

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13
2017
№ 12 (156)
декабрь

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

Редационный 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. МЫМИРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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

- Злобина И.В., Бекренев Н.В., Павлов С.П.** Упрочняющее модифицирование в СВЧ электромагнитном поле изделий, сформированных путем трехмерной печати из неметаллических композиционных материалов 531
- Лебедев В.А., Новиков С.В.** Анализ параметров управления формированием структуры шва при воздействии механическими колебаниями низкой частоты на расплав сварочной ванны 536
- Романов И.О., Перваков Д.Г.** Формирование основных направлений развития сварочно-наплавочных материалов на основе методов математически-статистического подхода 542

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь.** Влияние параметров осциллирующего выглаживания на образование регулярного микрорельефа поверхностного слоя 547
- Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С., Новокрещенов С.А.** Проектирование технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла 553

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Юркевич С.Н., Полякова Т.Л., Ващенко И.М., Андриенко К.Г., Аблажей Н.М.** Технология нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов 558

ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

- Беликов А.И., Данилов М.А., Петров В.В., Седых Н.С.** Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий 562
- Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Ворначева И.В., Макарова И.А., Филатов Е.А.** Исследование субструктуры и свойств спеченного титанового сплава с электрофизическим покрытием, подвергнутым выглаживанию минералокерамикой 568
- Жачкин С.Ю., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Пеньков Н.А., Михайлов В.В., Сидоркин О.А.** Упрочнение контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием 572

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

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 13
2017
№ 12 (156)
December

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. BEZYAZHNYI

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.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Pavlov S.P.** Strengthening modification in a microwave electromagnetic field of articles formed by three-dimensional printing of a non-metallic composite materials 531
- Lebedev V.A., Novikov S.V.** Analysis of parameters of manage formation structure beam by action of mechanical oscillation of low frequency on a welding pool meelt 536
- Romanov I.O., Pervakov D.G.** Formation of the basic directions of development of welding-surfacing materials on the basis of methods of the mathematical-statistical approach 542



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Zaides S.A., Nguyen Van Hinh.** Influence of the oscillation parameters smoothing on formation of regular microrelief of the surface layer 547
- Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S., Novokreshchenov S.A.** Design of technological processing of details by dynamic methods of superficial plastic deformation taking into account increase in their life cycle 553



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

- Yurkevich S.N., Polyakova T.L., Vaschenko I.M., Andriyonok K.G., Ablazhei N.M.** Technique of chromium-plating of titanium alloys parts 558



POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

- Belikov A.I., Danilov M.A., Petrov V.V., Sedykh N.S.** Discrete structure of a hardened antifrictional composite coatings on tribological properties influence investigation 562
- Gadalov V.N., Emelyanov S.G., Vornacheva I.V., Makarova I.A., Filatov E.A.** Study of the substructure and properties of sintered titanium alloy with electrical coating, subjected to a smoothing with mineral ceramic 568
- Zhachkin S.Yu., Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Penkov N.A., Mihailov V.V., Sidor-kin O.A.** Strengthening of rapid steel tool contact surfaces by disperse composite chrome coating 572

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

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



УДК 621.9.047/048

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, С.П. Павлов

(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)

E-mail: irinka_7_@mail.ru

Упрочняющее модифицирование в СВЧ электромагнитном поле изделий, сформированных путем трехмерной печати из неметаллических композиционных материалов*

Рассмотрены технологии изготовления изделий путем трехмерной печати с использованием порошковых материалов (3DP) и с использованием плавящейся в экструдере полимерной нити (FDM). Выполнены исследования изменения прочности сформированных путем трехмерной печати объектов после воздействия на них СВЧ электромагнитного поля различной мощности.

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые композиционные материалы, полимерная нить, межслоевое взаимодействие, предел прочности, изгиб, срез, продольная устойчивость, СВЧ электромагнитное поле, удельная мощность, время воздействия.

The technologies of manufacturing products by three-dimensional printing using powder materials (3DP) and with the use of melting in the extruder the polymer filament (FDM) are considered. The authors carried out studies of the strength changes of objects generated by three-dimensional printing after exposure to microwave electromagnetic fields of different power.

Keywords: additive technologies, powder composite materials, polymer thread, interlayer interaction strength, tensile strength, bending, shear, longitudinal stability, microwave electromagnetic field, power density, exposure time.

Введение

Аддитивные технологии, в которых послойное наращивание материала в соответствии с заданной компьютерной твердотельной моделью практически заменяет традиционные процессы резания, прессования и штамповки, относятся к наиболее актуальным технологическим трендам, [1–7]. Изделия, сформированные путем трехмерной печати из металлических и неметаллических материалов, все шире применяются для быстрого прототипирования, изготовления кон-

структивных элементов воздушного, водного и наземного транспорта, в строительстве и других областях хозяйственной деятельности. Основным преимуществом данных технологий является прямое воспроизведение на основе твердотельной модели изделия любой сложности без применения сложного инструмента и дорогостоящего оснащения. При этом возможно производство по индивидуальным заказам, без учета серийности. В настоящее время достигнуты значительные успехи в использовании аддитивных технологий не только для быстрого прототипирования, но и для изготовления конструктивных элементов действующих технических систем. Так, на выставке "Иннопром-2016", проходящей 11–14 июля 2016 г. в Екатеринбурге, "Объединенной приборостроительной корпорацией" был представлен опытный образец разведывательного беспилотного летательного аппарата, собираемого в полевых

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 "Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами".

условиях, большая часть деталей которого распечатана на 3D-принтере. Компания Raytheon Missile Systems (США) сообщила о создании управляемой ракеты, до 80 % конструкции которой, включая боевую часть, может быть напечатано в полевых условиях. Сообщается, что компания Stratasys представила самый большой и сложный беспилотный летательный аппарат, до 80 % деталей которого напечатано на 3D-принтере из оригинальных инновационных материалов [8].

Однако несмотря на бурное развитие указанных технологий актуальной остается проблема недостаточной прочности и выносливости изделий, получаемых путем 3D-печати, особенно из полимерных и композиционных материалов, что сдерживает их применение в основном производстве динамичных технических систем, к которым относятся транспортные средства, в том числе и различные летательные аппараты. Особенно важна неустойчивость характеристик от детали к детали и от установки к установке. Полученные по данным технологиям материалы отличаются высокой случайной анизотропией свойств и недостаточной прочностью по сравнению с материалами, получаемыми методами литья, штамповки, порошковой металлургии. Научные исследования в этой области направлены на разработку исходных материалов, методов соединения компонентов, программного обеспечения, позволяющего обеспечить максимальную точность и производительность. Таким образом, повышение прочности изделий, созданных на основе аддитивных технологий, представляет собой важную актуальную задачу научного и практического плана.

В работах отечественных и зарубежных ученых [9—11] отражены положительные результаты влияния СВЧ электромагнитного поля на различные технологические процессы синтеза и модифицирования неметаллических материалов, в том числе результаты, свидетельствующие о положительном влиянии на прочность и другие свойства стекловолоконных и других полимерных материалов нетеплового СВЧ-воздействия [12]. Нами установлено, что при таком воздействии на слоистые углепластики с квазиизотропной структурой предельное напряжение изгиба возрастает в среднем на 25 %, напряжение при межслоевом сдвиге — на 14...15 % (подтверждено испытаниями в производственных условиях), время до разрушения при предельной нагрузке — в 1,6...2 раза [12—16].

Цель работы — экспериментальное определение эффективности влияния СВЧ электромагнитного поля на прочностные характеристики изделий, изготовленных с использованием аддитивных

технологий двух типов: сформированных из порошкового материала с последующей стабилизирующей пропиткой (технология 3DP) и из расплавленной полимерной нити (технология FDM). При положительной динамике определяющих параметров это позволит расширить область применения исследуемых материалов.

Методы и объекты исследований

В экспериментах с применением порошкового материала использовали 3D-принтер модели ZPrinter450 и СВЧ-установку с магнетроном OM75S(31) с частотой 2450 МГц. Применяли три режима по удельной СВЧ-мощности $P_{уд}$: 1 — низкий (10...20 Вт/см³); 2 — средний (20...30 Вт/см³) и 3 — высокий (30...40 Вт/см³). Обработку осуществляли в течение 10 и 60 с. Одновременно обрабатывали три образца, изготовленных по единой технологической схеме. Образцы помещали на расстоянии 15 мм от нижней поверхности камеры установки. Для обеспечения нормальной работы магнетрона и недопущения перегрева образцов в СВЧ-камеру помещали балластную емкость с водой объемом 50 мл.

В соответствии с технологией 3DP из диэлектрического порошка марки Zp130 формировали образцы в виде пластин размером 80,0×8,0×1,4 мм. Для повышения прочности применяли дополнительную пропитку на основе цианакрилата Z-BondTM90.

Во второй серии опытов использовали нить толщиной 1,75 мм из пластика ABS, из которой на 3D-принтере Felix 3.1 Single Extruder формировали стержни диаметром 5,5 мм и длиной 80 мм. Для обработки использовали ту же установку, что и в экспериментах с порошковым материалом. Режимы воздействия были аналогичны указанным выше.

Результаты исследований и их обсуждение

Были получены следующие образцы:

I — контрольный образец без дополнительной пропитки;

II — образец без дополнительной пропитки с СВЧ-обработкой после формирования;

III — контрольный образец с дополнительной пропиткой;

IV — образец с СВЧ-обработкой после формирования и последующей дополнительной пропиткой;

V — образец с СВЧ-обработкой после дополнительной пропитки;

VI — образец с СВЧ-обработкой до и после дополнительной пропитки.

Исследовали прочность данных образцов, которую оценивали по силе излома образца, определяемой цифровым динамометром FMI-S10C1 фирмы ALLURIS GmbH & Co. KG с диапазоном измерений 0...100 Н. При испытаниях вылет образца устанавливали равным 20 мм. На основе полученных результатов расчетным путем определяли предельные напряжения изгиба [5]. Поверхность образцов до испытаний и поверхность зоны излома изучали при помощи цифрового микроскопа Digital Microscope 2.0 MP 1000X при увеличении соответственно $\times 17$ и $\times 400$ с выводом микрофотографий на экран ноутбука.

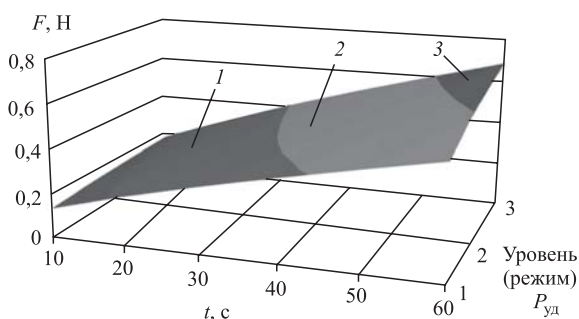


Рис. 1. Влияние удельной СВЧ-мощности и времени СВЧ-воздействия на силу разрушения образцов:
 1 — $P_{уд} = 10...20$ Вт/см³ (режим 1); 2 — $P_{уд} = 20...30$ Вт/см³ (режим 2); 3 — $P_{уд} = 30...40$ Вт/см³ (режим 3)

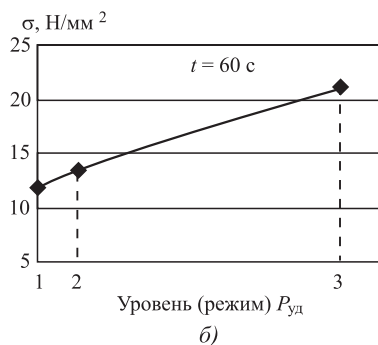
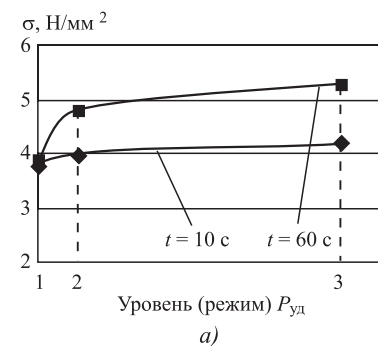


Рис. 2. Влияние удельной мощности СВЧ электромагнитного поля на изгибные напряжения σ в образцах II до стабилизирующей пропитки (а) и IV после стабилизирующей пропитки (б)

В результате математической обработки экспериментальных данных [6] для образцов с СВЧ-обработкой после формирования без пропитки получена аппроксимирующая функция

$$F = 41P_{уд}^{0,04}t^{0,086},$$

где F — внешняя сила, приводящая к разрушению образца, Н; $P_{уд}$ — подведенная удельная СВЧ-мощность, Вт/см³; t — время СВЧ-воздействия, с.

Результаты расчета по полученной зависимости представлены на рис. 1.

Используя известную площадь поперечного сечения образца и определенное значение силы излома, вычисляли максимальное изгибное напряжение, действующее в момент разрушения образца. На рис. 2 представлены полученные зависимости изгибных напряжений в образцах от режимных параметров их обработки.

Наибольший эффект по упрочнению достигается при максимальной удельной мощности из исследуемого диапазона и максимальном времени СВЧ-воздействия. При этом время СВЧ-воздействия оказывает существенно большее влияние, чем СВЧ-мощность. К значимому эффекту приводит уже сам факт помещения образца в СВЧ электромагнитное поле, т. е. имеют значение перестройка связующего и наполнителя на молекулярном уровне и появление новых связей между компонентами. В исследованном диапазоне режимных параметров максимальная температура нагрева образцов составила 39 °С.

Увеличение времени СВЧ-воздействия свыше 60 с нецелесообразно по причине роста длительности технологического цикла. В соответствии с изложенным для дальнейших исследований образцов с последующей пропиткой были выбраны

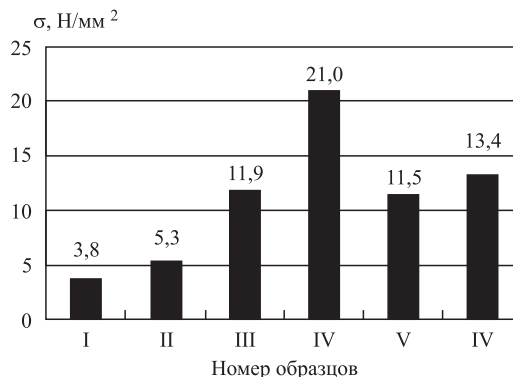


Рис. 3. Влияние места СВЧ-обработки в технологическом цикле на изгибные напряжения в образцах в сравнении с обработкой без СВЧ-воздействия

максимальная удельная мощность, соответствующая уровню 3, и время СВЧ-воздействия 60 с.

На рис. 3 представлена гистограмма максимальных изгибных напряжений σ , возникающих в образцах I...VI при разрушении внешней нагрузкой. Видно, что место СВЧ-обработки в технологическом цикле существенно влияет на прочность сформированного образца, характеризующуюся предельными изгибными напряжениями. После СВЧ-обработки непосредственно после формирования в 3D-принтере изгибная прочность повышается в среднем в 1,37 раза (образец II).

Стабилизирующая пропитка после формирования образца (образец III) способствует повышению прочности более чем в 2 раза. Обработка сформированных образцов в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц с удельной мощностью 30,5 Вт/см³ с последующей их пропиткой

(образец IV) обеспечивает по сравнению с существующими технологиями 3DP (образец III) увеличение изгибной прочности в 1,77 раза. Использование СВЧ-обработки после пропитки практически не влияет на изгибную прочность (образец V) или несколько ее снижает за счет возникновения в связующем, имеющем отличающиеся от основного материала (порошка) диэлектрические характеристики, остаточных напряжений, приводящих к микрорастрескиванию. Двухстадийная СВЧ-обработка (до и после дополнительной пропитки) дает увеличение изгибной прочности около 13 % (образец VI), что можно считать с практической точки зрения несущественным.

Выявлен эффект существенного увеличения интервала времени от начала нагружения до разрушения образца после помещения последнего в СВЧ электромагнитное поле.

Установлено, что воздействие СВЧ электромагнитного поля на термопласты, используемые в аддитивных технологиях (ABS), обеспечивает повышение предельного напряжения при срезе на 36...70 % и увеличивает время до разрушения при предельной нагрузке в 2...3 раза. При этом наибольший эффект достигается при срезе образца перпендикулярно к плоскости формирования слоев материала. Изгибная прочность возрастает в 2...4 раза, время до разрушения — в 1,5...2,5 раза. Продольная устойчивость практически не изменяется, время до разрушения увеличивается на 20...70 % в зависимости от интенсивности электрофизического воздействия. Графики, иллюстрирующие данные результаты, представлены на рис. 4.

Анализ поверхности среза образцов (рис. 5) позволяет сделать вывод, что воздействие СВЧ электромагнитного поля способствует повышению прочности элементов ячеистой структуры напечатанного образца. Стержень сохранил форму, все ячейки не деформированы, срез "чистый". Контрольные образцы явно деформированы, заметны даже расслоения. Ячеистая структура смята, ячейки практически не сохранились. Это свидетельствует о повышенной пластичности и малой прочности контрольного образца, что подтверж-

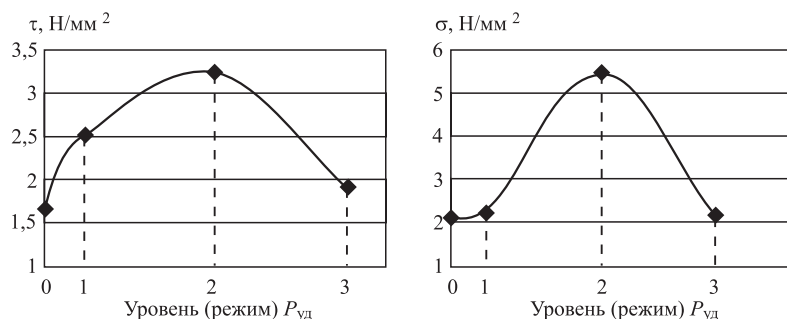


Рис. 4. Влияние СВЧ электромагнитного поля на напряжения среза τ и изгибные напряжения σ в образце из пластика ABS (уровень $P_{уд}$ нуль — контрольный образец)

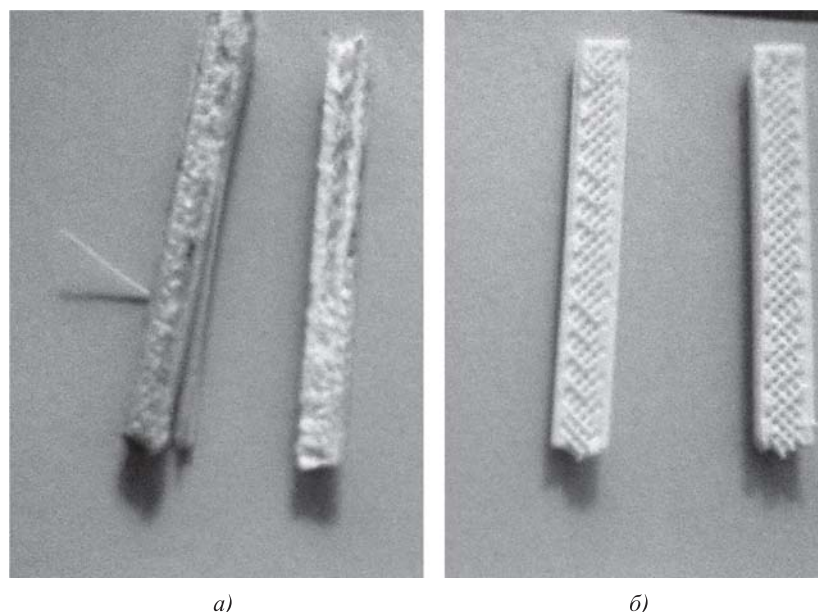


Рис. 5. Поверхность образцов после испытаний на срез: а — контрольный образец; б — обработанный образец

дается неоднородной рыхлой микроструктурой с явными несплошностями.

На основании изложенного можно сделать вывод, что обработка сформированных методами 3D-печати образцов в СВЧ электромагнитном поле значимо увеличивает прочностные параметры по срезу и изгибу. При этом эффективность воздействия зависит в том числе от подводимой СВЧ-мощности и метода испытаний образцов. Механизм упрочнения материала, по-видимому, состоит в увеличении числа сшивок компонентов структуры на макро- и микроуровне. Для подтверждения справедливости данного предположения необходимо проведение исследований с использованием электронной и атомно-силовой микроскопии.

Среди полученных результатов особый интерес представляет эффект возрастания времени функционирования образца до деформации (разрушения) под предельной нагрузкой. В реальном техническом объекте это может обеспечить увеличение шансов для оператора (например, летчика) принять взвешенное решение в критической ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Павлов С.П., Крысько В.А.** Оптимизация формы термоупругих тел. Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. 160 с.
2. **Павлов С.П., Жигалов М.В., Балабуха Т.С.** Оптимальное армирование стержней в задачах кручения // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвуз. научн. сб. Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. С. 151—157.
3. **Павлов С.П., Пальков Р.С.** Влияние свойств межфазового слоя на эффективные механические характеристики нанокompозитов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2013): Матер. V Междунар. конф. г. Москва, 26—29 ноября. 2013 г. С. 554—556.
4. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их пере-

работки на период до 2030 года" // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3—33.

5. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520—530.
6. **A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D.L. Bourell, J.J. Beaman, Jr., M.C. Leu, and D.W. Rosen // U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009.**
7. **Ehrenberg R.** The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time // Science News. 2013. Vol. 183. Iss. 5. P. 20—25.
8. <http://mplast.by/novosti/2015-11-10-stratasy-s-napechatal-na-3d-printere-bespilotnik>.
9. **Holmes L.R., Jr., Riddick J.C.** Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure // JOM. 2014. Vol. 66. Iss. 2. P. 270—274.
10. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
11. **Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M.** // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004. № 11. P. 33.
12. **Калганова С.Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: Дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов, Саратов. гос. тех. ун-т, 2009.
13. **Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Научно-технические технологии. 2016. Vol. 17. No 2. P. 25—30.
14. **Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 870. P. 101—106.
15. **Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G.K.** Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field // AIP Publishing, 020236-1 — 020236-4.
16. **Богомаз И.В., Мартынова Т.П., Москвичев В.В.** Соппротивление материалов. Ч. 1. М.: Изд-во АСВ, 2008. 176 с.



В.А. Лебедев, С.В. Новиков

(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net

Анализ параметров управления формированием структуры шва при воздействии механическими колебаниями низкой частоты на расплав сварочной ванны

Исходя из трактовки процесса кристаллизации под влиянием внешнего механического периодического воздействия различными исследователями, определены ключевые параметры управления формированием структуры сварного шва. Рассмотрены различные подходы в определении характерных зависимостей и представлены соответствующие иллюстрации.

Ключевые слова: кристаллизация, механические колебания, параметры управления, структура металла шва.

According to various researchers interpretation of crystallization process by the influence of outer mechanical periodic action, the key control parameters of structure formation are determined. In define of characteristic dependencies various approaches are reviewed and the corresponding illustration are presented.

Keywords: crystallization, mechanical oscillation, control parameters, metal seam structure.

Как известно, технологическая прочность зависит от структуры металла сварного шва, что обусловило создание и развитие различных технологических и металлургических методов по управлению формированием желаемой структуры. Среди технологических методов широкое распространение получил метод формирования структуры металла шва с помощью внешнего колебательного воздействия на расплав ванны. По типу ввода колебательного воздействия в расплав эти методы подразделяют на контактные (механические колебания сварочного инструмента или сварочной ванны) и бесконтактные (применение электромагнитного поля, модулированного тока, импульсного подогрева, пульсирующего или колеблющегося лазерного или электронного луча). Механические методы считаются наименее перспективными, так как существуют сложности с вводом колебаний в расплав. Кроме того, некоторые исследователи вообще отрицают влияние механических колебаний низкочастотного диапазона (до 200 Гц) на формирование структуры шва [1]. Данные обстоятельства обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований именно в направлении изучения формирования структуры шва с применением внешнего механического периодического воздействия на расплав, а так как формирование структуры подразумевает управление процессом, то необходимо определить

ключевые физические и технологические параметры, что и является целью данной статьи.

Рассматривая кристаллизацию как колебательный процесс, обусловленный колебаниями температурного градиента без какого-либо внешнего воздействия, следует отметить ключевое значение скорости выделения скрытого тепла в формировании структуры [2]. Так, во время остановки фронта кристаллизации основная часть выделившегося тепла будет способствовать его (фронта) противоположному движению, что обусловит частичное подплавление уже закристаллизовавшегося металла шва и замедлит кристаллизационный процесс. Вообще же различные металлы, кристаллизующиеся в одинаковых условиях, могут иметь скорость выделения скрытого тепла как больше скорости охлаждения при температуре плавления, так и меньше. В первом случае металл будет нагреваться, причем нагрев будет тем сильнее, чем больше ширина слоя кристаллизующегося металла, во втором случае более высокая скорость охлаждения будет способствовать замедлению выделения скрытого тепла. Изменяя соотношение скорости выделения скрытого тепла и скорости его отвода за счет теплопроводности, можно либо увеличивать, либо уменьшать скорость снятия термического переохлаждения, тем самым задавая его темп. Таким образом, скорость выделения скрытого тепла формирует скорость кристаллизации, а значит, также

влияет и на распределение примеси перед межфазной границей, что определяет степень концентрационного переохлаждения.

Особое значение имеет мгновенная скорость кристаллизации, что обусловлено зависимостью формирования первичной структуры металла шва от макроскопического распределения скорости кристаллизации по площади сварочной ванны [3]. В результате проведения экспериментальных исследований была предложена формула

$$V_{\text{св}} = AV_{\text{кр}}^2 \cos \varphi,$$

где $V_{\text{св}}$ — средняя скорость сварки; $V_{\text{кр}}$ — мгновенная скорость кристаллизации; $A = 0,017$ — эмпирический коэффициент; φ — угол между вектором скорости сварки и нормалью в произвольной точке межфазной границы.

Обработка экспериментальных данных, проведенная в той же работе, показала, что увеличение скорости сварки влечет за собой не только увеличение мгновенной скорости кристаллизации, но и частоту ее пульсаций, причем полный период кристаллизации состоит из трех временных промежутков: периодов ускоренной кристаллизации, замедления и остановки. Как раз во время остановки у некоторых металлов и наблюдается обратное движение межфазной границы, что обуславливает процесс подплавления уже закристаллизовавшегося металла шва. Таким образом, еще одним важным механизмом кристаллизационного процесса являются колебания мгновенной скорости кристаллизации, чья частота вместе с особенностями полученной микроструктуры определяет периодический характер изменения температуры охлаждения металла шва [4].

Собственная частота кристаллизации является основным параметром в управлении формированием структуры шва, так как именно ее значению должна соответствовать частота внешних колебаний, накладываемых на расплав ванны. Таким образом, определение этого параметра имеет исключительно важное значение. В связи с отсутствием строгой теории, описывающей процесс формирования структуры с наложением внешних колебаний на расплав, значение собственной частоты кристаллизации разные исследователи определяют по-разному исходя из условий эксперимента, теплофизических и металлургических свойств свариваемых металлов и т.д.

Так, в работе [2] собственная частота кристаллизации определяется как отношение скорости сварки к расстоянию между изотермами, которое фиксируется в микроструктуре осевой части шва.

На изменение этой частоты оказывают влияние такие факторы, как химический состав свариваемого металла, толщины свариваемых кромок, параметры процесса, формирующие значение удельной погонной энергии, а также значение температуры предварительного подогрева [5].

С другой стороны, на основе экспериментальных данных показано, что частота кристаллизации зависит не только от выделения скрытого тепла при кристаллизации твердой фазы, но и от концентрационной депрессии переохлаждения при накоплении примеси на межфазной границе [2]. Исходя из этого собственная частота кристаллизации $f_{\text{кр}}$ представляет собой сумму двух слагаемых: частоты выделения скрытой теплоты кристаллизации и частоты образования концентрационной депрессии переохлаждения $f_{\text{кд}}$:

$$f_{\text{кр}} = \frac{3,79}{\sqrt{(V_{\text{св}} + 0,1)^3}} + 14,47V_{\text{св}}^2.$$

По данным работы [6], второе слагаемое может иметь вид

$$f_{\text{кд}} = \frac{0,5k \lg e V_{\text{св}}^2}{D_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где $k = 0,01...10,0$ — коэффициент распределения примесей в расплаве на межфазной границе; $D_{\text{ж}} = (7,2...15,0) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ — коэффициент диффузии примесного элемента в жидкой фазе.

По мнению автора работы [1], механического воздействия на формирование структуры внешние механические колебания низкой частоты не оказывают, а первостепенное значение играют температурные колебания жидкой фазы, периодически изменяющие степень концентрационного переохлаждения этой фазы перед фронтом кристаллизации и диффузионные процессы в этой зоне. То есть концентрационное переохлаждение является основным фактором, обуславливающим нарушение теплового баланса на межфазной границе и приводящим к периодичности процесса кристаллизации металла шва, следовательно, частота колебаний должна согласовываться со временем накопления примесей перед фронтом кристаллизации, скоростью сварки и составом сплава, что учтено в формуле (1). Проведенные по данной формуле расчеты для скоростей сварки в диапазоне 18...36 м/ч подтверждаются опытными данными (рис. 1).

В этой же работе установлено, что температурный градиент вследствие внешнего низкочастотного воздействия колеблется с частотой внешнего колебательного воздействия при продольных внешних колебаниях и с удвоенной частотой при

поперечных. С ростом скорости кристаллизации, а следовательно и скорости сварки, температурный градиент будет снижаться (рис. 2).

Однако в работе [7] показано, что вывод, сделанный в работе [1], неверный. Внешние колебания будут по-разному влиять на расплав, а значит, будут иметь место иные механизмы формирования структуры. Согласно данному предположению, диапазон частот можно условно разделить на три части.

В первом случае, при частоте 1...10 Гц, необходимы значения амплитуды не менее 3,5 мм, чтобы в течение периода внешних колебаний расплав мог достигнуть фронта кристаллизации, что вызовет его разрушение и оплавление. При

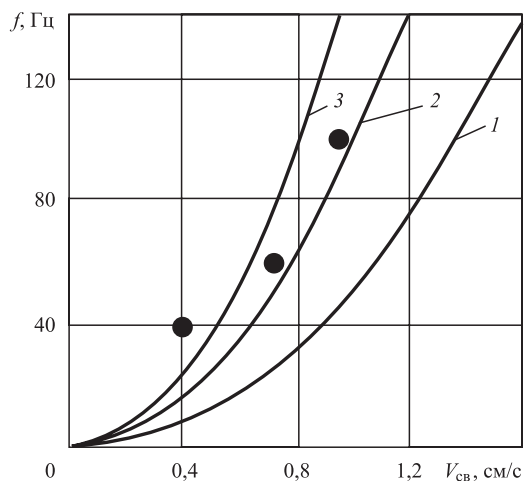


Рис. 1. Оптимальные частоты температурных колебаний сварочной ванны f в зависимости от скорости сварки: 1 — $k = 0,1$; 2 — $k = 0,2$; 3 — $k = 0,3$; — расчет по формуле (1); ● — данные эксперимента [1]

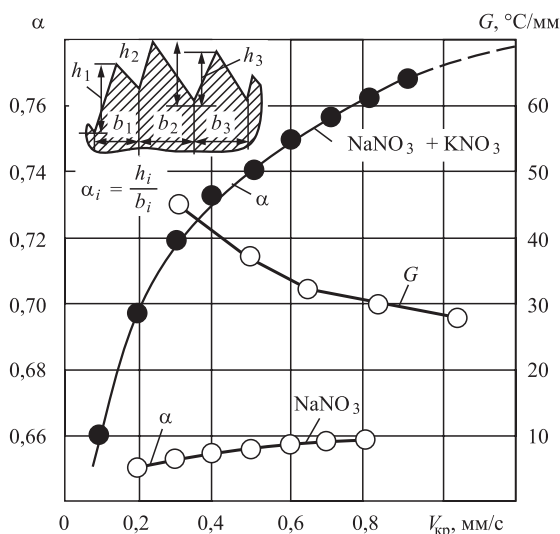


Рис. 2. Влияние скорости сварки на градиент температуры в ванне G и шероховатость фронта кристаллизации α [1]

этом образуется большое количество обломков, часть которых выносится в расплав и расплавляется, а другая — оседает на фронте кристаллизации, обеспечивая формирование мелкозернистой структуры. Данное допущение подтверждено экспериментально в работе [8], где показано, что мелкозернистая структура была получена при поперечных перемещениях электрода с частотой 3 Гц и амплитудой 3,5 мм (рис. 3). В то же время при частоте 8 Гц и амплитуде 2 мм при таких же колебаниях электрода никаких изменений в микроструктуре валиков не обнаружено.

Во втором случае, при частоте свыше 20 Гц, независимо от величины амплитуды на фронте кристаллизации не обнаружено каких-либо температурных колебаний. Это, по мнению авторов, объясняет получение мелкозернистой структуры только за счет механического воздействия волн расплава на межфазную границу, что опровергает выводы работы [1]. Данное предположение подтверждается экспериментальными данными работ [9, 10], где внешние поперечные колебания сообщались электроду с амплитудой до 0,5 мм и частотой 15...30 Гц для стали (рис. 4) и 30...50 Гц для алюминиевого сплава, что позволило получить максимальную степень мелкозернистости. С другой стороны, авторы работы [8] попробовали получить мелкозернистую структуру на частотных режимах, приведенных в работах [9, 10],

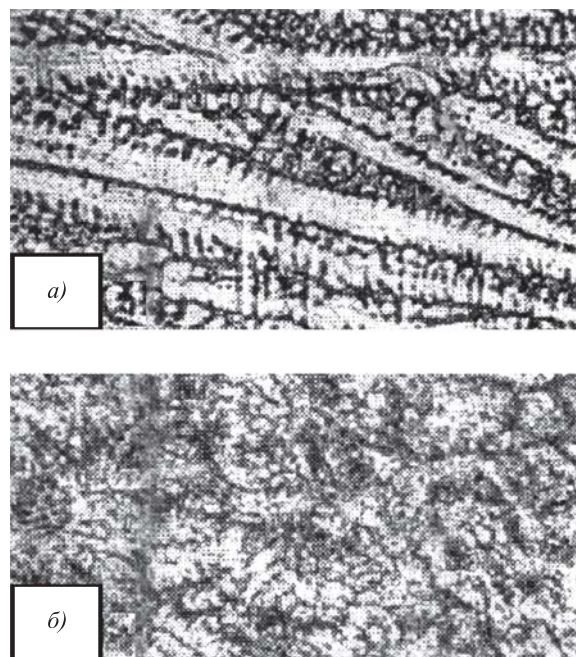


Рис. 3. Первичная структура металла шва ($\times 100$) [8]: а — без перемещений электрода; б — с поперечными колебаниями электрода

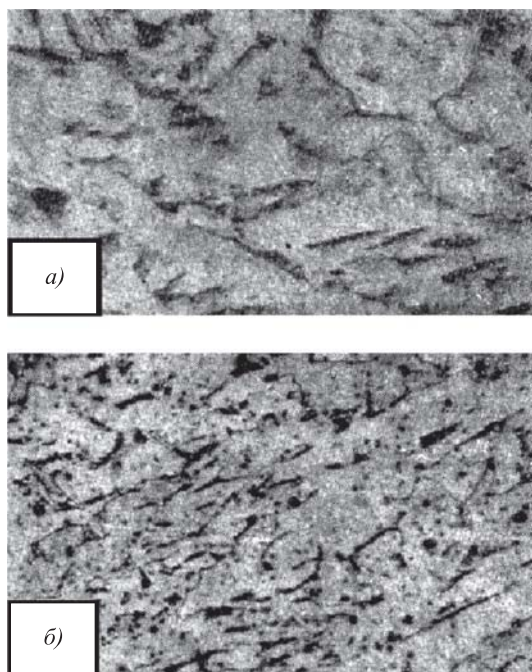


Рис. 4. Структура металла шва при сварке малоуглеродистой стали ($\times 200$) [10]:
a — без вибрации электрода; *б* — с поперечными колебаниями электрода

и им это не удалось. В работе [11] при сварке коррозионно-стойкой и низкоуглеродистой сталей мелкозернистая структура была получена при частоте внешних колебаний 50...60 Гц и амплитуде 0,8...1,0 мм. Разница в частотном режиме по сравнению с работами [8—10], вероятно, объясняется тем фактом, что в данном случае внешние колебания накладывались не на электрод, а на объем расплава сварочной ванны.

В третьем случае, при частоте, лежащей в диапазоне 10...20 Гц, характер процесса получения мелкозернистой структуры носит переходный характер, при условии, что значение амплитуды будет не менее 2,0 мм.

С другой стороны, как показано выше, в работе [10] наилучшие результаты были достигнуты при частоте внешних колебаний, лежащей в диапазоне 15...30 Гц, при амплитуде до 0,5 мм. Видно, что эти результаты лишь частично удовлетворяют допущению третьего случая работы [7].

На основании изложенного авторы статьи [7] считают, что амплитуда колебаний является функцией критической скорости движения расплава и частоты собственных колебаний расплава, что можно выразить формулой

$$A = \frac{V_{кр}}{2\pi f} = K \frac{1}{f},$$

где $V_{кр}$ — критическая скорость движения расплава; f — частота собственных гармонических колебаний расплава. По мнению же авторов работы [12], именно гармонические синусоидальные колебания играют наиболее важную роль в формировании структуры металла шва.

Справедливость этой формулы экспериментально подтверждена для диапазона частот свыше 20 Гц. Для частот ниже этого значения формула неприменима, так как изменяется характер влияния внешних колебаний на фронт кристаллизации.

Влияние же концентрационного переохлаждения на расплав по механизму, описанному в работе [1], возможно только для сплавов, имеющих коэффициент распределения примесей $k < 1$, а также при малых скоростях кристаллизации, обуславливающих наличие равновесия между жидкой и твердой фазами на фронте кристаллизации. Однако для сварки такие условия невозможны, а концентрация примесей перед фронтом кристаллизации достигнет величины, при которой процесс будет не ускоряться, а тормозиться.

Важной характеристикой поведения жидкого расплава при воздействии на него внешнего колебания является ускорение. Как показано в работе [12], для случая неподвижного расплава без влияния дуги, существует момент, когда волновое ускорение a равно гравитационному g ($a = g$), т. е. расплав находится в состоянии невесомости. Амплитуда колебаний A при этом будет являться функцией их частоты ω : $A = g/\omega^2$, т. е. чем выше частота колебаний, тем при меньшей амплитуде будет наступать состояние невесомости. В таком состоянии на межфазной границе начнутся гидродинамические изменения, обусловленные уменьшением кристаллизационного давления и скорости ликвирующих примесей в междендритном пространстве, изменением характера перемещения неметаллических включений и др. В случае превышения значением волнового ускорения значения гравитационного ($a > g$) в расплаве наступит состояние разрежения, которое будет характеризоваться перемещением ликвирующих элементов и отдельных кристаллов от межфазной границы. Интенсивность данных процессов будет определяться разностью сил, соответствующих значениям данных ускорений. Вообще же зависимость амплитуды колебаний заметно изменяется по высоте и зависит от частоты. Так, в случае экспериментов с неподвижным расплавом при наложении колебаний с амплитудой в 1,0 мм при частоте в 25 Гц амплитуда увеличивалась на 1,5...2,5 мм, при частоте 3,8 Гц — на 1,5...3,8 мм. Аналогичная зависимость от частоты наблюдается и при изме-

нении скоростей и ускорений частиц расплава в вертикальном направлении, а в радиальном — движения почти не происходит. С уменьшением же объема жидкости амплитуды скоростей и ускорений частиц увеличиваются от области дна до поверхности расплава. На основании этих данных в работе [12] делается предположение, что значительное перемещение центров кристаллизации и частей кристаллов, находящихся в зоне фронта кристаллизации, происходит только в вертикальном направлении. Перемещение в радиальном направлении почти отсутствует, что способствует значительному переохлаждению пограничных с фронтом кристаллизации объемов расплава и зарождению в нем новых центров кристаллизации, что обуславливает формирование мелкозернистости. Следует отметить, что данные выводы получены при отсутствии явления резонанса. В случае же достижения резонанса наблюдалось резкое увеличение вибрационного ускорения, давления среды на частицу и других динамических свойств колебательной системы. Кроме того, выводы, сделанные в работе [12], не учитывают электромагнитные силы и газовые потоки, влияющие на расплав сварочной ванны благодаря дуге, что требует корректировки при расчете.

В монографии [12] также показано, что расплав можно определить как несжимаемую жидкость, находящуюся под воздействием гармонических колебаний, которая характеризуется такими основными параметрами, как:

давление в расплаве $p = p_0 + \rho A \omega^2 x \sin \omega t$, где p_0 — внешнее давление на открытую поверхность металла; ρ — плотность среды; ω — угловая частота; x — глубина рассматриваемого слоя в расплаве; t — координата времени;

скорость движения среды $v = \omega \cos \omega t$.

В случае внешнего импульсного воздействия на расплав интенсивность воздействия будет определяться скоростью передачи импульса расплаву и его плотностью. В этом случае характеристики будут такими:

импульс $I = v\rho$, где v — скорость передачи импульса расплаву; ρ — плотность расплава;

давление в расплаве $p = v\rho c_0$ или $p = \sqrt{I\rho c_0}$, где c_0 — скорость звука. При этом градиент давления будет определяться по формуле $p = \frac{2\rho_{\max}\pi\omega}{c_0}$, где ρ_{\max} — амплитуда колебаний давления.

Авторы указанной монографии также установили влияние на поведение дисперсной частицы от соотношения между собственной частотой кристаллизации $\omega_{кр}$ и частотой внешнего воздействия ω . Согласно этим исследованиям при соот-

ношении $\omega_{кр} > \omega$ и размере частицы $r > 10^{-1}$ мм, она (частица) будет подниматься вверх, а при $\omega_{кр} < \omega$ и $r < 10^{-1}$ мм — опускаться, несмотря на архимедову силу. На данный процесс имеют существенное влияние такие величины, как вязкость расплава, глубина, на которой находится рассматриваемая частица, взаимодействие продольных и радиальных сил на данной глубине.

Согласно проведенным исследованиям в различных вязких средах в работе [12] отмечено, что при частотах до 50 Гц частицы жидкости не отрываются и покоятся на дне сосуда, а при более высоких частотах начинается придонная кавитация, которая наблюдалась авторами на расстоянии 20...30 мм от дна. Исследования проводились для большого объема покоящейся жидкости, что делает невозможным применение данных результатов для объяснения процессов, протекающих в сварочной ванне. Тем не менее в работе [11] выдвинуто предположение, согласно которому в расплаве металла ванны при наложении низкочастотных колебаний периодически возникают волны давления — адиабатического сжатия и разрежения, изменяющие температуру и плотность жидкого металла, что создает локальные перегревы и переохлаждения. Но эти волны ведут не к кавитации, как утверждает в работе [12], а к появлению зародышей критических размеров, которые, в свою очередь, увеличивают скорость кристаллизации и структурных превращений. Кроме того, мгновенное изменение температуры способствует росту концентрации дислокаций, и в итоге все эти процессы приводят к измельчению зерна. Как отмечает автор, проведенные экспери-

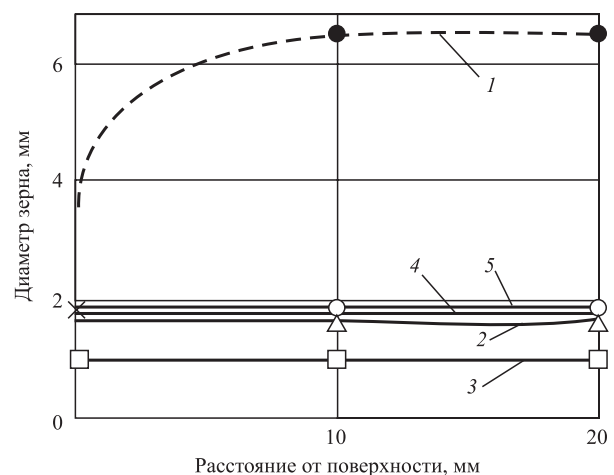


Рис. 5. Влияние вибрации низкой частоты на величину зерна при кристаллизации сплава АЛ-3 [11]: 1 — без вибрации; 2 — вибрация с частотой 40 Гц; 3 — с частотой 60 Гц; 4 — с частотой 80 Гц; 5 — с частотой 100 Гц

менты показали хорошее соответствие с теоретическими результатами. Так, наибольшая степень измельчения с наложением внешних колебаний на сварочную ванну при сварке стали 1X18H9 и сплава АЛ-3 (рис. 5) была достигнута при частоте внешних вибраций 50...60 Гц с амплитудой 0,8...1,0 мм.

В заключение следует отметить тот факт, что на формирование первичной структуры металла шва при наложении внешних колебаний помимо частотных параметров влияют также и параметры режима сварки. В работе [8] экспериментально доказано, что при неизменных частотных параметрах резко изменяется характер кристаллизации металла шва при изменении мощности дуги и скорости сварки. Таким образом, для получения мелкозернистости при повышении мощности дуги и уменьшении скорости сварки необходимо снижать частоту внешних колебаний, одновременно повышая их амплитуду. Однако при таком режиме трудно получить хорошо сформированный шов, что обуславливает снижение эффективности применения внешних колебаний при сварке металлов больших и средних толщин.

Выводы

1. Из-за отсутствия теории технологической прочности сварных швов, полученных с применением внешних колебаний при сварке, во многих работах авторы рассматривают формирование первичной структуры с позиции либо механического, либо теплового механизма. Однако влияние на фронт кристаллизации могут оказывать физические явления, присущие обоим этим механизмам, что наиболее вероятно в случае наложения на расплав ванны низкочастотных колебаний. Кроме того, эти механизмы взаимосвязаны, что обуславливает при проведении дальнейших исследований необходимость создания модели, учитывающей как гидродинамические процессы, так и процессы тепломассопереноса в условиях периодического внешнего влияния.

2. Управление формированием структуры шва осуществляется частотными параметрами внешних колебаний (амплитуда и частота), которые являются ключевыми в формировании желаемой структуры. Кроме них значительное влияние на формирование структуры оказывает скорость сварки, которую необходимо включать в расчет частоты внешнего воздействия. Технологические параметры сварки, определяющие удельную мощность дуги, необходимо повышать с одновременным снижением частоты и повышением амплитуды внешних колебаний.

3. Одним из ключевых параметров управления формированием структуры шва является волновое ускорение внешних колебаний, с помощью которого возможно управлять давлением в расплаве и скоростью перемещения его слоев, тем самым управляя процессами формирования фронта кристаллизации. Однако данные исследования были проведены для металла слитка, получаемого в литейных условиях. Влияние же волнового ускорения на расплав сварочной ванны требует проведения исследований, основанных на корректировке полученной теории под условия сварки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Болдырев А.М.** О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Сварочное производство. 1976. № 2.
2. **Морозов В.П.** Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // Наука и образование. 2010. № 9.
3. **Морозов В.П.** Определение связи между периодичностью процесса кристаллизации металла сварного шва, изменениями мгновенной скорости затвердевания и показателями технологической прочности // Наука и образование. 2010. № 9.
4. **Семенюк Н.И., Рабкин Д.М., Лозовская А.В.** Характер изменения температуры алюминия в процессе затвердевания при сварке плавлением // Автоматическая сварка. № 9. 1986.
5. **Морозов В.П.** Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Изв. вузов. Машиностроение. 2006. № 8.
6. **Мовчан Б.А.** Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. Киев: ГИТЛ УССР, 1962.
7. **Аристов С.В., Руссо В.Л.** Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное производство. 1982. № 11.
8. **Макара А.М., Кушниренко Б.Н.** Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений // Автоматическая сварка. 1967. № 1.
9. **Алов А.А., Виноградов В.С.** Повышение качества металла сварных швов // Сварочное производство. 1957. № 7.
10. **Алов А.А., Виноградов В.С.** Влияние вибрации на процесс дуговой сварки и свойства швов // Сварочное производство. 1958. № 9.
11. **Сутырин Г.В.** Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автоматическая сварка. 1975. № 5.
12. **Ефимов В.А., Эльдарханов А.С.** Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995.

Формирование основных направлений развития сварочно-наплавочных материалов на основе методов математически-статистического подхода

Изучение и получение наплавочных материалов на протяжении длительного времени позволяют выделить не только наиболее предпочтительные, но и установить диапазоны их применения, а также сформулировать функциональные зависимости, используя методы математической статистики.

Ключевые слова: наплавочные материалы, легирующие элементы, математическая статистика, ранжирование, согласованность.

The study and obtaining the alloying material for a long time allows to select not only the most preferred, but also a set of dia-ranges of their application, and also to formulate functional dependence on the basis of methods of mathematical statistics.

Keywords: hardfacing materials, alloying elements, mathematical statistics, ranking, consistency.

Существует большая номенклатура деталей машин, которые в процессе своей эксплуатации подвергаются значительным динамическим нагрузкам. В результате происходит износ рабочих поверхностей и требуется организация ремонтно-восстановительных (сварочно-наплавочных) операций. Из большого числа восстанавливаемых деталей можно выделить группу работающих в условиях абразивного изнашивания со значительной ударной нагрузкой. Для их восстановления изготавливаются наплавочные материалы. Анализ литературных источников [1–3], а также конъюнктура рынка позволили свести их в табл. 1. Анализ приведенных в ней данных позволяет выделить основные легирующие элементы, используемые для обеспечения физико-механических свойств наплавленных покрытий. Основные диапазоны содержания используемых в них легирующих элементов представлены в табл. 2.

Используя методы математической статистики, можно определить наиболее весомые легирующие элементы.

В данной работе предлагается использовать ранжирование методом экспертных оценок, при этом разработчик каждого наплавочного материала условно принимается за одного компетентного эксперта. Таким образом, число экспертов достаточно для использования указанного подхода. Ранжирование позволит выбрать из исследуемых совокупностей наиболее существенную.

Процедура ранжирования заключается в следующем. В соответствии с данными табл. 1 объекты располагаются в порядке, при котором максимальный ранг N получает наиболее предпочтительная альтернатива, а ранг \min — наименее предпочтительная. В результате ранжирования получается порядковая шкала, которая удовлетворяет условию равенства рангов N числу ранжируемых объектов n . Если нескольким объектам присваивается одинаковый ранг, то число рангов не равно числу объектов. В этом случае прописываются стандартизованные ранги. Значение стандартизованного ранга представляет собой среднее суммы мест, которые разделили между собой объекты с одинаковыми рангами [4].

В результате получается нормальная ранжировка. При этом сумма рангов будет равна сумме чисел натурального ряда:

$$S_n = \sum_{i=1}^n x_i = \frac{n(n+1)}{2},$$

где x_i — присвоенные ранги; i — число признаков.

В настоящей работе ранжирование проводится несколькими экспертами. Сначала для каждого объекта подсчитывают сумму рангов S_{ij} , полученную от всех экспертов, а затем устанавливают результирующий ранг исходя из значения S_{ij} ,

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij},$$

где m — число экспертов.

Таблица 1

Наплавочные материалы для деталей, работающих при ударно-абразивном износе

№ п/п	Тип, марка материала	Содержание элемента, %										
		C	Si	Mn	Cr	Ti	Mo	V	W	Ni	Co	B
1	T-620	3,5	1,0	1,0	21,0	1	—	—	—	—	—	1,0
2	T-590	2,5	2,0	1,0	23,0	—	—	—	—	—	—	1,0
3	ЭН-60М	0,6	1,0	1,0	2,0	—	1,0	—	—	—	—	—
4	ЭН-60	0,6	1,0	1,0	2,0	—	—	—	—	—	—	—
5	ЭТН-2	3,0	1,0	6,0	7,0	—	—	—	—	—	—	—
6	ВИСХОМ-10	3,5	—	6,0	3,0	—	—	—	—	—	—	—
7	БХ-2	3,5	—	—	35	—	8,0	—	—	—	—	—
8	ЭТН-5	2,2	—	1,0	24	—	—	—	—	—	—	2,0
9	ЭН-У10Г5Х7С	1,0	1,0	5,0	7,0	—	—	—	—	—	—	—
10	ЭН-У30Х28С4Н4	3,0	4,0	—	28	—	—	—	—	4,0	—	—
11	ЭН-80Х4СГ	0,8	1,0	1,0	4,0	—	—	—	—	—	—	—
12	RCoCr-A	0,8	—	0,8	29,6	—	—	—	10,3	—	0,1	—
...
172	RCoCr-A	1,0	1,2	—	28,3	—	—	—	4,2	—	—	—
173	RCoCr-B	1,5	—	—	30,6	—	—	—	7,5	—	—	—
174	RCoCr-C	2,8	—	—	32,5	—	—	—	17,5	—	—	—

Примечание. Остальное — Fe.

Таблица 2

Основные диапазоны содержания легирующих элементов в наплавочных материалах

Легирующий элемент		C	Si	Mn	Cr	Ti	Mo	V	W	Ni	Co	B
Содержание, %	min	0,020	0,18	0,1	1,4	0,1	0,8	0,1	0,7	1,5	0,1	—
	max	5,2	12,0	34,0	38,0	4,8	17,0	8,4	30,0	35,0	1,5	3,0

Групповая оценка считается достоверной при условии хорошей согласованности экспертов. Для проверки согласованности могут использоваться методы ранговой корреляции, которые были предложены К. Спирмэнном и М. Кендаллом [5].

В данной работе согласованность мнений экспертов оценивается с помощью коэффициента конкордации W — общего коэффициента ранговой корреляции, определяемого по формуле

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где S — сумма квадратов отклонений,

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m x_{ij} \right)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \right)^2}{n}.$$

Поскольку количество данных достаточно большое, целесообразнее всего использовать метод средних рангов. Результаты расчетов представлены в табл. 3. Видно, что наиболее весомым является Fe, при этом коэффициент конкордации $W = 0,69$, что говорит о достаточной согласованности экспертов. Кроме того, из табл. 3 видно, что последовательность весомости легирующих элементов следующая Fe, C, Cr, Mn, Si и т. д. в по-

Таблица 3

Значения средних рангов

Легирующий элемент	C	Si	Mn	Cr	Ti	Mo	V	W	Ni	Co	B	Fe
Ранг	10	8	9	11	6	3	2	4	5	1	7	12

рядке убывания, что вполне объяснимо, поскольку Fe является основой сплавов. Поэтому было предложено на следующем этапе провести анализ корреляционной и функциональной зависимости легирующих элементов и Fe.

Для установления зависимости используется парный линейный коэффициент корреляции [5], определяемый по формуле

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i, y_i — значения признаков x и y соответственно для объекта $i = 1...n$; n — число объектов; \bar{x}, \bar{y} — средние арифметические значения признаков x и y соответственно.

Для оценки значимости коэффициента корреляции необходимо проводить его расчет с учетом стандартных отклонений. Для этого предлагается использовать коэффициент корреляции Пирсона

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y},$$

где S_x, S_y — стандартные отклонения значений x и y соответственно.

Результаты расчетов коэффициентов парной линейной корреляции представлены в табл. 4.

Для оценки коэффициента корреляции обычно используют следующий подход: при коэффициенте корреляции $r > 0,7$ — корреляция сильная; $0,5 < r \leq 0,69$ — средняя; $0,3 < r \leq 0,49$ — умеренная; $0,2 < r \leq 0,29$ — слабая; $r \leq 0,19$ — очень слабая.

С учетом изложенного при анализе табл. 4 видно, что наиболее тесная линейная связь между Fe и Cr, Fe и Mo, Fe и Ni. Между остальными элементами и Fe тесной корреляции не наблюдается, т. е. зависимость между элементами отлична от линейной.

Для оценки нелинейной зависимости используется подход определения тесноты любой корреляционной зависимости по отношению межгрупповой дисперсии к общей [5]

$$R = \frac{D_{\text{межг}}}{D_{\text{общ}}},$$

где $D_{\text{межг}}$ — дисперсия групповых средних относительно общей средней; $D_{\text{общ}}$ — дисперсия значений признака всей совокупности относительно общей средней.

Если $R = 1$, то значения признаков связаны функциональной зависимостью, если $R < 1$ — то корреляционной.

Для определения $D_{\text{межг}}$ и $D_{\text{общ}}$ разобьем все числа значений признака совокупности на k групп. Рассматривая каждую группу как самостоятельную совокупность, определим значения $D_{\text{межг}}$ и $D_{\text{общ}}$:

$$D_{\text{межг}} = \frac{\sum N_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{n},$$

где \bar{x}_j — групповая средняя группы j ; N_j — объем группы j ; \bar{x} — общая средняя; $n = \sum_{j=1}^k N_j$ — объем всей совокупности,

$$D_{\text{межг}} = \frac{\sum n_j (x_i - \bar{x})^2}{n},$$

где n_j — частота значения x_i .

Табл. 5 отражает общий подход к отображению количественных признаков X и Y в корреляционном виде. Можно считать, что тем самым наблюдаемые значения Y разбиты на группы. Каждая группа содержит те значения Y , которые соответствуют определенному значению X . X_1, X_2 — значения признаков X , соответствующих признаку Y ; a, b, c, d — числа повторений признаков Y соответствующих признаку X ; n_x — сумма всех значе-

Таблица 4

Коэффициенты парной линейной корреляции легирующих элементов относительно железа

Легирующий элемент	C	Si	Mn	Cr	Ti	Mo	V	W	Ni	Co	B
Коэффициент корреляции Пирсона	-0,3	-0,273	-0,07	-0,85	-0,22	-0,9	0,0003	-0,34	-0,72	0,00001	-0,52

Таблица 5

Корреляционная таблица совокупности признаков

Y	X	
	X ₁	X ₂
Y ₁	aY ₁	bY ₂
Y ₂	cY ₁	dY ₂
n _x	n _{xY₁}	n _{xY₂}
\bar{x}	$\bar{x} Y_1$	$\bar{x} Y_2$

Таблица 6

Корреляционная таблица совокупности признаков Fe—Mn

Y(Mn)	X(Fe)				
	72	94	95	83	И т. д.
21	1				
1		2	1	1	
1		2	1	1	
6		1		2	
И т. д.					
n _x	7	142	49	58	...
\bar{x}	5,57	0,97	1,2	3,55	...

ний числа признаков Y, соответствующих признаку X; \bar{x} — групповая средняя.

С использованием данных табл. 1 в табл. 6 сведены распределения признаков для системы Fe—Mn, распределение признаков для совокупностей Fe—C, Fe—Si, Fe—Ti, Fe—V, Fe—W, Fe—Co выполняется аналогичным образом.

Результаты расчетов значений R и r представлены в табл. 7. Видно, что железо связано с легирующими элементами функциональной зависимостью. То есть определенному значению функции соответствует значение аргумента. Наличие функциональной зависимости позволяет говорить о том, что все легирующие элементы каким-то образом вступают во взаимодействие с основой, образуя различные фазы (твердые растворы, интерметаллиды и т. п., растворенные в α -Fe и γ -Fe) [6]. При этом изменение количественного состава легирующих элементов варьируется в пределах, представленных в табл. 2.

Например, в работах [1—3] описываются получение карбидной фазы в ледебурите и наличие остаточного аустенита, а в работе [7] — в мартенсите. С другой стороны, в [8] отмечается, что для повышения износостойкости структура не должна претерпевать мартенситные превращения (путем проведе-

Таблица 7

Оценка тесноты корреляционной зависимости Fe с легирующими элементами

Легирующий элемент	Значения коэффициентов r/R	Тип зависимости
C	-1,0	Функциональная (нелинейная)
Si	-1,0	Функциональная (нелинейная)
Mn	-1,0	Функциональная (нелинейная)
Ti	-1,0	Функциональная (нелинейная)
V	-1,0	Функциональная (нелинейная)
W	-1,0	Функциональная (нелинейная)
Co	-1,0	Функциональная (нелинейная)
Cr	-0,85/-	Функциональная (линейная)
Ni	-0,72/-	Функциональная (линейная)
B	-0,52/-	Функциональная (линейная)
Mo	-0,9/-	Функциональная (линейная)

ния различных видов термообработки). А в работе [9] отмечается использование подслоя. Для снижения себестоимости материала авторы работы [10] предлагают использовать легирующие элементы не в виде ферросплавов, а в виде концентратов.

Анализируя изложенное и результаты исследований в области создания сварочных материалов, можно сформулировать основные выводы и направления для разработчиков новых наплавочных материалов.

1. Мировой опыт создания наплавочных материалов показывает, что их состав изучен достаточно объемно, что позволяет установить функциональные зависимости между легирующими элементами в целях оптимизации количественного состава. Однако в этом случае значительное снижение себестоимости изготовления наплавочных материалов при указанных диапазонах невозможно. Исходя из этого перспективным направлением будет более глубокое исследование возможности использования других легирующих элементов и их соединений, позволяющих реализовать весь спектр необходимых свойств.

2. Наличие функциональных зависимостей, подтверждающих растворимость легирующих эле-

ментов в Fe, говорит о том, что выделение твердых и износостойких фазовых составляющих возможно только при осуществлении дополнительного термического воздействия (термообработки для выделения карбидных, интерметаллидных и т. п. фаз) в целях повышения механических характеристик. В связи с этим достаточно актуальным становится поиск альтернативных технологий, позволяющих комбинировать такие воздействия с проведением наплавки.

3. Перспективным направлением становится более глубокое изучение растворимости легирующих элементов в матрице основного металла в целях реализации принципа Шарпи (в настоящее время наиболее показательным примером реализации этого принципа является спекание твердых сплавов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Воловик Е.Л.** Справочник по восстановлению деталей. М.: Колос, 1981. 351 с.
2. **Износостойкость** и структура твердых наплавов / М.М. Хрущов и др. М.: Машиностроение, 1971. 94 с.
3. **Гарбер М.Е.** Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
4. **Орлов А.И.** Организационно-экономическое моделирование: учебник. В 3 ч. Ч. 2: Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 480 с.
5. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
6. **Диаграммы** состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др. М.: Metallurgia, 1986. 440 с.
7. **Литвинов А.А.** Современные материалы для упрочнения бурового инструмента. Наплавка замков буровых труб // Территория Нефтегаз. 2012. № 3. С. 21.
8. **Дема Р.Р., Котенко Д.А.** Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник ЮУрГУ. Сер. Metallurgia. 2015. Т. 15. № 1. С. 103–106.
9. **Структура** и износостойкость многослойного карбидосодержащего покрытия после ацетиленокислородной наплавки / А.А. Паркин, С.С. Жаткин, Е.А. Минаков и др. // Изв. МГТУ "МАМИ". 2014. Т. 2. № 4 (22). С. 34–43.
10. **Использование** циркониевого сырья для сварочных материалов / В.М. Макиенко, Д.В. Строителей, И.О. Романов и др. // Технология металлов. 2008. № 2. С. 22–25.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

М. Н. СТЕПНОВ, А. В. ЗИНИН

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК
СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ
МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ

ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Степнов М.Н., Зинин А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

Цена 1000 руб.

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

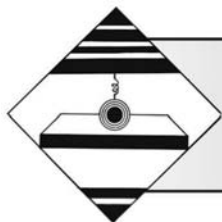
Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделях учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении.

Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

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



Влияние параметров осциллирующего выглаживания на образование регулярного микрорельефа поверхностного слоя

Представлено исследование влияния основных параметров осциллирующего выглаживания на микрорельеф поверхностного слоя. Результаты работы получены на основе выполнения аналитического расчета и экспериментальных исследований. Микрорельеф поверхностного слоя при осциллирующем выглаживании зависит от частоты вращения заготовки, подачи деформирующего инструмента, частоты осцилляции, амплитуды и угла наклона рабочего инструмента. Экспериментальными исследованиями установлено, что микрорельеф поверхностного слоя после осциллирующего выглаживания хорошо согласуется с геометрией, полученной аналитическим расчетом.

Ключевые слова: осциллирующее выглаживание, угол наклона инструмента, микрорельеф поверхностного слоя, подача, частота вращения.

A study of the effect of the main parameters of oscillating smoothing on the microrelief of the surface layer is discussed. The results of the work are obtained on the basis of the implementation of analytical calculations and experimental studies. The microrelief of the surface layer under oscillating smoothing depends on the rotational speed of the workpiece, the supply of the deforming tool, the oscillation frequency, the amplitude and the angle of inclination of the working tool. Experimental studies have established that the microrelief of the surface layer after the oscillating smoothing is in good agreement with the geometry obtained by analytical calculations.

Keywords: oscillating smoothing, angle of inclination of the working tool, microrelief of the surface layer, feed, rotational speed.

Введение

Для повышения качества поверхностного слоя деталей машин существует ряд методов, одними из которых являются методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Упрочнение методами ППД приводит к повышению поверхностной твердости, образованию в поверхностных слоях деталей остаточных напряжений сжатия и благоприятному изменению микрогеометрии поверхностей. В результате в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации деталей повышаются их усталостная и контактная прочность, износостойкость и сопротивление коррозии, гидроплотность и маслоудерживающая способность [1–3]. Эффективным направлением совершенствования методов ППД является применение до-

полнительных колебательных и осциллирующих движений [4–6], которые позволяют кроме отделочно-упрочняющей обработки формировать регулярный микрорельеф на упрочняемой поверхности. Для совершенствования методов отделочной обработки поверхностей и создания регулярного микрорельефа профессор Ю.Г. Шнейдер предложил схему вибрационного обкатывания [7], а профессор М.Е. Попов разработал технологию и инструментальное оснащение для осциллирующего ППД [8]. Предложенные методы упрочняющей обработки отличаются кинематикой деформирующего инструмента, который совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси детали. При этом каждая микрizona поверхностного слоя испытывает давление в разных направлениях.

В результате сложного взаимодействия заданных параметров на обрабатываемой поверхности

формируется микрорельеф, состоящий из синусоидальных канавок различной композиции и плотности. Образование на обработанной поверхности системы канавок, пересекающихся друг с другом с определенной закономерностью, улучшает процесс смазки трущихся пар. Установлено, что такие системы образуют искусственные "масляные карманы", в которых удерживается смазка, препятствующая схватыванию контактирующих поверхностей трущихся пар; формируют на поверхностях деталей регулярные неровности различной формы в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик и свойств; создают на сопрягаемых цилиндрических поверхностях винтовые микрошлицы; обеспечивают декоративную обработку поверхностей деталей взамен трудоемкой абразивной обработки [9–12].

В работе [13] приведены результаты исследования процесса отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием инструментом тороидальной формы с наклоненной осью, что характеризует процесс обработки инструментом со скользящим контактом. Для разных сочетаний значений подачи, амплитуды осцилляции, частот вращения инструмента и детали рассчитаны относительная скорость скольжения инструмента по обрабатываемой поверхности детали и траектория перемещения точки контакта.

В отличие от методов обработки, разработанных Ю.Г. Шнейдером и М.Е. Поповым, в предлагаемом методе рабочий инструмент представляет собой пластину со скругленной боковой поверхностью. При этом инструмент совершает возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к оси детали, в то время как известные схемы обработки реализуют колебательное движение инструмента.

Предлагаемая технология отделочно-упрочняющей обработки осциллирующим выглаживанием является новым процессом ППД, поэтому в настоящее время отсутствует информация о микрорельефе поверхности слоя. **Целью работы** является исследование влияния основных параметров осциллирующего выглаживания на геометрическую форму микрорельефа поверхностного слоя.

Механика процесса выглаживания

Схема осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей представлена на рис. 1. В качестве рабочего инструмента использована пластина 1, имеющая скругление по радиусу r на одном из торцов. Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся-

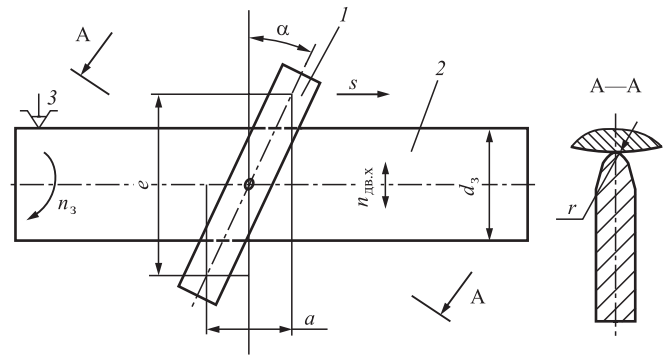


Рис. 1. Схема процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей:

1 — деформирующий инструмент; 2 — заготовка

ся обрабатываемой заготовке 2. Пластина может поворачиваться относительно вертикальной плоскости на некоторый угол α , а также совершать осциллирующее вертикальное движение относительно оси заготовки и перемещаться в осевом направлении по направлению подачи s .

Выполнение инструмента в виде пластины обеспечивает равномерность износа рабочей поверхности деформирующего инструмента по длине. Это увеличивает срок его службы, так как износу подвергается не одна локальная область, а цепочка последовательных зон. Устойчивое положение зоны контакта в процессе обкатывания повышает стабилизацию формы детали и точность процесса обработки.

Как видно из схемы обработки (см. рис. 1), параметрами режима, определяющими кинематику процесса и все параметры регулярного микрорельефа, являются частота вращения заготовки n_3 , подача деформирующего инструмента s , амплитуды осцилляции деформирующего элемента e и a , частота осцилляции деформирующего инструмента $n_{дв.х}$ и угол наклона рабочего инструмента α . Сущность управления образованием регулярного микрорельефа состоит в том, что оно производится за счет варьирования соотношения скоростей движения заготовки и деформирующего инструмента [14].

Расчет траектории перемещения точки контакта

Объемные характеристики и взаимное расположение микрорельефа зависят от величины i [7–8]:

$$i = n_{дв.х}/n_3 = [i] + \{i\}, \quad (1)$$

где $[i]$ — целая часть числа i ; $\{i\}$ — дробная часть числа i .

Целая часть числового значения $[i]$ показывает, сколько раз длина волны λ укладывается в дли-

не окружности поперечного сечения заготовки, а дробная $\{i\}$ — смещение канавок относительно друг друга при каждом последующем ее обороте:

$$\lambda = v_3 T, \quad (2)$$

$$v_3 = \pi d_3 n_3, \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{n_{дв.х}}, \quad (4)$$

где v_3 — скорость вращения заготовки; d_3 — диаметр заготовки; T — период осцилляции деформирующего элемента.

Тогда длина волны, мм, определяется выражением

$$\lambda = \pi d_3 \frac{n_3}{n_{дв.х}}. \quad (2')$$

Колебания инструмента с амплитудой e и частотой $n_{дв.х}$ в вертикальном направлении вызывают колебания пятна контакта в горизонтальном направлении с такой же частотой $n_{дв.х}$, но с амплитудой

$$a = etg\alpha. \quad (5)$$

Наличие угла α и возможность его регулирования расширяют технологические возможности процесса. При одной и той же амплитуде колебаний инструмента можно получать разные амплитуды пятна контакта между деталью и инструментом, причем можно получать большие значения амплитуды $a = etg\alpha$ (см. рис. 1) при большем угле α ($+90^\circ > \alpha > -90^\circ$).

На рис. 2 показана траектория точки контакта при осциллирующем выглаживании [15].

На рис. 3 приведены схемы взаимного расположения канавок в зависимости от значений $\{i\}$. При $\{i\} = 0$ (i — целое число) смещение канавок отсутствует (рис. 3, а). Если $\{i\} = 0,5$, канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны λ (рис. 3, б). При $0,5 > \{i\} > 0$ канавки располагаются по схеме, приведенной на рис. 3, в (переплетаются).

Рассмотрим влияние параметров осциллирующего выглаживания на конфигурацию микрорельефа. При оценке влияния каждого параметра выглаживания на геометрическую форму поверхностного рисунка использовали следующий базовый режим обработки: $n_3 = 200 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 10^\circ$; $n_{дв.х} = 1000 \text{ дв. ход/мин}$; $e = 30 \text{ мм}$; $s = 1 \text{ мм/об}$.

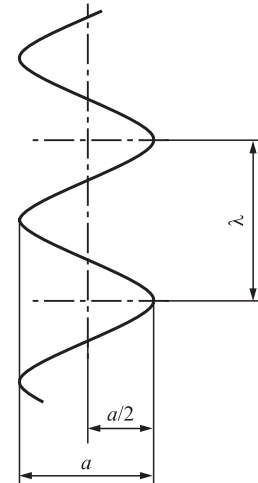


Рис. 2. Траектория точки контакта при осциллирующем выглаживании

Влияние подачи рабочего инструмента. Подачу инструмента s изменяли от 0,5 до 2 мм/об. Остальные параметры режима обработки соответствовали базовому режиму.

Подставляя значения n_3 , $n_{дв.х}$, e , α , s в формулы (1)...(5), получаем траектории точки контакта (канавки) при осциллирующем выглаживании. На рис. 4 показана зависимость формы микро-

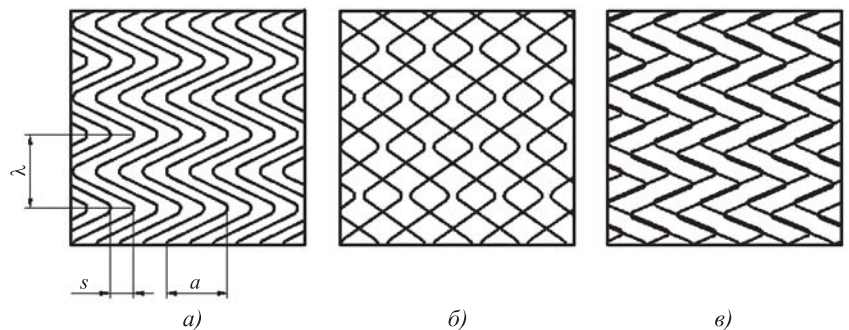


Рис. 3. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от величины $\{i\}$:

а — $\{i\} = 0$; б — $\{i\} = 0,5$; в — $\{i\} = 0,25$

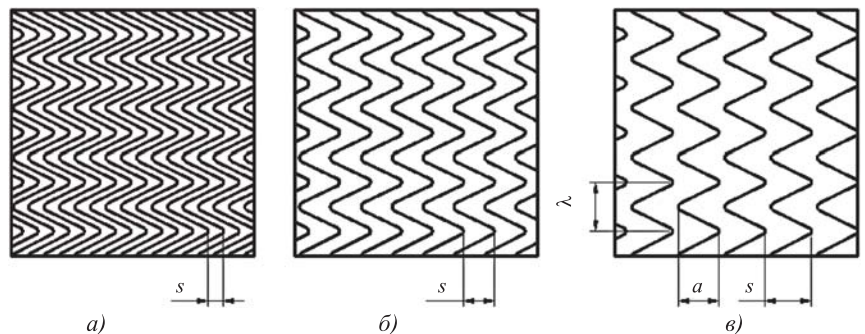


Рис. 4. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от подачи рабочего инструмента ($\{i\} = 0$):

а — $s = 0,5 \text{ мм/об}$; б — $s = 1 \text{ мм/об}$; в — $s = 2 \text{ мм/об}$

рельефа поверхностного слоя от подачи рабочего инструмента. Видно, что изменение подачи инструмента приводит к изменению шага канавки микрорельефа на поверхности (расстояния между двумя смежными канавками), но форма канавки при этом не изменяется.

Влияние угла наклона рабочего инструмента. Угол наклона инструмента изменяли от 0 до 45°. Остальные параметры режима обработки соответ-

ствовали базовому режиму. На рис. 5 показана зависимость формы микрорельефа от угла наклона рабочего инструмента. Видно, что изменение угла наклона рабочего инструмента приводит к изменению формы микрорельефа поверхностного слоя. Если рабочий инструмент не поворачивать ($\alpha = 0$), то на образующей поверхности детали формируется прямая линия, которая при наличии подачи инструмента преобразуется в винтовую линию.

Увеличение угла наклона инструмента α приводит к увеличению амплитуды ($a = etg\alpha$) волны. При повороте рабочего инструмента против часовой стрелки (см. рис. 1) закономерности форм рельефа сохраняются, т. е. с увеличением α возрастает амплитуда волны канавки.

Влияние частоты вращения заготовки. Частоту вращения заготовки изменяли от 200 до 400 мин⁻¹. Остальные параметры режима обработки соответствовали базовому режиму. На рис. 6 показана зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от частоты вращения заготовки. Видно, что изменение частоты вращения заготовки приводит к изменению взаимного расположения канавок и формы канавки микрорельефа на поверхности слоя, которая зависит от величины i .

При $\{i\} = 0$ (i — целое число) смещение канавок отсутствует (рис. 6, а). Если $\{i\} = 0,17$ канавки располагаются по схеме, приведенной на рис. 6, б (переплетаются). При $\{i\} = 0,5$ канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны λ (рис. 6, в).

Влияние амплитуды осцилляции деформирующего элемента. Амплитуду осцилляции деформирующего инструмента изменяли от 20 до 40 мм. Остальные параметры режима обработки соответствовали базовому режиму. На рис. 7 показана зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от амплитуды осцилляции деформирующего элемента. Видно, что изменение амплитуды осцилляции

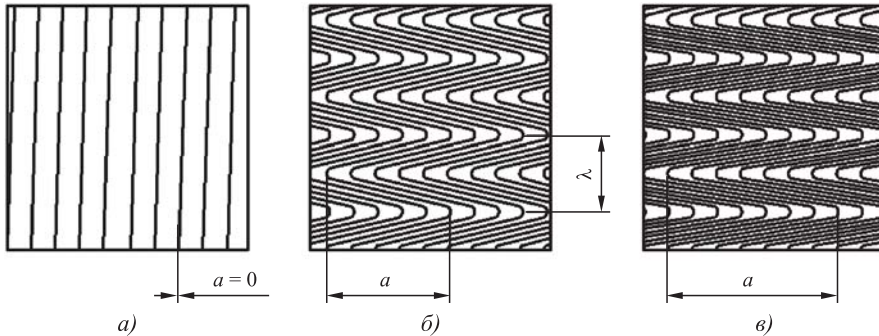


Рис. 5. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от угла наклона рабочего инструмента ($\{i\} = 0$): а — $\alpha = 0$; б — $\alpha = 20^\circ$; в — $\alpha = 45^\circ$

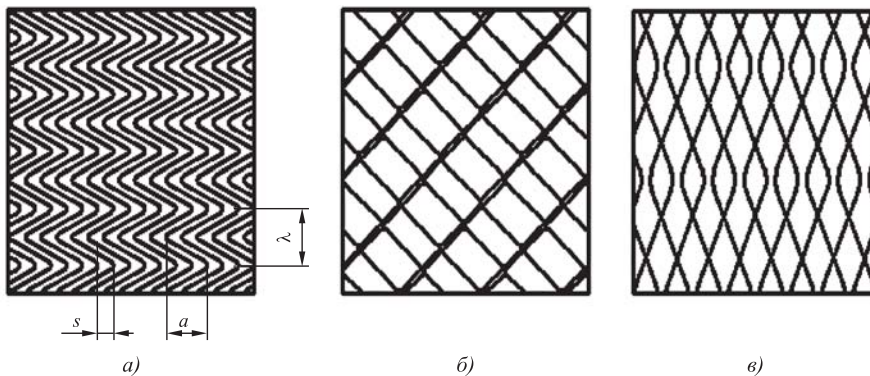


Рис. 6. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от частоты вращения заготовки: а — $n_3 = 200 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0$); б — $n_3 = 240 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0,17$); в — $n_3 = 400 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0,5$)

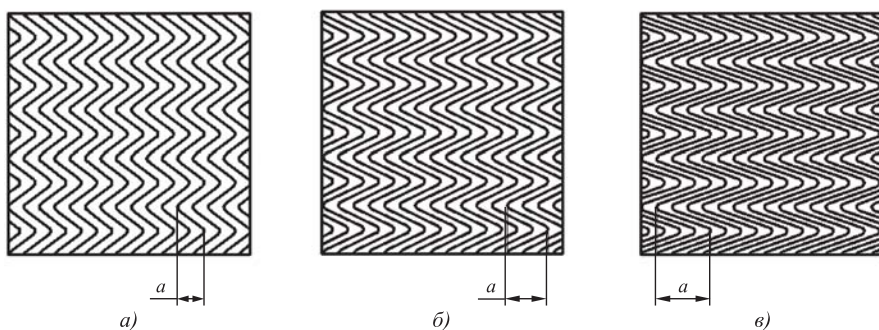


Рис. 7. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от амплитуды осцилляции деформирующего элемента: а — $e = 20 \text{ мм}$; б — $e = 30 \text{ мм}$; в — $e = 40 \text{ мм}$

деформирующего элемента e приводит к изменению амплитуды канавки a микрорельефа на поверхности.

Влияние частоты осцилляции деформирующего инструмента. Частоту осцилляции деформирующего элемента изменяли от 250 до 1220 дв. ход/мин. Остальные параметры режима обработки соответствовали базовому режиму. На рис. 8 показана зависимость формы микрорельефа по-

верхностного слоя от частоты осцилляции деформирующего инструмента. Видно, что изменение частоты осцилляции деформирующего элемента приводит к изменению взаимного расположения канавок микрорельефа на поверхности. Форма канавки микрорельефа зависит от величины i . При $\{i\} = 0$ (i — целое число) смещение канавок отсутствует (рис. 8, б). Если $\{i\} = 0,5$, канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны λ (рис. 8, а). При $\{i\} = 0,25$ канавки располагаются по схеме, приведенной на рис. 8, в.

Изменение натяга t и радиуса r деформирующего элемента приводит к изменению глубины и ширины канавки, но ее форма не изменяется.

Экспериментальное исследование процесса выглаживания

Для проверки адекватности полученных математических моделей проведены экспериментальные исследования обработки инструментом со скользящим контактом [14]. Исследования проводили на токарном станке с помощью устройства для создания осциллирующего движения рабочего инструмента (рис. 9). В этом устройстве вращение от мотора-редуктора 1 передается через эксцентрик на подвижную пластину в корпусе 2, которая совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. К этой пластине крепится деформирующий элемент, имеющий возможность поворачиваться относительно вертикальной оси на угол $\pm\alpha$ (см. рис. 1). Обрабатываемая заготовка 4 одним концом крепится в трехкулачковом патроне 3, а другим — поджимается задним центром 6. Устройство для осциллирующего упрочнения крепится на суппорте токарного станка вместо резцедержателя.

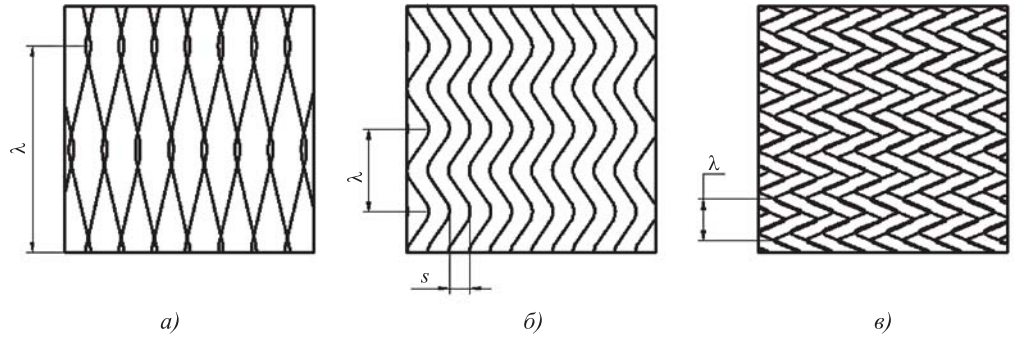


Рис. 8. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от частоты осцилляции деформирующего элемента:

a — $n_{\text{дв.х}} = 250$ дв. ход/мин ($\{i\} = 0,5$); *б* — $n_{\text{дв.х}} = 600$ дв. ход/мин ($\{i\} = 0$); *в* — $n_{\text{дв.х}} = 1250$ дв. ход/мин ($\{i\} = 0,25$)

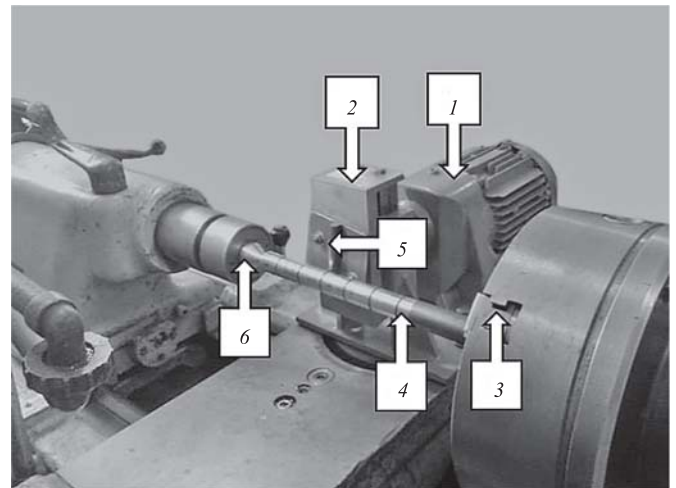


Рис. 9. Устройство для осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей:

1 — мотор-редуктор; 2 — корпус для закрепления деформирующего инструмента; 3 — трехкулачковый патрон; 4 — обрабатываемая заготовка; 5 — деформирующий инструмент; 6 — задний центр

Характеристики образца: форма — цилиндрическая, диаметр 20 мм, материал — сталь 45, упругопластичный, упрочняющийся. Характеристики индентора: тип — пластина с рабочей поверхностью с радиусом скругления $r = 2$ мм; материал — твердый сплав ВК8; подача инструмента $s = 1$ мм/об, угол наклона инструмента $\alpha = 10^\circ$; частота осцилляции деформирующего элемента $n_{\text{дв.х}} = 300$ дв. ход/мин; амплитуда осцилляции деформирующего элемента $e = 30$ мм, частота вращения заготовки n_3 изменялась от 100 до 130 мин⁻¹.

Подставляя значения $n_{\text{дв.х}}$, e , α , s в формулы (1)... (5), получаем траектории точки контакта (канавки) при осциллирующем выглаживании (рис. 10).

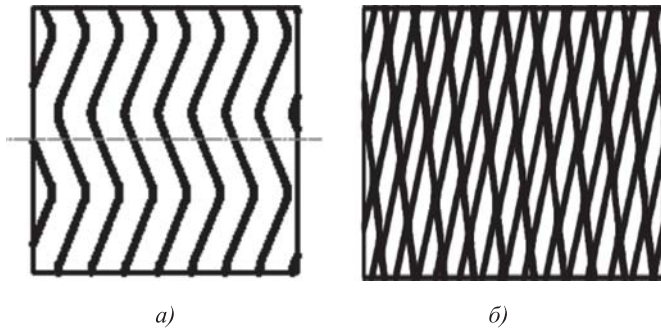


Рис. 10. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от частоты вращения заготовки:
 а — $n_3 = 100 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0$); б — $n_3 = 130 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0,3$)

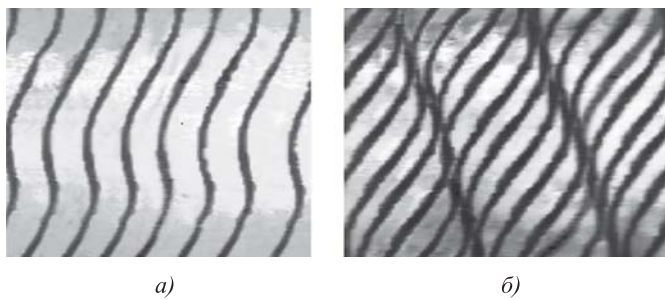


Рис. 11. Следы перемещения точки контакта инструмента и обрабатываемой поверхности:
 а — $n_3 = 100 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0$); б — $n_3 = 130 \text{ мин}^{-1}$ ($\{i\} = 0,3$)

На рис. 11 показаны фотографии микрорельефа поверхностного слоя при разных частотах вращения заготовки.

Полученные результаты экспериментального определения зависимости формы микрорельефа поверхностного слоя от частоты вращения заготовки хорошо согласуются с аналитическим расчетом (см. рис. 10).

Выводы

Результаты исследования показывают, что при осциллирующем выглаживании канавки микрорельефа на поверхности бывают трех видов: параллельные, переплетенные и стыковые.

Изменение подачи инструмента s приводит к изменению расстояния между двумя смежными канавками на поверхности, но форма канавки при этом не изменяется.

Изменение угла наклона рабочего инструмента α приводит к изменению формы микрорельефа поверхностного слоя. Если рабочий инструмент не поворачивать ($\alpha = 0$), то на образующей поверхности детали формируется прямая линия, ко-

торая при наличии подачи инструмента преобразуется в винтовую линию. Увеличение угла наклона инструмента α приводит к увеличению амплитуды a волны. При повороте рабочего инструмента против часовой стрелки (см. рис. 1) закономерности форм рельефа сохраняются, т. е. с увеличением α возрастает амплитуда волны канавки.

Изменение частоты вращения заготовки n_3 и частоты осцилляции деформирующего элемента $n_{\text{дв.х}}$ приводит к изменению взаимного расположения канавок и формы канавки микрорельефа, которые зависят от величины i . При $\{i\} = 0$ (i — целое число) смещение канавок отсутствует. Если $0,5 > \{i\} > 0$, канавки переплетаются. При $\{i\} = 0,5$ канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны λ .

Изменение амплитуды осцилляции деформирующего элемента e приводит к изменению амплитуды канавки a микрорельефа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей // Вестник ИрГТУ. 2017. № 4. С. 22—29.
2. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2 т. Т. 2. М.: Л.В. М.-СКРИПТ, Машиностроение, 1995. 688 с.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
4. Балгер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
5. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
6. Бойко Н.И. Ресурсосберегающие технологии повышения качества поверхностных слоев деталей машин: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 198 с.
7. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб.: Политехника, 1988. 414 с.
8. Деформирующая обработка валов / С.А. Зайдес, В.Н. Емельянов, М.Е. Попов и др. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
9. Рыжов Э.В., Сулов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
10. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
11. Жасимов М.М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. Алма-Ата: Наука, 1986. 205 с.

12. **Бурков Г.М.** Исследование процесса обработки поверхностей инструментом ударного действия с вращающейся эксцентриковой массой: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов-н/Д, 1972. 163 с.

13. **Попов М.Е.** Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 11. С. 24–28.

14. **Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь.** Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей // Вестник ИрГТУ. 2017. № 4. С. 22–29.

15. **Попов М.Е.** Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 7. С. 11–19.

УДК 621.787

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.С. Шведова, С.А. Новокрещенов
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: tehn_rostov@mail.ru

Проектирование технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла

Представлены результаты исследований процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) в гранулированных средах. Получены зависимости для определения шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя, степени деформации и времени обработки для различных динамических методов ППД в гранулированных средах. Разработаны методика оптимизации по критерию оптимальной интенсивности деформаций и блок автоматизированного проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: обработка деталей динамическими методами ППД, качество поверхности, глубина упрочненного слоя, степень деформации, время обработки, разработка САПР ТП.

Results of researches of processing of details by the superficial plastic deformation (SPD) dynamic methods in the granulated environments are presented in article. Dependences for definition of a roughness of a surface, depth of the strengthened layer, extents of deformation and time of processing for various dynamic methods of processing of SPD in the granulated environments are received. The optimization technique by criterion of optimum intensity of deformations and the block of the automated design of technological processes are developed.

Keywords: processing of details by dynamic methods of superficial plastic deformation, quality of a surface, depth of the strengthened layer, extent of deformation, processing time, development of systems of the automated design of technological processes.

Жизненный цикл изделия — это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта. Основные этапы жизненного цикла: проектирование, производство, техническая эксплуатация, утилизация. Анализ этапов жизненного цикла позволяет уменьшить издержки на доработку изделия, рационально спланировать деятельность по его созданию и обслуживанию.

Учет всех этапов жизненного цикла изделия существенно усложняет задачу его проектирования и производства. Возможность ее решения достигается применением автоматизированных систем проектирования (САПР), в том числе САПР технологических процессов (САПР ТП).

В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального (CAE — Computer Aided Engineering), конструкторского (CAD — Computer Aided Design) и технологического (CAM — Computer Aided

Manufacturing) проектирования. Проектирование технологических процессов является основной частью технологической подготовки производства, что, в свою очередь, требует детального изучения этого элемента САПР и тщательной его проработки.

При проектировании технологических процессов финишной обработки деталей во многих случаях применяют обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД). ППД — это вид упрочняющей обработки, при котором не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя обрабатываемой детали. Такой вид обработки может использоваться для повышения несущей способности контактной поверхности деталей машин, позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, в том числе работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред, а также имеющих концентраторы напряжений. В процессе ППД одновременно с обработкой поверхности детали происходит ее упрочнение. Большой интерес инженеров к методам обработки поверхностным пластическим деформированием объясняется их широкими технологическими возможностями и существенными технико-экономическими преимуществами.

По характеру прилагаемой нагрузки согласно ГОСТ 18296—72 [1] методы ППД подразделяют на статические и динамические. При обработке статическими методами ППД деформирующий инструмент или рабочие среды воздействуют на поверхность обрабатываемых деталей с некоторым постоянным усилием. При этом происходит плавное перемещение инструмента и, соответственно, очага деформации под ним по всей поверхности детали, подлежащей обработке. При динамических методах ППД рабочие среды, чаще всего в виде стальных полированных шариков, воздействуют на поверхность обрабатываемых деталей многократными соударениями. Сила соударений изменяется в каждом цикле от минимального до максимального значения. При этом обработке может подвергаться или вся поверхность детали, или ее отдельные участки.

В современном машиностроении динамические методы ППД получили широкое применение в целях повышения эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей. Обработка данными методами позволяет при сравнительно низких производственных затратах в несколько раз повысить сопротивление усталости, износостойкость, контактную жесткость и тем самым повлиять на

увеличение жизненного цикла изделия. Результат упрочнения обусловлен формированием в поверхностном слое благоприятной картины сжимающих остаточных напряжений, увеличением микротвердости, глубины и степени деформации.

Процессы обработки деталей динамическими методами ППД и достигаемые технологические параметры достаточно подробно изучены [2, 3]. Результаты обработки динамическими методами ППД можно описать множеством критериев: глубиной и степенью деформации упрочненного слоя, шероховатостью поверхности, максимальной реализацией резервов упрочнения материала деталей. Авторами работ [2—5, 7] и др. получены уравнения, учитывающие особенности динамического взаимодействия частиц среды с поверхностью детали. Эти зависимости позволяют рассчитать значение каждого из указанных критериев при различных сочетаниях технологических параметров, среди которых можно выделить управляемые (режимы обработки для соответствующего метода и характеристики рабочих сред) и неуправляемые (физико-механические характеристики обрабатываемого материала). Так, параметр шероховатости поверхности можно определить с помощью зависимости

$$Ra_{уст} = k \sqrt{\frac{h_{max} a b l_{ед}}{R^2}},$$

а глубина упрочненного слоя h_n и степень деформации ε определяются как

$$h_n = 3,8R \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{V_{эф} \sin \alpha} \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{k_c c \sigma_T}};$$

$$\varepsilon = 0,8 \sqrt[4]{V_{эф}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}},$$

где k — эмпирический коэффициент; h_{max} — максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали при единичном соударении; a , b — большая и малая полуоси эллипса контакта соответственно; $l_{ед}$ — единичная длина, введенная для сохранения размерности; R — радиус шарика; $V_{эф}$ — эффективная скорость соударения шарика с поверхностью детали; α — угол встречи шарика с поверхностью детали; $\rho_{ш}$ — плотность материала шарика; σ_T — предел текучести материала детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_c — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; HB — твердость по Бринеллю.

Остаточные напряжения, которые формируются в поверхностном слое в процессе обработки деталей динамическими методами ППД, оказывают значительное влияние на их эксплуатационные свойства при знакопеременных нагрузках. Главную роль играют величина остаточных напряжений, их знак и характер распределения по глубине поверхностного слоя деталей.

В настоящее время существует и широко используется значительное число методик экспериментального определения остаточных напряжений, большая часть из которых основана на послонном удалении поверхностного слоя материала детали и измерении остаточных деформаций с последующим расчетом величины остаточных напряжений. Большинство данных методик являются достаточно трудоемкими и не позволяют оперативно оценить распределение остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых деталей.

Одним из перспективных направлений, позволяющим спрогнозировать знак и глубину залегания остаточных напряжений в поверхностном слое, является разработка расчетного аппарата, который позволит сократить количество трудоемких экспериментальных исследований. Для определения остаточных напряжений проведено моделирование напряженно-деформированного состояния очага деформации методом конечных элементов, получены эпюры полей напряжений. Это позволило значительно уменьшить трудоемкость расчета величины и глубины проникновения остаточных напряжений при упрочняющей обработке.

Время обработки деталей играет важную роль в процессе формирования качества поверхностного слоя при динамических методах ППД. При проектировании технологических процессов динамических методов обработки ППД является важным определением рационального времени обработки детали. При этом необходимо избегать таких явлений, как перенаклеп, который приводит к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нем. Исходя из изложенного можно заключить, что образование перенаклепа способно негативно влиять на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Перенаклеп является необратимым явлением, при котором невозможно восстановление качества поверхностного слоя металла даже при использовании термообработки.

Для наиболее точного прогнозирования результатов технологического процесса необходимо знать и уметь определять расчетное время обра-

ботки. Поэтому рассмотрим теоретическую модель определения времени обработки деталей.

Рассмотрим процесс деформации поверхностного слоя деталей глубиной h_{\max} . Вероятность события P_1 , что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной h_{\max} попадет в локальный деформированный объем за одно взаимодействие с индентором, можно определить, разделив объем деформируемого металла V при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью (либо объем металла V_s , заключенного в шаровой сегмент радиусом R и высотой h_{\max}) на объем слоя металла толщиной h_{\max} и площадью, равной квадрату упаковки шариков на поверхности детали:

$$P_1 = \frac{V}{4R^2 h_{\max}} \quad \text{или} \quad P_1 = \frac{V_s}{4R^2 h_{\max}}.$$

Для теоретико-вероятностных расчетов числа актов деформирования, приходящихся на единицу площади детали в единицу времени, для различных динамических методов обработки ППД введем переменную f_B — частоту циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали. Следует учесть то обстоятельство, что не все колебания рабочей камеры приводят к деформирующим ударам шариков. Вероятность события, что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной h_{\max} попадет в локальный деформированный объем за одну секунду обработки

$$P_1 = \frac{V_s}{4R^2 h_{\max}} f_B.$$

Время однократного деформирования всего объема поверхностного слоя толщиной h_{\max}

$$t_1 = \frac{4R^2 h_{\max}}{V_s f_B}.$$

Время многократного деформирования всего объема поверхностного слоя толщиной h_{\max} будет определяться как

$$t_F = \frac{4h_{\max} F R^2}{V_s f_B},$$

где F — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности.

Согласно рекомендациям автора работы [2] выбор значения величины F при динамических

методах обработки ППД зависит от твердости материала. Число повторяющихся ударов F варьируется от 10 до 20, бóльшие значения назначаются для меньшей твердости обрабатываемого материала детали.

В связи с тем, что превышение рационального времени обработки может привести к перенаклепу обрабатываемой поверхности, были проведены исследования по определению времени перенаклепа образцов из различных материалов в зависимости от режимов обработки и характеристик рабочих сред, что в дальнейшем позволило выбирать такие технологические параметры динамических методов ППД, при которых требуемое время обработки гарантированно не достигало бы времени образования перенаклепа.

Для формализации проектных процедур, используемых при проектировании технологических процессов обработки динамическими методами ППД, необходима разработка методики оптимизации технологических режимов и характеристик рабочих сред в целях получения наилучших эксплуатационных характеристик деталей, подвергнутых обработке. Следует отметить, что в исследованиях, проводимых ранее, оптимизация технологических процессов осуществлялась по критерию трудоемкость [2, 4], что не позволяет в полной мере учитывать эксплуатационные характеристики обработанных деталей и увеличивать их жизненный цикл. При проведении настоящих исследований установлено, что для динамических методов ППД целесообразнее проводить оптимизацию по критериям максимальный предел выносливости и отклонение интенсивности деформаций, которые непосредственно влияют на увеличение жизненного цикла детали. При этом необходимо предварительно проанализировать влияние технологических факторов, характерных для каждого рассматриваемого метода обработки, на основные результаты технологического процесса. Это делает возможным проведение ранжирования технологических факторов, позволяет выбрать из них наиболее существенные, а также принять решение, какие из технологических параметров и характеристик рабочих сред необходимо задавать массивом чисел, а какие — простым выбором по условиям технологической задачи.

Оптимальным режимом ППД, проводимого в целях упрочнения деталей, является тот, который позволит обеспечить максимальное приращение предела выносливости детали по сравнению с его исходным значением. В общем случае для материала детали с определенным набором физико-механических свойств значение предела выносли-

вости зависит от следующих факторов: величины и распределения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали после ППД, глубины упрочненного слоя, степени деформации и шероховатости поверхности. Имеющиеся зависимости для определения этих величин не позволяют определить оптимальное физическое состояние поверхностного слоя. Это состояние формируется в процессе обработки детали и определяется конкурирующим влиянием двух параллельно протекающих процессов: физического упрочнения (наклепа) и разрушения. По мере увеличения интенсивности деформации происходит непрерывный рост предела текучести материала детали за счет наклепа. Наибольшие остаточные напряжения сжатия близки к возрастающему пределу текучести. Для усиления благоприятных факторов нужно стремиться к максимальной интенсивности деформации поверхностного слоя. Однако при такой интенсивности увеличивается вероятность процесса одновременного разупрочнения поверхностного слоя. Поэтому необходимо обеспечить оптимальную интенсивность деформации, при которой приращение предела выносливости детали будет наибольшим.

Учитывая результаты работы [6], при описании деформационного упрочнения можно считать, что главная часть ресурса пластичности исчерпывается на стадии равномерной деформации, а за ее пределами наблюдается значительный рост количества и размера микродефектов.

В работе [3] получена зависимость для определения равновесной интенсивности деформаций, которая определяет максимальный резерв использования физического упрочнения материала детали при обработке динамическими методами ППД,

$$\varepsilon_i = 2,4 \left(\frac{h}{R} \right)^{2/3},$$

где h — глубина остаточной вмятины.

Для оптимизации технологических процессов обработки динамическими методами ППД в качестве целевой функции выбрана интенсивность деформации. Из большого числа вариантов сочетания технологических режимов и характеристик рабочих сред выбирается такой, который обеспечивает интенсивность деформации, наиболее близкую к равновесной. В качестве исходных данных, необходимых для начала расчета, используются параметры определенного вида обработки динамическим методом ППД. При выборе оптимального варианта используются ограничительные функции, в качестве которых может выступать заданная

глубина упрочненного слоя, степень деформации или требуемые параметры шероховатости поверхности. Таким образом, при дальнейших технологических расчетах учитываются только такие варианты сочетания технологических режимов и характеристик рабочих сред, которые обеспечивают выполнение заданных ограничительных функций.

После того как были достигнуты заданные значения параметров качества поверхностного слоя, необходимо провести перебор и анализ показателей интенсивности деформации, после чего выбирается вариант технологического процесса, при котором достигается интенсивность деформации, близкая к равновесной. После проведенных расчетов на экран выводятся следующие параметры: заданная глубина упрочненного слоя и степень деформации, параметры шероховатости поверхностного слоя, показатели интенсивности деформации и предельной равномерной деформации, параметры обработки.

На основании результатов представленной работы может быть разработан блок для проектирования оптимальных технологических процессов динамических методов обработки ППД, который позволит значительно расширить возможности уже имеющейся САПР ТП и будет способствовать широкому внедрению данных методов в машиностроительное производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

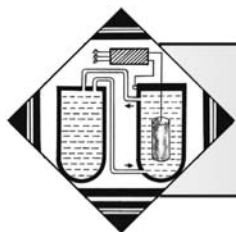
1. **ГОСТ 18296—72.** Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М., 1972. 13 с.
2. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 1995.
3. **Шведова А.С.** Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами ППД: Дис. ... канд. техн. наук: Ростов н/Д, 2016. 146 с.
4. **Разработка САПР ТП обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах / Динамика технических систем // М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.Г. Исаев и др. // Сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. 2016. С. 317—321.**
5. **Технологические основы оптимизации процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных рабочих средах / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.С. Шведова, А.Г. Исаев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 11 (131).**
6. **Сидякин Ю.И.** Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06. М., 2002. 34 с.
7. **Tamarkin M., Tichshenko E., Fedorov V.** Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 24. No. 1.

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



УДК 621.793:7.08.17

С.Н. Юркевич, Т.Л. Полякова, И.М. Ващенко, К.Г. Андриенок, Н.М. Аблажей
(ОАО "558 Авиационный ремонтный завод", Республика Беларусь, г. Барановичи)
E-mail: yurckevi4@yandex.by

Технология нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов

Показана возможность получения хромового покрытия на деталях из титановых сплавов с высокой макрозернистостью после модификации поверхности. Разработаны методики определения и частичного устранения прижогов, защиты от загрязнений.

Ключевые слова: хромовое покрытие, макробалльность, прижоги.

The paper describes the possibility of chromium plate production on titanium alloys parts with macro graininess after surface modification. Methods of identifying and partial eliminating of thermal damage, contamination protection are developed.

Keywords: chromium plate, macro grade, thermal damage.

Введение

Детали из титановых сплавов широко применяются в авиационной технике. При сравнимой прочности они гораздо легче стальных, однако уступают стальным деталям по износостойкости. Для повышения износостойкости и поверхностной твердости авиационных деталей из титановых сплавов проводят их хромирование или никелирование. Электроосаждение хрома на титановые сплавы сопряжено со значительными трудностями. Одной из них является невозможность нанесения хромового покрытия на детали с макробалльностью, по разным источникам, выше 7 баллов и выше 5 баллов. Все это относится и к никелевым покрытиям. В настоящее время приобретаемый (особенно на биржах) сортамент часто имеет макробалльность выше 6 баллов. При проведении обычных механических испытаний на твердость и временное сопротивление разрыву различий между материалом с высокой и низкой макробалльностью нет, и материал с высокой макробалльностью попадает в производство для изготовления титановых деталей с хромовыми и никелевыми покрытиями. Обнаруживается отклонение по макробалльности, как правило,

лишь после отслоения покрытия, т. е. после проведения череды дорогостоящих и длительных операций. Поскольку структура формируется на стадии проката и отклонения по балльности являются следствием нарушения его режимов, то и исправлять структуру необходимо при той же или большей температуре, а это не менее 1300 °С. Печи с такой температурой есть не везде, и при исправлении структуры "уходят" размеры.

Другой трудностью является образование прижогов после механической обработки. Титановые сплавы чувствительны к нарушениям режимов механической обработки, и при малейшем отклонении от оптимальных значений скорости вращения детали или подачи инструмента образуются прижоги. Причем они образуются не только при шлифовании, но и при других видах механической обработки. Прижоги не всегда заметны визуально, а хромовое и никелевое покрытия на места прижогов не ложатся.

Кроме указанного выше на хромирование деталей из титановых сплавов влияют загрязнения, не удаленные до термической обработки (диффузионного отжига). Загрязнения при нагреве до 740 °С изменяют химический состав поверхностного слоя металла, и покрытия на места загрязнений не ложатся.

В работе описаны результаты исследований по хромированию деталей из титановых сплавов.

Подготовка поверхности деталей перед нанесением хромового покрытия

Определяющим фактором при нанесении гальванических покрытий на детали из титановых сплавов является подготовка поверхности. Как отмечалось выше, имеются три фактора, оказывающих существенное влияние на получение качественного хромового покрытия: наличие загрязнений при предварительной термообработке, прижогов, макроструктуры с зерном более 5...7 баллов. Рассмотрим решение этих проблем.

Загрязнения поверхности проявляются после термической обработки (термодиффузионного отжига) в виде темных пятен (рис. 1).

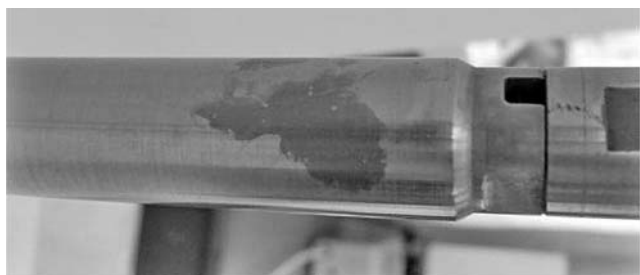


Рис. 1. Шток с загрязнением поверхности

Для обеспечения защиты от загрязнений в технологический процесс необходимо вводить операцию обезжиривания детали после механической обработки и ее упаковку в полиэтиленовые мешочки перед передачей на термодиффузионный отжиг. В случае такого проявления загрязнений возможно его устранение полированием в пределах допуска на размер.

Определение и устранение прижогов. Не допустить прижоги на деталях из титановых сплавов возможно только при неукоснительном соблюдении оптимальных режимов механической обработки.

Прижоги на деталях из титановых сплавов образуются при механической обработке, в основном при шлифовании, вследствие локального разогрева поверхности в зоне контакта с инструментом в присутствии кислорода. Таким образом, прижог можно рассматривать как локальную закалку материала или насыщение поверхности кислородом. Склонность к прижогам у титана весьма велика вследствие его низкой теплопроводности, высокой химической активности при повышенной температуре и способности образовывать с кислородом твердые растворы.

Прижог характеризуется: фазово-структурным изменением исходного состояния материала, морфологией (формой) дефектных участков и глубиной распространения. Прижоги резко снижают характеристики сопротивления повторным и знакопеременным нагрузкам.

После любой механической обработки, а также перед термической или гальванической обработкой необходимо проводить контроль на прижоги.

Для обнаружения прижогов применяются:

- визуальный осмотр поверхности;
- дефектоскопическое травление поверхности травильным раствором;
- анализ микроструктуры поверхностного слоя, в спорных случаях выборочно.

Порядок проведения контроля для выявления прижогов:

- обезжиривание детали;
- травление;
- промывка деталей;
- сушка;
- контроль.

В процессе проведения контроля не разрешается брать руками детали за места, подвергаемые контролю.

Прижоги проявляются:

на поверхности в виде отдельных штрихов, групп штрихов, полос с интерференционной окраской от серого и соломенного до коричнево-оранжевого цвета;

на поверхности после дефектоскопического травления в виде участков соответствующей морфологии белого и темно-серого цветов.

Из опыта работы с титановыми сплавами, следует, что хром не ложится на места, отмеченные на фотографиях деталей как прижоги или подозрения на прижоги.



Рис. 2. Деталь с прижогам после травления

Характеристики прижогов

Характеристика прижога	Тип I (низкотемпературный)		Тип II (высокотемпературный)
Цвет поверхности пленки	Темно-серый		От соломенного до коричнево-оранжевого
Морфология	Отдельные штрихи	Группы штрихов, полосы	Группы штрихов, полосы, пятна
Проявление на травленной поверхности	Серовато-белые участки по форме прижога		Белые участки по форме прижога
Строение	Две зоны: <ul style="list-style-type: none"> • поверхностных пленок (оксидных); • измененной β-фазы 		Три зоны: <ul style="list-style-type: none"> • поверхностных пленок (нитридных, оксидных); • так называемой "белой зоны", которая может быть представлена α-твердым раствором; α-фазой; α'-фазой; глубина зоны 10...20 мкм; • измененной β-фазы; глубина зоны 50...100 мкм. Минимальное значение глубины зоны относится к прижогу в форме групп штрихов, максимальное — к прижогу в форме полос, пятен
Общая глубина дефектного слоя, мкм	До 10	До 20...50	60...120
Наличие трещин в зоне прижога	Трещин в зоне прижога не образуется		Может сопровождаться образованием трещин; зоной зарождения является "белая зона"
Сопrotивление усталости плоских образцов	Снижается на 20 %	Снижается на 50...60 %	Снижается на 70...90 %
Заключение о дефекте	Дефект может быть устранен при удалении слоя дву- и однократной глубины при обработке соответственно методами чистового шлифования или методом гидропескоструйной обработки		Детали должны быть отнесены к окончательному браку. Для восстановления прочностных характеристик сплава до уровня исходных требуется удаление слоя шести-семикратной глубины альфированного слоя с включениями

В таблице приведены характеристики прижогов. На рис. 2 показана деталь с прижогами после травления.

Модификация поверхности деталей для исправления макроструктуры. Есть выход и из ситуации, связанной с высокой макробалльностью. Это модификация поверхности детали для получения равномерного осажденного герметичного хромового покрытия на изделиях из титановых сплавов (BT3-1, OT4, OT4-1, BT5-1, BT5Л, BT6 (BT6C), BT9, BT22, BT23).

Исследования проводили на забракованных штоках из BT6C.

Измеряли толщину покрытия, размер макрозерна у края поверхности и в сердцевине четырех образцов штоков из титанового сплава BT6C с маркировками № 1...4.

Съемку макроструктуры исследуемых образцов проводили с помощью цифрового фотоаппарата Canon. Макроразмер зерна оценивали по ГОСТ 26492—85 "Прутки канатные из титана и титановых сплавов. Технические условия". Получены следующие размеры макрозерна:

образец № 1 — 5 баллов; № 2 (сечения 1...3) — 6 баллов в сердцевине, к поверхности уменьшается и составляет 4 балла (рис. 3) в приповерхностном слое толщиной от 20 до 60 мкм в зависимости от способа модификации поверхности; № 3 — 6, 7 баллов; № 4 — 5 баллов.

Анализ представленных данных показывает следующее.

Введение в технологию дополнительной операции механического упрочнения (образец № 2) перед первым диффузионным отжигом позволило уменьшить макробалльность поверхности до 4 баллов и получить качественное хромовое по-

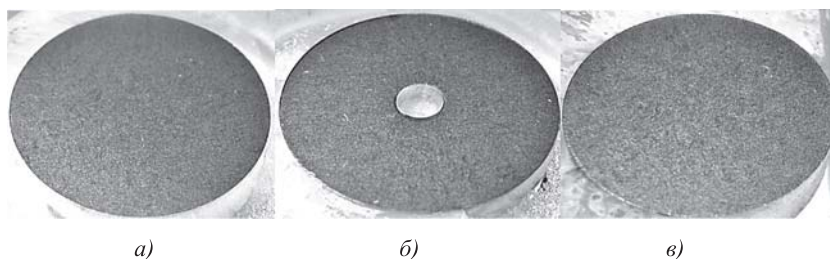


Рис. 3. Макробалльность зерна (образец № 2):

а — 10 мм от торца (сечение 1); б — центр (сечение 2); в — 10 мм от края (сечение 3)

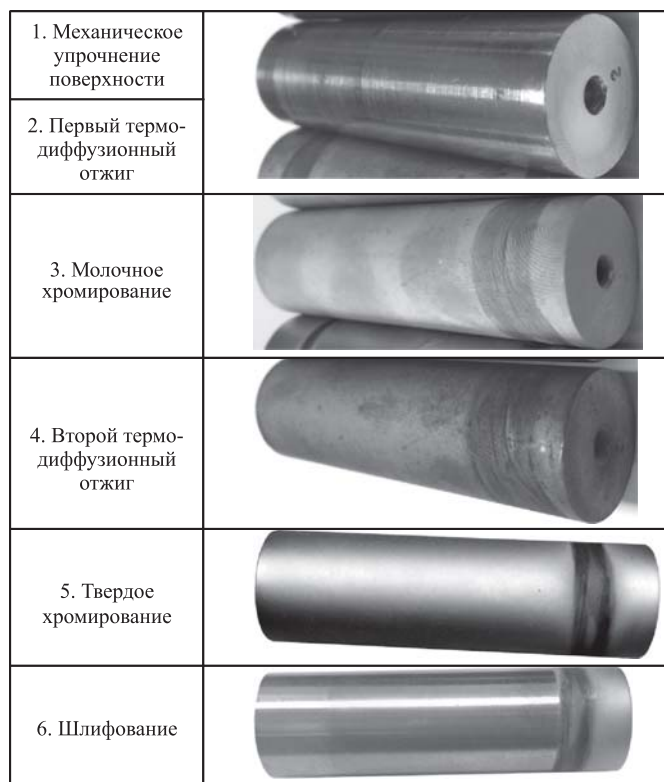


Рис. 4. Образец № 2 в процессе проведения операций по нанесению хромового покрытия

крытие на образце, имеющем макробалльность 6...7 баллов. Внешний вид образца № 2 в процессе проведения операций по нанесению хромового покрытия показан на рис. 4.

Термодиффузионный отжиг не уменьшает размер зерна. Измельчение зерна на поверхности образца № 2 (макробалльность до 4 баллов) произошло в результате механического упрочнения поверхности.

Процесс нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов

Хромирование деталей из титановых сплавов проводится в целях повышения их износостойкости и поверхностной твердости.

Технологический процесс хромирования деталей из титановых сплавов состоит в нанесении комбинированного двухслойного покрытия хром молочный — хром твердый с промежуточным термодиффузионным вакуумным отжигом, повышающим прочность сцепления покрытия с основой. Обязательными операциями технологии хромирования деталей из титановых сплавов являются шлифование твердого хромового покрытия, позволяющее контролировать прочность сцепления покрытия с поверхностью деталей, и

предварительное упрочнение поверхности перед первым термодиффузионным отжигом.

Твердое хромирование можно проводить в стандартном серноокислом электролите.

Технологический процесс нанесения хромового покрытия состоит из следующих стадий:

- контроль на прижоги;
- упрочнение (модификация) поверхности;
- обезжиривание;
- первый термодиффузионный отжиг в вакуумной печи;
- пескоструйная обработка поверхности;
- гидридная обработка поверхности;
- молочное хромирование;
- обезжиривание;
- второй термодиффузионный отжиг в вакуумной печи;
- пескоструйная обработка поверхности;
- электрохимическая активация;
- твердое хромирование;
- шлифование твердого хромового покрытия.

В отличие от требований к деталям с покрытиями из традиционных сплавов, сталей и алюминиевых сплавов процесс изготовления деталей из титановых сплавов с хромированием требует повышенного внимания к соблюдению требований инструкции, более высокой культуры производства и более тщательного контроля ОТК по следующим причинам:

процесс более чувствителен к нарушениям и отклонениям от установленных технологических режимов;

в случае нарушения покрытия в процессе эксплуатации работоспособность узла трения значительно снизится из-за пониженных антифрикционных свойств титановых сплавов.

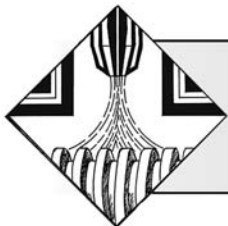
Заключение

1. Модификация поверхности деталей из титановых сплавов путем изменения механической обработки макробалльности поверхностного слоя позволяет наносить качественные покрытия на детали со структурой, имеющей макробалльность выше 5 баллов.

2. Представляется возможным использовать для изменения балльности поверхностного слоя обработку ультразвуком, обкатку роликами, шариком, алмазное выглаживание, магнито-импульсную и иную обработку.

3. Разработаны методика определения и частичного устранения прижогов и методы недопущения и удаления загрязнений.

4. Разработана технология нанесения хромового покрытия на детали авиационной техники из титановых сплавов.



УДК 621.793.182:621.7-4 + 621.893

А.И. Беликов, М.А. Данилов, В.В. Петров, Н.С. Седых
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: belikov@bmstu.ru

Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий

Приведены результаты исследования влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий на основе тонких пленок TiC и MoS₂. Оценивается упрочняющий эффект от покрытий TiC на основе дискретных элементов в сравнении со сплошным слоем, а также для случая двухкомпонентных композиций эффект от применения в составе покрытия MoS₂.

Ключевые слова: антифрикционные покрытия, упрочняющие покрытия, твердосмазочные покрытия, дискретные покрытия, композитные покрытия, магнетронное распыление, трибометрические испытания.

Discrete structure of hardened antifrictional composite coatings based on TiC and MoS₂ thin films on tribological properties influence research results are presented. Hardened effect of TiC coatings as continuous thin films and as discrete elements thin films without and with MoS₂ thin films are compared.

Keywords: antifrictional coatings, hardened coatings, solid lubricant coatings, discrete coatings, composite coatings, magnetron sputtering, tribometrical test.

Введение

Перспективы и развитие вакуумных технологических методов осаждения тонких пленок, которые обеспечивают высокое качество, химическое и структурное совершенство покрытий, в целях повышения трибологических характеристик деталей машин и инструмента связаны с достижением высокого уровня прочностных и антифрикционных свойств разрабатываемых перспективных материалов.

В процессе эксплуатации сплошные тонкопленочные покрытия разрушаются в результате растрескивания, адгезионного отслаивания, активизации трибохимических процессов. Это влечет необходимость разработки новых покрытий, в основе создания которых лежат представления о контактном взаимодействии покрытия в сопряжении с учетом воздействия окружающей среды [1, 2].

Одним из путей повышения износостойкости в условиях контактного взаимодействия является

применение регулярных микрорельефов и дискретных покрытий [3, 4].

Для улучшения антифрикционных характеристик современных твердых износостойких материалов используют различные решения, реализующие добавление в структуру композита твердосмазочных слоистых материалов типа дисульфидов и диселенидов тугоплавких металлов [5, 6]. В этом направлении перспективным представляется вариант композитной структуры, сочетающий дискретно-планарную структуру износостойкой составляющей покрытия и фрагменты твердосмазочного покрытия, заполняющие такую твердую матрицу.

Синергетический эффект от применения дискретно-планарной структуры в композитном покрытии на основе твердой износостойкой составляющей и твердосмазочного антифрикционного материала ожидается вследствие одновременного влияния топологии структуры на трибологические процессы, протекающие как в износостой-

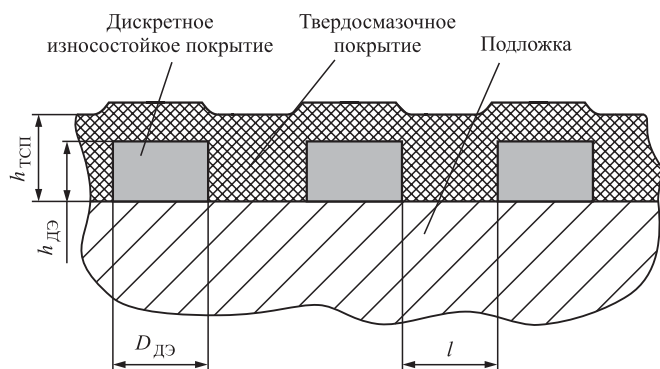


Рис. 1. Структура дискретно-планарного тонкопленочного покрытия:

$D_{дэ}$ и $h_{дэ}$ — размер и толщина дискретного элемента износостойкого покрытия; l — расстояние между дискретными элементами; $h_{тсп}$ — толщина твердосмазочного покрытия

ком, так и в твердосмазочном слоях, заключающиеся в следующем:

блокирование процессов трещинообразования на границах дискретных элементов износостойкого слоя покрытия;

снижение технологических и эксплуатационных внутренних напряжений в слое износостойкого покрытия вследствие релаксации размерных элементов износостойкого покрытия;

формирование на основе дискретно-планарной структуры искусственного регулярного рельефа, обеспечивающего удержание в углублениях подверженного абразивному износу твердосмазочного материала антифрикционной составляющей покрытия;

повышение уровня предельных внутренних напряжений сжатия в твердосмазочном покрытии, при котором возникают процесс блистеринга и разрушение вследствие слабых связей между атомными слоями ламелярной структуры MoS_2 -подобных материалов, за счет уменьшения размеров элементов твердосмазочного слоя.

Сечение покрытия дискретно-планарной структуры представлено на рис. 1.

Цель работы — проведение сравнительных испытаний и исследование трибологических характеристик сплошных покрытий и покрытий дискретно-планарной композитной структуры на основе тонких пленок TiC и MoS_2 .

Технология изготовления образцов

Формирование слоев композитных покрытий. Для достижения поставленной цели по разработанному плану экспериментов было решено подготовить образцы двухслойных покрытий с изно-

состойким подслоем и нанесенным на него слоем твердосмазочного покрытия и покрытия дискретно-планарной структуры, которые бы отличались от первого варианта только наличием дискретной структуры износостойкого слоя покрытия и при этом имели бы те же толщины слоев.

В качестве подложек образцов в исследованиях использовали пластинки из стали 08X18H10T размером 20×20 мм и толщиной 1,5 мм. Предварительная подготовка образцов включала механическую полировку до достижения значения параметра шероховатости $Ra = 0,2$ мкм, обработку в ультразвуковой ванне, обезжиривание и сушку спиртовым раствором.

Нанесение износостойкого покрытия TiC осуществляли методом электродугового осаждения в атмосфере ацетилена на установке PLATIT P80. Предварительно образцы очищали с использованием тлеющего разряда. В качестве мишени применяли цилиндрический титановый катод диаметром 80 мм и длиной $L = 300$ мм. В процессе формирования покрытий подложки нагревали до 450 К.

Твердосмазочное покрытие формировали методом магнетронного распыления прессованной мишени из MoS_2 на вакуумной технологической установке кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рабочую камеру установки откачивали до остаточного давления 10^{-3} Па. Покрытия наносили при давлении аргона 10^{-1} Па. Перед нанесением покрытий поверхность образцов обрабатывали с помощью автономного источника ионов с холодным катодом типа "Радикал".

Формирование дискретных элементов покрытий. Дискретное покрытие (рис. 2) характеризуется следующими параметрами:

формой и размерами дискретных элементов покрытия. Для приведенной на рис. 2 структуры из круглых элементов — диаметр дискретного элемента $D_{дэ}$. Толщина дискретного элемента $h_{дэ}$;

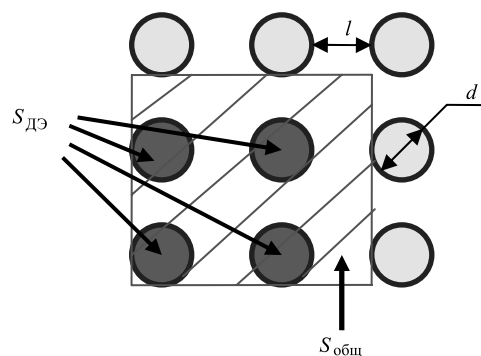


Рис. 2. Схема топологии дискретного покрытия

шагом сетки элементов, или расстоянием между дискретными элементами, l . В рассматриваемом случае шаг одинаков по обеим координатам;

сплошностью дискретного покрытия, оцениваемой как доля дискретных элементов на поверхности Ψ , равная отношению площади, занимаемой дискретными элементами, $S_{\text{дис}}$ к общей площади $S_{\text{общ}}$ поверхности, т. е. $\Psi = (S_{\text{дис}}/S_{\text{общ}}) \cdot 100 \%$.

Базовые параметры топологии дискретного покрытия определяли с учетом оптимальных параметров, необходимых для достижения максимальной износостойкости, сплошности, формы и размеров элементов дискретных покрытий, полученных авторами работ [3, 4]. Для уточнения базовых параметров использовали также результаты работ [7–9], в которых изучалось влияние топологии искусственных регулярных рельефов на удержание твердосмазочного материала на поверхности трения и повышение износостойкости твердосмазочных тонкопленочных покрытий.

В представляемой серии экспериментальных исследований дискретные элементы износостойкого покрытия формировали путем нанесения покрытия через металлическую маску с отверстиями, контактно прижатую к поверхности образца [10]. В результате под выбранные параметры топологии была подобрана маска с диаметром отверстий 1200 мкм и расстоянием между отверстиями 250 мкм для формирования покрытия со сплошностью $\Psi = 52 \%$. Внешний вид нанесенного через маску дискретно-планарного покрытия представлен на рис. 3. Фактические размеры дискретных элементов $D_{\text{ДЭ}}$ полученного износостойкого покрытия находились в диапазоне значений 1250...1400 мкм, а расстояния l между ними изменялись в диапазоне 270...310 мкм, толщина покрытия h_{TiC} составляла 2,2 мкм.

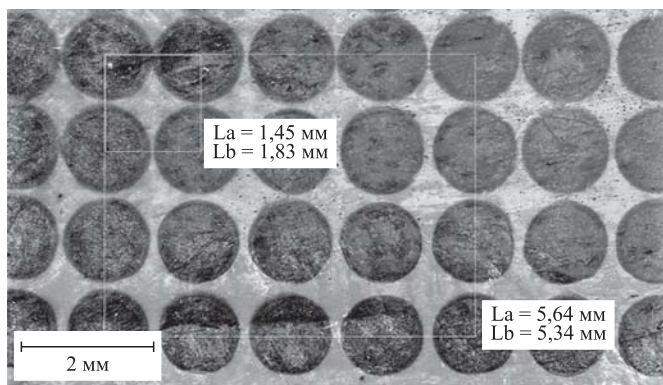


Рис. 3. Дискретное износостойкое покрытие TiC на подложке из стали 08X18H10T (SEM MIRA 3 TESCAN; HV:5kV, X:43):

La, Lb — размеры оцениваемой области

Подготовка серии экспериментальных образцов.

На завершающем этапе подготовки экспериментальных образцов наносили слой твердосмазочного покрытия, толщину которого для варианта дискретно-планарного композитного покрытия определяли исходя из условия заполнения пустот между элементами дискретного покрытия TiC по формуле $h_{\text{MoS}_2} \geq (1 - \Psi)h_{\text{TiC}}$.

В соответствии с планом эксперимента были подготовлены образцы с различными вариантами покрытий:

1. Отдельные сплошные покрытия TiC и MoS₂ с толщинами, используемыми в композитных покрытиях.
2. Дискретное покрытие TiC.
3. Двухслойные покрытия TiC + MoS₂ с одинаковой толщиной слоя TiC h_{TiC} и различными толщинами слоя MoS₂ h_{MoS_2} .
4. Дискретно-планарные покрытия TiC (дискретное) + MoS₂ с одинаковой толщиной и топологией дискретных элементов слоя TiC и различными толщинами слоя MoS₂.

Технологически покрытия на образцах формировали таким образом, чтобы на всех сопоставляемых образцах одинаковые функциональные слои были получены в одном цикле осаждения. По плану эксперимента были определены расчетные толщины слоев покрытий, представленные в табл. 1. В результате проведения экспериментов были получены покрытия с фактическими толщинами, отличающимися от расчетных (табл. 1).

Фактическую толщину полученных покрытий измеряли по методу шарового истирания (калотест) (ISO EN-1071-2, ASTM D4138-07a (2013)) на толщиномере CalotestCompact (CSM Instruments SA). Перед измерениями осуществляли подготовку образцов с использованием стального шара диаметром 50 мм при скорости вращения вала калотестера 500 мин⁻¹. Внешний

Таблица 1

Толщина покрытий образцов

Тип покрытия	Толщина покрытия, мкм	
	Расчетная	Измеренная
Износостойкое, TiC	2	2,2
Антифрикционное, MoS ₂	0,5	0,4
	1,0	1,1
	1,5	1,7
	2	2,1

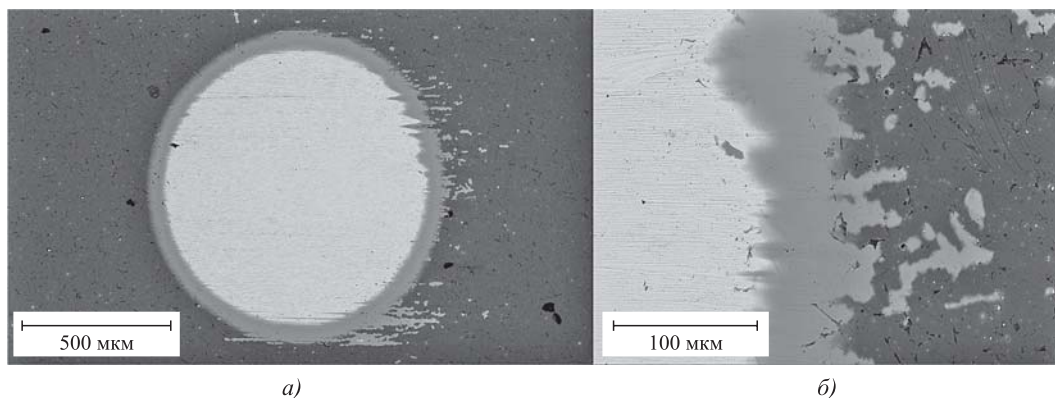


Рис. 4. Отпечаток сферы (а) и увеличенная граница отпечатка (б) на поверхности образца из стали 08X18H10T со сплошным покрытием TiC толщиной 2,2 мкм (SEM MIRA 3 TESCAN; HV:20kV, X:219)

вид отпечатка сферы, полученного на сплошном покрытии TiC, приведен на рис. 4.

Исследование трибологических характеристик покрытий

Трибометрические испытания подготовленных образцов проводили на трибометре TRB-S-CE (CSM Instruments SA) по методу "шар—плоскость" с линейным возвратно-поступательным перемещением образца относительно неподвижного индентора, в качестве которого выступал шар диаметром 6 мм из WC. Использовали следующие режимы испытаний:

прикладываемая нагрузка — 1; 5 Н;
ход (амплитуда перемещений) — 8 мм;

скорость перемещения образца относительно индентора — 5; 10 см/с;

длина пробега (путь трения) — 500; 1500 м.

В процессе измерения коэффициент трения фиксировали в виде зависимости от пути трения (в метрах). График изменения коэффициента трения в зависимости от пути трения для образца с двухслойным покрытием TiC/MoS₂ представлен на рис. 5. По окончании трибологического испытания для каждого образца определяли начальное, среднее, конечное и максимальное значения коэффициента трения. Результаты для всех образцов представлены в табл. 3.

Износостойкость образцов определяли по объему потерянного во время трибометрических испытаний материала. Объемный износ образцов

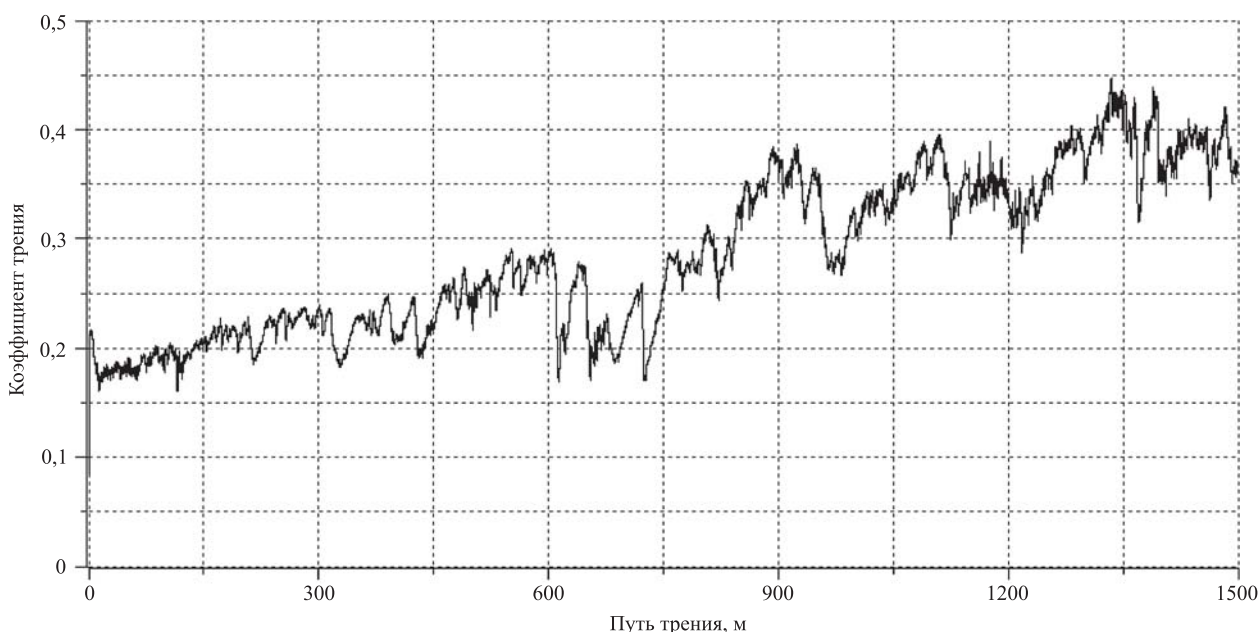


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от пути для образца с покрытием TiC/MoS₂ ($h_{\text{TiC}} = 2,2$ мкм; $h_{\text{MoS}_2} = 2,1$ мкм) в паре с контртелом — шаром из WC

Таблица 2

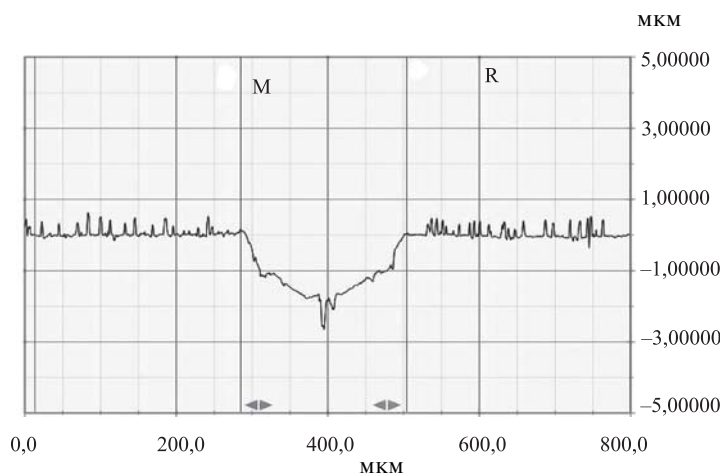


Рис. 6. Характерный вид поперечного профиля дорожки износа на образце с покрытием TiC/MoS₂ ($h_{TiC} = 2,2$ мкм; $h_{MoS_2} = 2,1$ мкм) после испытания на трение в паре с контртелом — шаром из WC диаметром 6 мм, полученного на профилометре Dektak 150

Структура подготовленных образцов

Номер образца	Износостойкое покрытие TiC	Твердосмазочное покрытие MoS ₂
1	Без покрытия	
2	Сплошное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	—
3	Дискретное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	—
4	Сплошное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	$h_{MoS_2} = 0,4$ мкм
5	Сплошное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	$h_{MoS_2} = 1,1$ мкм
6	Сплошное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	$h_{MoS_2} = 1,7$ мкм
7	Сплошное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	$h_{MoS_2} = 2,1$ мкм
8	Дискретное, $h_{TiC} = 2,2$ мкм	$h_{MoS_2} = 2,1$ мкм

Таблица 3

Измеренные в ходе трибометрических испытаний значения износа и коэффициента трения покрытий

Номер испытания	Номер образца	Покрытие, толщина	Режим испытаний: нагрузка, Н/ скорость, см/с	Глубина износа, мкм	Интенсивность изнашивания, мм ³ /(Н·м)	Коэффициент трения			
						Начальный μ_n	Максимальный μ_{max}	Средний μ_{cp}	Конечный μ_k
1	1	Подложка без покрытия	1/10	20	$4,6 \cdot 10^{-5}$	0,74	0,94	0,78	0,73
2	2	Сплошное TiC, 2,2 мкм	1/5	0,93	$9,8 \cdot 10^{-7}$	0,15	0,28	0,18	0,17
3	3	Дискретное TiC, 2,2 мкм	1/10	0,7	$4,6 \cdot 10^{-7}$	0,2	0,29	0,24	0,2
4	4	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 0,4 мкм	1/10	1,1	$4,2 \cdot 10^{-7}$	0,14	0,29	0,20	0,17
5	5	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 1,1 мкм	1/5	2,44	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,11	0,37	0,28	0,37
6	5	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 1,1 мкм	5/5	9,68	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,08	0,64	0,25	0,29
7	6	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 1,7 мкм	1/10	0,88	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0,09	0,35	0,26	0,30
8	7	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 2,1 мкм	1/10	0,61	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,18	0,45	0,29	0,36
9	8	Дискретное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 2,1 мкм	1/10	0,54	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0,14	0,26	0,18	0,22
10	7	Сплошное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 2,1 мкм	5/10	4,47	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,13	0,31	0,19	0,23
11	8	Дискретное TiC, 2,2 мкм / MoS ₂ , 2,1 мкм	5/10	4,38	$6,9 \cdot 10^{-7}$	0,10	0,16	0,11	0,15

определяли с использованием среднего значения площади сечения дорожки износа, которую рассчитывали на основании результатов измерения 5 поперечных профилей дорожки износа, полученных с помощью профилометра Dektak 150 (Veeco Instruments Inc.) (рис. 6). Объемную интенсивность изнашивания определяли исходя из рассчитанного объемного износа с учетом приложенной нагрузки и пройденного пути трения.

Для оценки износостойкости покрытий трибометрические испытания образцов проводили при нагрузке 1 Н, пути трения 500 м и разных скоростях скольжения. Режим полного изнашивания покрытий обеспечивался при нагрузке 5 Н на пути трения 1500 м. Сводные результаты экспериментов с указанием используемых образцов (табл. 2) и режимов их испытаний приведены в табл. 3.

Заключение

На основании полученных результатов исследований можно отметить следующее:

1. Применяемое на подложках упрочняющее покрытие TiC обеспечивало повышение износостойкости поверхности примерно в 46 раз. При этом дискретное покрытие TiC продемонстрировало в сравнении со сплошным покрытием TiC более чем двукратное увеличение износостойкости (образцы № 2 и 3 в табл. 3).

2. Для дискретного покрытия TiC в сравнении со сплошным покрытием TiC в экспериментах наблюдалось некоторое увеличение (примерно на 30 %) коэффициента трения скольжения, что, возможно, может быть связано с увеличением деформационной составляющей трения при прохождении индентора по дискретным элементам покрытия.

3. Использование твердосмазочного покрытия — дисульфида молибдена на поверхности покрытия карбида титана обеспечивает дополнительное повышение износостойкости в зависимости от толщины нанесенного покрытия дисульфида молибдена в 2...4 раза (испытания № 4, 5, 7 в табл. 3).

4. Для композитного покрытия на основе дискретных элементов TiC и нанесенного сверху покрытия MoS₂ толщиной 2,1 мкм в сравнении с двухслойным покрытием TiC/MoS₂ с такими же толщинами слоев наблюдалось увеличение на 40 % износостойкости, которое возросло до

примерно 220 % при увеличении нагрузки на индентор с 1 до 5 Н (испытания № 8...11 в табл. 3).

5. Для дискретных композитных покрытий с MoS₂ в сравнении со сплошными покрытиями также наблюдалось некоторое снижение коэффициента трения, примерно на 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бледнова Ж.М.** Управление долговечностью материалов путем нанесения на поверхность самоорганизующихся покрытий с памятью формы // Сб. тр. 5-го Междунар. междисциплинар. симпозиума "Прикладная синергетика в нанотехнологиях", 17–20 ноября 2008 г. М., 2008. С. 78–82.

2. **Сорока Е.Б.** Обеспечение устойчивости PVD покрытий созданием дискретной топографии с задаваемыми параметрами // Сверхтвердые материалы. 2009. № 5. С. 82–89.

3. **Определение** параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений / Б.А. Ляшенко, Е.Б. Сорока, А.В. Рутковский, Н.В. Липинская // Проблемы прочности. 2002. № 4. С. 119–125.

4. **Сорока Е.Б.** PVD-покрытия дискретного типа на режущем инструменте // Металлообработка. 2010. № 2. С. 26–29.

5. **Беликов А.И., Седых Н.С.** Вакуумные технологии формирования дискретных упрочняющих покрытий на основе регулярного микрорельефа // Высокие технологии в промышленности России: Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. М., 2007. С. 300–303.

6. **Панфилов Ю.В., Беликов А.И.** Антифрикционные тонкопленочные покрытия на основе дисульфида молибдена // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 3. С. 9–14.

7. **Беликов А.И.** Повышение вакуумных и фрикционных характеристик механизмов с твердосмазочным покрытием на основе дисульфида молибдена для вакуумного технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. М., 1998. 203 с.

8. **Исупов М.Г.** Разработка и исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2006. 366 с.

9. **Беликов А.И., Петров В.В.** Комбинированные композитные покрытия триботехнического назначения, формируемые методами вакуумного осаждения и лазерной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 4. С. 81–89.

10. **Исследование** антифрикционных упрочняющих нанокompозитных покрытий на основе планарных структур, формируемых методами магнетронного осаждения и размерной обработки тонких пленок / А.И. Беликов, В.В. Петров, Н.С. Седых, М.А. Шарипов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 4. С. 81–89.

В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, И.В. Ворначева, И.А. Макарова, Е.А. Филатов
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)
E-mail: gadalov-vn@yandex.ru

Исследование субструктуры и свойств спеченного титанового сплава с электрофизическим покрытием, подвергнутом выглаживанию минералокерамикой

Представлены результаты исследования нанесения электроакустических покрытий на спеченный титановый сплав ВТ23. Проанализированы изменения структурных микроискажений при поверхностном пластическом деформировании. Проведено рентгенографическое изучение формирования субструктурных характеристик до и после выглаживания.

Ключевые слова: спеченный титановый сплав, электроакустическое покрытие, минералокерамика.

The paper presents the results of a study of the application of the electro-acoustic coating on the sintered titanium alloy ВТ23. Analyzed the structural changes of microscopic strains in surface plastic deformation. Radiographic studying of the formation substructure characteristics before and after smoothing is carried out.

Keywords: sintered titanium alloy, electro-acoustic coating, mineral ceramic.

В работе представлены результаты рентгенографического исследования и микротвердости композиционного порошкового $\alpha + \beta$ -титанового сплава с электроакустическими покрытиями после выглаживания минералокерамикой.

Образцы из порошкового титанового сплава типа ВТ23 с электроакустическими покрытиями [1, 2] подвергали поверхностному пластическому деформированию (ППД) — выглаживанию минералокерамикой ВОК-60 [3–7]. Деформируемый сплав ВТ23 относится к системе Ti—Al—V—Mo—Fe. Это среднелегированный $\alpha + \beta$ -сплав мартенситного класса с большим количеством β -фазы (в отожженном состоянии ~ 30 %). Сплав обладает высокой технологической пластичностью и хорошо сваривается.

Порошковый титановый сплав Ti₆Al₅V₂MoCrFe, близкий по составу к ВТ23, получали по следующей технологической схеме: засыпка в пресс-формы, прессование, укладка усадки, спекание при соответствующих температурах в вакууме, охлаждение по заданному режиму и дополнительная термическая обработка (ТО).

Объектом исследования служили образцы типа втулка из спеченного $\alpha + \beta$ -сплава, имеющего химический состав, идентичный составу деформируемого сплава ВТ23 [8].

Прессование соответствующих композиций порошков осуществляли при давлении 1250 МПа. После прессования полученный брикет (втулку) подвергали спеканию в вакуумной печи с оста-

точным давлением в камере $\leq 0,133$ МПа при температуре 1300...1350 °С. Время спекания составляло 3...5 ч; нагрев и охлаждение брикета с печью происходили со скоростью 0,1...0,2 °С/с. Полученный по данному режиму спеченный сплав, по композиции элементов соответствующий деформированному сплаву ВТ23, имеет предел прочности 500...600 МПа; относительное удлинение 2...7 %; ударную вязкость $\leq 40...50$ кДж/м²; твердость по Роквеллу 51...63 НRC 150. Остаточная деформация, измеренная гидростатическим методом, составляла 2...5 %.

Для электроакустического нанесения покрытий на установке ЭЛАН-3 использовали самофлюсующиеся порошки типа ПГ-СР [9], частично легированные добавками карбидов и боридов размером $10^{-6}...10^{-7}$ м, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом [10].

На различных этапах создания композиционного материала (получение порошкового титанового сплава, нанесение электроакустического покрытия плюс выглаживание) проводили рентгенографическое изучение формирования субструктурных характеристик (развития микроискажений кристаллической решетки, дробления блоков мозаики) как на поверхностном слое покрытия до и после выглаживания, так и по мере удаления от поверхности (по глубине).

Для рентгенографического изучения субструктуры спеченных титановых образцов с электроакустическими покрытиями до и после выгла-

живания проводили их послойное химическое травление в электролите следующего состава: азотная кислота — 25...27 %; плавиковая кислота — 2...3 %; остальное — дистиллированная вода. После травления каждого слоя со скоростью 2...3 мкм/мин проводили полное рентгенографическое изучение истинного физического уширения рентгеновских интерференционных линий двух порядков с выделением эффектов второго рода. Для оценки размеров блоков и величин микроискажений выбрали аппроксимирующие функции профиля и интерференционных линий, позволяющие проводить количественные расчеты.

Электроакустическое напыление покрытий (ЭЛАНП) осуществляли на установке ЭЛАН-3 на оптимизированном режиме, обеспечивающем максимальную эрозию электрода и удовлетворительную шероховатость поверхности покрытия. Однако качество поверхности ответственных деталей и инструмента после ЭЛАНП часто не соответствует техническим условиям (ТУ).

Так, параметр шероховатости после ЭЛАНП Ra составляет 4...6 мкм, а с помощью выглаживания достигается необходимое значение $Ra = 0,2...0,6$ мкм.

Операцию выглаживания осуществляли на токарно-винторезном станке 1К62 с помощью пружинного устройства (рис. 1). Устройство состоит из корпуса 1, в котором установлены ползун 2 с выглаживателем 3, пружина 4, создающая силу выглаживания, и шток 5 с указателями 6. Сила выглаживания регулируется винтом 7, сжимающим или разжимающим пружину 4 через шток 5. Указатели 6 служат для установки требуемого значения силы выглаживания относительно шкал, выполненных вдоль пазов, имеющих в корпусе 1. Сила выглаживания регулируется в пределах 10...500 Н.

В качестве инструмента применяли выглаживатели из минералокерамики ВОК-60 и ВОК-70, которые относятся к классу оксидно-карбидной режущей керамики состава, % ат.: Al_2O_3 — 76; TiC — 20; (WCo)C — 3...5; Mg < 1. Выглаживатель из минералокерамики ВОК-60 квадратного сечения размером 2×2 мм и длиной до 15...20 мм с радиусом рабочей поверхности 4,5...6,5 мм закрепляли с помощью винта 8 в рабочую часть державки (ползун 2 на рис. 1). Для стабилизации упругих свойств державки ползун изготавливали из закаленной стали У7 твердостью 44...46 HRC.

Диапазоны условий обработки для выглаживания минералокерамикой: сила выглаживания P_H —

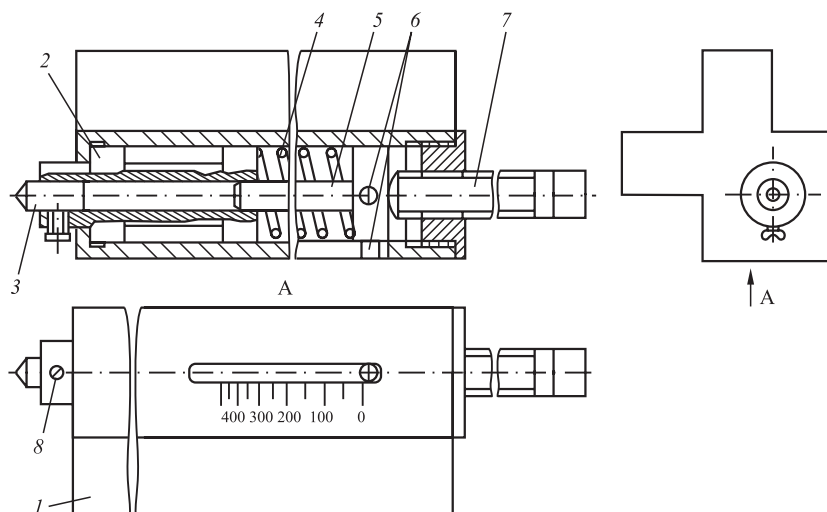


Рис. 1. Устройство для выглаживания цилиндрических, конических и торцевых поверхностей на станках токарной группы

290...510 Н; подача S — 0,06...0,15 мм/об; частота вращения шпинделя станка n — 300...600 мин⁻¹.

Оценку эффектов второго рода проводили методом рентгенографического анализа уширений рентгеновских интерференционных линий (102) и (204), зарегистрированных на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М.

С помощью выбора аппроксимирующих функций профилей и зарегистрированных интерференционных линий получены следующие формулы, позволяющие оценить размер кристаллических блоков мозаики B и величину микроискажений кристаллической решетки ε :

$$D^2 = \frac{\lambda^2 (\sin^2 \theta_{h_2 k_2 l_2} - \sin^2 \theta_{h_1 k_1 l_1})}{\beta_1^2 \sin^2 \theta_{h_2 k_2 l_2} \cos^2 \theta_{h_1 k_1 l_1} - \beta_2^2 \sin^2 \theta_{h_1 k_1 l_1} \cos^2 \theta_{h_2 k_2 l_2}};$$

$$\varepsilon^2 = \frac{\beta_2^2 \cos^2 \theta_{h_2 k_2 l_2} - \beta_1^2 \cos^2 \theta_{h_1 k_1 l_1}}{16(\sin^2 \theta_{h_2 k_2 l_2} - \sin^2 \theta_{h_1 k_1 l_1})},$$

где λ — длина волны используемого рентгеновского излучения ($\lambda_{CuK\alpha_1} = 1,53 \text{ \AA}$); $\theta_{h_1 k_1 l_1}$, $\theta_{h_2 k_2 l_2}$ — углы Вульфа—Брегга для отражений (102) и (204) соответственно; β_1 , β_2 — истинные физические уширения зарегистрированных интерференционных линий двух порядков.

В таблице приведены результаты рентгенографических оценок размеров кристаллических блоков и микроискажений кристаллической решетки, которые формируются на поверхностном слое титановых образцов с электроакустическими покрытиями до и после выглаживания минералокерамикой ВОК-60.

Видно, что при обработке ППД с различными режимами выглаживания на поверхности элек-

Результаты рентгенографических оценок искажений

Оцениваемый параметр	Электроакустическое покрытие	Сила выглаживания P_n , Н				
		300	350	400	450	500
		48...47	45...46	43...42	37...38	35...32
$\varepsilon \cdot 10^3$	0,7...0,75	0,8...0,95	1,5...1,6	2,1...2,2	2,4...2,5	2,0...2,1

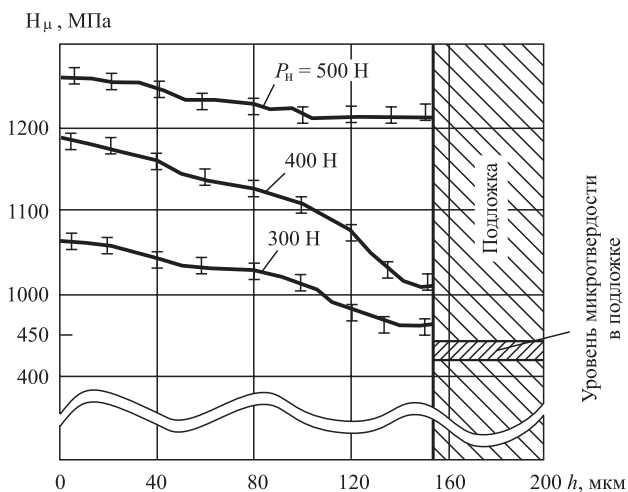


Рис. 2. Изменение микротвердости H_μ при выглаживании спеченного титанового сплава с электроакустическим покрытием по мере удаления от поверхности при разных значениях силы выглаживания: h — расстояние от поверхности

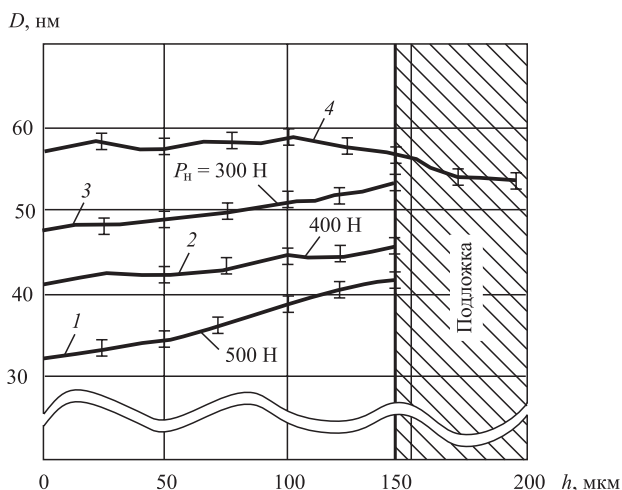


Рис. 3. Изменение размеров кристаллических блоков по глубине h слоя покрытия, подвергнутого выглаживанию (1...3), и композита без выглаживания (4)

троакустического покрытия реализуются мелко-дисперсная блочная структура и развитая микроискаженная субструктура.

При последующем выглаживании образцов из спеченного титанового сплава ВТ23 с электроакустическим покрытием с увеличением силы выглаживания наблюдается дополнительное развитие субструктурных характеристик (раздробление кристаллических блоков и развитие микроискажений кристаллической решетки), что должно привести к повышению прочностных свойств композита. Изложенное подтверждают измерения микротвердости по глубине упрочненной поверхности композита при разных значениях силы выглаживания (рис. 2) — микротвердость возрастает на 30...35 %.

На рис. 3, 4 показан характер изменения субструктурных параметров по мере удаления от поверхностного слоя при выглаживании покрытия.

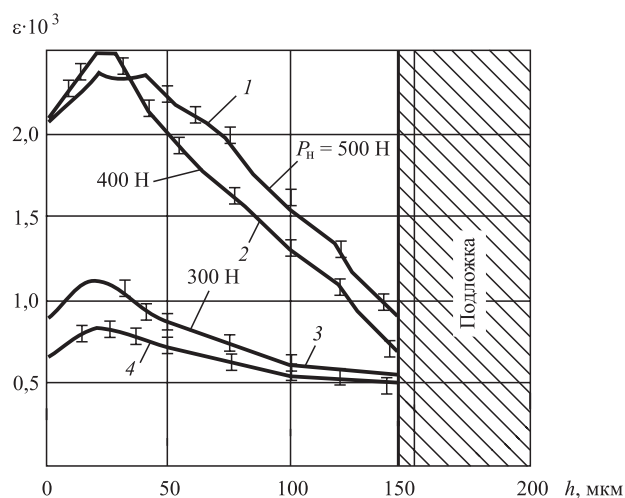


Рис. 4. Изменение микроискажений кристаллической решетки по глубине h слоя покрытия, подвергнутого выглаживанию (1...3), и композита без выглаживания (4)

Кривые 1...3 на рис. 3 показывают, что при выглаживании электроакустического покрытия реализуется более развитая субструктура как в поверхностных слоях покрытия, так и на глубине. Отдельные области субструктуры обнаружены также на границе покрытия и подложки, а также в приповерхностных слоях самой подложки. Таким образом, при выглаживании происходит раздробление кристаллических блоков мозаики как на поверхности покрытия, так и на больших глубинах подповерхностного слоя электроакустического покрытия. Выглаживание самой подложки (спеченный титановый сплав) при нагрузке 500 Н (кривая 4 на рис. 3) также приводит к уменьшению размеров блока по глубине подложки. С уменьшением силы выглаживания до 400 и 300 Н размер блоков B уменьшается до 0,45 и 0,42 соответственно.

На рис. 4 представлены результаты исследования микроискажений кристаллической решетки электроакустического покрытия по его глубине от действия силы выглаживания. Изучение элементов такой кристаллической структуры по мере удаления от поверхностного слоя показало, что глубина распространения микроискажений при ППД (выглаживании) достигает 140...150 мкм, т. е. распространяется на все покрытие. При этом максимальное развитие микроискажений при ППД наблюдается не на поверхности, а в подповерхностном слое с глубиной залегания $h \approx 30...40$ мкм. Несколько заниженные значения микроискажений на выглаженной поверхности, очевидно, обусловлены действием локально выделенного тепла в местах контакта образца и обрабатывающего инструмента (гладилки с выглаживателем).

Выводы

1. Нанесение электроакустических покрытий на спеченный титановый сплав VT23 сопровождается развитием микроискажений и раздроблением кристаллических блоков мозаики по всему покрытию.

2. При ППД структурные микроискажения интенсивно развиваются, достигая максимального значения не на поверхности образцов, а на глубине подповерхностного слоя $\approx 30...40$ мкм.

3. Выглаживание приводит к дальнейшему раздроблению кристаллических блоков мозаики как

на поверхности, так и в самом электроакустическом покрытии, что приводит к дополнительно упрочнению композита, вызванному сильным развитием субструктурных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Применение** электроакустического напыления для упрочнения и восстановления деталей машин / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Д.Н. Романенко и др. // Сварщик. 2008. № 1. С. 26—29.
2. **Металлография** металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Е.В. Агеева, Д.В. Романенко. М.: Инфра-М. 2011. 468 с. (Научная мысль).
3. **Электроискровые** покрытия, подвергнутые выглаживанию минералокерамикой / В.Н. Гадалов, Ю.Г. Алевин, Ю.В. Скрипкина и др. // Технологии машиностроения. 2008. № 11. С. 19—23.
4. **Методика** оценки шероховатости поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой / В.Н. Гадалов, Д.Н. Романенко, В.В. Самойлов и др. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. № 4. С. 44—46.
5. **Инструмент** для отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием / В.Н. Гадалов, Е.В. Чернышева, В.В. Самойлов и др. // Технологии металлов. 2010. № 5. С. 30—34.
6. **Повышение** ресурса работы оснастки и инструмента / В.Н. Гадалов, Д.Н. Романенко, А.В. Николаенко и др. // Технологии машиностроения. 2010. № 12. С. 22—25.
7. **Применение** износостойких минералокерамических и твердосплавных инденторов для повышения надежности и качества деталей / В.Н. Гадалов, А.Е. Гвоздев, Д.Н. Романенко и др. // Вестник машиностроения. 2011. № 6. С. 63—66.
8. **Разработка** и исследование износостойкого порошкового титанового сплава ТЮ7М2Ф2Ц2 / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Н.М. Игнатенко и др. // Известия Юго-Западн. гос. ун-та. 2015. № 3 (16). С. 51—54.
9. **Гадалов В.Н., Филонович А.В., Ворначева И.В.** О методах получения порошковых материалов и быстрозакристаллизованных ультрадисперсных порошков // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 6. С. 31—34.
10. **Использование** самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для повышения эксплуатационных свойств деталей и инструментов / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, С.В. Шестакина и др. // Вестник Курской сельхоз. академии. 2012. Т. 1. № 1. С. 130—133.

С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, Н.А. Пеньков, В.В. Михайлов, О.А. Сидоркин
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Упрочнение контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием

Рассмотрены вопросы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента нанесением композитных хромовых покрытий. Представлены графические зависимости для основных характеристик покрытия, полученные экспериментальным путем. В результате исследования сделан вывод о возможности снижения износа упрочненного инструмента до 20 % и повышения выдерживаемой температуры до 1500 °С.

Ключевые слова: упрочнение, режущий инструмент, композитные хромовые покрытия.

The article is about increasing wear resistance of cutting tool contact surfaces due to the application of composite chrome coatings. Graphical dependences for the main coating characteristics obtained experimentally are presented. As a result, it was concluded that it is possible to reduce the wear of a hardened tool to 20 % and increase max temperature to 1500 °C.

Keywords: hardening, cutting tools, composite chrome coatings.

Введение

Повышение работоспособности режущего инструмента — важнейший резерв для интенсификации процесса резания и повышения эффективности механообрабатывающего производства. Режущий инструмент является особым объектом механической обработки, от которого в первую очередь зависит работоспособность технологической системы в целом. Роль режущего инструмента еще больше возрастает на операциях механической обработки, характеризующихся повышенными теплосиловыми нагрузками, — при высокоскоростном резании, обработке деталей из закаленных, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов. В настоящее время отсутствуют универсальные инструментальные материалы, которые смогли бы обеспечить высокую работоспособность режущего инструмента при разнообразных условиях его эксплуатации. Следовательно, повышение износостойкости контактных площадок режущего инструмента, изготовленных из традиционных инструментальных материалов, — эффективное направление повышения его работоспособности. Одним из перспективных методов повышения износостойкости контактных

площадок режущего инструмента является нанесение износостойких покрытий.

Проведение исследований

Комплексные исследования влияния покрытия на износостойкость инструмента проводили при точении стали 40Х быстрорежущими резцами с дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием (КХП) контактных поверхностей, полученным на установке ГКО-1. При точении одновременно фиксировали температуру резания и износ по задней поверхности инструмента h_3 . В качестве показателя интенсивности износа инструмента приняли поверхностный относительный износ $h_{0,п}$.

Покрытия осаждали в стандартном электролите хромирования, содержащем 200...250 г/л CrO_3 и 2,0...2,5 г/л H_2SO_4 , наиболее широко применяемом на предприятиях. Для проведения экспериментальных исследований электролит приготавливали из реактивов "ХЧ" и "ЧДА" на дистиллированной воде по методике, описанной в [1]. Плотность электролита измеряли ареометром, а кислотность (рН) — метромилливольтметром модели рН-121. Температуру электролита поддерживали с точ-

ностью 1 К при помощи термометра ТПП-11 (ГОСТ 13717—84) и контролировали с помощью термометра ТН-5 (ГОСТ 400—80) с ценой деления шкалы 0,2 К. Анализ электролита и его корректировку проводили по методике, изложенной в [2].

Для исследований выбрали максимальную плотность тока 200 А/дм². Ограничение по значению плотности тока вызвано также тем, что прохождение больших токов приводит к значительному нагреву деталей, затрудняет создание надежных токоподводов к ним и в итоге не позволяет поддерживать в процессе обработки стабильные технологические режимы [2].

Для нанесения гальванических дисперсно-упрочненных композитных хромовых покрытий использовали модернизированную экспериментальную установку ГКО-1 (рис. 1).

Нанесение хромовых покрытий осуществляли на следующем режиме:

Плотность тока, кА/м ²	20
Температура электролита, °С	63
Давление инструмента, МПа	2,0
Частота вращения детали, мин ⁻¹	140
Число двойных ходов инструмента, дв. х./мин . . .	140

Во всех случаях детали до нанесения покрытия подвергали одинаковой обработке: после шлифования — отпуск при температуре 200...230 °С в течение 2...3 ч; магнитный контроль; обезжиривание; промывка и сушка.

Для создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое все контактные поверхности инструмента, на которые в последующем наносили КХП, подвергали гидропескоструйной обработке при давлении 5 атм корундовым песком (ГОСТ 3647—80).

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ экспериментальных данных (рис. 2) показал, что зависимости износа от пути резания носят монотонный характер при обработке как стандартным инструментом, так и инструментом с покрытием. При этом в области всех исследуемых скоростей резания износ инструмента с покрытием остается меньшим по сравнению со стандартным образцом.

Температура резания, как видно на рис. 3, *а*, растет при увеличении скорости резания при обработке как стандартным инструментом, так и инструментом с покрытием. Однако для всех ис-

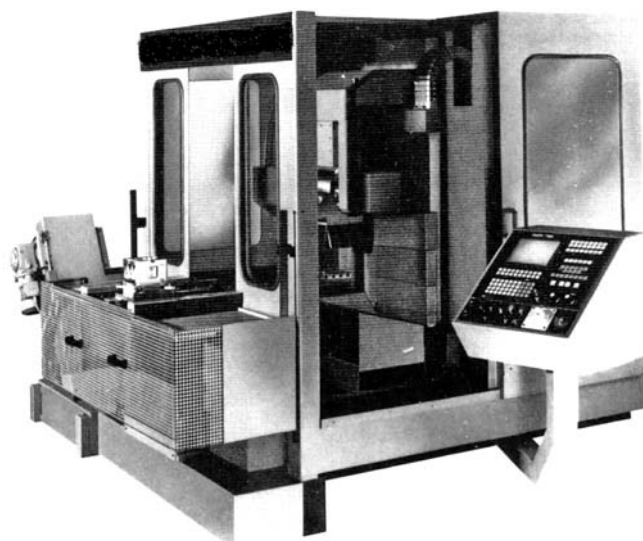


Рис. 1. Модернизированная установка ГКО-1

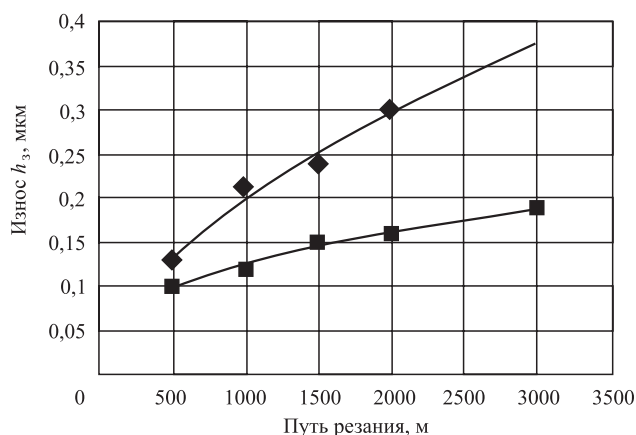


Рис. 2. Зависимость износа реза от длины пути резания при точении стали 40Х резцом из Р6М5 с КХП ($t = 0,25$ мм; $s = 0,125$ мм/об):
◆ — без покрытия; ■ — с КХП

следуемых скоростей резания у инструмента с покрытием температура в зоне резания оставалась меньше, чем при использовании стандартного инструмента. Авторы объясняют этот эффект тем, что композитное хромовое покрытие имеет более низкий коэффициент трения.

Анализ полученных данных показал, что зависимости $h_{0.п}$ от скорости резания носят четко выраженный экстремальный характер (рис. 3, *б*) с точкой перегиба в зоне оптимальных скоростей резания с точки зрения интенсивности износа инструмента. При этом уровень оптимальных скоростей резания для инструментов с покрытием по сравнению со стандартным неупрочненным резцом повышается в 1,2 раза. Интенсивность износа

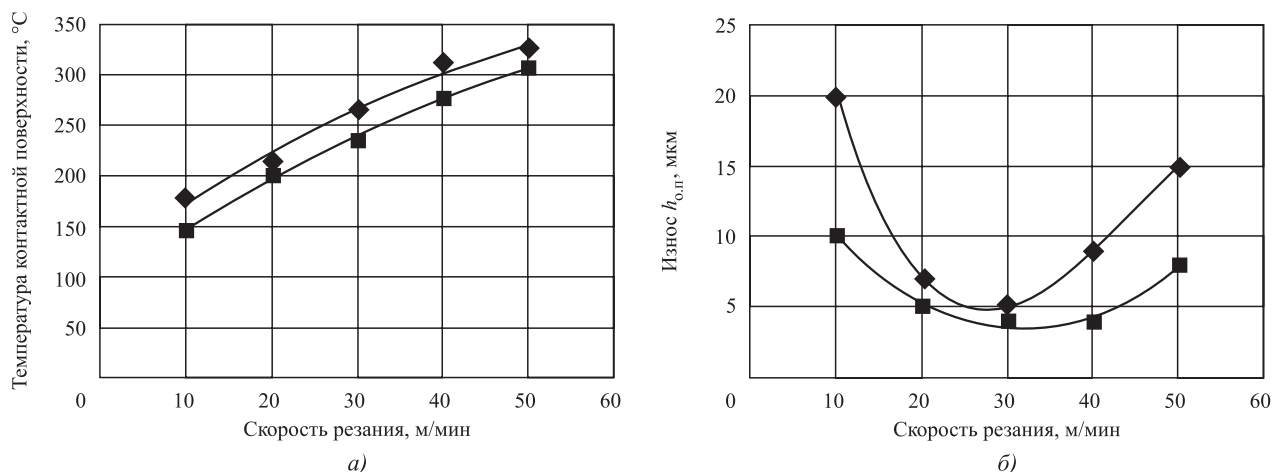


Рис. 3. Влияние скорости резания на температуру контактной поверхности инструмента (а) и его поверхностный относительный износ $h_{0,л}$ (б) при точении стали 40Х резцами из Р6М5 ($t = 0,25$ мм; $s = 0,125$ мм/об):

◆ — без покрытия; ■ — с КХП

упрочненного инструмента снижается на 20 % и на столько же увеличивается длина пути резания.

Выводы

Композитные гальванические хромовые покрытия, используемые для упрочнения контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей, значительно повышают ресурс инструмента. Твердые включения в хромовой матрице играют роль смазывающего материала, что позволяет снизить износ упрочненного инструмента на 20 %. Причем данный тип покрытия выдерживает температуры до 1500 °С, что значительно превосходит температуры нагрева инструмента из быстрорежу-

щих сталей. С другой стороны, ни один тип смазки не рассчитан на такие температуры, что делает применение КХП для упрочнения контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей весьма актуальным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** износостойкости деталей авиационной техники с гальваническими покрытиями / С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 43–46.
2. **Антикоррозионная** защита металла методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 11. С. 29–31.

Вниманию читателей!

В следующем номере приведен указатель статей, опубликованных в журнале в 2017 г.

К сведению авторов журнала «Упрочняющие технологии и покрытия»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: utp@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой () на первой странице.*

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуючную подпись. Подрисуючные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается



ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

п р е д с т а в л я е т

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Выходит с января 2005 г.

E-mail: utp@mashin.ru

Впервые в мире появился журнал, полностью посвященный упрочняющим технологиям и покрытиям, а также различным аспектам их применения. В нем публикуется информация о новейших методах упрочнения материалов и нанесения функциональных покрытий, совершенствовании существующих технологий, перспективном оборудовании, контроле упрочнения, системах автоматизации, нормативно-технические документы и многое другое.

Журнал ориентирован на технологов, конструкторов, специалистов, занимающихся изготовлением, ремонтом и восстановлением машин, оборудования и по роду своей деятельности связанных с проблемами повышения качества, надежности, ресурса и конкурентоспособности изделий. Журнал также может быть полезен преподавателям, аспирантам, студентам вузов и научным работникам.

ЖУРНАЛ РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ ТОЛЬКО ПО ПОДПИСКЕ!



ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ:

85159 – по каталогу агентства «Роспечать»;
39269 – по объединенному каталогу «Пресса России»;
60252 – по каталогу «Почта России»

Тематика журнала

- Общие вопросы упрочнения
- Механическая упрочняющая обработка
- Термическая обработка
- Обработка концентрированными потоками энергии
- Химическая, химико-термическая и электрохимическая обработка
- Полимерные и композиционные покрытия
- Обработка комбинированными методами
- Перспективное оборудование и системы автоматизации
- Контроль качества упрочняющей обработки
- Информация. Производственный опыт
- Нормативно-технические документы

Журнал входит в перечень изданий ВАК РФ

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в издательстве «Инновационное машиностроение» за наличный или безналичный расчет с любого номера и на любой период. Заявки на подписку принимаются по почте, электронной почте, телефону или факсу.

Телефон: (499) 268-47-19, 269-54-96.

E-mail: utp@mashin.ru. Http: www.mashin.ru

Адрес: 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

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 *Копова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 03.10.2017 г. Подписано в печать 20.11.17 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 "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: **www.aov.ru**