учебными заведениями для проведения лабораторного практикума студентов и работы аспирантов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** эффективности изготовления лопаток моноколес / Ю.П. Астахов, С.А. Кочергин, Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Технология машиностроения. 2013. № 5. С. 14—18.

2. **Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б.** Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки // Металлообработка. 2010. № 2. С. 42—45.

3. **Микрообработка** поверхностных рельефов с применением физико-химических методов воздействия на материал / Ю.П. Астахов, С.А. Кочергин, Е.А. Митрюшин, Ю.А. Моргунов, Г.Б. Саушкин, Б.П. Саушкин // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. № 7. С. 33—38.

4. **Современные** технологии модификации поверхностей деталей машин / под ред. Г.В. Москвитина. М.: ЛЕНАНД, 2013. 400 с.

5. **Саушкин Б.П., Кузенков С.Е., Масликов С.В.** Физико-химические методы модификации свойств поверхностного слоя. Липецк: Изд-во ЛГПИ, 1998. 155 с.

6. **Белкин П.Н.** Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Мир, 2005.

7. **Микродуговое** оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд и др. М.: Экомет, 2005. 435 с.

8. **Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я.** Электроплазменная обработка материалов. Минск: Белорусская навука, 2010. 231 с.

9. **Болога М.К.** Исследования и инновации в институте прикладной физики. Эволюция и достижения // Электронная обработка материалов. 2006. № 3. С. 4—91.

10. **Саушкин Б.П., Атанасянц А.Г.** Электроразрядные процессы в технологиях машиностроительного производства. Ч. 2. Технологическое применение электроразрядных явлений в системе "электролит—металл" // Металлообработка. 2006. № 2. С. 10—14.

up_517.indd 229 27.04.2017 12:10:21

УДК 621.315:539.3

С.М. Афонин
(НИУ "Московский институт электронной техники")
E-mail: eduems@mail.ru

Статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов

Исследованы статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов. Получены механические и регулировочные характеристики пьезоактюаторов. Определено влияние геометрических и физических параметров пьезоактюатора и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики, получены передаточные функции пьезоактюатора.

Ключевые слова: *многослойный пьезоактюатор, нано- и микроманипуляторы, продольный и поперечный пьезоэффекты, деформация, механические и регулировочные характеристики, статические и динамические характеристики.*

Investigated static and dynamic characteristics of multilayer piezoactuator for nano- and micromanipulators. The mechanical and regulating characteristics of piezoactuator are proposed. Effect of geometric and physical parameters of piezoconverter and external load on its statics and dynamic characteristics are determined.

Keywords: *multilayer piezoactuator, nano- and micromanipulators, longitudinal and transverse piezoeffects, deformation, mechanical and regulating characteristics, static and dynamic characteristics.*

Пьезоактюаторы применяются в нано- и микроманипуляторах для сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), сканирующих силовых микроскопов (ССМ), атомно-силовых микроскопов (АСМ), в наноробототехнических системах. Пьезоактюатор — пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение и силу. Пьезоактюаторы для нано- и микроманипуляторов работают на основе обратного пьезоэффекта, при котором перемещение достигается после приложения электрического напряжения за счет деформации пьезоактюатора в диапазоне от нескольких нанометров до 10 мкм с погрешностью в пределах десятых долей нанометров [1—7].

В фотонике пьезоактюаторы используются для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при оптических методах передачи информации и энергии, для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов, для совмещения и сканирования в адаптивной оптике больших телескопов, например европейского чрезвычайно большого телескопа (E-ELT) и большого обзорного телескопа (LSST), для коррекции деформации и вибраций в аэрокосмической технике, в космических телескопах, для микропривода инструментов в микрохирургии и биотехнологии. Пьезоактюаторы изготавливают из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или PZT, например ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-26Ц, ЦТС-36, НЦТС-1, НЦТБС-1, ЦТБС-3, ЦТБС-7, ЦТС-42, ЦТС-43, ЦТС-46, ЦТС-47, ЦТС-48, ПКР-7, ПКР-7М или PZT-4, PZT-5H [1—12].

Основным параметром внешней нагрузки пьезоактюатора является жесткость нагрузки, т. е. отношение силы к вызванной действием этой силы деформации. В зависимости от жесткости нагрузки выбираются конструктивные параметры пьезоактюатора.

Рассмотрим статические характеристики пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте (рис. 1).

up_517.indd 230 27.04.2017 12:10:21

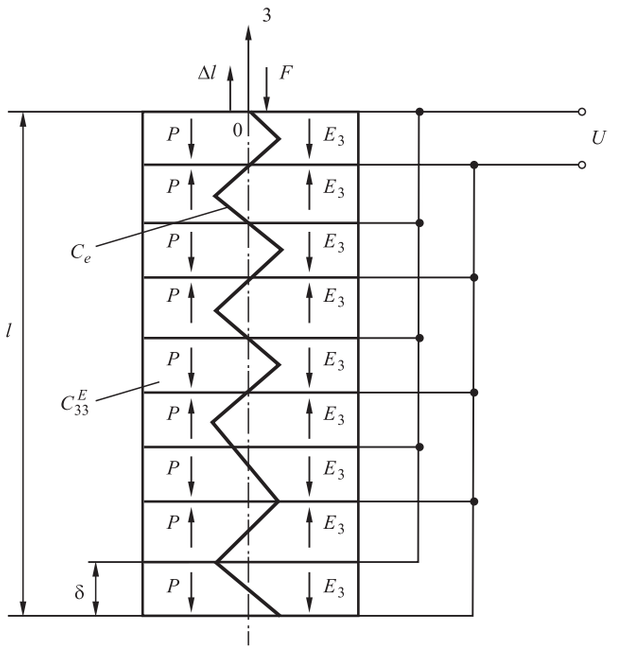


Рис. 1. Многослойный пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте:
Δl — перемещение торца армированного многослойного пьезоактюатора; P — поляризация

Уравнение обратного продольного пьезоэффекта [3—5] имеет вид

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

где $S_3 = \xi/l$ — относительная деформация пьезоактюатора по оси 3; ξ — перемещение пьезоактюатора; $l = n\delta$ — длина многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте; n — число пьезослоев; δ — толщина пьезослоя; d_{33} — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте; $E_3 = U/\delta$ — напряженность электрического поля в пьезоактюаторе по оси 3; U — напряжение на электродах пьезоактюатора; s_{33}^E — упругая податливость при E_3 = const при управлении от источника напряжения; $T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение в пьезоактюаторе по оси 3; F_0 — внешняя сила, $F = F_0 + C_a\xi + C_l\xi = F_0 + C_e\xi$; $F_0 = \sigma_a S_0$ — сила первоначального поджатия упругим элементом; σ_a — механическое напряжение первоначального армирования в пьезоактюаторе; S_0 — площадь поперечного сечения пьезоактюатора; C_a — жесткость армирующего элемента; C_l — жесткость нагрузки; C_e — суммарная жесткость нагрузки.

Из (1) получаем выражение для перемещения многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в виде

$$\xi = \frac{d_{33}nU - \sigma_a s_{33}^E l}{1 + (C_a + C_l)/C_{33}^E} = \frac{l(d_{33}E_3 - \sigma_a s_{33}^E)}{1 + C_e/C_{33}^E},$$

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

Следовательно, регулировочная характеристика армированного многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте при упругой нагрузке имеет вид

$$\Delta l = \frac{d_{33}nU}{1 + (C_a + C_l)/C_{33}^E} = \frac{ld_{33}E_3}{1 + C_e/C_{33}^E}. \qquad (2)$$

В статике максимальное перемещение по оси 3 многослойного пьезоактюатора при $F = 0$ описывается зависимостью $\Delta l_m = d_{33}nU$, а выражение для его максимального рабочего усилия по оси 3 при $\Delta l = 0$ имеет вид

$$F_m = \Delta l_m S_0/\left(s_{33}^E l\right) = d_{33}US_0/\left(s_{33}^E\delta\right).$$

Следовательно, из (1) получаем механическую характеристику многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в виде

$$\Delta l = d_{33}nU - s_{33}^E Fl/S_0 = d_{33}nU - F/C_{33}^E \qquad (3)$$

или

$$\Delta l = \Delta l_m(1 - F/F_m),$$

где $F_m = d_{33}US_0/\left(s_{33}^E\delta\right)$. Таким образом, при U = const имеем уравнение $\Delta l(F)$ механической характеристики.

Для многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте из пьезокерамики ЦТС при $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11}$ м^2/Н, $\delta = 0{,}6 \cdot 10^{-3}$ м, диаметре пьезоактюатора $D = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $n = 50$ получаем механическую характеристику, приведенную на рис. 2, где кривые *1...3* соответствуют напряжению пьезоактюатора U 300, 200 и 100 В. Механические характеристики пьезоактюатора измеряли на прессе УММ-5. Экспериментальные и расчетные характеристики многослойного пьезоактюатора совпадают с погрешностью 5 %.

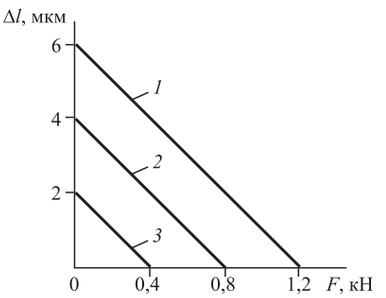


Рис. 2. Механические характеристики многослойного пьезоактюатора

up_517.indd 231 27.04.2017 12:10:24

Динамические характеристики пьезоактюатора находим на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения пьезоэффекта с учетом граничных условий для двух торцов (1, 2) и соответствующих масс нагрузки M_1, M_2 на двух торцах.

При расчете пьезоактюаторов используется волновое уравнение [3—5], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений,

$$\frac{1}{(c^E)^2}\frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial t^2}+\frac{2\alpha}{c^E}\frac{\partial\xi(x,t)}{\partial t}+\alpha^2\xi(x,t)=\frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где x — координата; t — время; α — коэффициент, учитывающий затухание колебаний из-за рассеяния энергии при распространении волны в пьезоактюаторе.

При применении пьезоактюатора имеем упругоинерционную нагрузку в виде упругого элемента (пружины, мембраны) и инерционной массы. При одном закрепленном торце пьезоактюатора, например при $x=0$, $M_1\to\infty$, $\xi_1(t)=0$, при упругоинерционной нагрузке пьезоактюатора получаем уравнение сил

$$T_3(t)\,S_0\big|_{x=l}=-M_2\frac{\partial^2\xi_2(t)}{\partial t_2}-C_e\xi_2(t). \quad (5)$$

Применив преобразование Лапласа [8] к (5), получим с учетом уравнения обратного пьезоэффекта (1) следующее выражение:

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

$$=d_{33}E_3(p)-\frac{s_{33}^E M_2 p^2\Xi_2(p)}{S_0}-\frac{s_{33}^E C_e\Xi_2(p)}{S_0}, \quad (6)$$

где p — параметр преобразования.

В результате применения к (4) преобразования Лапласа [8] при нулевых начальных условиях получим обыкновенное дифференциальное уравнение для пьезоактюатора в виде

$$\frac{d^2\Xi(x,p)}{dx^2}-\left[\frac{1}{(c^E)^2}p^2+\frac{2\alpha}{c^E}p+\alpha^2\right]\Xi(x,p)=0, \quad (7)$$

решением которого будет функция

$$\Xi(x,p)=C\mathbf{e}^{-x\gamma}+B\mathbf{e}^{x\gamma}, \quad (8)$$

где $\gamma=p/c^E+\alpha$ — коэффициент распространения. Постоянные C и B определим из граничных условий

$$\Xi(0,p)=\Xi_1(p) \text{ при } x=0;$$

$$\Xi(\delta,p)=\Xi_2(p) \text{ при } x=l;$$

$$C=\frac{\Xi_1(p)\mathbf{e}^{l\gamma}-\Xi_2(p)}{2\mathrm{sh}(l\gamma)};$$

$$B=\frac{\Xi_1(p)\mathbf{e}^{-l\gamma}-\Xi_2(p)}{2\mathrm{sh}(l\gamma)}.$$

Тогда решение обыкновенного дифференциального уравнения для пьезоактюатора запишется в виде

$$\Xi(x,p)=\frac{1}{\mathrm{sh}(l\gamma)}\big(\Xi_1(p)\mathrm{sh}\big((l-x)\gamma\big)+\Xi_2(p)\mathrm{sh}(x\gamma)\big). \quad (9)$$

Из (9) при одном закрепленном торце пьезоактюатора при $x=0$, $M_1\to\infty$ и $\Xi_1(p)=0$ получаем

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

Для пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке из (6) получаем следующее выражение:

$$\frac{\Xi_2(p)\gamma}{\mathrm{th}(l\gamma)}+\frac{\Xi_2(p)s_{33}^E M_2 p^2}{S_0}+\frac{\Xi_2(p)s_{33}^E C_e}{S_0}=d_{33}E_3. \quad (10)$$

Из (10) получаем передаточную функцию пьезоактюатора в виде

$$W_{21}(p)=\frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)}=$$

$$=\frac{d_{33}}{s_{33}^E M_2 p^2/S_0+\gamma\mathrm{cth}(l\gamma)+s_{33}^E C_e/S_0}. \quad (11)$$

С учетом жесткости пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте записываем передаточную функцию (11) пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке в следующем виде:

$$W_{21}(p)=\frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)}=$$

$$=\frac{d_{33}l}{M_2p^2/C_{33}^E+l\gamma\mathrm{cth}(l\gamma)+C_e/C_{33}^E}. \quad (12)$$

Используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, для передаточной функции многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте для $M_2\gg m$ при упругоинерционной нагрузке с учетом сопротивления согласующих цепей R получаем в диапазоне частот $0<\omega<0{,}01c^E/l$ следующее выражение:

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

$$=\frac{d_{33}n}{\big(1+C_e/C_{33}^E\big)(T_ap+1)\big(T_{33}^2p^2+2T_{33}\xi_{33}p+1\big)}, \quad (13)$$

up_517.indd 232 27.04.2017 12:10:24

где $T_a = RnC_0$ — постоянная времени апериодического звена пьезоактюатора, C_0 — емкость пьезослоя, n — число пьезослоев в пьезоактюаторе; $T_{33} = \sqrt{M_2/\left(C_e + C_{33}^E\right)}$ — постоянная времени колебательного звена пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке; $\xi_{33} = \dfrac{\alpha l^2 C_{33}^E}{3c^E\sqrt{M_2(C_e + C_{33}^E)}}$ — коэффициент затухания колебательного звена пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Аналогично для пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке получаем выражение передаточной функции в виде

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \\ = \frac{d_{31} l/\delta}{\left(T_a p + 1\right)\left(M_2 p^2/C_{11}^E + l\gamma\,\mathrm{cth}\left(l\gamma\right) + C_e/C_{33}^E\right)}, \quad (14)$$

где d_{31} — пьезомодуль при поперечном пьезоэффекте; $C_{11}^E = S_0/\left(s_{11}^E l\right)$ — жесткость пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению; l — длина пьезоактюатора; δ — толщина пьезоактюатора.

Для пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке при $M_2 \gg m$ в диапазоне частот $0 < \omega < 0{,}01c^E/l$ получаем выражение передаточной функции в виде

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \\ = \frac{d_{31} l/\delta}{\left(1 + C_e/C_{11}^E\right)\left(T_a p + 1\right)\left(T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}\xi_{11} p + 1\right)}, \quad (15)$$

где $T_{11} = \sqrt{M_2/\left(C_e + C_{11}^E\right)}$ — постоянная времени колебательного звена пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке, $\xi_{11} = \dfrac{\alpha l^2 C_{11}^E}{3c^E\sqrt{M_2(C_e + C_{11}^E)}}$ — коэффициент затухания колебательного звена пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Переходная характеристика многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте при $U = U_m \cdot 1(t)$, где U_m — амплитуда напряжения; $1(t)$ — единичная функция, и $T_a \gg T_{33}$ имеет вид

$$h(t) = \xi(t) = d_{33} n U_m \left(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t}{T_a}}\right). \quad (16)$$

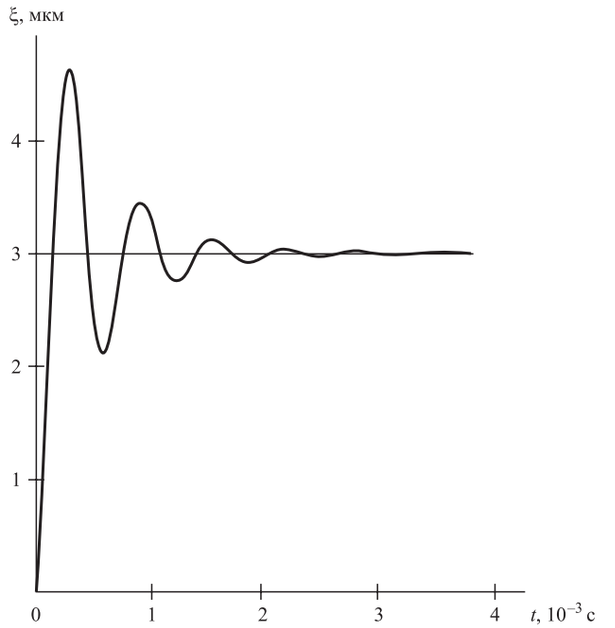


Рис. 3. Переходная характеристика многослойного пьезоактюатора

Переходная характеристика многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте при $U = U_m \cdot 1(t)$ и $T_{33} \gg T_a$, $M_2 \gg m$ имеет вид

$$h(t) = \xi(t) = \\ = d_{33} n U_m \left(1 - \frac{\mathbf{e}^{-\frac{\xi_{33} t}{T_{33}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}} \sin\left(\omega_{33} t + \varphi_{33}\right)\right), \quad (17)$$

где $\omega_{33} = \dfrac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{T_{33}}$; $\varphi_{33} = \mathrm{arctg}\left(\dfrac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{\xi_{33}}\right)$.

Соответственно, для многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС из (17) при ступенчатом входном напряжении с амплитудой $U_m = 150$ В получим $\Delta l_m = 3$ мкм; $\xi_{33} = 0{,}1$; $T_{33} = 0{,}9$ мс и переходную характеристику, приведенную на рис. 3.

Заключение

Исследованы механические и регулировочные характеристики пьезоактюаторов.

Найдены передаточные функции пьезоактюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах для нано- и микроманипуляторов с учетом решения волнового уравнения. Полученные передаточные функции определяют динамические и статические характеристики пьезоактюаторов с учетом граничных условий, их физических и геометрических параметров, внешней нагрузки и сопротивления согласующих цепей.

up_517.indd 233 27.04.2017 12:10:25

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

2. **Некоторые** физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения / В.А. Акопьян, А.Е. Панич, А.Н. Соловьев, Е.С. Лесных, С.Н. Шевцов и др. // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 35—40.

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.** Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 34—41.

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

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

7. **Актюаторы** для оптических затворов и методы измерений их характеристик / В.К. Казаков, В.М. Климашин, В.Г. Никифоров, А.Я. Сафронов, В.А. Чернов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 52—55.

8. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2004. 752 с.

9. **Uchino K.** Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997. 347 p.

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

11. **Springer** Handbook of Nanotechnology / Ed. by B. Bhushan. Berlin, New York: Springer, 2004. 1222 p.

12. **Encyclopedia** of Nanoscience and Nanotechnology / Ed. by H.S. Nalwa. Calif.: American Scientific Publishers, 2004.

III МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

г. Севастополь, 19—23 сентября 2017 г.

Приглашаем руководителей, ученых, специалистов, преподавателей вузов, сотрудников IT-, машино- и приборостроительных предприятий, аспирантов и студентов принять участие в **III Межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».**

Одно из основных направлений работы конференции связано с использованием современных информационных технологий **в машиностроении, приборостроении.**

Конференция состоится на базе Севастопольского государственного университета при поддержке Законодательного Собрания и Правительства Севастополя, Правительства Санкт-Петербурга, Крымского IT-кластера.

В программе конференции пленарные и секционные доклады, открытые лекции, выступления экспертов IT-отрасли, представителей органов власти, науки, образования, бизнеса, круглые столы, дискуссии, учебные семинары, молодежный IT-фестиваль.

Сроки подачи заявок: 10 сентября 2017 г., для включения в сборник материалов конференции 15 апреля 2017 г. (продлен до 01 мая 2017 г.).

Информация о конференции — на сайте:

http://pnroit.code-bit.com/

Контакты: e-mail: ANIST017@mail.ru, pervukhina14@mail.ru,

раб. тел.: +7 (8692) 43-52-90б моб. тел.: +7 (978) 730-10-78, +7 (978) 739-07-78

up_517.indd 234 27.04.2017 12:10:25

УДК 621.7.011

С.А. Зайдес, Нго Као Кыонг
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)
E-mail: zsa@istu.edu

Влияние кинематики процессов поверхностного пластического деформирования на качество упрочненного слоя

Рассмотрено влияние кинематических схем деформационного воздействия (включая поверхностное пластическое деформирование, поперечную обкатку плоскими плитами, локальную обкатку роликом) на характеристики качества поверхностного слоя упрочненных деталей: шероховатость, остаточные напряжения, микроструктуру, твердость и микротвердость. Выявлено, что качество поверхностного слоя существенно зависит от способов поверхностного пластического деформирования. Результаты экспериментальных исследований позволяют выбрать способ упрочнения для получения заданных характеристик качества поверхностного слоя деталей машин.

Ключевые слова: *охватывающее поверхностное пластическое деформирование, поперечная обкатка, обкатка роликом, упрочнение, пластическое деформирование, характеристики поверхностного слоя.*

The influence of the kinematic deformation of schemes (embracing surface plastic deformation, transverse burnishing by flat plates, local roller burnishing) on the characteristics of the surface layer quality: roughness, residual stress, microstructure, hardness and micro-hardness is considered. It was found that the quality of the surface layer depends on the methods of surface plastic deformation. The experimental results allow to select a method of hardening, which provides for obtaining a given quality characteristics of the surface layer of machine parts.

Keywords: *embracing surface plastic deformation, transverse burnishing, roller burnishing, hardening, plastic deformation, surface layer quality.*

Введение

В настоящее время существуют разнообразные методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые классифицируется в соответствии с ГОСТ 18296—72. Использование ППД на финишных этапах обработки позволяет в несколько раз улучшить эксплуатационные свойства деталей и увеличить тем самым ресурс машин. Деформационные методы упрочнения имеют достаточно широкие технологические возможности, что позволяет обрабатывать детали самой различной конфигурации и обеспечивать при этом высокое качество поверхностного слоя и высокую производительность процессов обработки [1].

В число важнейших задач машиностроения на современном этапе входят повышение долговечности изделий, их эффективности и конкурентоспособности на мировом рынке. Долговечность, в свою очередь, связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими (шероховатость, волнистость, макроотклонения) и физико-механическими (микротвердость, остаточные напряжения и т. д.) свойствами [2]. От качества поверхностного слоя зависят такие эксплуатационные свойства, как сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, контактная долговечность и др. [3]. Отсюда следует, что критериями оценки качества каждой детали являются не только точность выдерживаемого размера и шероховатость поверхности, но и физико-механические свойства поверхностного слоя: остаточные напряжения, глубина упрочненного слоя, степень упрочнения. Все эти характеристики играют немаловажную роль в обеспечении надежности, работоспособности деталей и всего изделия в целом.

up_517.indd 235 27.04.2017 12:10:26

В технологической практике отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием широкое распространение получили локальные методы упрочнения (обкатка шариком, роликом, диском). Однако в некоторых случаях возможности локальных способов деформирования имеют ограничения [4]. Например, длинномерные валы и оси, цилиндрические детали малой жесткости и т.д. не могут быть эффективно упрочнены известными способами. В ИРНИТУ для обработки таких деталей разработаны новые способы упрочнения, представляющие собой процессы, основанные на охватывающем деформировании [5] и радиальной обкатке плоскими плитами [6].

Цель работы — оценка качества поверхностного слоя упрочненных деталей в зависимости от кинематических схем деформационного воздействия.

Технологические схемы ППД

Рассмотрим три схемы поверхностного пластического деформирования, отличающиеся кинематикой процесса (рис. 1).

Процесс локального пластического деформирования осуществляется цилиндрическим роликом, вращающимся относительно горизонтальной оси (рис. 1, *а*). Перемещаясь в осевом направлении по поверхности вращающегося цилиндра деформирующий ролик создает винтовую траекторию пластического следа на обрабатываемой поверхности.

Как отмечалось выше, при обработке длинномерных валов локальные способы деформирования малоэффективны. Центробежные силы, возникающие при вращении заготовки, и радиальное воздействие деформирующего инструмента приводят к искривлению заготовки и снижению качества упрочненного поверхностного слоя. Для устранения указанных недостатков предложена другая кинематическая схема упрочнения. Вращательное движение заготовки заменено на линейное перемещение вдоль оси, а локальное воздействие инструмента заменено на охватывающее (рис. 1, *б*).

Для упрочняющей обработки коротких цилиндрических деталей типа пальцев и втулок или небольших деталей типа осей малой жесткости целесообразно использовать ППД радиальной обкаткой плоскими плитами (рис. 1, *в*). Способ поперечной прокатки нашел применение в технологии обработки металлов давлением для формообразования ступенчатых деталей, для изготовления метизных изделий и др. [7, 8]. Высокая производительность процесса, высокая износостойкость деформирующего инструмента, достаточно высокая точность обработки дали основание для использования этой схемы обкатки плоскими инструментами в качестве эффективной упрочняющей обработки ППД.

Режимы обработки и методика экспериментов

Исследования проводили на цилиндрических образцах диаметром 16 мм, изготовленных из стали 45 на токарном станке 1К62. Абсолютное обжатие для всех видов обработки приняли одинаковым (0,2 мм).

Для локального упрочнения использовали цилиндрический ролик из стали У10А, диаметром 30 мм с радиусом профиля $r = 5$ мм. В качестве технологической смазки использовали масло И-40А. Режим обработки: подача $s = 0{,}21$ мм/об; глубина внедрения ролика (натяга) 0,1 мм; частота вращения заготовки $n = 125$ мин$^{-1}$.

Охватывающее ППД выполняли на калибровочном станке [5]. В качестве рабочего инструмента использовали кольцевую матрицу из стали У10А. Угол рабочего конуса $\alpha = 9°$, длина калибрующей зоны $l_к = 4$ мм; абсолютное обжатие 0,2 мм; смазка — сухой порошок натриевого мыла.

Поперечную обкатку плоскими плитами выполнили на лабораторной установке [6, 9] с абсолютным обжатием также 0,2 мм. Угол заходного конуса плиты составлял 5°. Материал рабочих плит — сталь У10А.

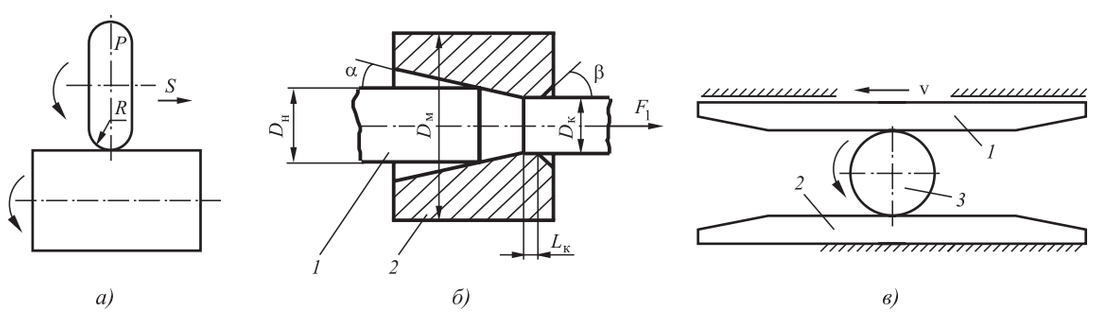


Рис. 1. Технологические схемы ППД:
а — локальное деформирование роликом; *б* — охватывающее ППД (*1* — заготовка; *2* — матрица); *в* — обкатка плоскими плитами (*1* — подвижная плита; *2* — неподвижная плита; *3* — заготовка)

up_517.indd 236 27.04.2017 12:10:28

Измерение параметров шероховатости после упрочнения ППД проводили с помощью профилографа-профилометра модели Form Talysurf I 1200 производства фирмы Taylor Hobson (Англия) с применением индуктивного и лазерного интерферометрического датчика. Прибор способен измерять отклонения формы в пределах ограниченной поверхности, волнистость, направления неровностей, изъяны поверхности, а также параметры шероховатости, в том числе соответствующие ГОСТ 2789—73.

С помощью твердомера модели HBRV 187,5 определили поверхностную твердость по Рокквеллу стальным шариком диаметром 1,588 мм (HRB). Твердость по Роквеллу определяли по глубине вдавливания наконечника. Вдавливание осуществляли под действием двух последовательно приложенных нагрузок — предварительной, равной 100 Н, и окончательной (общей), равной 980 Н. Твердость определяли по разности глубин отпечатков. Глубина отпечатка под действием основной нагрузки фиксируется индикатором, а твердость HRB после измерения отсчитывается на экране твердомера.

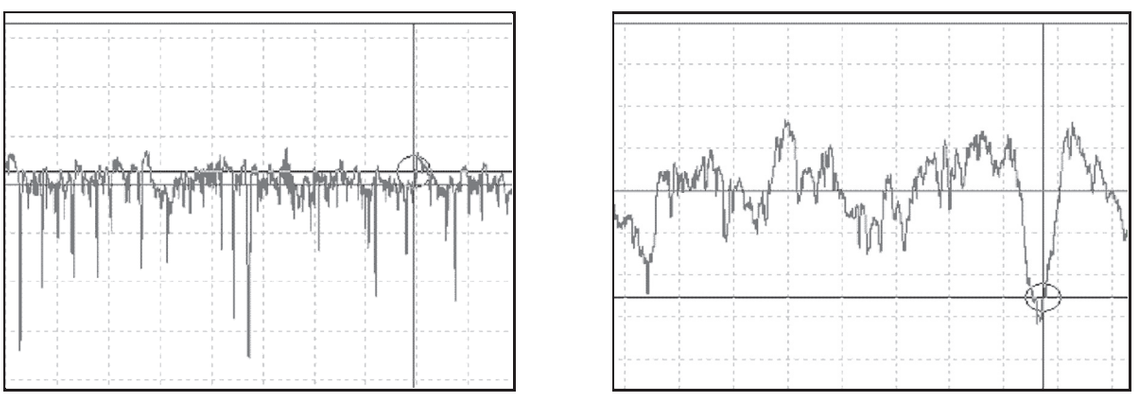
Для определения микротвердости использовали микротвердомер марки ПМТ-3 с усилием нагружения 200 гс. При испытании измеряли диагональ отпечатка d и по соответствующим таблицам (для заданной нагрузки P) получали микротвердость H_μ, Н/мм^2.

Для исследования микроструктуры металла использовали металлографический микроскоп марки МЕТ-2, который предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле, а также для исследования объектов в поляризованном свете. Образцы подготовили и залили порошком эпоксидной смолы в формы на прессе "Полилаб С50А". Образцы шлифовали наждачной бумагой с различной зернистостью, травили спиртом и азотной кислотой (5 %). С помощью программы Toup View получили и сфотографировали структуру металла.

Для измерения остаточных напряжений использовали прибор Xstress 3000 G3/G3R. Режим измерения: хромовый анод; K_α-излучение; напряжение на рентгеновской трубке — 25 кВ; ток — 5,5 мА. Использовали два детектора, коллиматор — 5 мм; угол дифракции — 156,4°; плоскость отражения (311); число наклонов — 8, отклонение наклона (осцилляция) ±5°; время экспозиции — 5 с. Измерение напряжений проводили в двух направлениях φ: 0 (положение гониометра вдоль образца) и 90° (положение гониометра поперек образца). Нормальные напряжения определяли одним из стандартных способов обсчета пиков Peakfit, предлагаемым программным обеспечением прибора. Для автоматизированного расчета напряжений вводили следующие параметры материала: модуль Юнга — 210 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,3.

Результаты эксперимента

Шероховатость. На рис. 2 показана профилограмма шероховатости при поперечной обкатке плоскими инструментами и при обкатке роликом, а на рис. 3 — зависимости параметров шероховатости от схемы обработки. Параметры шероховатости перед упрочнением образцов имели следующие значения: Ra = 1,7 мкм, Rz = 13 мкм. После обкатки роликом и охватывающего деформирования величины Ra и Rz снижаются в 1,6 и 1,7 раза соответственно. Наилучшую шероховатость получили при поперечной обкатке плоскими инструментами. При этом Rz уменьшился в 6,5 раз, Ra — в 8,5 раза. Значительное уменьшение параметров шероховатости при поперечной обкатке объ-



а) *б)*

Рис. 2. Профилограмма шероховатости при поперечной обкатке плоскими инструментами (*а*) и обкатке роликом (*б*)

up_517.indd 237 27.04.2017 12:10:28

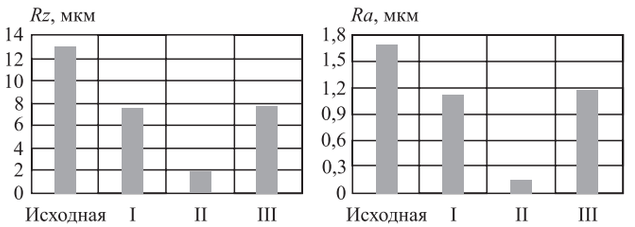


Рис. 3. Зависимости показателей шероховатости *Rz* и *Ra* от способа обработки:
I — охватывающее ППД; II — поперечная обкатка плоскими инструментами; III — обкатка роликом

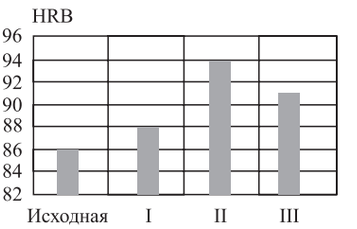


Рис. 4. Поверхностная твердость в зависимости от способов обработки:
I — охватывающее ППД; II — поперечная обкатка плоскими инструментами; III — обкатка роликом

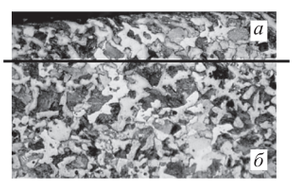
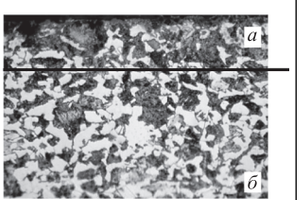
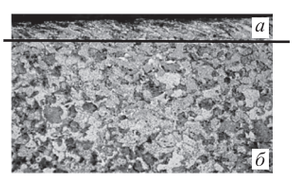
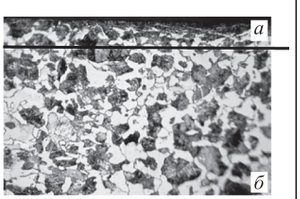
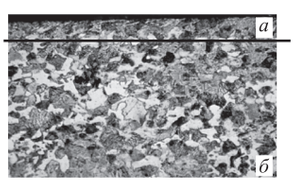
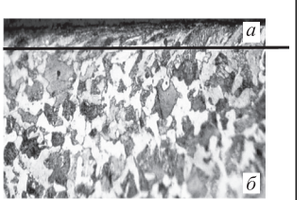
ясняется многократным движением образца (в нашем случае — четыре оборота) между плитами.

Поверхностная твердость. На рис. 4 показана зависимость поверхностной твердости от способа обработки. Наилучший результат получен при поперечной обкатке плоскими плитами, а наихудший — при охватывающем ППД. При этом твердость увеличивается до 9,3 и 2,3 % соответственно. Это объясняется тем, что при поперечной обкатке поверхностный слой деформируется многократно и в большей мере, чем при охватывающем ППД.

Микроструктура. Снимки микроструктуры и средние размеры зерен на краю упрочненной зоны представлены в табл. 1. Черные зерна — перлит, белые — феррит. При рассмотренных способах упрочнения наблюдается изменение микроструктуры в поверхностном слое. После обработки охватывающим ППД и роликом зерна вытягиваются в продольном сечении интенсивнее, чем в поперечном направлении. А при поперечной обкатке плоскими плитами зерна получают ориентацию в поперечном направлении в большей мере. При этом наблюдаются измельчение зерен, разрушение их границ и образование текстуры. Область значительного искажения зерен (зона *а*) распространяется на глубину 0,5 мм при охватывающем ППД, на 0,2...0,3 мм — при поперечной обкатке плоскими плитами, и на 0,1...0,2 мм — при обкатке роликом. Зоны *б* можно принять как исходные структуры с размером зерен ~22 мкм. Существенное изменение размеров зерен происходит в поверхностных слоях. Причем для охватывающего ППД размеры зерен уменьшаются в среднем в осевом направлении образца на 46 %, а в поперечном — на 32 %. При обкатке плоскими плитами и роликом размеры зерен уменьшаются на 54,5 и 72,7 % в продольном и на 63,6 и 54,5 % в поперечном направлении соответственно.

Таблица 1

Микроструктура упрочненных образцов и размеры зерен после различных способов обработки при 1000-кратном увеличении

Способы обработки	Поперечное сечение	Продольное сечение
I — охватывающее ППД	 15 мкм	 12 мкм
II — поперечная обкатка плоскими инструментами	 8 мкм	 10 мкм
III — обкатка роликом	 10 мкм	 6 мкм

up_517.indd 238 27.04.2017 12:10:29

Таблица 2

Остаточные напряжения на цилиндрической поверхности при различных схемах обработки

Способы обработки	I — охватывающее ППД	II — поперечная обкатка плоскими инструментами	III — обкатка роликом
σ_φ, МПа	32	−341	−297
σ_z, МПа	287	−385	−525

Остаточные напряжения. Результаты измерения остаточных напряжений рентгеновским способом приведены в табл. 2. Видно, что остаточные осевые напряжения имеют бóльшие значения, чем остаточные тангенциальные. При охватывающем ППД со степенью относительного обжатия Q = 2,48 % (абсолютное обжатие ΔQ = 0,2 мм) возникают остаточные тангенциальное и осевое напряжения растяжения в поверхностном слое. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными работ [5,10]. При обкатке плоскими плитами и упрочнении роликом в поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия. При поперечной обкатке плоскими инструментами остаточное тангенциальное напряжение больше, чем при обкатке роликом, а осевое напряжение — наоборот.

Микротвердость и глубина наклепа. На рис. 5 показано распределение микротвердости по поперечному сечению образцов в зависимости от способа обработки.

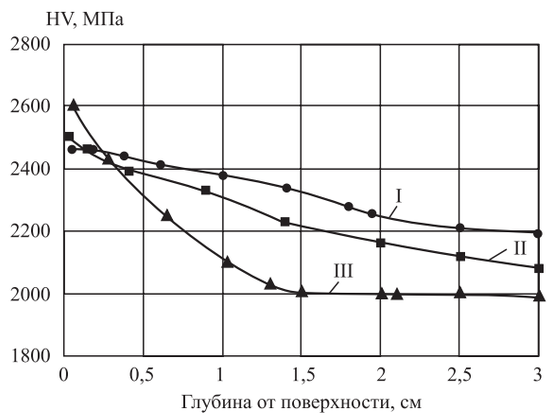


Рис. 5. Распределение микротвердости по поперечному сечению образцов в зависимости от способа обработки:
I — охватывающее ППД; II — поперечная обкатка плоскими инструментами; III — обкатка роликом

При охватывающем упрочнении микротвердость изменяется более плавно, чем при обкатке роликом и поперечной обкатке плоскими плитами. При этом интенсивно растут зоны пластического деформирования. Локальный процесс упрочнения роликом по сравнению с охватывающим ППД позволяет получить меньшую глубину пластической зоны и наибольший градиент изменения микротвердости. Это объясняется тем, что при обкатке роликом очаг деформации занимает небольшой объем по сравнению с деталью и деформируется только тонкий поверхностной слой, а при осесимметричном охватывающем деформировании пластическая деформация может доходить до центра вала [11].

По экспериментальным результатам установлено, что качество поверхностного слоя существенно зависит от способа поверхностного пластического деформирования. Выбор способа ППД и назначение режима обработки необходимо осуществлять в зависимости от технических требований к поверхностным слоям деталей.

Выводы

1. Установлено, что охватывающее ППД позволяет получить наибольшие глубину наклепа и толщину области искажения зерен (до 0,5 мм), но при этом в поверхностном слое возникают остаточные напряжения растяжения.

Поперечная обкатка плоскими инструментами дает наилучшую шероховатость (уменьшается в 6,5...8,5 раз) и поверхностную твердость (повышается на 9,3 %) по сравнению с другими схемами обработки.

При локальном обкатывании роликом обеспечивается формирование наибольшего значения осевого остаточного напряжения сжатия (−520 МПа) по сравнению с охватывающим ППД (+287 МПа) и поперечной обкатки плитами (−385 МПа). Но при этом получена наименьшая глубина наклепа (1,5 мм).

2. Результаты экспериментальных исследований позволяют выбрать способ упрочнения для получения заданных характеристик качества поверхностного слоя деталей машин. Они дают основание для разработки комбинированных способов ППД для получения высокого качества поверхности по ряду показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Папшев Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с

2. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

up_517.indd 239 27.04.2017 12:10:29

3. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

4. **Зайдес С.А., Нго Као Кыонг.** Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 10. С. 6—9.

5. **Зайдес С.А.** Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. 309 с.

6. **Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг.** Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7. С. 14—18.

7. **Щукин В.Я.** Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития: сб. науч. тр.; под ред. В.А. Струка, В.И. Кравченко. Гродно, УО ГГАУ, 2008. С. 195—207.

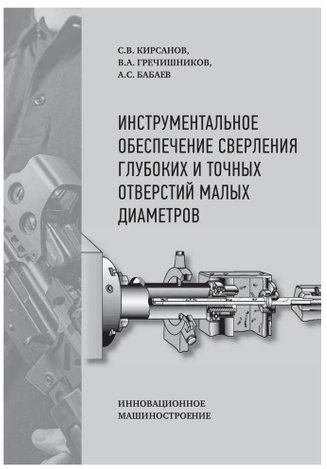
8. **Щукин В.Я.** Основы поперечно-клиновой прокатки. Минск: Наука и техника, 1986. 223 с.

9. **Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг.** Поверхностное пластическое деформирование поперечной обкаткой плоскими плитами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016.№ 5. С. 6—12.

10. **Деформирующая** обработка валов / А.С. Бубнов, С.А. Зайдес, Е.Ю. Кропоткина, М.Е. Попов; под. ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2013. 386 с.

11. **Зайдес С.А., Исаев А.Н.** Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Бабаев А.С.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ И ТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Под общ. ред. С.В. Кирсанова. 2016 г. 188 с.

Цена 600 руб.

Рассмотрены современные конструкции ружейных свёрл с твердосплавными стеблями, применяемые для сверления глубоких и точных отверстий малых диаметров. Даны рекомендации по их проектированию, изготовлению и эксплуатации. Приведены сведения о технологические возможностях этих инструментов.

Для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий, может быть полезна студентам втузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.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 *Комиссарова Е.В.*
Сдано в набор 03.03.2017 г. Подписано в печать 17.04.17 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**

up_517.indd 240 27.04.2017 12:10:29