

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 14
2018
№ 10 (166)
октябрь

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

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

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
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:

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г.** Влияние никельфосфорного покрытия на эффективность использования металлорежущего инструмента 435
- Кычкин А.К., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф.** Исследование состава и структуры электрометаллизационных покрытий, модифицированных концентратами редкоземельных элементов 439
- Лебедев В.А., Жук Г.В.** Анализ энергетических затрат с разными способами подачи порошковой электродной проволоки при механизированной сварке на различной полярности 443
- Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С.** Оценка работоспособности токарных резцов с разными покрытиями при обработке стали 09Х17Н7Ю 447
- Юркевич С.Н., Юркевич К.С.** Применение магнитно-импульсной обработки на образце из стали 12Х18Н10Т с хромовым покрытием 449

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Сахвадзе Г.Ж., Киквидзе О.Г.** Моделирование упрочнения имплантатов тазобедренного сустава из титановых сплавов ВТ6 с использованием технологии лазерно-ударно-волновой обработки 452

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

- Белевский Л.С., Юреть Е.Л., Леванцевич М.А., Пилипчук Е.В., Дема Р.Р.** Исследование структуры и свойств хромовых покрытий, нанесенных методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом 458
- Литовка Ю.В., Насраоуи М., Кузнецова О.А., Майстренко Н.В.** Модифицированные однослойными углеродными нанотрубками хромовые гальванические покрытия 463
- Щедрин А.В., Кострюков А.А., Мельников Э.Л., Алешин В.Ф., Чихачева Н.Ю.** Инновационные способы воздействия на обрабатываемый материал в методах охватывающей обработки длинномерных заготовок волочением 466

УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Гарипов А.Р., Варданян Э.Л., Назаров А.Ю.** Прогнозирование стехиометрического состава покрытий на основе интерметаллидов системы Ti—Al, синтезированных в среде реакционных газов 471
- Ризванова П.Г., Козлов Г.В., Магомедов Г.М.** Механизм формирования межфазных областей в дисперсно-наполненных полимерных наноккомпозитах 476

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

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.16.00 — Металлургия и материаловедение, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 14
2018
№ 10 (166)
October

Since 2005, January

Editor-in-Chief

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

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistant

Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

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

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
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. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOICHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Butenko V.I., Shapovalov R.G.** Influence of nickel-phosphorus coating on efficiency of metalcutting tool 435
- Kychkin A.K., Vinokurov G.G., Struchkov N.F.** Research of composition and structure of electroarc metallization coatings modified by concentrates of rare-earth elements 439
- Lebedev V.A., Zhuk G.V.** Analysis of energy costs with different methods of feeding of powder electrode wire at mechanized welding on various polarity 443
- Mokritsky B.Ya., Sitamov E.S.** Evaluation of serviceability of turning tools with different coatings in steel 09Kh17N7Yu processing 447
- Yurkevich S.N., Yurkevich K.S.** Application of magnetic-pulse treatment on steel 12Kh18N10T sample with chromium plate 449

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

- Sakhvadze G.Zh., Kikvidze O.G.** Modeling of strengthening of hip implants from titanium alloys VT6 using of laser shock processing technology 452

PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Belevsky L.S., Yurut' E.L., Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Dema R.R.** Research of structure and properties of chromic coatings inflicted by electro-friction method by flexible tool 458
- Litovka Yu.V., Nasraoui M., Kuznetsova O.A., Maystrenko N.V.** Chromium plated coatings modified by single-layer carbon nanotubes 463
- Shchedrin A.V., Kostryukov A.A., Mel'nikov E.L., Aleshin V.F., Chikhacheva N.Yu.** Innovative ways of influencing on material to be processed in methods of embracing processing of lengthy billets by drawing 466

STRENGTHENING NANOTECHNOLOGY

- Garipov A.R., Vardanyan E.L., Nazarov A.Yu.** Prediction of stoichiometric composition of coatings based on Ti—Al system intermetallic compounds synthesized in different reaction gases 471
- Rizvanova P.G., Kozlov G.V., Magomedov G.M.** Mechanism for formation of interfacial regions in particulate-filled polymer nanocomposites 476

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

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.00 — Mechanical engineering and machinery science; 05.05.00 — Transport, mining and building mechanical engineering; 05.16.00 — Metallurgy and materials science, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

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

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



УДК 621.81 + 539.3

В.И. Бутенко, Р.Г. Шаповалов

(Южный федеральный университет, г. Таганрог)

E-mail: shapovalov116@mail.ru

Влияние никельфосфорного покрытия на эффективность использования металлорежущего инструмента

Разработан и исследован способ повышения стойкости металлорежущего инструмента и эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей за счет нанесения на рабочие поверхности инструмента электрохимическим путем никельфосфорного покрытия с последующей его термообработкой.

Ключевые слова: инструмент, покрытие, стойкость, термообработка, сверление, толщина, рефлекс, нарост, трансформация, качественные показатели.

Method of increasing of durability of cutting tool and operating characteristics and the quality of the surface layer of the workpiece by the application on the working surfaces of the tool by electrochemically of nickel-phosphorus coating and subsequent heat treatment is developed and investigated.

Keywords: tool, coating, resistance, heat treatment, drilling, thickness, reflexes, growth, transformation, quality indicators.

Введение

В современном машиностроительном производстве продолжается использование металлорежущих инструментов (сверл разных диаметров, зенкеров, разверток, концевых и дисковых фрез и т.д.) из быстрорежущих сталей, изготовленных на отечественных предприятиях. Эти инструменты находят применение как непосредственно при установке их на металлорежущем станке, так и в инструментальных наладках многопозиционных станков и в обрабатывающих центрах. В отличие от закупаемых за рубежом аналогичных инструментов они сравнительно дешевые и доступные для любого производства, в том числе ремонтного. Однако при резании хромоникелевых сталей и сплавов стойкость инструментов из быстрорежущих сталей низкая, вследствие чего и производительность обработки остается невысокой, что сказывается на себестоимости их изготовления. Поэтому многие машиностроительные предприятия вынуждены закупать подобные инструменты за рубежом.

Учитывая все возрастающую потребность современного машиностроительного производства

в недорогих металлорежущих инструментах, обладающих высокой стойкостью при обработке деталей из хромоникелевых сталей и сплавов, необходимо разработать эффективный технологический способ повышения стойкости инструментов из быстрорежущих сталей. При этом затраты на практическое осуществление этого способа не должны приводить к увеличению себестоимости обработки детали, а размеры инструмента не были бы существенно изменены.

Методика проведения исследований

В лабораториях механики Южного федерального университета разработана технология повышения стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали нанесением на их рабочую поверхность никельфосфорного покрытия с последующей объемной термической обработкой в муфельной печи типа МП-1 при температуре 400 °С в течение 1 ч и охлаждением вместе с печью или последующим лазерным облучением на технологических лазерных установках "Квант-18" и "ГОС-30М" при длительности импульса излучения $5 \cdot 10^{-3}$ с, плотности мощности излучения 200 МВт/м² и

степени дефокусировки луча 4 мм. Никельфосфорное покрытие наносили на сверла электролитическим путем при плотности пропускаемого тока $i = 80 \text{ мА/см}^2$. Использовали водный электролит следующего состава: сернокислый никель — 120 г/л; хромистый никель — 20 г/л; гипофосфат натрия — 15 г/л; ортофосфорная кислота — 40 мл/л; борная кислота — 20 г/л.

Толщина никельфосфорного покрытия составляла $(5...40) \cdot 10^{-3}$ мм. Измерение толщины покрытия осуществляли на многофункциональном приборе "Константа К5" или косвенным методом по мощности рефлексов на дифрактограмме, снятой на рентгеновском дифрактометре "ДРОН-3М", с предварительной тарировкой их путем интерполяции зависимости "толщина покрытия—время нанесения". Металлографические исследования покрытия и состояния поверхностного слоя обработанной детали проводили на интерференционном микроскопе МИИ-4М.

Сравнительные исследования стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 14 мм проводили при сверлении сталей 12Х18Н9Т, 35ХГСА и сплавов 45Х25Н20С2, ЖС6У в сплошном материале на вертикально-сверлильном станке мод. 2Н150 без охлаждения. Режимы сверления (скорость резания v и подача S): для сталей 12Х18Н9Т и 35ХГСА — $v = 0,146 \text{ м/с}$, $S = 0,15 \text{ мм/об}$; для сплавов 45Х25Н20С2, ЖС6У — $v = 0,129 \text{ м/с}$, $S = 0,1 \text{ мм/об}$. Толщина наносимого на рабочую поверхность исследуемых сверл никельфосфорного покрытия составляла $2 \cdot 10^{-2}$ мм. За критерий износа сверл был принят износ их по задней поверхности, равный 0,3 мм, который измеряли на микроскопе БМИ-1. Каждый эксперимент повторяли 10 раз, после чего вычисляли среднеарифметическое значение стойкости сверла. Мощность критерия Стьюдента t_c составила при сверлении сталей 12Х18Н9Т и 35ХГСА соответственно 5,33 и 5,49, а при сверлении сплавов 45Х25Н20С2 и ЖС6У — 4,18 и 4,31 при его критическом значении $[t_c] = 3,0$.

В исследованиях сравнивали стойкость сверл без покрытия, с электролитическим никельфосфорным покрытием и последующей объемной термической обработкой, с никельфосфорным покрытием и последующей лазерной обработкой.

Влияние никельфосфорного покрытия на процессы наростообразования исследовали с помощью специального устройства для быстрого вывода резца из зоны резания [1] при обработке на токарном станке мод. 1И611П. Использовали резцы с пластинками из твердого сплава Т15К6, имеющие следующую геометрию заточки: $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 30^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ$; $r = 0,2 \text{ мм}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведена гистограмма значений стойкости испытанных сверл, из которой видно, что нанесение на рабочую часть спиральных сверл никельфосфорного покрытия с последующей их лазерной обработкой позволяет практически в 2 раза повысить стойкость спиральных сверл при обработке исследуемых материалов.

Совместно проведенный металлографический и рентгеноструктурный анализ никельфосфорного покрытия на быстрорежущей стали Р6М5 показал, что до лазерного облучения покрытия имеют мелкокристаллическую структуру, дающую на дифрактограммах диффузионное гало (рис. 2, кривая 1). После лазерной обработки при плотности мощности излучения $q = 100 \text{ МВт/м}^2$ на его фоне появляются достаточно четкие рефлексы кристаллических фаз Ni_3P и Ni_5P_4 .

На рис. 3 приведены фотографии рабочих поверхностей сверл с никельфосфорным покрытием без термообработки, с покрытием и последующей объемной термической обработкой и с никельфосфорным покрытием и последующей лазерной обработкой, из сопоставления которых видно, что наносимое электролитическим способом покрытие нивелирует рабочие поверхности сверл, способствуя снижению коэффициента трения в зоне резания. Объемная термическая обработка никельфосфорного покрытия приводит к формированию в нем сложных фрагментированных

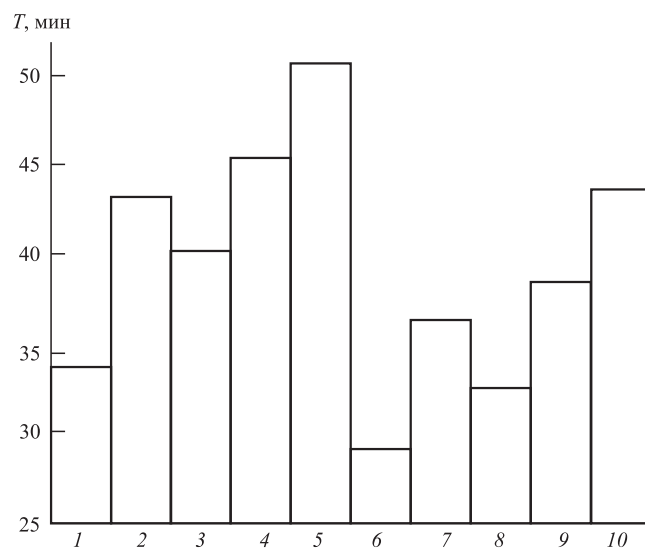


Рис. 1. Гистограмма значений стойкости сверл T при сверлении стали 12Х18Н9Т (1–5) и сплава 45Х25Н20С2 (6–10) без покрытия (1, 6), упрочненные лазерной обработкой (2, 7), с электролитическим никельфосфорным покрытием (3, 8), с никельфосфорным покрытием и объемной термообработкой (4, 9), с лазерной обработкой никельфосфорного покрытия (5, 10)

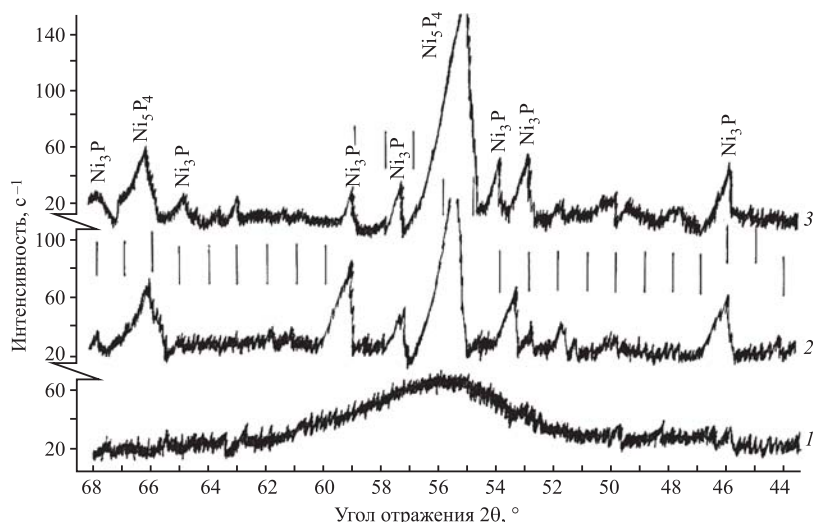


Рис. 2. Фрагменты дифрактограммы никельфосфорного покрытия на быстрорежущей стали Р6М5:

1 — без термообработки; 2 — после лазерной обработки с $q = 100 \text{ МВт/м}^2$; 3 — после объемной термообработки при $400 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 мин

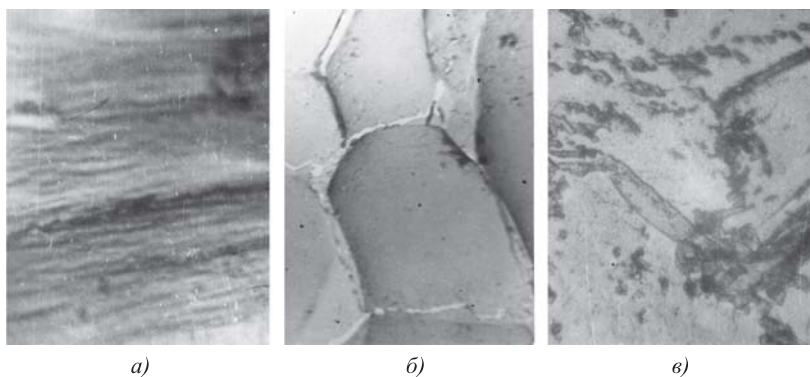


Рис. 3. Состояние поверхностного слоя рабочей части инструмента с никельфосфорным покрытием:

а — без термообработки; б — после объемной термообработки; в — после лазерной обработки. $\times 1000$

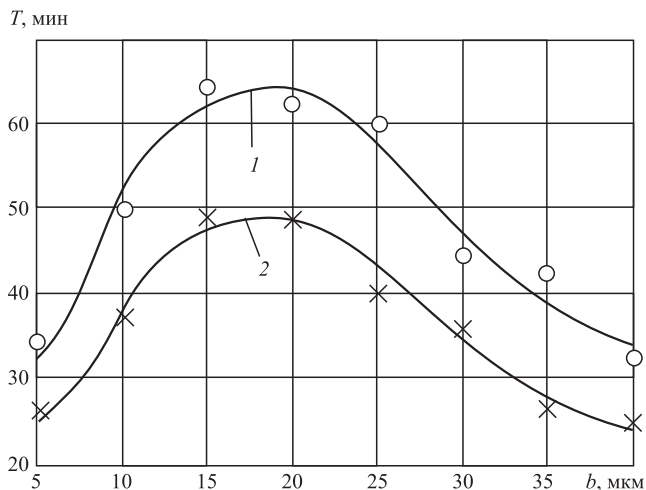


Рис. 4. Изменения стойкости сверл T в зависимости от толщины наносимого никельфосфорного покрытия b при обработке стали 12X18H9Т (1) и сплава 45X25H20C2 (2)

кластеров из соединений типа Ni—Fe—C—P с выделением чистого никеля по их границам (рис. 3, б). Лазерная обработка никельфосфорного покрытия позволяет достичь повышения качества электролитических покрытий за счет увеличения адгезии их к подложке или основе, улучшения морфологии поверхности, а также приводит к увеличению твердости покрытия до 8...10 ГПа из-за достаточно большого количества выделившихся дисперсных соединений типа Ni₃P и Ni₅P₄ (рис. 2, кривая 2). При этом энергетическое состояние никельфосфорного покрытия возрастает, благодаря чему на нем адсорбируются и прочно удерживаются соединения фосфора с углеродом в виде наноразмерных частиц (рис. 3, в). Эти соединения обладают низким коэффициентом трения при температурах резания и высоких давлениях, что в сочетании с незначительным тепловым влиянием лазерной обработки никельфосфорного покрытия на быстрорежущую сталь инструмента приводит к минимизации износа его режущих кромок.

Другим важным фактором, влияющим на процесс изнашивания рабочей части сверла, является толщина наносимого никельфосфорного покрытия b , которая оказывает неоднозначное влияние на стойкость инструмента (рис. 4). Установлено, что для каждого сочетания обрабатываемого материала, никельфосфорного покрытия и условий обра-

ботки существует некоторая оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая максимальную стойкость сверла. Этот вывод подтверждает предположение о существовании в парах трения так называемого эффекта "нанотрибологической ямы" [2], учет которого необходим при разработке технологии и режимов нанесения износостойких покрытий.

Исследованиями было установлено, что эффект "нанотрибологической ямы" может быть использован для повышения производительности обработки деталей в условиях автоматизированного производства или при использовании обрабатывающих центров, когда требуется обеспечение одновременной смены всех инструментов в наладке [3]. Так, применение в инструментальных наладках обрабатывающих центров АГП 630-800-1.3, АГПН 630-800-1.3, АГП 630-800-2.3, входящих в гибкий производственный комплекс ГПК-1,

Влияние никельфосфорного покрытия резов на качественные показатели поверхностного слоя деталей

Обрабатываемый материал	Режимы резания			Состояние режущей кромки	Стойкость инструмента T , мин	Показатели качества		
	v , м/с	S , мм/об	t , мм			Rz , мкм	ΔH , мм	$\sigma_{ост}$, МПа
Сталь 35ХГСА	0,32	0,2	1,5	Без покрытия	35,6	18,4	0,35	310
				С покрытием	63,8	12,2	0,31	280
Сталь 12Х18Н9Т	0,39	0,15	1,5	Без покрытия	41,5	20,6	0,38	320
				С покрытием	80,4	11,8	0,32	290
Сплав ЖС6У	0,25	0,1	1,0	Без покрытия	24,7	16,5	0,30	300
				С покрытием	48,6	10,9	0,26	270
Сплав 45Х25Н20С2	0,25	0,1	1,0	Без покрытия	22,1	15,7	0,29	290
				С покрытием	39,3	11,3	0,25	260

инструментов (сверл, зенкеров, разверток и концевых фрез различных размеров) с никельфосфорными покрытиями, толщины которых были рассчитаны и откорректированы в соответствии с эффектом "нанотрибологической ямы", позволило повысить производительность комплекса при обработке сложнопрофильных деталей более чем на 15 %.

Известно, что изменение состояния контактных поверхностей инструмента путем уменьшения коэффициента трения на контактных площадках инструмента за счет нанесения на них антифрикционного никельфосфорного покрытия приводит не только к уменьшению температуры и сил резания, но и к изменению формы нароста — его трансформации. На рис. 5 приведены фотографии микрошлифов корней стружек, свидетельствующие о том, что покрытие изменяет условия трения на передней поверхности инструмента, приводящие к трансформации нароста (рис. 5, б) и, соответственно, углов резания. Это

снижает напряженность материала в зоне резания, что влечет за собой не только повышение стойкости металлорежущих инструментов, но и улучшение показателей качества поверхностного слоя обрабатываемой детали (таблица).

Выводы

Нанесение на рабочие поверхности инструментов из быстрорежущей стали никельфосфорного покрытия с последующей его лазерной обработкой позволяет с минимальными затратами существенно повысить стойкость инструментов и улучшить эксплуатационные показатели поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Особенно эффективно использование инструментов с никельфосфорным покрытием в инструментальных наладках обрабатывающих центров и многопозиционных станков, так как имеется возможность за счет учета эффекта "нанотрибологической ямы" осуществлять одновременную смену всех инструментов.

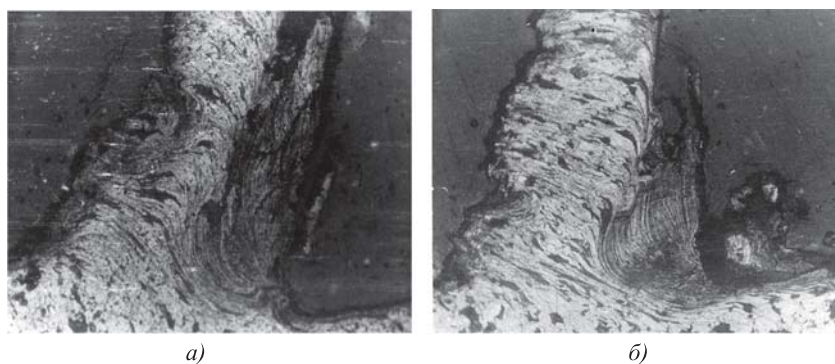


Рис. 5. Трансформация нароста на передней поверхности инструмента в зависимости от коэффициента трения:

a — микрошлиф корня стружки при использовании реза без покрытия; *б* — микрошлиф корня стружки при использовании реза с никельфосфорным покрытием и лазерной обработкой (сталь 35ХГСА; $v = 0,36$ м/с; $S = 0,25$ мм/об; $t = 2$ мм. $\times 75$)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2193950 РФ, МПК В23 В 39/18. Устройство для быстрого вывода реза из зоны резания / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко, Д.С. Дуров. 2002. Бюл. № 34.
2. Бутенко В.И., Гусакова Л.В., Шаповалов Р.Г. Эффект "нанотрибологической ямы" и пути его практического использования // Нанотехнологии—2012: труды междунар. науч.-техн. конф. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. С. 83—85.
3. Бутенко В.И., Анкудимов Ю.П., Чернега Ю.Г. Стратегический инновационный менеджмент в станкостроении. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2015. 264 с.

А.К. Кычкин, Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков
(Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск)
E-mail: struchkov_n@rambler.ru

Исследование состава и структуры электрометаллизационных покрытий, модифицированных концентратами редкоземельных элементов

Проведены исследования состава, структуры и микротвердости электрометаллизационных покрытий, полученных из порошковой проволоки с модифицирующими добавками в виде комплексного концентрата редкоземельных элементов Томторского месторождения. Показано, что распределение основных элементов проволоки и модифицирующих добавок в структуре напыленного покрытия равномерное. Определены уровни микротвердости покрытий при различных содержаниях добавок комплексного концентрата.

Ключевые слова: электрометаллизационное покрытие, модифицирующая добавка, редкоземельные металлы, структура, микротвердость, сканирующая электронная микроскопия.

Researches of composition, structure and microhardness of the electroarc metallization coatings received from powder wire with the modifying additives in the form of the complex concentrator of rare-earth elements of the Tomtor deposit are conducted. It is shown that distribution of basic elements of wire and the modifying additives in structure of the raised dust coating uniform. Values of microhardness of coatings at various content of additives of complex concentrate are determined.

Keywords: electroarc metallization coating, modifying additive, rare-earth metals, structure, microhardness, scanning electronic microscopy.

Введение

В настоящее время химические редкоземельные элементы представляют особый интерес и стратегическую важность для мирового промышленного производства. Редкоземельные элементы и их химические соединения широко применяются в инновационных технологиях металлургии, атомной энергетики, химической промышленности и др. В этом направлении актуальной задачей остается комплексное использование шиховых концентратов россыпных месторождений редкоземельных элементов с включением их в технологические процессы непосредственно, без предварительного выделения чистых компонентов.

Таким образом, разработка способов использования концентратов редкоземельных элементов является перспективным направлением, особенно в области получения широкого спектра многокомпонентных металлических и керамических порошковых материалов [1, 2]. Наличие в концентратах разнообразных минеральных ассоциаций позволяет получать композиционные порошки для новых конструкционных, электродных, наплавочных и других материалов [3, 4]. При этом

для исключения дорогостоящих промежуточных операций выделения редкоземельных элементов необходимо использовать эффективные способы физико-химической и механической обработки концентратов.

Как показывает практика, в металлургии редкоземельные элементы используются для модифицирования, легирования, раскисления и десульфурации, поскольку большое химическое сродство они проявляют к таким элементам, как кислород, сера, фосфор, водород, углерод. Взаимодействуя с данными элементами, редкоземельные добавки способствуют удалению или перераспределению вредных примесей и оказывают положительное влияние на структуру и свойства металлов [5]. Поэтому следует также ожидать, что использование редкоземельных элементов в качестве модифицирующих добавок в высокоэнергетических технологиях порошковой металлургии позволит улучшить структуру и физико-механические свойства порошковых покрытий и материалов.

Цель работы — установление состава и структуры порошковых электрометаллизационных покрытий, модифицированных концентратами редкоземельных элементов.

Материалы и методы эксперимента

Объектами сравнительного исследования являются электрометаллизационные покрытия из опытных порошковых проволок, модифицированных редкоземельными элементами из комплексных концентратов Томторского месторождения Республики Саха (Якутия). Порошковые проволоки, использованные в работе, представляют собой оболочку из малоуглеродистой стали, заполненную порошковой шихтой с модифицирующими добавками редкоземельных элементов концентрата Томторского месторождения, коэффициент заполнения порошковых проволок составляет 0,28...0,30.

В табл. 1 приведен состав порошковых проволок, из которых электродуговой металлизацией получены покрытия для исследований. Комплексный концентрат содержит, %: Nb_2O_5 — 5,03...13,56; примеси TR_2O_5 (включая Y_2O_3) — 15,45...31,03. Введение в состав порошковой шихты порошковой проволоки карбида кремния (SiC), феррохромбора (ФХБ-1) и порошка оксида алюминия обеспечивает образование в покрытии упрочняющей фазы с высокой твердостью, что приводит к повышению износостойкости покрытия.

Порошковые покрытия наносили на установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 при сле-

(100 гс) по 50—60 измерениям различных фаз в структуре порошковых электрометаллизационных покрытий.

Структура и состав покрытий с редкоземельными модифицирующими добавками

На рис. 1 представлены структуры полученных порошковых электрометаллизационных покрытий. Как видно из изображений, покрытия имеют характерную структуру газотермического покрытия, состоящую из неоднородных чередующихся широких слоев и тонких прослоек лентообразного вида, а также отдельных нерасплавленных частиц различных форм. Толщина слоев порошковых покрытий достигает ~40 мкм, а размеры отдельных частиц составляют до ~50...60 мкм.

Как установлено металлографическим анализом, границы между порошковым покрытием и материалом подложки имеют волнообразную форму. В переходной зоне к металлу основы выявлена полоса промежуточного слоя, частично расплавленного напыляемым порошковым материалом. Наличие разнообразных легирующих элементов в шихте (см. табл. 1) обуславливает присутствие большого количества фаз в покрытии, четко отличающихся на металлографических шлифах по степени травления.

Исследование элементного состава покрытий показало, что распределение основных и легирующих элементов, в основном, является равномерным, наблюдается локальная концентрация некоторых элементов в структуре покрытий (рис. 2, см. обложку). Как видно из элементных карт, основные элементы порошковой проволоки Fe (стальная оболочка), Ni, Cr, Si (порошок ПГСП-4) также распределены равномерно. Низкая концентрация данных основных элементов или их отсутствие наблюдается на участках расположения

Таблица 1

Состав шихты порошковой проволоки, % мас.

Номер состава	Порошок ПГСП-4	Комплексный концентрат	Модификатор SiC	Лигатура ФХБ-1	Порошок Al_2O_3
1	41,24	8,25	—	41,24	9,28
2	45,05	1,80	3,6	40,54	9,01

дующих технологических режимах напыления: ток дуги $I = 200...300$ А; напряжение $U = 40...70$ В; давление $p = 0,7...0,75$ МПа; дистанция $L = 130$ мм. Режимы электродуговой металлизации выбраны исходя из условия устойчивой работы дуги промышленной установки.

Структуру и элементный состав покрытий исследовали на металлографическом микроскопе Neophot-32, растровом электронном микроскопе Hitachi TM 3030 и сканирующем (растровом) электронном микроскопе JEOL JSM-7800F LV.

Микротвердость определяли на твердомере ПМТ-3М при нагрузке на алмазный индентор 0,981 Н

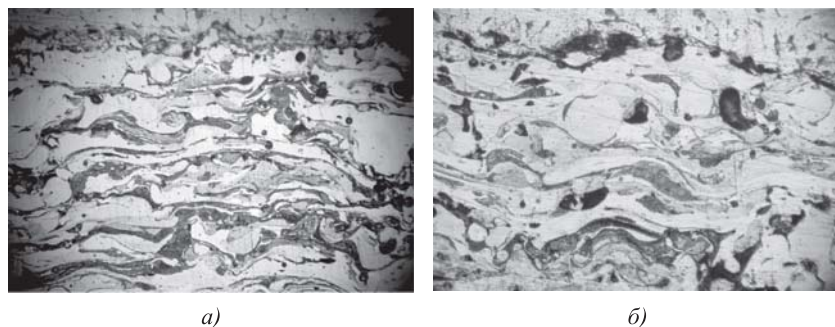


Рис. 1. Структура электрометаллизационных покрытий с редкоземельными модифицирующими добавками: а — состав № 1; б — состав № 2

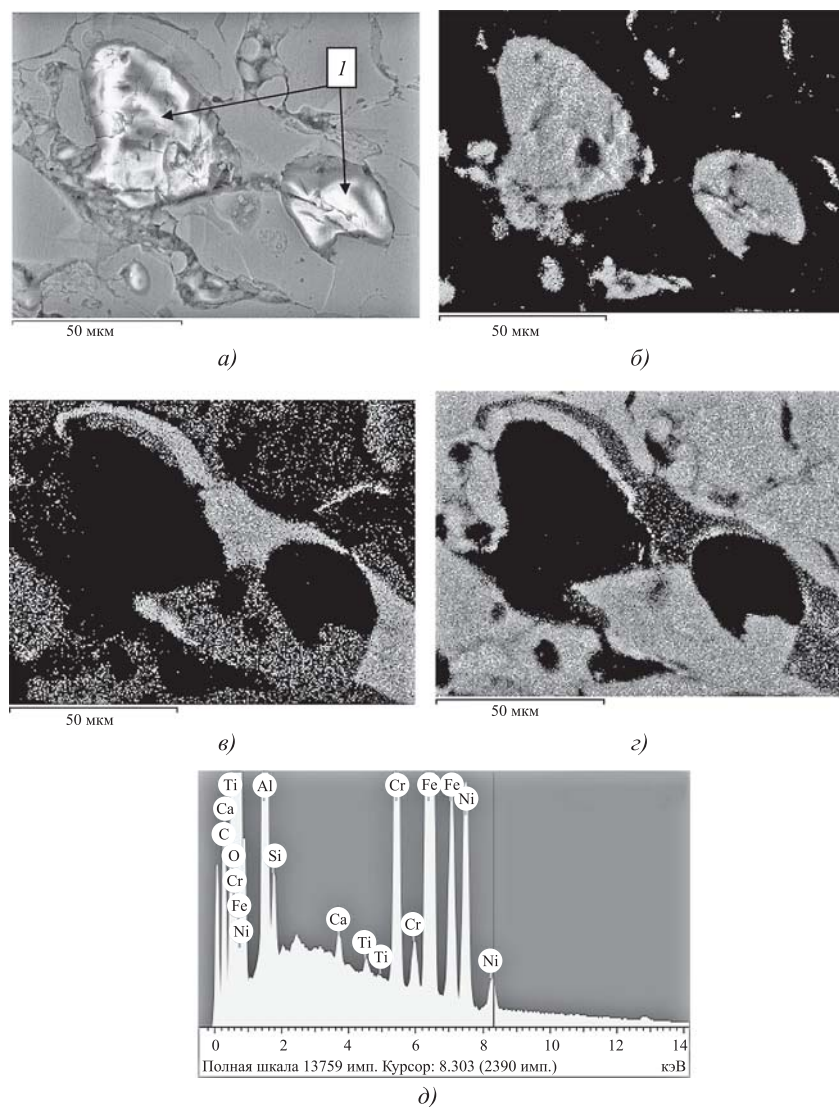


Рис. 3. Частицы с высокой микротвердостью (а, 1), распределение элементов покрытия из порошковой проволоки № 1: б — Al; в — Ni; г — Fe; д — суммарный спектр

отдельных нерасплавленных частиц, в которых установлено высокое содержание алюминия. Это обусловлено тем, что введенный в состав порошковой шихты проволоки тугоплавкий порошок оксида алюминия (Al_2O_3) в структуре покрытия выделяется в виде полностью не расплавленных отдельных частиц различной формы (см. рис. 2). Как видно из элементных карт на рис. 2, распределение редкоземельных элементов (Y, Nb) в покрытии равномерное, четко выраженной концентрации на отдельных участках не наблюдается.

В табл. 2 приведены результаты измерений микротвердости модифицированных порошковых покрытий с округлением значений до 100 МПа. Средние значения микротвердости порошковых покрытий отличаются и составляют 5500 и 6500 МПа.

Таблица 2

Микротвердость модифицированных порошковых покрытий

Номер состава	Микротвердость, МПа		
	средняя	максимальная	минимальная
1	6500	14 000	4700
2	5500	16 500	4200

Таблица 3

Состав элементов исследуемого участка покрытия из проволоки состава № 1 (JEOL JSM-7800F LV)

Элемент	Содержание	
	% мас.	% ат.
C	16,55	35,34
O	16,85	27,01
Al	13,41	12,75
Si	0,86	0,79
Ca	0,26	0,17
Ti	0,17	0,09
Cr	5,70	2,81
Fe	37,92	17,42
Ni	8,27	3,61

Большее среднее значение микротвердости (6500 МПа) у покрытия из проволоки состава № 1, в покрытии наблюдаются участки с высокими значениями микротвердости до 14 000 МПа. В покрытии из проволоки состава № 2 обнаружена область с максимальной микротвердостью 16 500 МПа.

Для идентификации областей с высокой твердостью в работе на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7800F LV проведены исследования участков с высокими значениями микротвердости покрытия из проволоки состава № 1 (рис. 3, табл. 3). Как видно из изображений на рис. 3, на исследуемом участке покрытия присутствуют основные элементы исходного состава порошковой проволоки. На частицах с высокой твердостью (участок 1, рис. 3, а) полностью отсут-

ствуют (или наблюдается минимальное содержание) железо Fe и никель Ni, а содержание алюминия Al максимально. Отсюда следует, что данные участки являются нерасплавленными частицами оксида алюминия Al_2O_3 , которые были добавлены в состав порошковой шихты проволоки в виде модифицирующих добавок (см. табл. 1). Также наблюдается незначительное количество Si, Ca и Ti (см. рис. 3, д; табл. 3), которые присутствуют в виде различных соединений в комплексном концентрате.

Выводы

1. Получены порошковые покрытия с модифицирующими добавками из концентратов редкоземельных элементов Томторского месторождения Республики Саха (Якутия). Показано, что технология электродуговой металлизации порошковых проволок позволяет обработать комплексные концентраты редкоземельных элементов. Для образования упрочняющих фаз покрытия в состав шихты порошковой проволоки также введены карбид кремния, феррохромбор (ФХБ-1) и оксид алюминия.

2. Покрытия имеют характерную структуру газотермического покрытия, состоящую из неоднородных чередующихся широких слоев и тонких прослоек лентообразного вида, а также отдельных нерасплавленных частиц различных форм. Толщина слоев порошковых покрытий достигает ~40 мкм, размеры отдельных частиц составляют до ~50...60 мкм.

Установлено, что распределение основных химических элементов порошковой шихты и модифицирующих добавок в виде редкоземельных элементов в структуре покрытия равномерное.

3. При содержании комплексного концентрата редкоземельных элементов ~8 % среднее значение микротвердости покрытия достигает 6500 МПа, также в покрытиях наблюдаются участки с высоким значением микротвердости (до 16 500 МПа). Исследованием на растровом электронном микроскопе выявлено, что отдельные частицы в структуре покрытия состава № 1 с высокими значениями микротвердости являются нерасплавленными частицами тугоплавкого оксида алюминия Al_2O_3 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Манохин А.И., Ватомин Н.А., Резниченко В.А.** Решение проблемы комплексного использования сырья в металлургии // Изв. АН СССР. Металлы. 1982. № 2. С. 3—14.
2. **Резниченко А.А., Липихина М.С., Морозов А.А.** Комплексное использование руд и концентратов. М.: Наука, 1989. 172 с.
3. **Горное дело и порошковая металлургия / В.И. Трефилов, Е.И. Богданов, А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева** // Горный журнал. 1988. № 2. С. 12—14.
4. **Богданов Е.И., Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А.** Шлихи россыпных месторождений и титаномагнетитовые пески — новые источники сырья для порошковой металлургии // Колыма. 1987. № 2. С. 6—8.
5. **Невар Н.Ф.** Роль редкоземельных металлов при модифицировании железобористых сплавов // Литье и металлургия. 2009. № 1 (50). С. 155—159.

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

В.А. Лебедев, Г.В. Жук
(ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев)
E-mail: lebedevvladimir@ukr.net

Анализ энергетических затрат с разными способами подачи порошковой электродной проволоки при механизированной сварке на различной полярности

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с энергосбережением при дуговой сварке-наплавке. На основе системных определений энергозатрат при дуговых процессах, реализуемых при разных способах подачи самозащитной порошковой электродной проволоки (импульсная, дозированная) при различных полярностях горения дуги, и анализа наплавленных валиков с использованием оригинальных диаграмм показаны преимущества применения того или иного технического решения. Определено, что при дозированной подаче электродной проволоки может быть использован источник сварочного дросселя без стандартного дросселя в сварочной цепи.

Ключевые слова: механизированная сварка, полярность, перенос капли, управление, способ подачи, затраты энергии, измерение, сравнение, анализ.

The issues related to energy saving in arc welding-surfacing are considered. Based on systemic definitions of energy consumption for arc processes realized with different methods of feeding self-shielded powder electrode wire (pulse, dosed) at different polarities of arc combustion and analysis of weld beads using the original diagrams, the advantages of using particular technical solution are shown. It is determined that when the electrode wire is dosed, the source of the welding choke can be used without standard throttle in the welding chain.

Keywords: mechanized welding, polarity, drop transfer, control, feeding method, energy costs, measurement, comparison, analysis.

Создание, восстановление, ремонт и упрочнение конструкций методами дуговой механизированной сварки-наплавки в условиях открытых площадок, непосредственно на рабочих местах сопряжены с рядом трудностей, основные из которых связаны с невозможностью осуществить технологический процесс с использованием защитных газов, а также с ограничением в использовании материальных (электродные проволоки с определенными свойствами) и энергетических ресурсов.

Способом, который позволяет в большей степени преодолеть отмеченные трудности, является использование самозащитных электродных проволок [1] с соответствующим сварочно-наплавочным оборудованием, которое может отличаться от оборудования для сварки в защитных газах тонкими электродными проволоками.

Для получения максимального эффекта от технологического процесса сварки-наплавки можно использовать управляемые импульсные алгоритмы подачи электродной проволоки

Результаты сварки-наплавки порошковыми самозащитными электродными проволоками с импульсной и дозированной подачей уже рассматривались в работах [2, 3]. Однако все это относилось

только к одному наиболее часто используемому при механизированном процессе сварки виду полярности — обратной. Можно заметить, что при наплавке наиболее предпочтительным, согласно работе [4], может быть процесс на прямой полярности, который обеспечивает меньшее проплавление основного металла и большую скорость плавления электродной проволоки, что позволяет получить большую производительность.

Цель настоящей работы — сравнительный анализ результатов, получаемых при сварке-наплавке с импульсной и дозированной подачей самозащитной электродной проволоки при различных полярности проведения дугового процесса и индуктивностях сварочной цепи, так как, например, при дозированной подаче при определенных параметрах импульсов возможны процессы как с короткими замыканиями дугового промежутка, так и без них.

Вопросы, связанные со сваркой-наплавкой самозащитной порошковой проволокой в сравнении прямой — обратной полярности при импульсных алгоритмах подачи электродной проволоки, насколько авторам статьи известно из анализа технической литературы, еще не изучались. Это и определяет актуальность задачи.

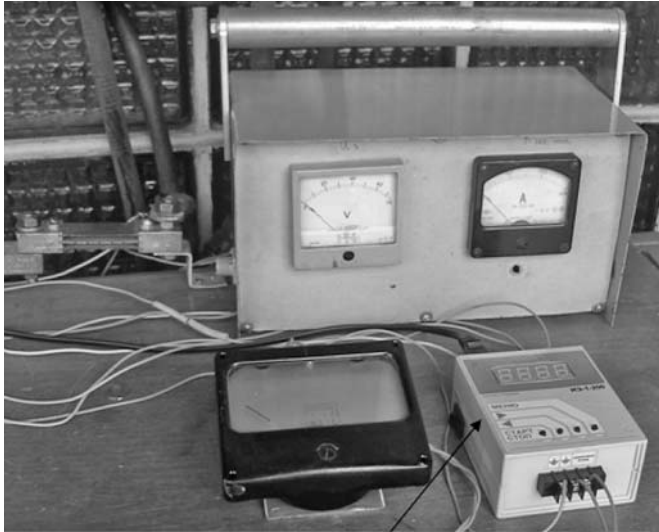


Рис. 1. Стенд для измерения затрат электроэнергии при дуговой сварке

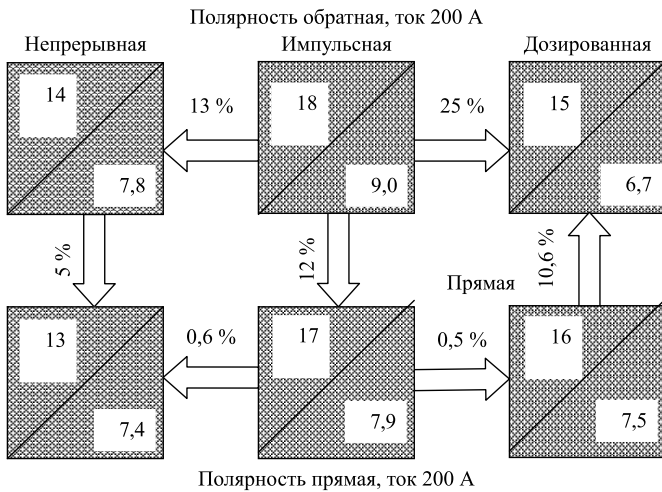


Рис. 2. Диаграмма, определяющая энергетические затраты при наплавке при разных полярностях, различных способах подачи электрода и токе 200 А

Сравнение и анализ выполняли на основе цикла экспериментальных исследований, при которых использовали образцы стандартных размеров и режимы дугового процесса из базы уже наработанных данных при наплавке на обратной по-

лярности, обеспечивающие благоприятное формирование валиков. Регистрацию энергетических затрат проводили на специально разработанном устройстве (рис. 1).

Величины измеренных энергетических затрат на ведение процесса наплавки на токе 200 А представлены на оригинальных диаграммах (рис. 2), позволяющих наглядно сравнить полученные результаты (средние по трем опытам). В левом верхнем углу каждого квадрата показаны номера экспериментов (номера наплавки), представленных на рис. 3. Все наплавленные валики намеренно не зачищались после технологического процесса. В правом нижнем углу даны результаты измерений. Стрелки между квадратами направлены в сторону снижения затрат и показывают их процентное значение. Наплавленные валики по длине соответствуют мерным отрезкам по времени измерения энергетических затрат.

По формированию наплавленных валиков можно отметить, что наихудшее формирование получается на прямой полярности при обычной непрерывной подаче электродной проволоки. Это вполне соответствует выводам работы [5], но для сплошной проволоки. Далее при импульсной подаче на прямой полярности формирование улучшается и при дозированной подаче формирование вполне удовлетворительное и, практически, ничем не отличается от формирования на обратной полярности, при этом разбрызгивание электродного металла даже меньше (на 4...5 %), чем при наплавке с непрерывной подачей электродной проволоки.

При наплавке на прямой полярности при всех видах подачи электродной проволоки затраты электроэнергии практически одинаковы. На обратной полярности при импульсной и дозированной подачах энергозатраты снижаются в сравнении с непрерывной подачей, при этом наименьшие затраты обеспечивает процесс с дозированной подачей.

Стабильность энергозатрат при разных способах подачи электродной проволоки при наплавке на прямой полярности объясняется, в том числе, перераспределением (существенным увеличе-

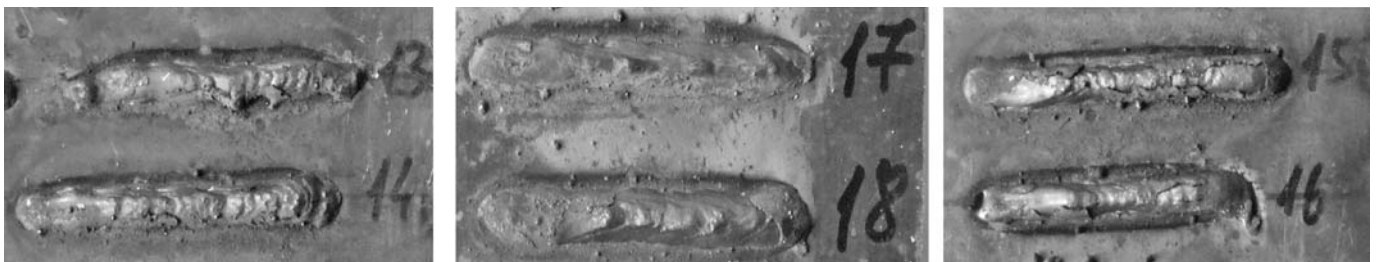


Рис. 3. Характерные валики наплавки, полученные при использовании различных способов подачи электродной проволоки на разных полярностях ведения процесса. Номера валиков соответствуют номерам экспериментов на рис. 2

нием) энергозатрат на плавление электродной проволоки. При этом способ подачи в меньшей степени влияет на энергетические характеристики плавления.

При экспериментальных работах по оценке возможностей наплавки на разной полярности при различных способах подачи электродной проволоки процесс выполнялся на других значениях токов. На диаграммах (рис. 4) представлены результаты определения энергетических затрат для непрерывной и дозированной подачи, а на рис. 5 — соответствующие примеры наплавленных валиков при токе наплавки 130 А. Разница в энергетических затратах при разных способах подачи и полярностях менее выражена, чем на наплавке на более высоких значениях тока (200 А).

При наплавке на прямой полярности с непрерывной подачей электродной проволоки валик имеет наихудший вид. При использовании дозированной подачи форма валиков на прямой и обратной полярности имеет практически одинаковый товарный вид, но на прямой полярности несколько возрастают энергозатраты. Процесс наплавки на прямой полярности интересен тем, что позволяет увеличить скорость наплавки, получая при этом существенно меньшее проплавление, чем при процессе на обратной полярности, что при выполнении упрочняющей наплавки с заданными электродной проволокой свойствами наплавленного слоя является желаемым результатом.

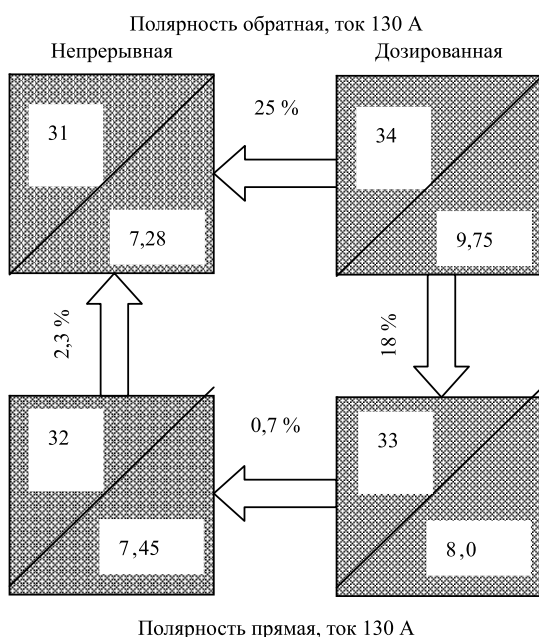


Рис. 4. Диаграмма, определяющая энергетические затраты при наплавке при разных полярностях, различных способах подачи электрода и токе 130 А

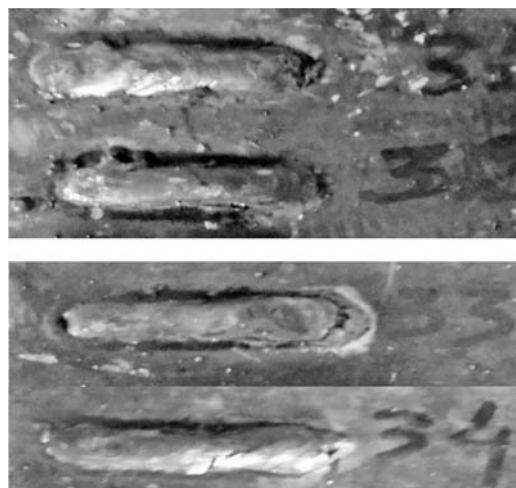


Рис. 5. Характерные валики наплавки, полученные при наплавке на разных полярностях при различных способах подачи электрода на токе 130 А. Номера валиков соответствуют номерам экспериментов на рис. 4

Интересны результаты по наплавке порошковой самозащитной проволокой с дозированной подачей электродной проволоки на различных величинах индуктивности дросселя в сварочной цепи и разных полярностях горения дуги. Ранее были показаны результаты наплавки на источнике сварочного тока с комплектным дросселем. На рис. 6 показаны результаты замеров энергозатрат

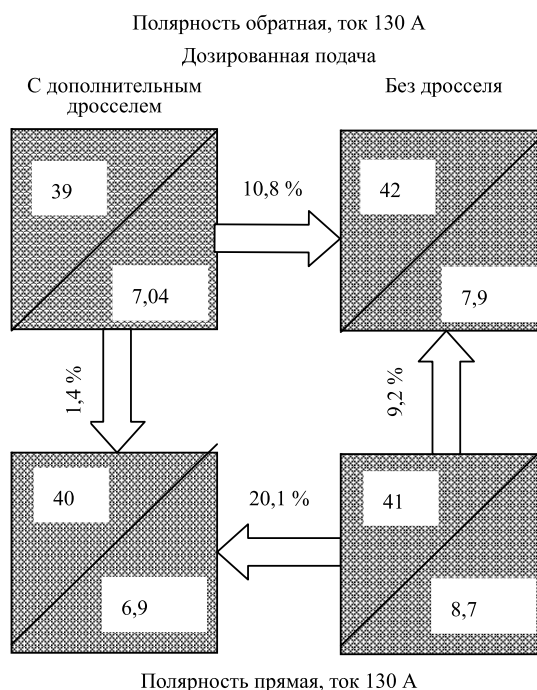


Рис. 6. Диаграмма, определяющая энергетические затраты при наплавке при разных полярностях, различных способах подачи электрода, значениях индуктивности сварочной цепи и токе 130 А

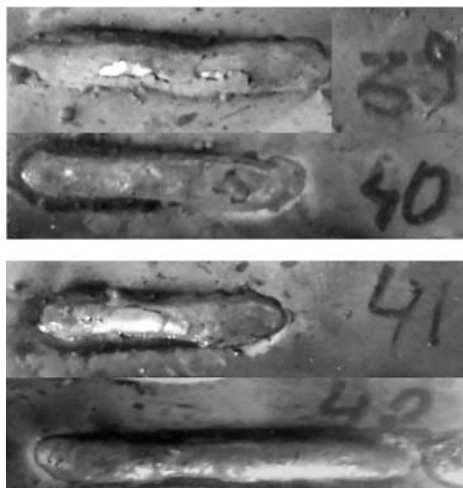


Рис. 7. Характерные валики наплавов, полученные при наплавке на разных полярностях при различных способах подачи электрода и индуктивностях сварочной цепи на токе 130 А. Номера валиков соответствуют номерам экспериментов на рис. 6

при наплавке на токе 130 А. На рис. 7 показаны наплавленные валики, соответствующие обозначениям на рис. 6. Все валики имеют хороший товарный вид, а процессы достаточно близки по энергетическим затратам.

В процессе экспериментальной оценки затрат энергии при наплавке порошковой проволокой использовали их различные типы, но достаточно близкие по характеристикам и назначению. Получаемые результаты имеют аналогичные приведенным выше тенденции по энергетическим затратам и формированию наплавленных валиков.

Из анализа процессов сварки-наплавки с дозированной подачей электродной проволоки с разными индуктивностями сварочной цепи следует, что в случае получения переноса электродного металла с управляемыми характеристиками от дросселя, который, как правило, имеет значительную массу и габаритные размеры, можно отказаться, а это ведет к снижению массогабаритных показателей источника сварочного тока. Возможность сварки-наплавки без дросселя в сварочной цепи при рассмотренных выше процессах можно объяснить управляемыми при помощи дозированной подачи характеристиками нарастания и спада тока при переносе электродного металла. Минимальные габаритные размеры источника

сварочного тока позволяют получить комплекс маневренного сварочно-наплавочного механизированного оборудования, что важно при его применении в условиях производственных площадок.

Выводы

1. При наплавке с использованием различных способов подачи самозащитной порошковой электродной проволоки энергетически более выгодными являются режимы с достаточно большими значениями токов (200...220 А).

2. Наплавка с импульсными алгоритмами формирования скорости подачи электродной проволоки обеспечивает формирование валиков с более качественным товарным видом (лучшее соотношение ширины и усиления, меньшее набрызгивание электродного металла и др.).

3. Применение дозированной подачи порошковой самозащитной электродной проволоки при выполнении качественной сварки-наплавки в разных производственных условиях может проводиться с использованием простых конструкций источников сварочного тока, в том числе и без дросселя в сварочной цепи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хусман М.Д. Порошковые проволоки — альтернатива штучным электродам и сплошной проволоке // Сварочное производство. 1996. № 1. С. 34—38.
2. Лебедев В.А. Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки // Сварка и диагностика. 2014. № 1. С. 16—18.
3. Лебедев В.А., Жук Г.В. Механизированная дуговая сварка и наплавка в разных пространственных положениях с управляемой дозированной подачей электродной проволоки различных типов // Тяжелое машиностроение. 2017. № 6. С. 19—23.
4. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. К.: Вища школа, 1976. 424 с.
5. Попков А.М. Устойчивость процесса плавления электрода при различных способах сварки системы источник питания — дуга при сварке с систематическими короткими замыканиями // Сварочное производство. 1983. № 6. С. 5—7.

Б.Я. Мокрицкий, Э.С. Ситамов

(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)

E-mail: ofisse@knastu.ru

Оценка работоспособности токарных резцов с разными покрытиями при обработке стали 09X17H7Ю

Рассмотрены результаты испытаний работоспособности отечественных токарных резцов, изготовленных из сплава ВК8, с различными упрочняющими покрытиями. Приведены сравнительные данные по износостойкости пластин с покрытиями.

Ключевые слова: твердосплавный инструмент, упрочняющие покрытия, износостойкость, коррозионно-стойкие стали.

The results of tests of the serviceability of domestic turning tools made of VK8 alloy with various hardening coatings are considered. Comparative data on the wear resistance of coated plates are given.

Keywords: cemented-carbide tool, hardening coatings, wear resistance, stainless steel.

Введение

Твердосплавные инструментальные материалы наиболее часто применяются для изготовления металлорежущих инструментов [1]. В настоящее время существенно возросла потребность в коррозионно-стойких сталях, но для их механической обработки требуется специальный износостойкий инструмент. Одним из направлений решения этой проблемы является применение специальных покрытий на твердосплавном инструменте [2, 3].

Цель работы — экспериментальное исследование работоспособности отечественных инструментальных твердых сплавов с различными покрытиями при обработке заготовок деталей из коррозионно-стойкой стали марки 09X17H7Ю.

Методика исследования

Для идентичных условий наружной токарной обработки заготовки, выполненной из стали марки 09X17H7Ю, выбраны несколько типов режущих сменных твердосплавных пластин с разными покрытиями и испытаны на износостойкость. Определяли время работы пластины до достижения критической величины износа (износ по задней поверхности) 0,5 мм. Для оценки характера протекания процесса изнашивания измерения проводили через каждые 15 мин работы пластины при помощи мультисенсорного измерительного центра (видеоизмерительной машины) модели "Micro Vu Sol 161"; результаты измерений документировали.

Испытания проводили на токарно-винторезном станке модели 16K25. Скорость резания поддерживали в пределах 50...55 м/мин. Применение более высоких скоростей резания (75 м/мин и выше) не

оправдало себя из-за низкой термостойкости субстрата (основы) твердосплавных пластин, это приводило к вязкому (пластическому) разрушению (термодеформации) режущей кромки инструмента.

Подача резца составляла 0,21 мм/об заготовки, глубина резания 0,5 мм для чистовой обработки и 1 мм — для черновой обработки. Применение глубины резания 1,5 и 2,0 мм вело к резкому снижению периода износостойкости инструмента.

Заготовку получали прокаткой, поверхностный слой перед точением удаляли. Длина обрабатываемой поверхности заготовки составляла 600 мм. Передний конец заготовки закрепляли в трехлапчатом патроне станка, задний конец центрировали конусом задней бабки, люнет не применяли, вход резца в резание и выход были свободными, смазывающе-охлаждающие технологические среды, стружколомы и иные средства дробления стружки не применяли.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты измерений величины износа h_3 по задней поверхности (границы) обобщали в виде графиков зависимости h_3 от времени обработки T (рис. 1). Пластина выполнена из сплава ВК8.

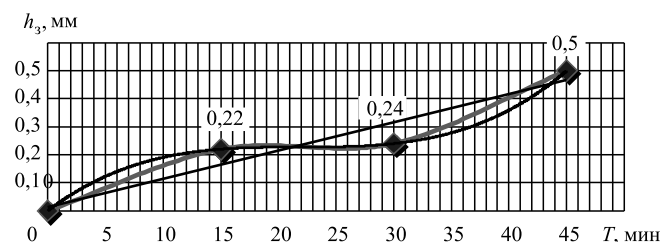


Рис. 1. Зависимость величины износа h_3 от времени T работы твердосплавного инструмента из сплава ВК8

Режим резания: скорость $v = 55$ м/мин; подача $S = 0,21$ мм/об; глубина $t = 1$ мм. Величину износа определяли как среднее по трем опытам.

Характер полученных зависимостей близок к классическому. Доводить величину износа h_3 до больших значений в данном случае не было необходимым. Данные рис. 1 получены для квадратной пластинки (диаметр описывающей окружности 17,5 мм, радиус и фаски при вершине имеют стан-

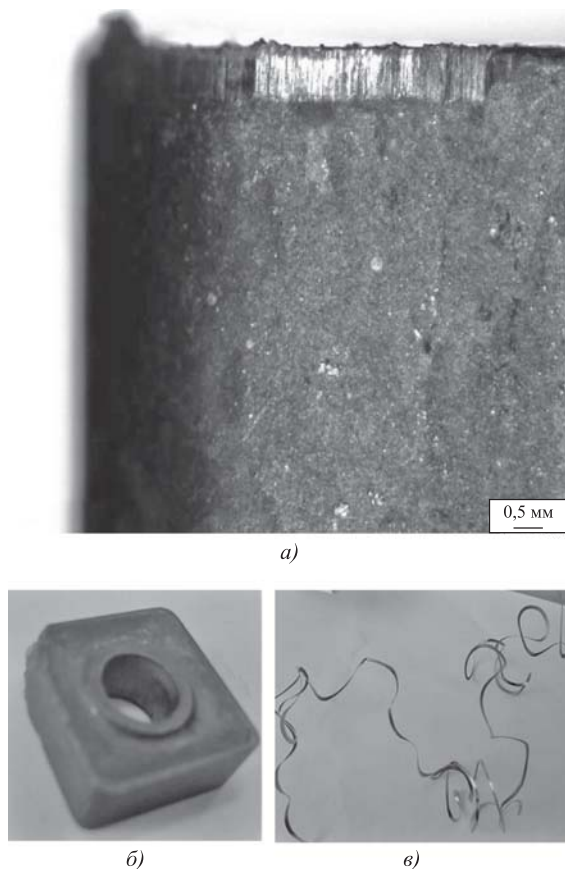


Рис. 2. Состояние режущей пластины после испытаний (а, б), внешний вид стружки (в)

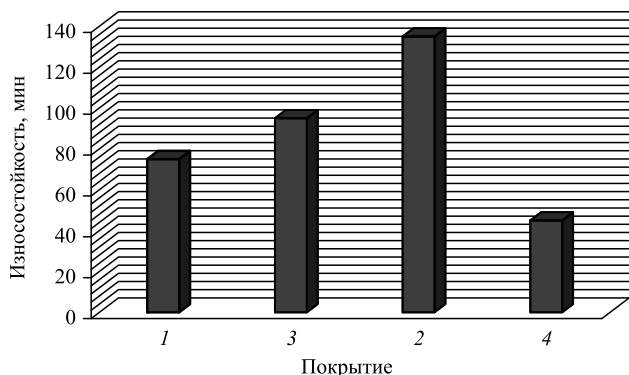


Рис. 3. Сравнительные данные по износостойкости при испытании пластин с различными покрытиями: 1 — ВК8 + покрытие А; 2 — ВК8 + покрытие Б; 3 — ВК8 + покрытие В; 4 — ВК8

дартные значения) с центральным отверстием для ее крепления. Внешний вид пластины после испытаний показан на рис. 2. Видимый на рис. 2, б скол режущей кромки произошел при точении с глубиной $t = 1,5$ мм. Приводимые далее результаты оценивали по отношению к этим базовым результатам.

Далее при аналогичных условиях эксплуатации оценивали величину износа h_3 пластин с различными покрытиями. Результаты испытаний приведены на рис. 3. Исследовали три покрытия, которые имели различную архитектуру (состав и число слоев, толщину слоев, метод нанесения и т.д.), но нанесены были на субстрат (основу ВК8), находящийся в идентичном исходном состоянии. Покрытие А: (AlCr)N (1,5 мкм) + (AlTi)N (2 мкм), (нанесение слоев покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы). Покрытие Б: Ti (до 1 мкм) + TiN (1 мкм) + (NbZrTiAl)N (2,5 мкм), нанесение слоев покрытия методом КИБ с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами. Покрытие В: Ti (до 1 мкм) + TiN (1 мкм) + (TiAl)N (2 мкм) + TiN (0,5 мкм), нанесение слоев покрытия методом КИБ с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами. Сведения о фильтрации капельной фазы и ассистировании ускоренными электронами приведены в работе [4].

Анализ сведений, приведенных на рис. 3, позволяет сделать следующие выводы:

1. Рост износостойкости инструмента с покрытием А по сравнению с покрытием В не существенен (в 1,22 раза), но это обеспечивает увеличение пути резания на 1100 м, что существенно. В сравнении с базовым вариантом это обеспечивает увеличение износостойкости в 1,66 раза и пути резания на 1650 м.

2. Рост износостойкости инструмента, имеющего покрытие Б, по сравнению с покрытием В также не существенен (в 1,42 раза), но это обеспечивает увеличение пути резания на 2200 м. В сравнении с базовым вариантом это обеспечивает рост износостойкости в 3 раза и пути резания на 4950 м.

3. Рост износостойкости инструмента с покрытием Б по сравнению с покрытием А значителен (1,8 раза) и это обеспечивает увеличение пути резания на 3300 м.

4. Из рассмотренных покрытий максимальный период износостойкости достигнут при применении покрытия Б — путь резания 7,4 км, что позволяет обрабатывать заготовки без смены режущей кромки. Это особенно важно для деталей высокой точности и при высокопроизводительной обработке на станках с ЧПУ.

Авторы выражают признательность А.А. Верещаке за помощь в нанесении и исследовании покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панов В.С., Чувилин А.М.** Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2001. 452 с.

2. **Improvement** of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method / A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.DL. Batako et al. // Nanomaterials and Nanotechnology. 2017. Vol. 7. P. 1—13.

3. **Study of Mechanism of Failure and Wear of Multi-Layered Composite Nano-Structured Coating Based on System Ti—TiN—(ZrNbTi) Deposited on Carbide Substrates** / A.A. Vereschaka, B.Ya. Mokritskii, N.N. Sitnikov et al. // Journal of nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110—123.

4. **Сотова Е.С., Верещака А.А., Верещака А.С.** Керамические режущие инструменты. М.: Изд-во МГТУ "СТАНКИН", 2013. 148 с.

УДК 621.7

С.Н. Юркевич, К.С. Юркевич

(ОАО "558 Авиационный ремонтный завод", г. Барановичи, Беларусь),

E-mail: yurkevi4@yandex.by

Применение магнитно-импульсной обработки на образце из стали 12Х18Н10Т с хромовым покрытием

Рассмотрены результаты применения магнитно-импульсной обработки стали 12Х18Н10Т с хромовым покрытием.

Ключевые слова: хромовое покрытие, измененный слой.

The results of magnetic-pulse treatment of steel 12Х18Н10Т with chromium plate is considered.

Keywords: chromium plate, modified layer.

Магнитно-импульсная обработка (МИО) материалов достаточно известна. Она применяется для упрочнения инструмента из быстрорежущих сталей, штамповки деталей из материалов с высокой электропроводностью (меди и ее сплавов, алюминиевых сплавов и т.д.). В данной работе рассмотрены результаты применения МИО стали 12Х18Н10Т с хромовым покрытием.

Проведено исследование микроструктуры, определены качество покрытия, глубина измененного слоя, измерена микротвердость образца в двух сечениях после МИО. Образец из стали 12Х18Н10Т с хромовым покрытием, энергия импульса — 6,2 Дж, число импульсов — 9.

Исследование микроструктуры проводили на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) при увеличениях $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$, измерение микротвердости — на микротвердомере Micromet-II с нагрузкой 0,490 Н (50 гс) по ГОСТ 9450—76.

Стальной образец с хромовым покрытием после магнитно-импульсной обработки с указанием выбранных заказчиком на исследование сечений — возле торца (сечение 1) и посередине (сечение 2) — показан на рис. 1. Микроструктура образца стали с хромовым покрытием после МИО в сечении 1 представлена на рис. 2.

Толщина хромового покрытия составляет 18...20 мкм. Покрытие практически беспористое,

имеет трещины. Пористость составляет не более 1...2 %. На границе раздела покрытие—основа наблюдаются несплошности в виде дырок. На стали в приграничной зоне присутствуют локальные участки МИО глубиной 30...40 мкм (рис. 2, в, е) и участки со сплошным измененным слоем глубиной 10...20 мкм. Микротвердость хромового покрытия составляет 3900...4100 МПа, в приграничной зоне со стороны стали на участке обработки — 2400 МПа, в сердцевине — 1600 МПа.

Микроструктура образца стали с хромовым покрытием после магнитно-импульсной обработки в сечении 2 представлена на рис. 3. Толщина хромового покрытия неравномерна и составляет 10...20 мкм. Покрытие практически беспористое, имеет меньшее количество трещин, чем в сечении 1. Пористость не



Рис. 1. Образец из стали с хромовым покрытием (рег. № 18456) после МИО с указанием вырезки сечений 1 и 2

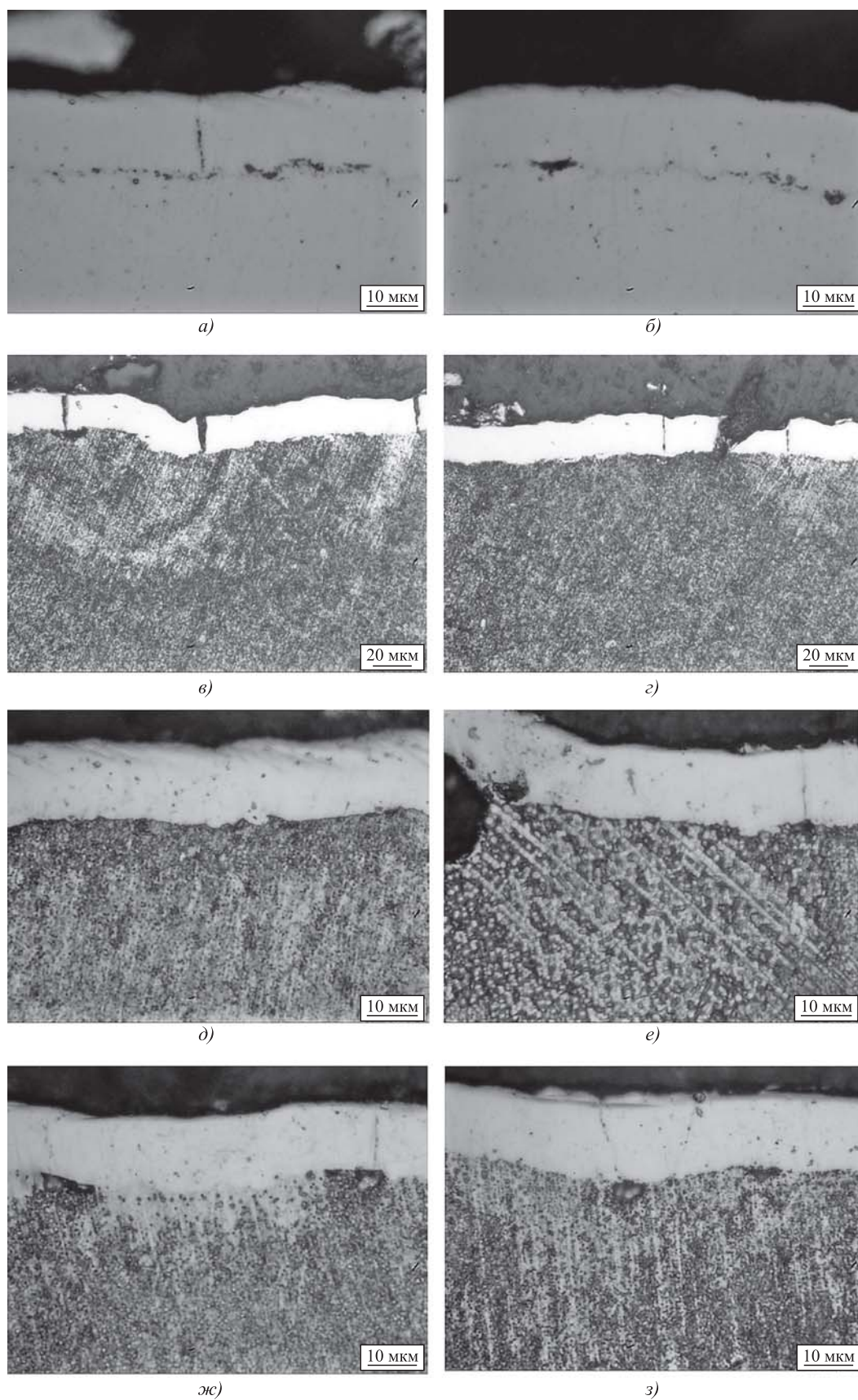


Рис. 2. Микроструктура образца стали с хромовым покрытием после МИО, сечение 1:
a, б, д, e, ж, з — $\times 500$; *в, г* — $\times 200$

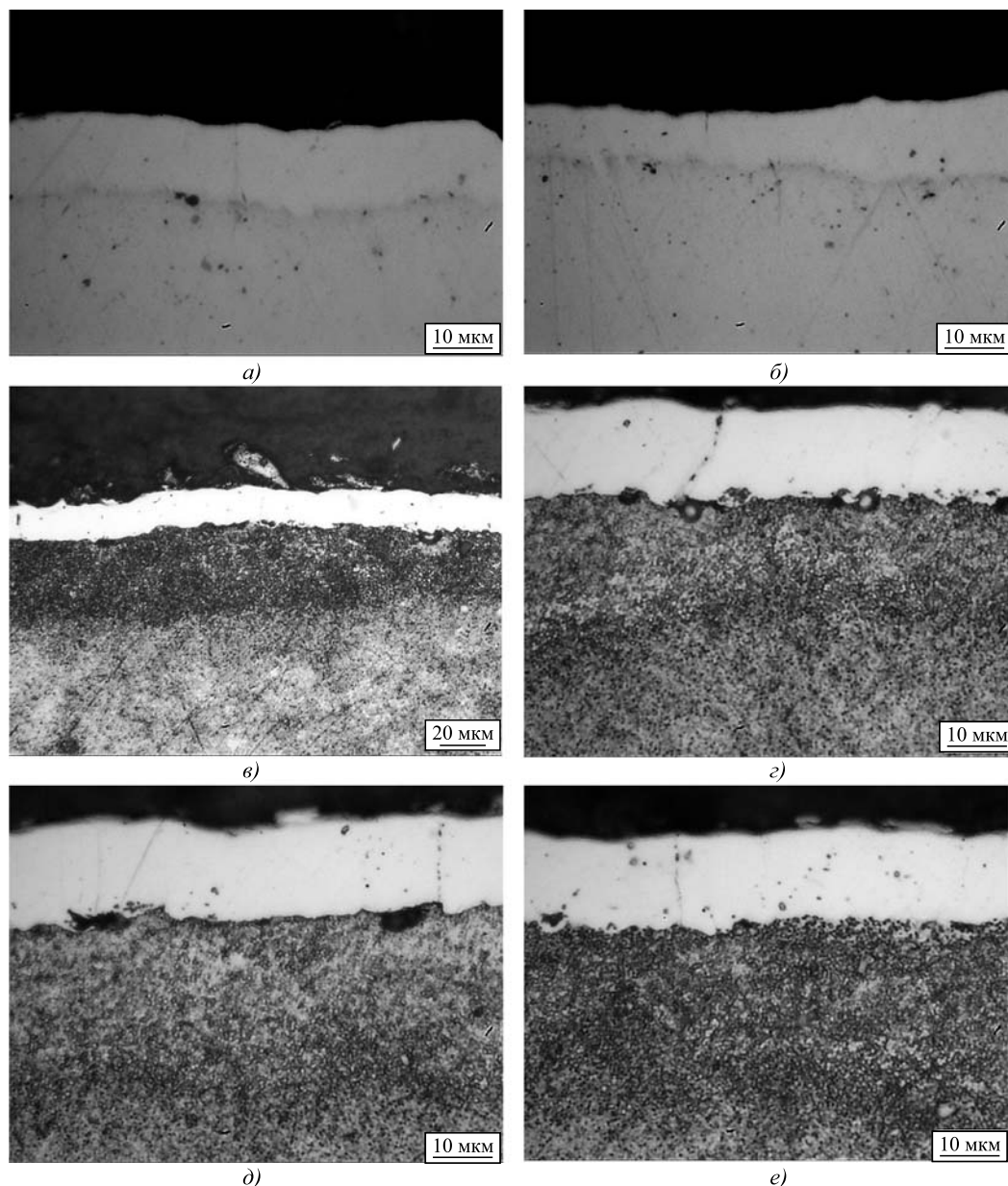


Рис. 3. Микроструктура образца стали с хромовым покрытием после МИО, сечение 2:
a, б, г, д, е — $\times 500$; *в* — $\times 200$

более 1...2 %. На границе раздела покрытие—основа также наблюдаются несплошности в виде дырок. На стали в приграничной зоне присутствует сплошной измененный слой глубиной 40...90 мкм. Микротвердость хромового покрытия — 4000...4400 МПа, в приграничной зоне со стороны стали на участке обработки — 2600...3500 МПа, в сердцевине — 1600 МПа.

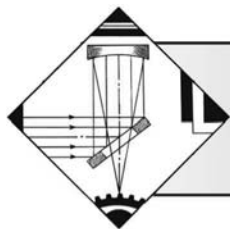
Обычная пористость хромового покрытия, нанесенного гальваническим способом с последующей обработкой алмазным выглаживанием или БУФО, составляет 5 %. После МИО получена пористость 1...2 %.

Трещины на покрытии, возможно, образовались из-за повышенной энергии МИО, воздей-

ствующей на образец. Это подтверждается наличием упрочненного слоя глубиной 40...90 мкм под хромовым покрытием.

Микротвердость упрочненного слоя примерно в 2 раза выше микротвердости основного металла, в пересчете $\sigma = 1050$ МПа, при том, что основной металл имеет $\sigma = 550$ МПа. Микротвердость хромового покрытия соответствует микротвердости молочного хрома.

При корректировке режимов таким образом, чтобы влияние МИО не затрагивало поверхностный слой металла под покрытием, возможно применение МИО для обеспечения герметичного хромового покрытия.



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 539.3

Г.Ж. Сахвадзе

(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва),

О.Г. Киквидзе

(Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия)

E-mail: sakhvadze@mail.ru

Моделирование упрочнения имплантатов тазобедренного сустава из титановых сплавов VT6 с использованием технологии лазерно-ударно-волновой обработки

Лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО) материалов является эффективной современной технологией обработки металлических материалов для их упрочнения. В последнее время данную технологию успешно применяют для имплантатов тазобедренного сустава из титановых сплавов VT6. Проведено его конечно-элементное моделирование с использованием метода собственных деформаций. Оценен уровень возникающих сжимающих остаточных напряжений, возникающих при ЛУВО.

Ключевые слова: лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО), метод конечных элементов, собственные деформации, тазобедренный сустав, остаточные напряжения, титановый сплав VT6.

Laser shock processing (LSP) of materials is effective modern technology for metallic materials processing with view to hardening them. Recently, this technology has been successfully used for implants of the hip replacement of titanium alloys VT6. Its finite element modeling using the eigenstrain simulation is performed. The level of the resulting compressive residual stresses arising at the LSP is estimated.

Keywords: laser shock processing, finite element modeling, eigenstrain, hip replacement, compressive residual stresses, titanium alloy VT6.

Введение

Лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО) материалов — эффективная инновационная технология обработки металлических материалов для их упрочнения. Общая методология технологии ЛУВО состоит в следующем: обрабатываемую поверхность 5 (рис. 1, а) покрывают прозрачным для лазерного излучения слоем с низкой температурой испарения: черной краской, металлической фольгой или лентой 3. Сверху находится прозрачный слой 2, роль которого наиболее часто играет вода. Энергия лазерного импульса 1 поглощается непрозрачным слоем, что приводит к его нагреву, испарению и формированию высокотемпературной плазмы, ограниченной, с одной стороны, поверхностью исследуемого материала, а с другой — прозрачным слоем, сдерживающим распространение плазмы. Вследствие ограниченности объема давление резко возрастает до высоких значений и быстро распространяется в мате-

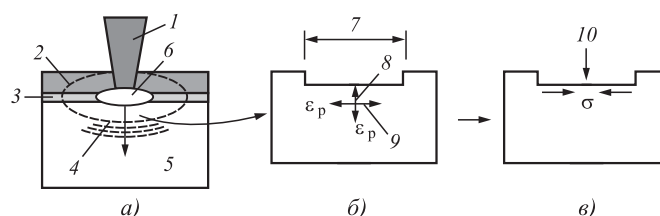


Рис. 1. Схематическое представление технологии ЛУВО и механизма возникновения остаточных напряжений:

а — принципиальная схема технологии ЛУВО; б — возникновение пластических деформаций в приповерхностной области; в — возникновение остаточных напряжений; 1 — лазерный импульс; 2 — прозрачный слой; 3 — непрозрачный слой; 4 — ударная волна; 5 — исследуемый материал; 6 — плазма; 7 — область воздействия лазерного импульса; 8 — сжатый в вертикальной плоскости материал (отрицательные пластические деформации); 9 — растянутый в горизонтальной плоскости материал (положительные пластические деформации); 10 — релаксация деформируемого материала, вызывающая создание поля сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое

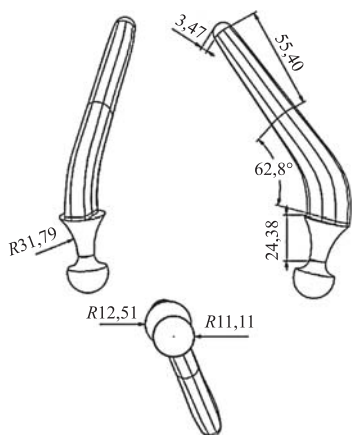


Рис. 2. Геометрические особенности протеза тазобедренного сустава Чарнли (размеры, мм)

риал в виде ударной волны 4, которая способствует появлению в материале сжимающих остаточных напряжений. Если эти напряжения превосходят упругий предел Гюгонио, то материал деформируется пластически [1].

Параметры процесса, необходимые для реализации технологии ЛУВО: нужен короткий (в диапазоне 3...30 нс) и интенсивный (>1 ГВт/см²) лазерный импульс, направленный перпендикулярно к поверхности исследуемого материала. Поверхностный слой при этом мгновенно испаряется (явление абляции) и образуется приповерхностная плазма б (см. рис. 1) с высокими температурой (приблизительно 10 000 К) и давлением (>2 ГПа). Плазма при расширении в результате быстротекающих физико-химических процессов и фазовых превращений излучает ударные волны 4, и механические импульсы распространяются как в среде, так и в твердом теле.

Титановые сплавы ВТ6 хорошо известны за их превосходные механические свойства и хорошую биологическую совместимость, делая их привлекательными в качестве имплантатов [2]. Протезы из ВТ6 тазобедренного сустава успешно применяются в последнее время. В основном, цель хирургического введения искусственного тазобедренного сустава состоит в том, чтобы максимально восстановить кинематику опорно-двигательной системы пациента, выдерживая при этом естественные физиологические нагрузки, минимизировав износ и трение в суставе, избегая вредных реакций со стороны организма.

Материал и геометрические особенности тазобедренного сустава

Выбранный материал для численного анализа в настоящих исследованиях — известный биосов-

местимый материал титановый сплав ВТ6. Выбранная форма тазобедренного сустава — стандартный протез Чарнли (Charnley), геометрические особенности которого представлены на рис. 2 [2]. Геометрия протеза сильно влияет на его биомеханические характеристики, а также и на биосовместимость.

Форма протеза Чарнли с гладкими поверхностями уменьшает концентрации напряжения и увеличивает долговечность протеза. Сложность геометрии протеза Чарнли требует тщательной предварительной подготовки его макета в САЕ-системе в виде IGES-файла прежде, чем импортировать его для проведения прочностных расчетов в конечно-элементных пакетах LS-DYNA и ANSYS.

Концепция метода собственных деформаций

Прежде всего, необходимо создание наглядной физической модели, объясняющей механизм возникновения пластических деформаций, и, соответственно, остаточных напряжений, возникающих при ЛУВО. После этого следует выбрать адекватные численные методы для реализации данной физической модели.

При однократном ЛУВО (см. рис. 1, а) во время и в области воздействия лазерного излучения поверхностный слой испытывает растягивающие пластические деформации в горизонтальной плоскости и сжимающие пластические деформации — в вертикальной плоскости (см. рис. 1, б). После прекращения воздействия лазерного импульса наступает период релаксации напряжений, во время которого деформированная часть материала подвергается сжатию со стороны окружающей ее недеформированной части материала (см. рис. 1, в). Таким образом, пластические деформации, вызванные ударной волной, созданной при ЛУВО, генерируют в материале поле сжимающих остаточных напряжений (СОН). Отклик материала можно считать упругим, так как к моменту начала процесса релаксации пластические деформации уже полностью сформированы и они стабильны. Поэтому имеем все основания считать, что поле СОН, сформированных при ЛУВО, является статическим упругим откликом материала на начальную ударную волну в случае, если предварительно там введены уже сформированные стабильные пластические деформации (так называемые собственные деформации). Важно заметить, что использование термина "собственная деформация" позволяет исследователю абстрагироваться от природы возникновения той или иной пластической деформации.

В настоящей работе предложена практическая реализация в конечно-элементных пакетах LS-DYNA и ANSYS сравнительно нового подхода — метода собственных деформаций (МСД) — для решения задач определения остаточных напряжений при ЛУВО.

Термин "собственные деформации" впервые ввел Н. Reissner в 1931 г. [3]. Под этим термином он понимал неупругие деформации, соответствующие самоуравновешенным остаточным напряжениям. В 1991 г. Т. Mura [4] предложил более общее определение собственной деформации, принятое в современной научной литературе. В рамках геометрически линейной теории это могут быть неупругие деформации любой природы (температурные, пьезоэлектрические, пластические, ростовые, фазовые и др.).

Деформации будем считать аддитивными, в этом случае тензор малой деформации ε можно представить суммой упругой ε_e и собственной ε^* деформаций [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon^* \quad (1)$$

В случае отсутствия собственных деформаций любое упругое тело свободно от остаточных напряжений. Продолжая аналогию, можно заключить, что случай наличия остаточных напряжений может быть представлен как некое распределение по исследуемому объему собственных деформаций (как в конечно-элементном моделировании, так и в аналитических исследованиях).

А.М. Корсунский предложил общий метод определения собственных деформаций [6], который нашел множество приложений, в частности, в задачах сварки, упрочнения, лазерной формовки. Его практическая важность заключается в том, что если определены собственные деформации, создаваемые технологией ЛУВО для образцов с простой геометрией, то их можно распространять и на образцы с более сложной геометрией. Этот принцип, впервые сформулированный А.М. Корсунским в работе [5], назван им "принципом переносимости собственных деформаций".

Собственные деформации, вызванные технологией ЛУВО ($\varepsilon^*_{ЛУВО}$), можно определить следующими линейными уравнениями Гука [6]:

$$\varepsilon^* = \begin{bmatrix} \varepsilon^*_{ЛУВО,xx}(z) \\ \varepsilon^*_{ЛУВО,yy}(z) \\ \varepsilon^*_{ЛУВО,zz}(z) \end{bmatrix} = -\frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{ЛУВО,xx}(z) \\ \sigma_{ЛУВО,yy}(z) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\sigma_{ЛУВО}$ — остаточные напряжения, вызванные технологией ЛУВО.

Стратегия численного моделирования

Предложенная стратегия численного конечно-элементного моделирования определения полных остаточных напряжений в тазобедренном суставе при ЛУВО состоит из двух шагов: 1) вычисление собственных деформаций, вызванных применением технологии ЛУВО, решая явную задачу динамического анализа посредством МКЭ-пакета LS-DYNA; 2) вычисленные на шаге 1 собственные деформации вводятся в качестве входа для упругого моделирования в целях определения полных остаточных напряжений, вызванных в тазобедренном суставе при ЛУВО, путем решения неявной задачи ANSYS (графически это представлено на рис. 3).

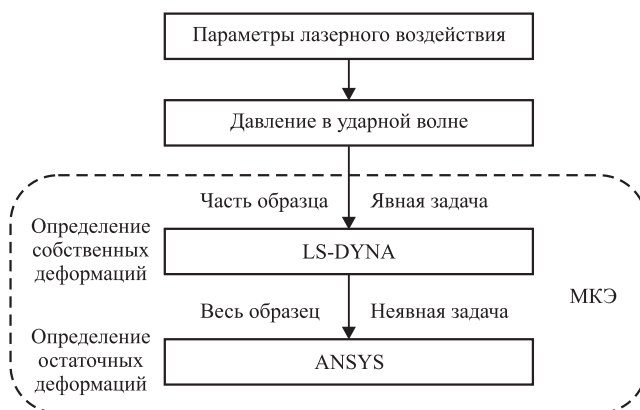


Рис. 3. Стратегия численного моделирования

Приложение ударной нагрузки

Для выбора оптимальной формы импульса и упрощения численного анализа лучше использовать экспериментальные данные, которые показывают [7], что давление сначала резко повышается, а затем медленно снижается. Поэтому в последних исследованиях справедливо аппроксимируют изменение давления треугольным импульсом [8–10]. На рис. 4 приведены некоторые возможные варианты простых треугольных приближений: a — пиковое давление p_{max} продолжительностью T_p действует в центре импульса; b — быстрое повышение давления с последующим постепенным снижением; v — аналогичен варианту a , но есть горизонтальный участок, соответствующий p_{max} ; z — аналогичен варианту b , но с билинейной формой снижения давления. Так как в настоящей работе основное внимание уделяется физическому моделированию возникновения ОН при ЛУВО, целесообразно выбрать относительно простую форму импульса, например

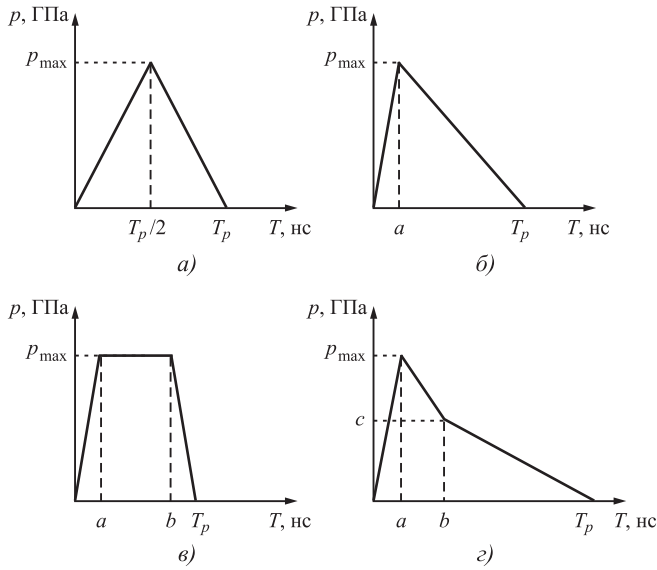


Рис. 4. Профили давления p в ударной волне в простейшей треугольной аппроксимации:
 a — 2 неизвестных (p_{\max} , T_p); b — 3 неизвестных (p_{\max} , T_p , a); v — 4 неизвестных (p_{\max} , T_p , a , b); z — 5 неизвестных (p_{\max} , T_p , a , b , c)

треугольную (см. рис. 4, a), характеризующуюся только двумя параметрами (p_{\max} и T_p), и при этом имеющую удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными [7].

Вычисление собственных деформаций, вызванных применением технологии ЛУВО (явная задача)

Для вычисления собственных деформаций, вызванных применением технологии ЛУВО, решают явную задачу в LS-DYNA. Здесь решается задача распространения ударной волны в твердом материале со специфическим рассмотрением упруго-пластического поведения материала. При ЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают значений 10^6 с^{-1} и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния используется модель пластического деформирования материала Джонсона—Кука [9].

Большое количество элементов в конечно-элементной модели, особенно в явной задаче, ведет к очень долгим вычислительным процедурам. Однако они могут быть легко преодолены при использовании моделирования собственных деформаций. Так как полные остаточные напряжения, вызванные технологией ЛУВО, геометрически независимы, рассматриваем только маленькую

часть исследуемого образца с относительно простой геометрией, получив распределение полных остаточных напряжений по глубине. Имея такой профиль распределения, легко получаем собственные деформации, вызванные использованием ЛУВО ($\varepsilon_{\text{ЛУВО},ij}^*$).

Вычисление остаточных напряжений путем упругого моделирования (неявная задача)

После определения собственных деформаций ($\varepsilon_{\text{ЛУВО},ij}^*$), вызванных использованием технологии ЛУВО (шаг 1), они используются в качестве входа в упругом моделировании (шаг 2), что позволяет определять полные остаточные напряжения, вызванные ЛУВО для всего исследуемого образца, а не только для его участка с простой геометрией.

Полученные собственные деформации вводятся как анизотропные коэффициенты теплового расширения α_{ij} , путем ввода их в соответствующей подпрограмме ANSYS:

$$\alpha_{ij} = \varepsilon_{\text{ЛУВО},ij}^* \tag{3}$$

Так как α_{ij} включает в себя 6 независимых компонентов, процедура счета позволяет описать любые возможные состояния собственных деформаций. После этого запускается неявный решатель ANSYS с температурной вариацией $\Delta T = 1$ и решается прямая термоупругая задача. Исследуемый образец упруго деформируется согласно уравнению:

$$\varepsilon_{\text{упр},ij} = \alpha_{ij} \Delta T \tag{4}$$

Перерасчетом по закону Гука получаем распределение ОН ($\sigma_{\text{ЛУВО}}$) для всего образца на каждом шаге. В конечно-элементном анализе используются тетраэдральные элементы C3D4T (линейными смещением и температурой), в узлах которых вводятся температурные деформации.

Как было отмечено выше, собственные деформации — это смесь всех неупругих деформаций различного происхождения без возможности их разделения на компоненты. Поэтому представление при моделировании собственных деформаций в виде термических деформаций вполне корректно и дает те же результаты.

Полученные результаты и их обсуждение. Остаточные напряжения, возникшие в тазобедренном суставе в результате обработки по технологии ЛУВО

Рассмотрим процесс определения остаточных напряжений, возникших в тазобедренном суставе со сложной геометрией в результате его обработ-

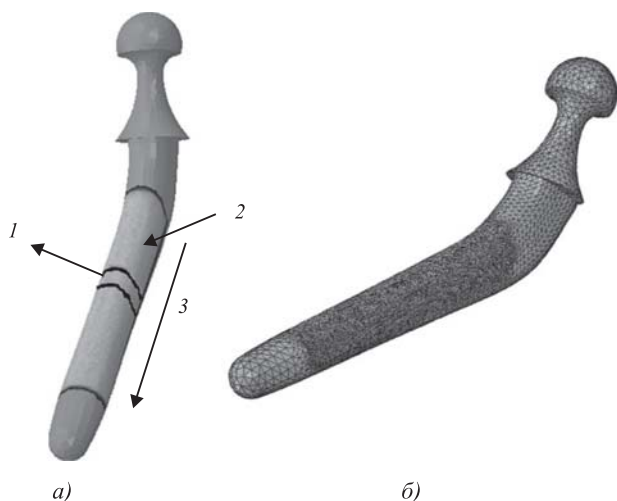


Рис. 5. Макет тазобедренного сустава:
a — уменьшенная (1) и целая (2) области макета тазобедренного сустава, 3 — направление сканирования;
б — конечно-элементная сетка ANSYS

ки по технологии ЛУВО, используя метод собственных деформаций.

На рис. 5, *a* представлен 3D-макет протеза тазобедренного сустава, созданного в САЕ-системе для дальнейшего конечно-элементного анализа. Стратегия численного моделирования заключается в следующем. На первом этапе, как было отмечено выше, решается явная задача в пакете LS-DYNA для малой части макета (участок 1 на рис. 5) длиной 10 мм. Происходит обработка этой части по технологии ЛУВО, применяя лазерное воздействие со следующими параметрами: диаметр лазерного пятна — 1,5 мм, степень перекрытия лазерных пятен — 78 %. Такая высокая степень перекрытия лазерных пятен, как показывает накопленный опыт, уменьшает градиент поверхностных остаточных напряжений, обеспечивая их относительную однородность и сглаженный профиль. Получаем распределение собственных деформаций ($\varepsilon_{\text{ЛУВО}}^*$) для этого участка. На втором этапе происходит реконструкция собственных деформаций для всей области макета (участок 2 на рис. 5) длиной 80 мм в конечно-элементной модели (рис. 5, *б*), состоящей из 300 240 конечных элементов типа С3Д4Т, импортируя сюда полученные на первом этапе собственные деформации ($\varepsilon_{\text{ЛУВО}}^*$). На третьем этапе в соответствующем решателе ANSYS решается неявная задача с определением полей остаточных напряжений.

Проведенные ранее исследования показывают [2], что существует почти линейная зависимость между кривизной материала и возникшими вследствие наличия кривизны дополнительными

сжимающими остаточными напряжениями: наблюдается тенденция увеличения остаточных напряжений для вогнутых поверхностей и спад — для выпуклых поверхностей. Такая интересная взаимосвязь может быть объяснена из энергетических соображений как следствие увеличения или уменьшения энергий пластической диссипации, возникающих в образцах с криволинейными геометриями по сравнению с плоскими геометриями.

К сожалению, экспериментальные измерения остаточных напряжений в образцах с криволинейной геометрией, а также на краях, не могут быть корректно выполнены. По этой причине численное моделирование является необходимым инструментом для учета краевого эффекта и эффекта кривизны. Для ответственных узлов, например таких, как биопротезы, крайне важно знание реального распределения остаточных напряжений перед началом их практической эксплуатации.

На рис. 6 показаны распределения внутренних остаточных напряжений двух различных сечений вдоль осей *x* и *y*.

На рис. 7 показано сравнение между моделируемыми в настоящей работе остаточными напряжениями (по оси *x*), генерируемыми при ЛУВО, и экспериментальными остаточными напряжениями, наведенными при использовании традиционной дробеструйной обработке, широко используемой в настоящее время для обработки протезов тазобедренного сустава. Как видно, глубина СОН, созданных при использовании технологии ЛУВО, более чем в 4 раза больше, чем при дробеструйной обработке. Это также доказывает, что технология

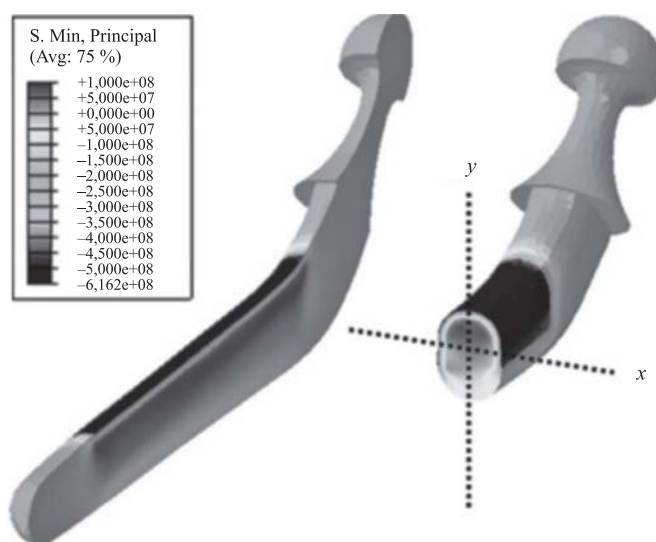


Рис. 6. Внутренние остаточные напряжения в конечно-элементном макете тазобедренного сустава, вызванные технологией ЛУВО

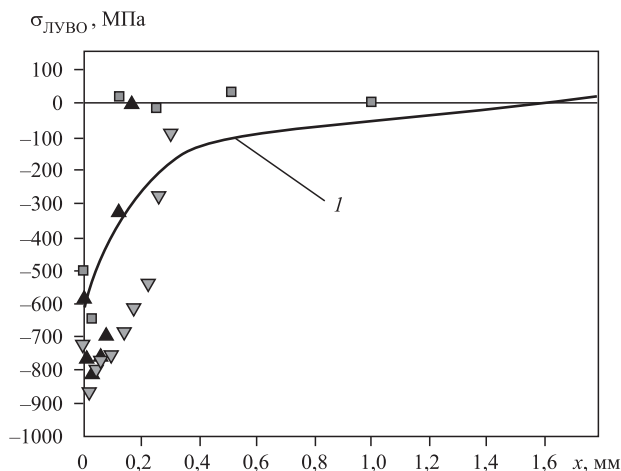


Рис. 7. Сравнение распределения остаточных напряжений по глубине, созданных по технологии ЛУВО (1) и по различным экспериментальным данным (значки), полученными методом дробеструйной обработки (экспериментальные данные [7])

ЛУВО создает гораздо более глубокие СОН, чем другие альтернативные технологии.

Выводы

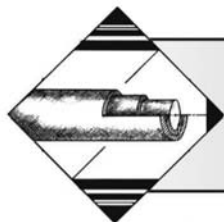
Разработана численная конечно-элементная модель расчета полей остаточных напряжений, вызванных технологией лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) в тазобедренном суставе из титанового сплава ВТ6. Модель реализует все основные физические процессы, протекающие при прохождении ударной волны в реальных трехмерных криволинейных объектах. Вычислительные трудности, возникающие в аналогичных задачах, были преодолены путем использования метода собственных деформаций (МСД). Были вычислены сжимающие остаточные напряжения (СОН), возникающие при ЛУВО в протезе тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ6. Полученные результаты показали, что технология ЛУВО в протезах тазобедренного сустава может сгенерировать СОН больше 600 МПа, при этом глубина залегания СОН — более 1,60 мм, что более чем в 4 раза больше, чем при применяющейся в настоящее время в целях их упрочнения технологии дробеструйной обработки. Полученные результаты, подтвержденные доступными в литературе экспериментальными результатами, показывают, что технология ЛУВО может быть успешно применена для упрочнения протезов тазобедренных суставов в целях создания в них глубоких СОН,

существенно повышая их прочность, долговечность, а также износо- и коррозиестойкость.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН М.А. Бубнову за помощь в проведении расчетов в конечно-элементных пакетах LS-DYNA и ANSYS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Analysis** of laser shock waves and resulting surface deformations in an Al—Cu—Li aluminum alloy / P. Peyre, L. Berthe, V. Vignal et al. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 303—335.
2. **Hip** prosthesis computational modeling: FEM simulations integrated with fatigue mechanical tests, Biomechanics imaging and computational modeling in biomechanics / I. Campioni, G. Notarangelo, U. Andreass et al. // *Lecture notes in computational vision and biomechanics.* 2013. V. 4. P. 81—109.
3. **Reissner H.** Eigenspannungen und Eigenspannungsquellen // *Z. Angew. Math. Mech.* 1931. V. 11. P. 1—8.
4. **Mura T.** *Micromechanics of Defects in Solids.* Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 1991. 587 p.
5. **Korsunsky A.M.** Residual elastic strain due to laser shock peening: modelling by eigenstrain distribution // *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2006. V. 41 (3). P. 195—204.
6. **DeWald A.T., Hill M.R.** Eigenstrain-based model for prediction of laser peening residual stresses in arbitrary three-dimensional bodies Part 1: model description // *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2009. V. 44. P. 1—11.
7. **Investigation** on experiments and numerical modelling of the residual stress distribution in deformed surface layer of Ti—6Al—4V after shot peening / L. Xie, J. Zhang, C. Xiong et al. // *Mater. Des.* 2012. V. 41. P. 314—318.
8. **Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В.** Лазерно-ударно-волновая обработка материалов при однократных и многократных импульсных воздействиях // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2015. № 6. С. 75—80.
9. **Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г.** Особенности упрочнения материалов технологией лазерно-ударно-волновой обработки // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2016. № 9 (141). С. 20—25.
10. **Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г.** Технология двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки материалов // *Вестник машиностроения.* 2016. № 10. С. 71—76.



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9.07

¹Л.С. Белевский, ²Е.Л. Юреть, ³М.А. Леванцевич, ²Е.В. Пилипчук, ¹Р.Р. Дема
(¹Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова,
²Белорусский национальный технический университет, г. Минск,
³Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)
E-mail: demarr78@mail.ru

Исследование структуры и свойств хромовых покрытий, нанесенных методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом*

Приведены результаты исследований микроструктур хромовых покрытий, сформированных электрофрикционным плакированием. Показано, что сформированное хромовое покрытие не имеет видимых границ внутри покрытия, однородно по структуре и без деформированной зоны под покрытием. Результаты триботехнических испытаний образцов с хромовым покрытием показали, что при дополнительном модифицировании поверхности слоем фторопласта коэффициент трения снижается в 1,5 раза.

Ключевые слова: плакирование, покрытие, износостойкость, испытание.

Results of researches of microstructures of the chromium coatings created by electrofrictional cladding are presented. It is shown that the created chromic coating has no visible borders in coating, it is uniform in structure and without the deformed zone under coating. Results of tribotechnical models of test with chromium coating have shown what at additional modifying of surface layer of the fluoroplastic occurs to decrease in coefficient of friction by 1.5 times.

Keywords: cladding, coating, wear resistance, test.

Введение

Нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности деталей триботехнического назначения — эффективный технологический прием, используемый для повышения работоспособности узлов трения машин и механизмов. Одним из них является достаточно простой в реализации, мало энерго- и металлоемкий, экологически чистый и высокопроизводительный метод обработки изделий — метод деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка (ВМЩ) с проволоочным ворсом [1—5].

Опыт практического применения метода ДПГИ на промышленных предприятиях показал, что, несмотря на свою высокую эффективность, он имеет и ряд существенных недостатков. К их числу следует отнести малую толщину формируемых слоев покрытия, ограниченный перечень наносимых материалов, невозможность формирования покрытий из твердых и тугоплавких материалов и др. В этой связи в целях устранения указанных недостатков и расширения технологических возможностей метода предложено процесс плакирования осуществлять с подачей электрического напряжения в зону контакта ворса щетки с материалом-донором и поверхностью детали. По этой причине способ назван электрофрикционным плакированием [6]. Общий вид изготовленного устройства для электрофрикционного плакирования приведен на рис. 1.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-38-50226 "мод_нр".

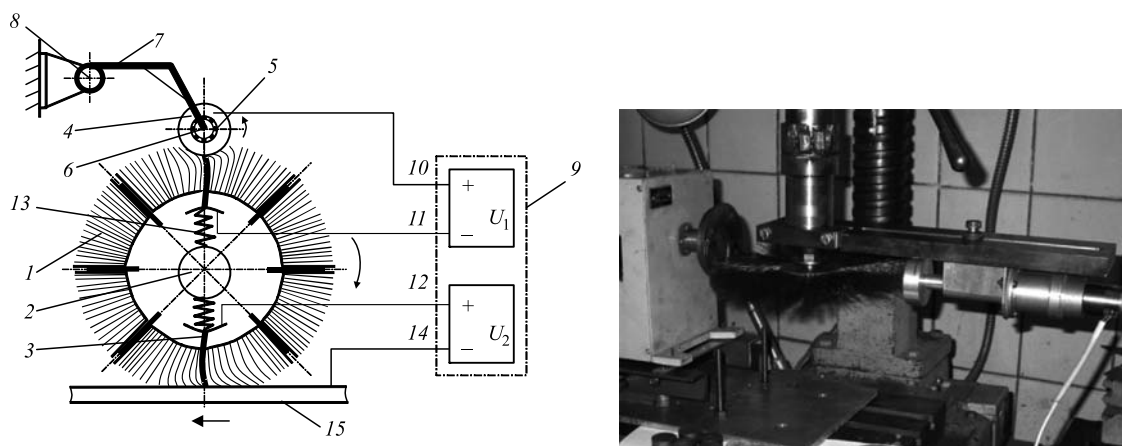


Рис. 1. Устройство для формирования покрытий методом электрофрикционного плакирования:

1 — металлическая щетка, выполненная в виде электрически изолированных друг от друга секторов; 2 — вал привода вращения (на рисунке показан условно); 3 — пластины из нихрома; 4 — элемент из материала покрытия; 5 — упорный узел; 6 — ось; 7 — кронштейн; 8 — ось; 9 — генератор импульсов; 10—12, 14 — вывод; 13 — токо-съемник; 15 — поверхность детали

В современном машиностроении широкое применение получили покрытия на основе хрома. Их используют для защиты от коррозии и износа различных деталей машин, станков и технологического оборудования. Наиболее широко подобные покрытия применяют для хромирования деталей гидравлических систем (штоков и рабочих поверхностей гидроцилиндров, плунжерных пар и др.) [7]. Как правило, для формирования хромовых покрытий используют технологии гальванического осаждения, которые обеспечивают получение качественных покрытий. Однако одну из серьезных проблем при их реализации представляют дорогостоящая очистка и последующая утилизация отработанных электролитов. Поэтому авторы предлагают провести нанесение покрытий на основе хрома с применением метода электрофрикционного плакирования гибким инструментом.

Методика проведения эксперимента

Для испытаний были подготовлены образцы в виде плоских дисков из стали 40Х диаметром 71 мм и толщиной 5 мм, твердостью 50 НRC.

На плоских поверхностях дисков методами гальванического осаждения и электрофрикционного плакирования формировали покрытия на основе хрома. Часть дисков после формирования хромового покрытия электрофрикционным плакированием была подвергнута обработке обычным деформационным плакированием с нанесением поверх слоя хрома покрытий из фторопласта Ф-4 и баббита Б83.

При формировании покрытия методом электрофрикционного плакирования использовали металлическую щетку с восьмью нихромовыми пластинами-вставками диаметром 200 мм, с вылетом ворса 60 мм. Линейная скорость вращения щетки составляла 35 м/с, значение натяга ворса щетки — 1,2 мм, число проходов — 6. Напряжение и сила тока, подаваемые на материал-донор и вставные нихромовые пластины, составляли 40 В и 90 А соответственно. Положительный полюс подводили к металлу покрытия, а отрицательный — к вставным нихромовым пластинам.

Для формирования покрытий из фторопласта Ф-4 и баббита Б83 обычным деформационным плакированием использовали цилиндрическую щетку с проволочным ворсом (200×10×22 мм), с диаметром и вылетом ворса соответственно 0,2 и 60 мм. Линейная скорость вращения щетки от 25 до 30 м/с, значение натяга ворса щетки — 0,5...1,0 мм, число проходов — 6.

Толщина слоя хромовых покрытий составляла 12...15 мкм. Толщина двухслойных покрытий хром—фторопласт Ф-4 и хром—баббит Б83 составляла 18...20 мкм.

Структура сформированного покрытия приведена на рис. 2. Стальные поверхности после нанесения хромового покрытия электрофрикционным плакированием приобретают белый, характерный хрому цвет, а микроструктура покрытия на уровне оптической микроскопии указывает на то, что покрытие толщиной до 10...15 мкм формируется ровным слоем, без видимых границ внутри покрытия, с однородной структурой и без деформированной зоны под покрытием.

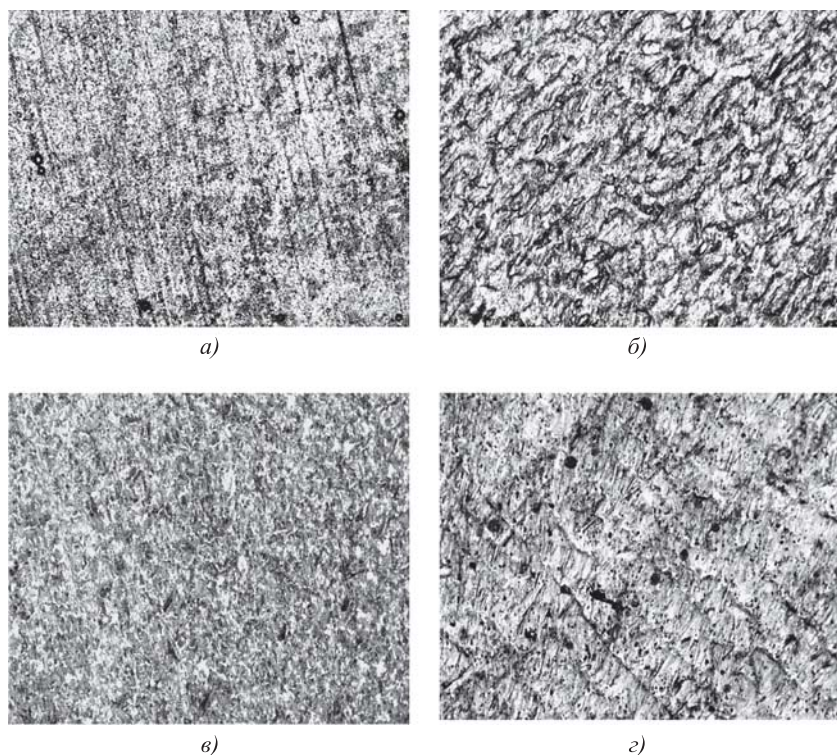


Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов с покрытием на основе хрома на образцах из стали 40X ($\times 100$):

а — с гальваническим хромовым покрытием; *б* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием; *в* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; *г* — с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83

Исследование триботехнических характеристик сформированных покрытий

Испытания подготовленных образцов проводили в режиме "сухого трения" (без смазочного материала) на специальном испытательном стенде, представленном на рис. 3.

В качестве контролобразцов использовали цилиндрические ролики диаметром 6 мм и длиной 12 мм, изготовленные из маслостойкой резины с модулем упругости 15 МПа.

Износ роликов и дисков оценивали по убыли их массы на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г.

Диски с покрытием и без покрытия подвергали сравнительным испытаниям на трение и изнашивание на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение резинового индентора по плоской поверхности диска (рис. 4). Частота вращения диска составляла $7,3 \text{ мин}^{-1}$, относительная скорость скольжения индентора по диску — $0,011...0,019 \text{ м/с}$, удельная нагрузка — $0,5 \text{ МПа}$. В ходе испытаний регистрировали коэффициент

трения скольжения $f_{\text{тр}}$ между трущимися образцами, а также износ индентора и диска, определяемый весовым методом. Время испытаний варьировалось от 50 до 70 мин для обеспечения пути трения, соответствующего 45 м.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты триботехнических испытаний показали, что хромовое покрытие, сформированное электрофрикционным плакированием, имеет наибольший коэффициент трения скольжения $f_{\text{тр}} = 0,90...0,92$ (см. рис. 4, образец № 3) по сравнению с другими образцами. Это объясняется тем, что указанное покрытие имело более высокое значение параметра шероховатости ($Ra = 1,25 \text{ мкм}$) поверхности, что обусловило повышенную сопротивляемость сдвиговым нагрузкам, возникающим в результате трения образцов.

Минимальный коэффициент трения скольжения ($0,42...0,45$) имел образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4 (см. рис. 4, образец № 4). Нанесение слоя фторопла-



Рис. 3. Машина трения для проведения триботехнических испытаний

ста обеспечило улучшение шероховатости плакированного хромового покрытия. В результате плакирования с нанесением слоя фторопласта произошло сглаживание поверхности хромового покрытия. При этом частички фторопласта заполнили все микроуглубления между частичками хрома, обеспечив тем самым гладкую ровную поверхность (см. рис. 2, в).

То же самое имело место и при нанесении слоя баббита Б83, однако значение коэффициента трения $f_{тр}$ составило 0,60...0,62, что в среднем в 1,4 раза выше, чем у двухслойного покрытия хром—фторопласт Ф-4. В данном случае это можно объяснить тем, что фторопласт Ф-4, по сравнению с баббитом Б83, обладает лучшими триботехническими свойствами.

Значения $f_{тр}$ у образцов с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия составили в среднем 0,68 и 0,54 соответственно.

Анализ данных по износу образцов (рис. 5) позволяет заключить, что резиновые контрообразцы при трении по дискам с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия (см. рис. 5, образцы № 1, 2) практически не изнашиваются. Имеет место только износ дисков.

Незначительный износ подобных контрообразцов наблюдается и при трении по диску с двухслойным покрытием хром—баббит Б83 (см. рис. 5, образец № 5). В данном случае износ диска значительно превышает износ контрообразца.

Максимальный износ резиновых контрообразцов наблюдался при трении по диску с электрофрикционно-плакированным хромовым покрытием (см. рис. 5, образец № 3). Это объясняется тем, что вследствие высокой шероховатости и твердости поверхности диска с хромовым покрытием в процессе трения резиновый контрообразец интенсивно истирается, в то время как изнашивание диска протекает в значительно меньшей степени. При этом износ диска был меньше износа других образцов.

Истирание резинового контрообразца наблюдалось и при трении по диску с двухслойным покрытием хром—фторопласт (см. рис. 5, образец

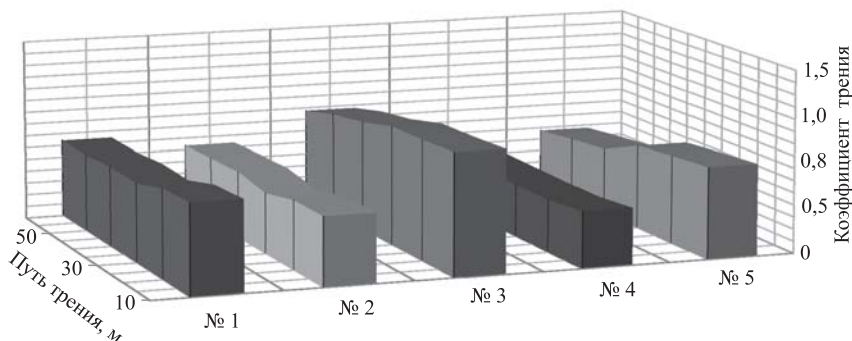


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента трения скольжения резинового контрообразца по поверхности образца с покрытием от пути трения:

№ 1 — образец с гальваническим хромовым покрытием; № 2 — образец без покрытия; № 3 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием; № 4 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; № 5 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83

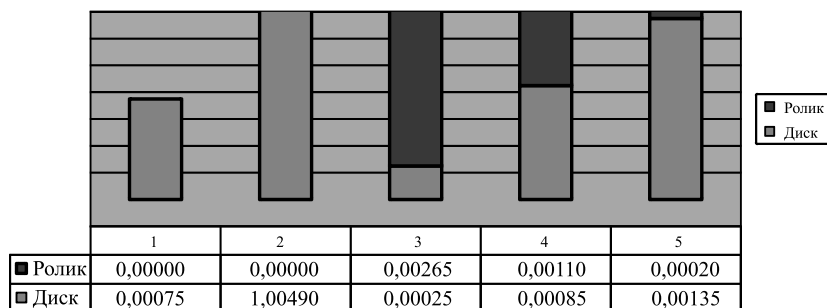


Рис. 5. Зависимость весового износа, г, дисков с хромовым покрытием и резиновых контрообразцов:

№ 1 — образец с гальваническим хромовым покрытием; № 2 — образец без покрытия; № 3 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием; № 4 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем фторопласта Ф-4; № 5 — образец с электрофрикционно-плакированным покрытием с нанесенным поверх слоем баббита Б83

№ 4). В данном случае, несмотря на относительно невысокие значения $f_{тр}$, наблюдался износ как контрообразца, так и диска.

Выводы

1. Исследована структура хромовых покрытий, сформированных электрофрикционным плакированием. Установлено, что сформированное электрофрикционным способом хромовое покрытие не имеет видимых границ внутри покрытия, однородно по структуре и без деформированной зоны под покрытием.

Внешняя поверхность покрытия состоит из мелких и крупных частиц подплавленного хрома, хаотично разбросанных по поверхности, что обуслав-

ливаает повышенную шероховатость поверхности. Параметр шероховатости Ra у образца с хромовым покрытием, сформированным электрофрикционным плакированием, составляет 1,25 мкм, что на 30 % выше, чем у образцов без покрытия и с хромовым покрытием, сформированным гальваническим осаждением.

2. Разработана методика, изготовлены экспериментальные образцы деталей с хромовым покрытием и проведены их триботехнические испытания, где в качестве контробразца использовали ролики (инденторы), изготовленные из маслостойкой резины с модулем упругости 15 МПа, а условия испытаний соответствовали условиям работы резиновых манжет в уплотнениях валов мобильных машин и технологического оборудования.

Установлено, что хромовые покрытия, сформированные электрофрикционным плакированием без последующей финишной обработки шлифованием, обладают худшими триботехническими свойствами, чем гальванические хромовые покрытия со шлифовкой поверхности.

Модифицирование поверхности электрофрикционно-плакированных хромовых покрытий с дополнительным нанесением слоя фторопласта Ф-4 способствует снижению (до значений 0,42...0,45) коэффициента трения скольжения в 1,5 раза, по сравнению с образцом с гальваническим хромовым покрытием и без покрытия. Однако, несмотря на значительное снижение коэффициента трения, суммарный износ резинового контробразца и диска с двухслойным покрытием хром — фторопласт Ф-4 выше, чем у аналогичных образцов с гальваническим покрытием.

3. Модифицирование поверхности электрофрикционно-плакированных хромовых покры-

тий дополнительным нанесением слоя баббита Б83 не дает существенных преимуществ по сравнению с образцами с гальваническими хромовыми покрытиями и без покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Белевский Л.С.** Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. Магнитогорск: Магнитогор. лицей РАН, 1996. 230 с.
2. **Анцупов В.П.** Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
3. **Белевский Л.С., Кадошников В.И., Плотников Г.В.** Поверхностное упрочнение металлическими щетками // Вестник машиностроения. 1987. № 10. С. 24—26.
4. **Расширение** технологических возможностей метода плакирования гибким инструментом / В.И. Кадошников и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 64—66.
5. **Завалишин А.Н.** Механизм образования покрытий, сформированных во фрикционном контакте // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 2. С. 197—202.
6. **Белевский Л.С., Белевская И.В.** Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Вып. 38. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. С. 158—163.
7. **Пат. 2138579 РФ, МПК⁶ С 23 С 26/00.** Способ упрочнения деталей с одновременным нанесением композиционных покрытий. Самарский государственный технический университет. № 97116694/02; заявл. 07.10.97; опубл. 27.09.99.

Ю.В. Литовка, М. Насраоуи, О.А. Кузнецова, Н.В. Майстренко
(Тамбовский государственный технический университет)
E-mail: polychem@list.ru

Модифицированные однослойными углеродными нанотрубками хромовые гальванические покрытия

Проведено экспериментальное исследование выхода по току технологического процесса получения наномодифицированного однослойными углеродными нанотрубками хромового гальванического покрытия из стандартного электролита, а также микротвердости полученного осадка. Выявлено, что выход по току снижается при увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок. Микротвердость хромового покрытия возрастает до 8580 МПа при увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок до 50 мг/л (по сравнению с хромовым покрытием, полученным из стандартного электролита хромирования без добавок, увеличение микротвердости составляет 16 %). При дальнейшем увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок микротвердость хромового покрытия уменьшается.

Ключевые слова: хромовое гальваническое покрытие, одностенные углеродные нанотрубки, выход по току, микротвердость.

Experimental study of the current output of technological process for the production of chromium plated galvanic coating nanomodified by single-walled carbon nanotubes from standard electrolyte, as well as the microhardness of the obtained coating is performed. It is revealed that the current output decreases with increasing concentration of single-walled carbon nanotubes. The microhardness of the chromium coating increases to 8580 MPa with increase in the concentration of single-walled carbon nanotubes to 50 mg/l (compared to chromium coating obtained from standard chromium plating without additives, increase in microhardness is 16 %). With further increase in the concentration of single-walled carbon nanotubes, the microhardness of the chromium coating decreases.

Keywords: chromium galvanic coating, single-walled carbon nanotubes, current output, microhardness.

Ранее проведенные исследования показали, что использование многостенных углеродных нанотрубок (УНТ) марки "Таунит" в гальванических процессах позволяет получать положительные результаты с точки зрения повышения функциональных свойств гальванических покрытий [1–8].

Развитие промышленного производства однослойных углеродных нанотрубок поставило задачу поиска областей их применения. Опираясь на позитивный опыт применения многослойных УНТ в гальванотехнике, представляет интерес проведение исследований влияния однослойных УНТ на характеристики гальванических процессов и, в частности, на выход хрома по току и микротвердость хромовых покрытий.

Цель работы — исследование выхода по току технологического процесса получения наномодифицированного однослойными углеродными нанотрубками хромового гальванического покрытия, а также микротвердости полученного осадка.

Гальваническое хромовое покрытие получали с помощью наиболее распространенного в промышленности стандартного сульфатного электролита хромирования следующего состава: хромовый ангидрид CrO_3 — 250 г/л; серная кислота H_2SO_4 — 2,5 г/л.

В исследовании в качестве катода применяли квадратные пластины, изготовленные из стали Ст3 площадью 0,1 дм² (30 × 30 мм). Покрытие наносили только на сторону, обращенную к аноду, обратную сторону изолировали. В качестве анода использовали свинцовую пластину состава: 10 % олова и 90 % свинца. Соотношение площади анод — катод 1:1.

Процесс нанесения покрытия состоит из следующих стадий:

1. Промывка в холодной воде в непроточной ванне 2 мин.
2. Травление в течение 10 мин в 50%-ном растворе соляной кислоты.
3. Холодная промывка в течение 2 мин.
4. Сушка.
5. Взвешивание на аналитических весах.
6. Изолирование нерабочей стороны детали.
7. Горячая промывка в дистиллированной воде непосредственно перед нанесением покрытия 2 мин.
8. Нанесение покрытия в ванне хромирования. Температура электролита 52 °С. Токовый режим представлен на рис. 1, 2. Время нанесения покрытия 60 мин.
9. Холодная промывка в течение 2 мин.
10. Удаление изоляции с нерабочей стороны.

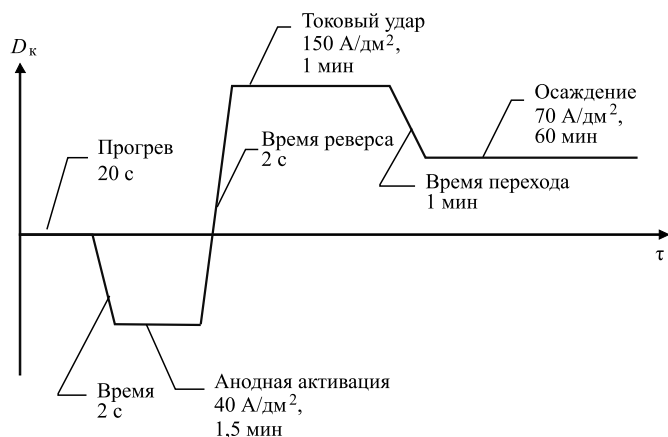


Рис. 1. Изменение плотности тока

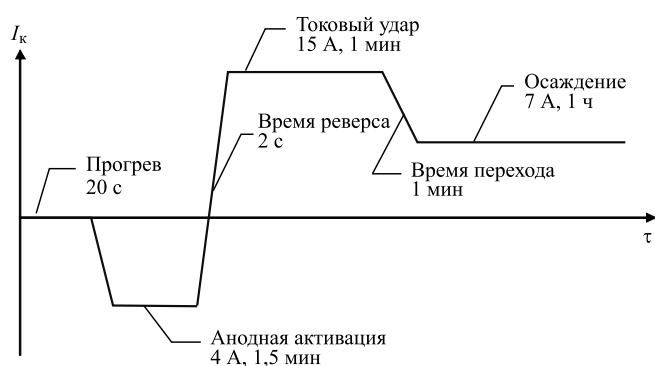


Рис. 2. Изменение тока

11. Сушка.

12. Взвешивание на аналитических весах.

После приготовления и приработки электролита хромирования осуществляли нанесение хромового покрытия из электролита без добавок.

В приготовленный и приработанный электролит добавляли одностенные углеродные нанотрубки, представляющие собой чрезвычайно тонкие графеновые плоскости, свернутые в цилиндр, диаметром 1,6 нм, длиной более 5 мкм). Поскольку важнейшим вопросом приготовления наномодифицированного гальванического электролита является равномерное распределение нанотрубок в объеме электролита и предотвращения объединения нанотрубок в агломераты, вводили их с использованием шипучих растворимых таблеток, приготовленных по рецептуре [9]. Таблетки изготавливали прессованием (давление 0,98 ГПа). Эта технология хорошо зарекомендовала себя при введении многослойных углеродных нанотрубок [3].

Эксперименты проводили с наномодифицированным стандартным электролитом с концентрацией одностенных углеродных нанотрубок 50, 60, 70, 80, 90 мг/л. В каждом варианте наносили покрытие на 5 деталей.

Для расчета выхода по току использовали первый закон Фарадея:

$$m = \eta \mathcal{E} I \tau,$$

где m — масса выделившегося на детали-катоде хрома, г; η — выход по току; \mathcal{E} — электрохимический эквивалент хрома (0,323 г/(А·ч)); I — сила тока (7 А); τ — время (1 ч).

Отсюда выход по току:

$$\eta = m / (\mathcal{E} I \tau).$$

Результаты экспериментов приведены в табл. 1 и на рис. 3.

В результате проведенных экспериментов выявлено, что выход по току снижается при увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок.

Микротвердость H_{μ} полученного покрытия измеряли с помощью прибора ПМТ-3М по методике [10]. Измерение диагоналей отпечатков проводили фотоэлектрическим окулярным микрометром ФОМ-1-16 с автоматической обработкой результатов измерения. Погрешность измерения — 2 %.

Таблица 1

Средние значения выхода по току

Концентрация трубок, мг/л	Выход по току	
	Абсолютное значение	Относительное значение, %
0	0,161	100,00
50	0,141	87,58
60	0,134	83,23
70	0,127	78,88
80	0,127	78,88
90	0,128	79,50

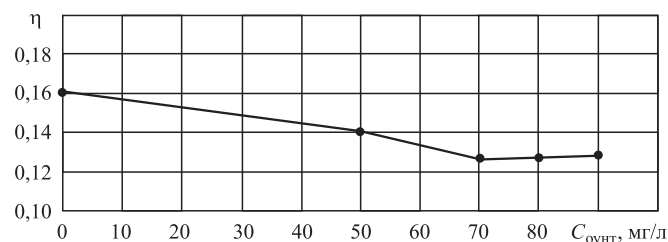


Рис. 3. Зависимость выхода по току в абсолютных единицах от концентрации одностенных углеродных нанотрубок

Таблица 2

Результаты экспериментов по определению микротвердости хромового покрытия

Концентрация трубок, мг/л	Микротвердость, МПа	Микротвердость (относительное значение), %
0	7370	100,0
50	8580	116,4
60	8460	114,8
70	8100	109,9
80	7580	102,8
90	7150	97,0

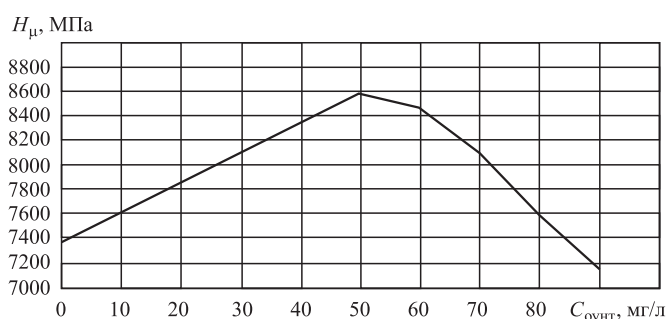


Рис. 4. Зависимость микротвердости наномодифицированного хромового покрытия от концентрации одностенных углеродных нанотрубок

На каждом образце микротвердость измеряли в пяти точках, в которых отпечатки получались симметричными, после чего результат усредняли. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

В результате проведенных экспериментов выявлено, что микротвердость хромового покрытия возрастает до 8580 МПа при увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок до 50 мг/л (по сравнению с хромовым покрытием, полученным из стандартного электролита хромирования без добавок, увеличение микротвердости составляет 16 %). При дальнейшем увеличении концентрации одностенных углеродных нанотрубок микротвердость хромового покрытия уменьшается.

Хромовое покрытие с повышенной микротвердостью (и, как следствие, с повышенной износостойкостью) представляет интерес для использования на деталях, подверженных динамическим нагрузкам в режиме трения. Срок эксплуатации деталей с наномодифицированным однослойными углеродными нанотрубками хромовым гальваническим покрытием существенно выше, чем при использовании традиционного хромового покрытия.

Полученные результаты хорошо коррелируются с показателями для хромовых покрытий, модифицированных многостенными углеродными нанотрубками [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литовка Ю.В., Ткачев А.Г., Кузнецова О.А., Дьяков И.А. Получение наномодифицированных композиционных никелевых гальванических покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 2010. Т. XVIII. № 1. С. 17–21.
2. Никелевое гальванохимическое покрытие, модифицированное углеродными нанотрубками / Ю.В. Литовка, Ю.И. Головин, А.В. Шуклинов и др. // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 31–34.
3. Наномодифицированные хромовые гальванические покрытия / Ю.В. Литовка, А.Г. Ткачев, О.А. Кузнецова и др. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2011. Т. XIX. № 4. С. 29–33.
4. Модифицирование никелевых покрытий углеродными нанотрубками разными методиками / Ю.В. Литовка, Ю.И. Головин, А.Г. Ткачев и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 1. С. 218–220.
5. Никелевые покрытия, модифицированные многостенными углеродными нанотрубками / Ю.В. Литовка, Ю.И. Головин, А.Г. Ткачев и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3. С. 1034–1035.
6. Медное гальванохимическое покрытие, модифицированное многостенными углеродными нанотрубками / Р.А. Столяров, А.Г. Ткачев, А.В. Шуклинов и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 5. С. 1481–1482.
7. Литовка Ю.В., Кулаков В.Ю. Микроструктура и механические свойства наномодифицированного палладиевого покрытия, полученного методом электроосаждения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 1. С. 159–166.
8. Литовка Ю.В., Симагин Д.Н., Дьяков И.А. Процесс нанесения цинковых покрытий из электролитов с добавками наноглерода для повышения защитной способности от коррозии // Нанотехника. 2014. № 3. С. 20–23.
9. Способ приготовления электролита для получения композиционных покрытий на основе металлов: пат. 2477341, МПК С25D15/00, В82В1/00 / Ю.В. Литовка, А.Г. Ткачев, А.А. Пасько и др. 2013, БИ № 7.
10. Вячеславов П.М., Шмелева Н.М. Методы испытаний электролитических покрытий. Л.: Машиностроение, 1977. 88 с.

¹А.В. Щедрин, ²А.А. Кострюков, ¹Э.Л. Мельников, ¹В.Ф. Алешин, ³Н.Ю. Чихачева
 (¹МГТУ им. Н.Э. Баумана,
²ОАО "Демидовский машиностроительный завод",
³МОО "Академия проблем качества")
 E-mail: mt13@bmstu.ru

Инновационные способы воздействия на обрабатываемый материал в методах охватывающей обработки длинномерных заготовок волочением

На примере волочения сплошных цилиндрических образцов из стали марки Ст3 показана сравнительная эффективность комбинированного способа воздействия, заключающегося в последовательном сочетании холодного пластического деформирования и резания, а также синтезированы перспективные смешанные способы воздействия с параллельной технологией применения инновационных металлолакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского".

Ключевые слова: волочение, резание, эффект безызносности при трении, металлолакирующая смазка.

On the example drawing of solid cylindrical specimens from steel St3 shows the comparative effectiveness of the combined method of exposure, consisting in the successive combination of cold plastic deformation and cutting, and also synthesized promising methods of influence with various technologies of innovative metal-plating lubricants which realize the fundamental scientific discovery "Garkunov—Kragelsky frictionless effect".

Keywords: drawing, cutting, effect of non-frictionless wear, metal-clad lubricant.

Как свидетельствует системный анализ технологических объектов для охватывающей обработки [1–6], способ воздействия на обрабатываемый материал — важный элемент соответствующего метода обработки [7–16].

С использованием алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" [1–3] и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" [17] в работе [18] теоретически синтезирован комбинированный метод деформирующе-режуще-калибрующей охватывающей обработки длинномерных заготовок волочением (патент 2560475 РФ). Данный метод включает в себя последовательную комбинацию холодного пластического деформирования (ХПД) фильерой со сферическими деформирующими элементами [9, 10, 17] и обработку деформирующе-режущей фильерой [15], реализующей параллельную комбинацию ХПД и резания. В итоге имеет место сочетание отдельных способов воздействия в виде резания и ХПД, включая воздействие смазки.

Для сравнительного экспериментального исследования и оптимизации способов воздействия были подготовлены соответствующие инструменты (рис. 1). Фильера со сферическими деформиру-

ющими элементами (рис. 1, а) содержит корпус из стали У8, в котором расположено двенадцать сферических элементов из закаленной стали ШХ15 диаметром 7,104 мм. Диаметр рабочего канала фильеры по вершинам сферических деформирующих элементов 21,47 мм. Скальпирующая режущая фильера (рис. 1, б) имеет следующую геометрию [9]: диаметр рабочего канала 21,30 и 21,52 мм; главный передний угол +15°; главный задний угол 5°; ширина калибрующей ленточки 2 мм. Материал фильеры — быстрорежущая сталь Р6М5.

В качестве образцов-заготовок использовали сплошные цилиндрические штоки из стали Ст3 (твердость по Бринеллю 1430 МПа) диаметром 21,6...22,0 мм с участками под охватывающую обработку длиной 150 мм. Волочение осуществляли на приспособлении, конструкция которого приведена в работе [6], скорость волочения 1 м/мин, технологическая смазка — минеральное масло марки И-40.

На рис. 2 представлен внешний вид образцов-деталей после охватывающей режущей обработки волочением через скальпирующую фильеру диаметром 21,3 мм. При этом обработка сопровождалась большими вибрациями и образованием кольцевой плохо разделенной стружки (рис. 3),



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальные инструменты:

а — стружкоразделительная фильера со сферически деформирующими элементами; б — скальпирующая режущая фильера

что обеспечивало параметр шероховатости поверхности $Ra_d = 5...8$ мкм и размерную точность 20...80 мкм. Аналитически удельная сила, Н/мм, обработки имеет вид:

$$q_p = 4,266 + 1960,94A_p, \quad (1)$$

где A_p — толщина срезаемого слоя на радиус образца-заготовки, мм.

Для исключения образования кольцевой стружки и вибраций был применен комбинированный способ воздействия, включающий предварительное воздействие ХПД фильерой со сферическими деформирующими элементами (см. рис. 1, а) и последующее режущее воздействие скальпирующей фильерой (см. рис. 1, б) диаметром 21,52 мм.



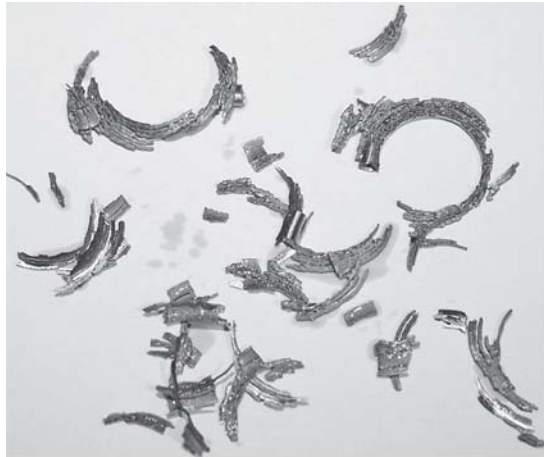
Рис. 2. Образцы-детали из стали Ст3, обработанные режущим волочением без предварительного деформирования

Аналитически суммарная сила, кН, обработки через фильеру со сферическими деформирующими элементами имеет вид:

$$F_d = -19,318 + 125,27i_\phi, \quad (2)$$

где i_ϕ — фактическая деформация на диаметр образца-заготовки, мм.

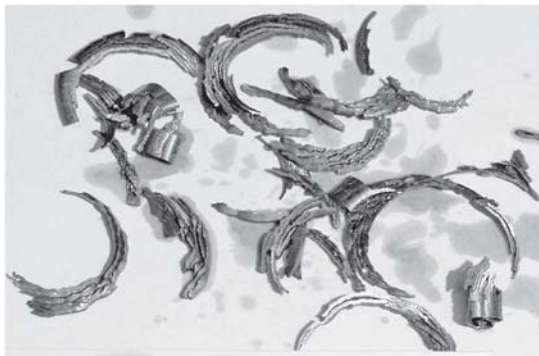
В результате опережающего ХПД на поверхности образцов-заготовок формируются продольные стружкоразделительные канавки [3, 10]. Как показал анализ поверхности выдавленных стружкоразделительных канавок, при $i_\phi > 0,5$ мм в конце обработки (КО) процесс ХПД дестабилизируется (рис. 4, а) из-за адгезионного наростообразования обрабатываемого материала на сферических де-



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Характерная стружка при режущем волочении без предварительного деформирования образцов-заготовок из стали Ст3 при A_p , мм:
 а — 0,15; б — 0,205; в — 0,247; г — 0,302; д — 0,348

формирующих элементах (рис. 4, б), где НО — начало обработки. Причиной адгезии является высокая вязкость обрабатываемого материала, низкая "маслосмкость" поверхности образцов-заготовок и сферических деформирующих элементов, сплошность деформируемого слоя и неоптимальные параметры очага деформации [3, 10, 14].

На рис. 5 представлен внешний вид образцов-деталей после режущего воздействия фильерой диаметром 21,52 мм в направлении предварительного ХПД. Их анализ показал более высокое качество поверхностного слоя по сравнению с обработкой только режущим воздействием (см. рис. 2). Однако при $A_p > 0,2$ мм на поверхности образ-

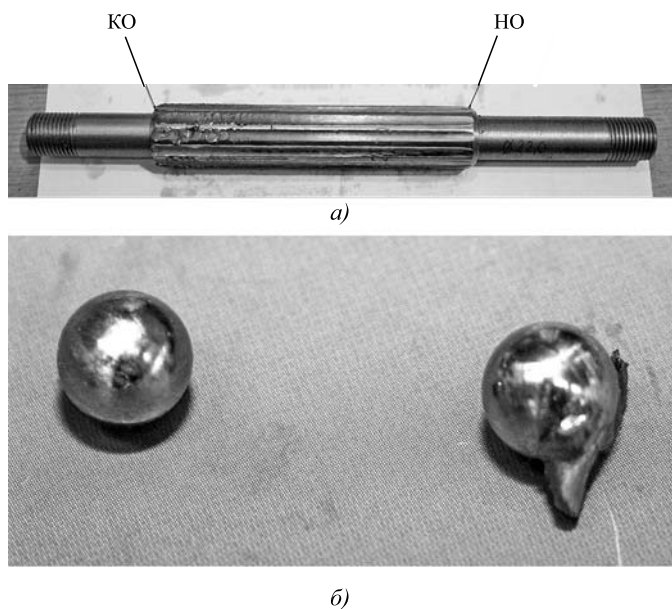


Рис. 4. Характер продольных стружкоразделительных канавок на образцах из стали Ст3 после волочения стружкоразделительной фильерой при $i_{\phi} > 0,5$ мм (а), адгезионное наростообразование стали Ст3 на сферических деформирующих элементах стружкоразделительной фильеры (б)



Рис. 5. Характерный внешний вид образцов-деталей из стали Ст3 после резания в направлении предварительного деформирования

цов-деталей образуются вырывы неупрочненного материала, расположенные между стружкоразделительными канавками. Аналитически удельная сила резания имеет вид, Н/мм:

$$q_p = 3,858 + 2482,07A_p \quad (3)$$

Большие энергозатраты по сравнению с обработкой только режущим воздействием (1) объясняются повышенным предварительным упрочнением срезаемого слоя. Достоинством данного способа воздействия является отсутствие вибраций и хорошо разделенная стружка (рис. 6).



Рис. 6. Характерный внешний вид стружки, образующейся после резания образцов-заготовок из стали Ст3 в направлении предварительного деформирования:

а – $A_p = 0,0408$ мм, $i_{\phi} = 0,132$ мм; б – $A_p = 0,0866$ мм, $i_{\phi} = 0,223$ мм; в – $A_p = 0,136$ мм, $i_{\phi} = 0,323$ мм; г – $A_p = 0,19$ мм, $i_{\phi} = 0,43$ мм; д – $A_p = 0,249$ мм, $i_{\phi} = 0,54$ мм

Используя результаты всех проведенных исследований, можно синтезировать [1] оптимальный способ воздействия, который будет заключаться в последовательной обработке фильерами (см. рис. 1) и деформирующей фильерой [12], упрочненными регулярным микрорельефом в условиях параллельного противодействия [11, 16] металлоплакирующих смазок [3, 10, 12, 19], реализующих "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [17]. Дополнительный существенный эффект от реализации комбинированного способа воздействия может быть получен в случае предварительной регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки [13, 14, 17]. При этом, в частности, на 25...72 % снижается сила волочения [17].

Полученные научно обоснованные решения существенно расширяют имеющуюся информационную базу [9, 15, 18, 20] для системного синтеза [1—3] перспективных методов комбинированной деформирующе-режущей охватывающей обработки волочением сплошных длинномерных профилей с любой формой поперечного сечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
2. **Трибология** как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
3. **Формирование** очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании / А.В. Щедрин и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3—7.
4. **Теоретические** и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2. С. 11—17.
5. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Воронков В.И.** Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодействия металлоплакирующих смазочных материалов. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С. 11—15.
6. **Совершенствование** способа воздействия на обрабатываемый материал в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования / А.А. Кострюков, А.В. Щедрин, В.Ф. Алешин и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 5. С. 211—216.
7. **Повышение** эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогео-

метрии рабочей поверхности инструмента / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 58—60.

8. **Исследование** комбинированного волочения инструментом с регулярным микрорельефом / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2008. № 4. С. 78—80.

9. **Совершенствование** комбинированных методов редуцирования и прошивания / А.В. Щедрин и др. // Металлург. 2005. № 10. С. 66—69.

10. **Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 21—25.

11. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю.** Совершенствование технологий применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.

12. **Гаврилов С.А.** Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 33—39.

13. **Повышение** эффективности комбинированной охватывающей обработки / А.В. Щедрин, А.А. Кострюков, Н.Ю. Чихачева и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 5. С. 12—16.

14. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Кострюков А.А.** Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 4. С. 162—168.

15. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Сергеев Е.С.** Исследование технологических возможностей комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 5. С. 40—44.

16. **Гаврилов С.А., Щедрин А.В.** Совершенствование технологий применения металлоплакирующего кондиционера в методах комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 75—78.

17. **Новое** научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, А.В. Щедрин и др. // Научные труды Академии проблем качества: Спецвыпуск. 2016. С. 348—356.

18. **Проектирование** инструмента со сферическими деформирующими элементами для охватывающей комбинированной обработки длинномерных заготовок / Щедрин А.В. и др. // Вестник машиностроения. 2015. № 8. С. 59—61.

19. **Повышение** качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок / Щедрин А.В. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21—25.

20. **Shchedrin A.V., Sumele G.K.** Influence of the blanks properties on the hybrid drawing of long profiles // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. № 11. P. 1137—1140.



УДК 621.793.1

А.Р. Гарипов, Э.Л. Варданян, А.Ю. Назаров

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

E-mail: Albert060494@yandex.ru

Прогнозирование стехиометрического состава покрытий на основе интерметаллидов системы Ti—Al, синтезированных в среде реакционных газов

Разработана математическая модель процесса вакуумно-дугового осаждения покрытий системы Ti—Al в среде различных газов (азот, кислород, углерод). На основе модели создана программа для определения стехиометрического состава покрытий в зависимости от технологических режимов.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое осаждение, покрытия системы Ti—Al, математическая модель, цифровое производство.

Mathematical model of vacuum arc deposition of Ti—Al coatings in medium of different gases (nitrogen, oxygen, carbon) is developed. On the basis of the model program for determining of stoichiometric composition of coatings depending on the technological modes is created.

Keywords: vacuum arc deposition, Ti—Al system coatings, mathematical model, digital manufacturing.

Введение

Разработка и создание интерметаллидных материалов и наноструктурированных, аморфных материалов и покрытий с высокими физико-химическими свойствами и технологии их получения являются приоритетными стратегическими направлениями развития материалов и технологий (указ Президента РФ) [1].

В последнее десятилетие широко применяется титано-алюминиевый нитрид ($Ti_{1-x}Al_xN$), повышающий твердость и стойкость режущего инструмента при высокоскоростной обработке. Также необходимо отметить, что слоистые тройные карбиды (Ti—Al—C) и нитриды (Ti—Al—N) проявляют уникальное сочетание свойств, характерных как для металлов, так и для керамики. Такие материалы обладают малой плотностью, высокими значениями электропроводности, теплопроводности и прочности, отличной коррозионной стойкостью в агрессивных жидких средах, пониженным модулем упругости, стойкостью к термическим ударам и высокотемпературному окислению, а также

легко подвергаются механической обработке, обладают высокой температурой плавления и являются достаточно стабильными при температурах до 1000 °C [2].

Одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий является осаждение покрытий из плазмы вакуумно-дугового разряда, что обусловлено его особенностями [3]:

- универсальность спектра наносимых покрытий;
- высокая производительность процесса (скорость осаждения до 40 мкм/ч);
- высокая прочность адгезионной связи покрытия с подложкой;
- высокий коэффициент ионизации испаряемых частиц;
- отсутствие необходимости в дополнительном газе для ионизации;
- большая кинетическая энергия эмитируемых ионов.

Множество работ посвящено изучению систем Ti—Al—O, Ti—Al—C, Ti—Al—N [4—6] и разработке математических моделей [3, 7, 8]. Авторами рабо-

ты [4] установлено, что в условиях вакуумно-дугового осаждения твердость $Ti_{1-x}Al_xN$ -покрытий плавно нарастает с 20 до 32 ГПа при увеличении x от 0 до 0,6.

Автором работы [5] были получены зависимости, позволяющие прогнозировать трибологические свойства систем $Ti_{1-x}Al_xN$ по их фазовому и элементному составам. Установлено улучшение износостойких и антифрикционных свойств системы $Ti_{1-x}Al_xN$ при увеличении в ней содержания алюминия и гексагональной фазы $h-Ti_3Al_2N_2$.

Элементный состав системы $Ti_{1-x}Al_xN$, сформированной магнетронным распылением, электродуговым испарением и комбинированным методом изменяется в зависимости от технологических и температурных параметров подготовки подложки и осаждения системы в следующих интервалах: 8,55...33,14 % ат. Al; 40,88...65,80 % ат. Ti; 24,92...39,57 % ат. N.

В работе [6] показано, что в значительной степени на состав $Ti_{1-x}Al_xN$ -покрытий и концентрацию элементов влияет величина потенциала подложки в процессе осаждения. С изменением потенциала подложки от 0 до -300 В концентрация алюминия сильно уменьшается; отношение Al/Ti для $72Ti-28Al$ также снижается вдвое.

Ранее авторами работы [7] была разработана модель расчета состава многокомпонентного покрытия. Данную модель предлагают использовать для определения технологических параметров (плотности тока на группы катодов-мишеней, разрядного потенциала, величины запирающего потенциала) процесса формирования многокомпонентных покрытий различного стехиометрического состава. Однако данные, подтверждающие, что данная модель подойдет для процесса осаждения покрытий из плазмы вакуумно-дугового разряда, отсутствуют.

В работе [3] разработана математическая модель роста покрытия в плазме вакуумно-дугового разряда, в виде системы уравнений движения, скорости роста покрытия, и затенения, записанных в однородных координатах, отличительной особенностью которой является учет конфигурации и кинематики движения детали. Разработана программа для ЭВМ, реализующая модель роста покрытия в плазме вакуумно-дугового разряда, отличающаяся тем, что позволяет рассчитать толщину и разнотолщинность покрытия, а также отклонение формы, вызванное нанесением покрытия в зависимости от области расположения деталей с учетом габаритных размеров рабочей зоны установки, источника частиц и детали. Данная модель не позволяет определить стехиометрический состав покрытия при различных режимах обработки.

Авторами работы [8] была предложена модель процесса нанесения покрытия на основе интерметаллида Ti—Al. На основе модели создан программный продукт, позволяющий рассчитать ионный ток насыщения для каждого из катодов и поток ионов металла на единицу площади в единицу времени в произвольной точке вакуумной камеры. Недостаток данной модели — она предназначена для определения только интерметаллидных фаз системы Ti—Al и только в среде аргона.

Данная работа посвящена созданию математической модели, позволяющей подбирать стехиометрический состав покрытий систем Ti—Al—O, Ti—Al—C, Ti—Al—N в зависимости от технологических режимов их нанесения из плазмы вакуумно-дугового разряда. На основе модели можно создать программный продукт для цифрового производства, что намного облегчит работу технологом, которым уже не придется в ходе долгих экспериментов подбирать оптимальные технологические режимы нанесения покрытий.

В последнее время все чаще начали применять цифровое производство при изготовлении какого-либо продукта или изделия, оно позволяет осуществлять имитационное моделирование производственных процессов, направленное на использование существующих знаний и оптимизацию технологии до начала выпуска изделия.

Математическое моделирование

В данной работе представлена математическая модель, которая позволяет без проведения многочисленных экспериментов определять стехиометрический состав покрытий системы Ti—Al, осажденных из плазмы вакуумно-дугового разряда в среде различных газов (азот, кислород, углерод).

Обобщив результаты работ различных авторов, можно утверждать, что основными технологическими параметрами, оказывающими влияние на стехиометрический состав, структуру и свойства многокомпонентных покрытий из плазмы вакуумно-дугового разряда являются (рис. 1): давление газа, ток разряда, потенциал смещения, пространственное расположение образцов. Возмущающие факторы: температура подложки и энергия ионов.

В основе модели лежит предположение о возможности определения фазового состава покрытия на основе расчета процентного содержания ионов в произвольной точке и сравнения с диаграммами состояния Ti—Al—O, Ti—Al—C, Ti—Al—N [8].

В модели приняты следующие допущения:

— степень ионизации приближена к 100 % (доля ионов в общем потоке частиц, движущихся

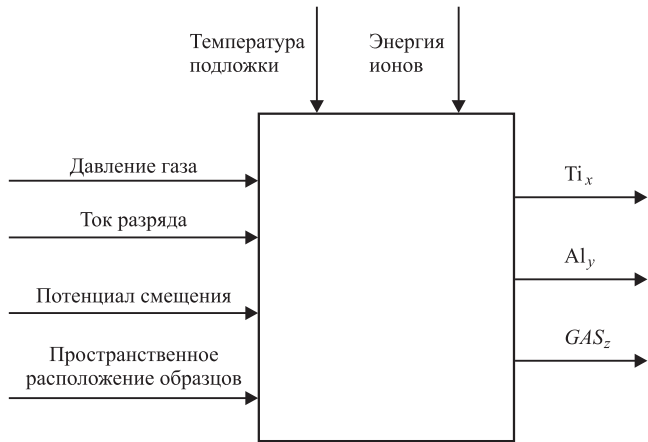


Рис. 1. Факторы, влияющие на стехиометрический состав покрытий

из катодного пятна дуги, в ряде случаев достигает 90...100 %);

— капельная фаза отсутствует.

Для определения фазового состава покрытия необходимо:

- 1) рассчитать плотность ионного тока для Ti, Al и газа;
- 2) рассчитать процентное содержание ионов Al, Ti и газа;
- 3) сравнить полученные данные с соответствующей диаграммой состояния (Ti–Al–O, Ti–Al–C, Ti–Al–N) и определить фазовый состав покрытия.

Формула для расчета плотности тока взята из математической модели процесса осаждения вакуумных ионно-плазменных покрытий В.В. Будилова:

$$j_{l,b} = \frac{\mu_p I_d Z e}{\pi m_i R_k^2} \left[1 + \frac{R_k^2 - l^2 - b^2}{\sqrt{(R_k^2 + l^2 + b^2)^2 - 4R_k^2 b^2}} \right], \quad (1)$$

где μ_p — коэффициент эрозии катода; I_d — ток дугового разряда; Z — среднее зарядовое число осаждаемого компонента; e — заряд электрона; m_i — масса конденсирующегося иона, кг; R_k — радиус катода, м; l — расстояние от торца катода до поверхности обработки, м; b — смещение относительно оси катода, м.

Поток ионов металла на единицу площади в единицу времени определяется из следующего соотношения:

$$n_i = \frac{j_i}{Ze}. \quad (2)$$

Расчетная схема геометрических параметров (l_{Ti} , b_{Ti} , l_{Al} , b_{Al}) для предыдущих формул представлена на рис. 2, а.

После расчета ионного потока на единицу площади в единицу времени по математической модели в рассматриваемой точке рассчитывается процентное содержание алюминия, титана и газа по следующим формулам:

$$\begin{aligned} N_{Al} &= n_{Al} 100 / (\alpha_{Al} n_{Al} + \alpha_{Ti} n_{Ti} + \alpha_{газ} n_{газ}); \\ N_{Ti} &= n_{Ti} 100 / (\alpha_{Al} n_{Al} + \alpha_{Ti} n_{Ti} + \alpha_{газ} n_{газ}); \\ N_{газ} &= n_{газ} 100 / (\alpha_{Al} n_{Al} + \alpha_{Ti} n_{Ti} + \alpha_{газ} n_{газ}), \end{aligned} \quad (3)$$

где α_i — коэффициент конденсации, который зависит от угла наклона образующей поверхности к потоку частиц и напряжения смещения. Данный коэффициент определяется эмпирическим путем.

Рассмотрим расчет (рис. 2, б) процентного содержания алюминия, титана и газа для случая нанесения покрытий с вращением рабочего стола.

В данном случае концентрация Al, Ti и газа рассчитывается в определенном числе точек, рас-

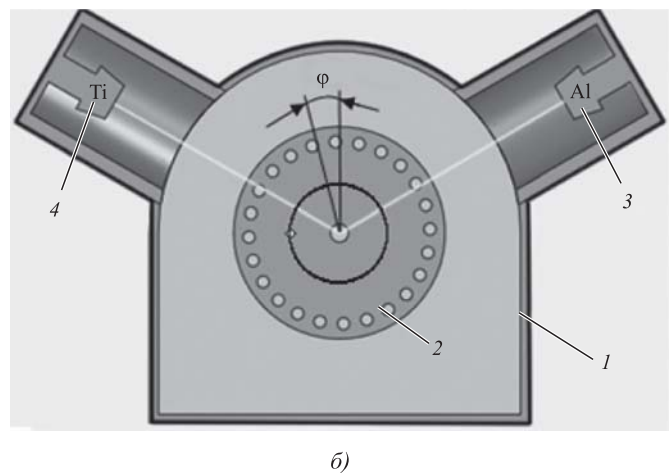
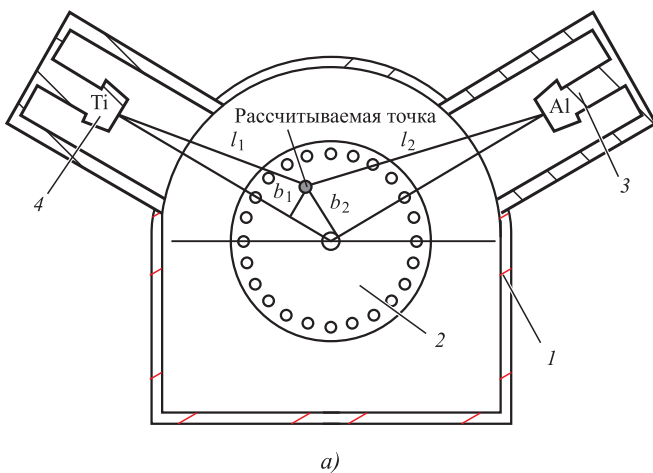


Рис. 2. Расчетная схема установки ННВ-6,6-И1 для обработки:

а — без вращения стола; б — с вращением стола; 1 — рабочая камера; 2 — рабочий стол; 3 — Al-катод; 4 — Ti-катод

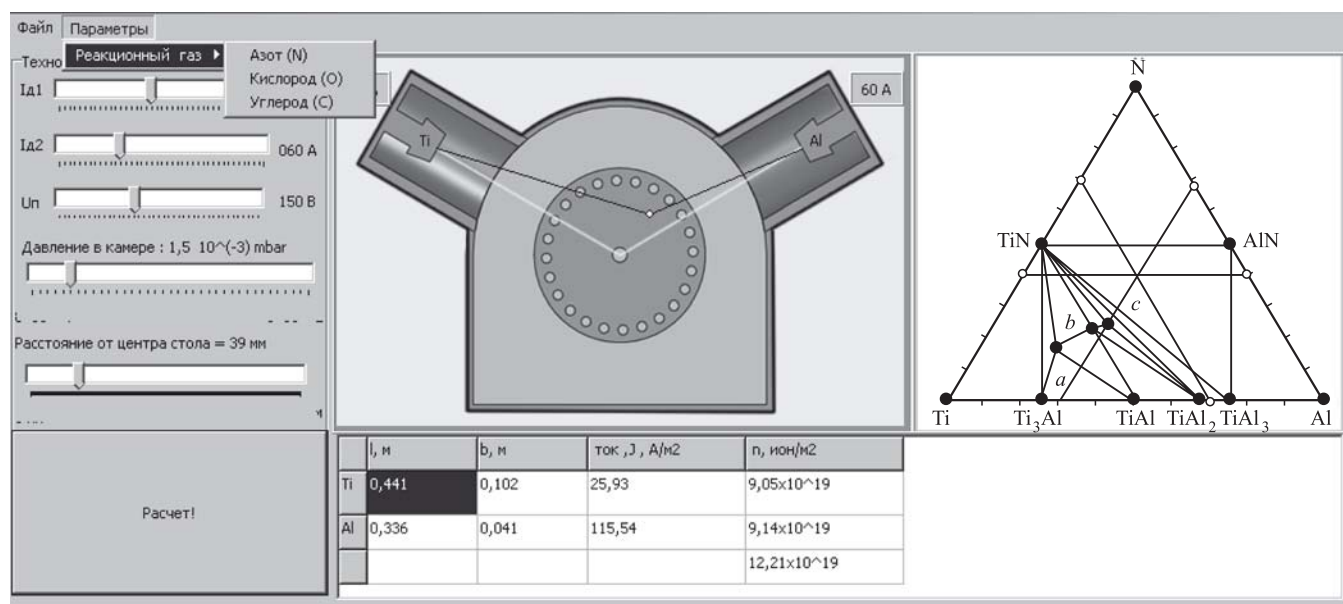


Рис. 3. Интерфейс программы "Определение стехиометрического состава покрытий на основе интерметаллидов системы Ti—Al, осаждаемых из плазмы вакуумно-дугового разряда в среде различных газов"

положенных по всей длине окружности. От числа точек зависит точность результата. Все точки расположены относительно друг друга под одинаковым углом φ :

$$\varphi = \frac{360^\circ}{K_f}, \quad (4)$$

где $K_f = 1000$ — число расчетных точек, расположенных по всей длине окружности.

Тогда процентное содержание алюминия, титана и газа можно рассчитать по следующим формулам:

$$N_{Al} = \sum_{i=0}^{K_f} n_{Al} \times 100 / \left(\alpha_{Al} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Al} + \alpha_{Ti} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Ti} + \alpha_{газ} \sum_{i=0}^{K_f} n_{газ} \right);$$

$$N_{Ti} = \sum_{i=0}^{K_f} n_{Ti} \times 100 / \left(\alpha_{Al} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Al} + \alpha_{Ti} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Ti} + \alpha_{газ} \sum_{i=0}^{K_f} n_{газ} \right);$$

$$N_{газ} = \sum_{i=0}^{K_f} n_{газ} \times 100 / \left(\alpha_{Al} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Al} + \alpha_{Ti} \sum_{i=0}^{K_f} n_{Ti} + \alpha_{газ} \sum_{i=0}^{K_f} n_{газ} \right). \quad (5)$$

Значения N сопоставляются с диаграммой состояния, и определяется фазовый состав покрытия.

По модели разработана программа для ЭВМ (рис. 3), позволяющая определить стехиометри-

ческий состав покрытий при различных режимах обработки. Программа настроена для работы с тремя реакционными газами.

Программный продукт позволяет рассчитать ионный ток насыщения для каждого из катодов и плотность ионного тока в произвольной точке вакуумной камеры. Возможна регулировка режимов нанесения покрытия. На основе данных расчетов автоматически строится тройная диаграмма состояния с указанием точки с определенным стехиометрическим составом.

Расчет стехиометрического состава покрытий проведен для всех трех систем при следующих параметрах:

- давление в камере $p = 3 \cdot 10^{-1}$ Па;
- ток дуги: $I_{дTi} = 90$ А, $I_{дAl} = 60$ А;
- расстояние от центра стола 80 мм.

Результаты расчетов с выноской на диаграмме состояния приведены на рис. 4.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для определения концентрации химических элементов в поверхностной зоне исследуемых образцов проводили количественный микрорентгено-спектральный анализ (MPCA) на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV, оснащенном приставкой фирмы Oxford Instruments (Великобритания) INCA Energy для энергодисперсионного анализа (EDS).

Для определения влияния технологических параметров осаждения на стехиометрический состав

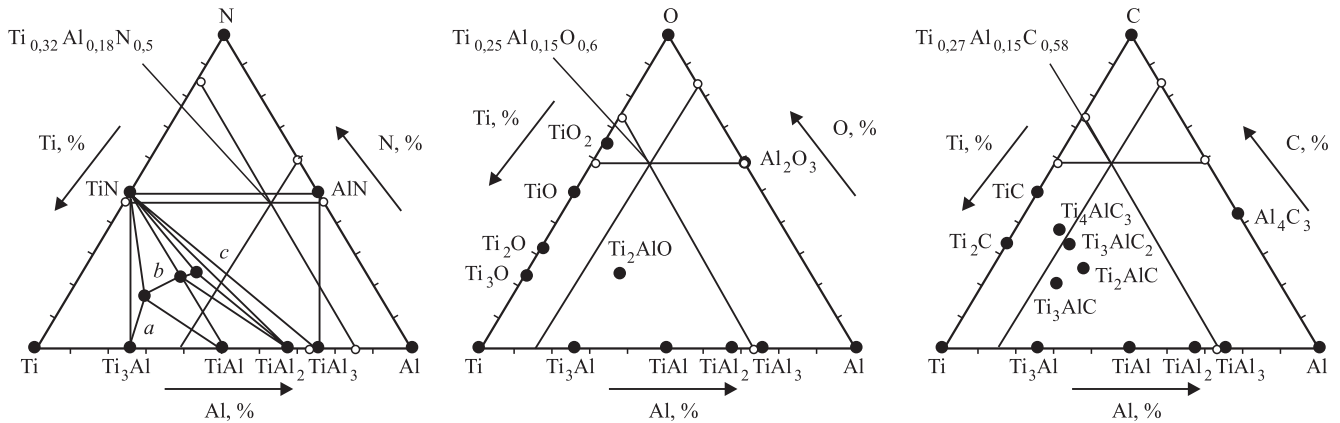


Рис. 4. Определение фазового состава покрытий с помощью диаграмм состояния

покрытий были получены образцы при различных частотах вращения стола (1, 3, 7 и 14 мин⁻¹) и различном расстоянии от центра стола (0, 8, 15 и 22 см) при следующих технологических режимах:

- давление в камере $p = (1,5...3) \cdot 10^{-1}$ Па;
- ток дуги: $I_{дTi} = 90$ А, $I_{дAl} = 60$ А;
- напряжение подложки $U_{п} = 180...220$ В.

Результаты энергодисперсионного анализа (рис. 5) показывают, что изменение частоты вращения стола и расположения образцов относительно центра стола незначительно влияют на значения концентраций элементов.

Сравнивая полученные расчетные данные с экспериментальными результатами и результатами других авторов, можно видеть хорошую сходимость.

Заключение

Таким образом, экспериментальные результаты подтвердили адекватность математической модели. Использование разработанной модели и программы для ЭВМ позволит на стадии разработки технологического процесса подобрать режимы нанесения покрытий систем Ti—Al—O, Ti—Al—C, Ti—Al—N заданного фазового состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указ Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 года.
2. Сметкин А.А., Майорова Ю.К. Свойства материалов на основе МАХ-фаз // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 4. С. 120—138.
3. Ягафаров И.И. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и точности прецизионных деталей машин при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда: дис... канд. техн. наук. Рыбинск, 2014. 111 с.
4. Kimura A., Hasegawa H., Yamada K., Suzuki T. Effects of Al content on hardness, lattice parameter and microstructure of $Ti_{1-x}Al_xN$ films // Surf. Coat. Technol. 1999. Vol. 120—121. P. 438—441.
5. Каменова А.Л. Влияние фазового и элементного состава $Ti_{1-x}Al_xN$ системы на ее трибологические

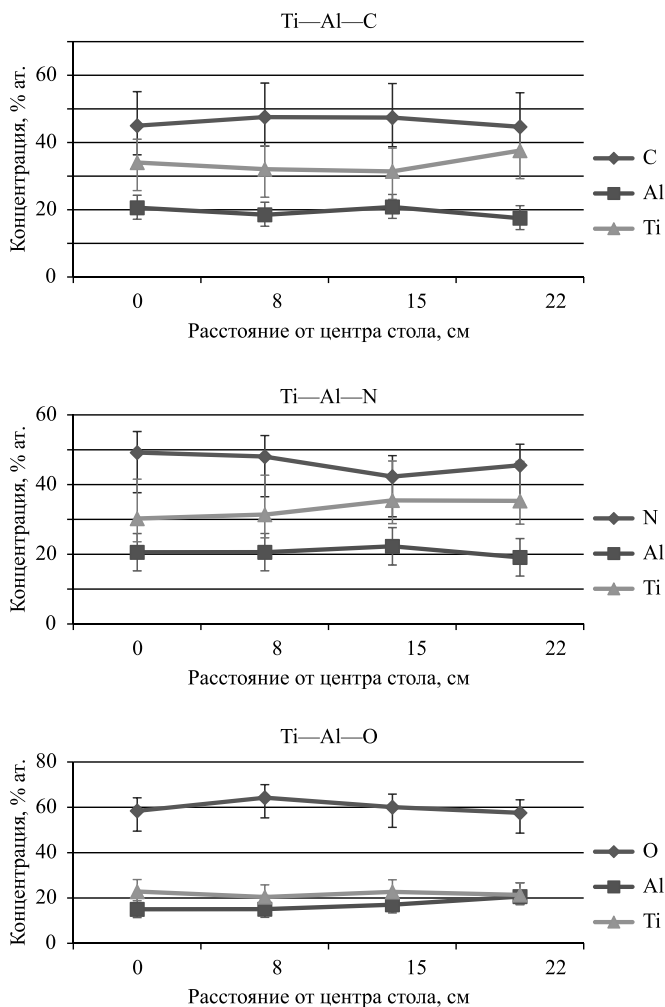


Рис. 5. Результаты энергодисперсионного анализа с указанием погрешностей

свойства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. С. 59—64.

6. **Крыгина О.В.** Генерация газометаллической плазмы в дуговых разрядах низкого давления для синтеза многокомпонентных нанокристаллических защитных покрытий: дис.... канд. техн. наук. Томск, 2016. 192 с.

7. **Определение** параметров технологического процесса формирования многокомпонентных покрытий

/ Н.В. Белан, В.В. Колесник, В.П. Колесник и др. // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 8. С. 21—24.

8. **Варданян Э.Л., Ягафаров И.И., Будилов В.В., Киреев Р.М.** Математическое моделирование процесса нанесения упрочняющих покрытий на основе интерметаллида системы Ti—Al // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 6. С. 7—10.

УДК 541.64

¹П.Г. Ризванова, ²Г.В. Козлов, ¹Г.М. Магомедов

(¹Дагестанский государственный педагогический университет, г. Махачкала,

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик)

E-mail: i_dolbin@mail.ru

Механизм формирования межфазных областей в дисперсно-наполненных полимерных нанокompозитах

Рассмотрен механизм формирования межфазных областей в дисперсно-наполненных нанокompозитах на основе полипропилена. Показано, что этот механизм реализуется практически без участия диффузионных процессов, что приводит к более высокой фрактальной размерности указанных областей по сравнению с объемной полимерной матрицей. Это условие определяет межфазные области в качестве армирующего элемента рассматриваемых нанокompозитов.

Ключевые слова: нанокompозит, дисперсный нанонаполнитель, межфазные области, диффузия, структура, фрактальная размерность.

The mechanism of formation of interfacial regions in polypropylene-based particulate-filled nanocomposites is considered. It is been shown that this mechanism is realized practically without diffusive processes participation, that leads to higher fractal dimension of the indicated regions in comparison with bulk polymer matrix. This condition defines interfacial regions as reinforcing element of the considered nanocomposites.

Keywords: nanocomposite, disperse nanofiller, interfacial regions, diffusion, structure, fractal dimension.

Введение

Роль межфазного взаимодействия в многофазных системах, в том числе и полимерных композитах (нанокompозитах), очень велика, отсутствие таких взаимодействий (межфазной адгезии) приводит к резкому снижению степени армирования (усиления) [1, 2]. Для полимерных нанокompозитов наличие межфазной адгезии в первую очередь означает формирование межфазных областей, которые являются таким же армирующим элементом, как и собственно нанонаполнитель [3]. Для контроля структуры полимерных нанокompозитов необходимо знать условия и механизмы формирования межфазных областей в них. Их определение является целью настоящей работы, где указанное исследование будет выполнено на примере двух дисперсно-наполненных нанокompозитов на основе полипропилена.

Методика эксперимента

В качестве матричного полимера использован полипропилен (ПП) промышленного производства марки "Каплен" 01 030 со средневесовой молекулярной массой $(2...3) \cdot 10^5$ и индексом полидисперсности 4,5. В качестве нанонаполнителя применяли: наноразмерный карбонат кальция (CaCO_3) в виде компаунда марки Nano-Cal P-1014 (производство Китай) с размером частиц 80 нм и массовым содержанием 1...7 % мас. и глобулярный нанокompозит углерод (ГНУ) производства группы компаний "Объединенные системы", г. Москва, с размером частиц 5...6 нм, удельной поверхностью $1400 \text{ м}^2/\text{г}$ и массовым содержанием 0,25...3,0 % мас.

Нанокompозиты ПП/ CaCO_3 и ПП/ГНУ получены смешиванием компонентов в расплаве на двухшнековом экструдере Thermo Haake модели Reo-
tmax RTW 25/42 (производство ФРГ). Смешивание

выполнено при температуре 463...503 К и частоте вращения шнека 50 мин^{-1} в течение 5 мин. Образцы для испытаний получены методом литья под давлением на литьевой машине Test Sample Molding Apparate RR/TS MP фирмы Ray-Ran (Великобритания) при температуре 483 К и давлении 43 МПа.

Механические испытания на одноосное растяжение выполнены на образцах в форме двухсторонней лопатки с размерами согласно ГОСТ 11262—80. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Gotech Testing Machine CT-TCS 2000 (производство Тайвань) при температуре 293 К и скорости деформации $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Рассмотрим механизмы формирования межфазных областей в исследуемых нанокompозитах, используя фрактальные модели. В работах [4, 5] была предложена трактовка формирования структуры осадений на волокнах и поверхностях в рамках моделей необратимой агрегации. В рамках этой трактовки получено соотношение между среднеквадратичной толщиной осаждения (межфазного слоя) $l_{\text{мф}}$ и числом частиц (статистических сегментов) n_i в нем при $n_i \rightarrow \infty$ [5]:

$$l_{\text{мф}} \sim n_i^\varepsilon, \quad (1)$$

где показатель ε характеризует механизм формирования осаждения (межфазного слоя): $\varepsilon = 1,7$ — для осадений, контролируемых диффузией, и $\varepsilon = 1,0$ — для условий, где диффузионные процессы несущественны.

Величину $l_{\text{мф}}$ можно рассчитать следующим образом. Сначала определяем относительную долю межфазных областей $\varphi_{\text{мф}}$ в рамках перколяционной теории усиления полимерных нанокompозитов [3]:

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{м}}} = 1 + 11(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{мф}})^{1,7}, \quad (2)$$

где $E_{\text{н}}$ и $E_{\text{м}}$ — модули упругости нанокompозита и матричного полимера соответственно; $\varphi_{\text{н}}$ — объемное содержание нанонаполнителя, определяемое согласно формуле [3]

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{W_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{н}}$ — массовое содержание нанонаполнителя; $\rho_{\text{н}}$ — его плотность, кг/м^3 , которая для наночастиц оценивается следующим образом [3]:

$$\rho_{\text{н}} = 188(D_{\text{ч}})^{1/3}, \quad (4)$$

где $D_{\text{ч}}$ — диаметр исходных частиц нанонаполнителя, нм.

Далее можно рассчитать величину $l_{\text{мф}}$, используя следующее уравнение [3]:

$$\varphi_{\text{мф}} = \varphi_{\text{н}} \left[\left(\frac{R_{\text{агр}} + l_{\text{мф}}}{R_{\text{агр}}} \right)^3 - 1 \right], \quad (5)$$

где $R_{\text{агр}}$ — радиус агрегатов исходных частиц нанонаполнителя.

Диаметр $D_{\text{агр}}$ ($D_{\text{агр}} = 2R_{\text{агр}}$) указанных агрегатов определяется с помощью соотношения [6]:

$$k(\rho)\lambda = \left[\left(\frac{0,261\pi D_{\text{агр}}^{1/3}}{W_{\text{н}}} \right)^{1/3} - 2 \right] \frac{D_{\text{агр}}}{2}, \quad (6)$$

где $k(\rho)$ — параметр агрегации; λ — расстояние между исходными частицами нанонаполнителя в полимерном нанокompозите.

Величину $k(\rho)\lambda$ можно оценить следующим образом [6]:

$$k(\rho)\lambda = 2,09 \cdot 10^{-2} D_{\text{ч}}(S_{\text{н}}/\varphi_{\text{н}})^{1/2}, \quad (7)$$

где $S_{\text{н}}$ — удельная поверхность исходных частиц нанонаполнителя, определяемая согласно формуле [7]:

$$S_{\text{н}} = \frac{6}{\rho_{\text{н}} D_{\text{ч}}}. \quad (8)$$

В свою очередь, число статистических сегментов в межфазных областях n_i может быть рассчитано из уравнения [8]:

$$n_i = \frac{\varphi_{\text{мф}}}{S l_{\text{ст}}}, \quad (9)$$

где S — площадь поперечного сечения макромолекулы, равная $27,2 \text{ \AA}^2$ для ПП [9]; $l_{\text{ст}}$ — длина статистического сегмента полимерной цепи, определяемая следующим образом [9]:

$$l_{\text{ст}} = l_0 C_{\infty}, \quad (10)$$

где l_0 — длина скелетной связи основной цепи, равная $0,154 \text{ нм}$ для ПП [9]; C_{∞} — характеристическое отношение, связанное с фрактальной размерностью d_f структуры полимерного материала соотношением [9]:

$$C_{\infty} = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}, \quad (11)$$

где d — размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в данном случае $d = 3$).

Размерность d_f определена согласно уравнению [10]

$$d_f = (d - 1)(1 + \nu), \quad (12)$$

где ν — коэффициент Пуассона, определяемый по результатам механических испытаний с помощью следующего соотношения [8]:

$$\frac{\sigma_T}{E_H} = \frac{1 - 2\nu}{6(1 + \nu)}, \quad (13)$$

где σ_T — предел текучести нанокompозита.

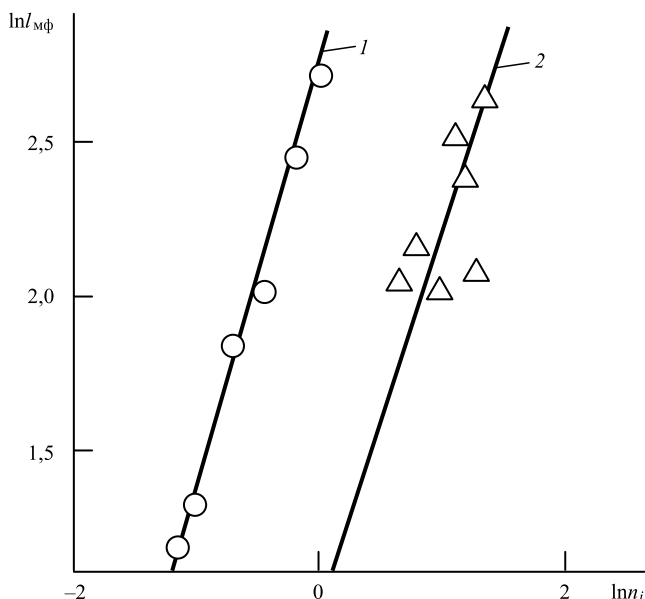


Рис. 1. Зависимости толщины межфазного слоя $l_{мф}$ от числа статистических сегментов в нем n_i в двойных логарифмических координатах для нанокompозитов ПП/ГНУ (1) и ПП/СаСО₃ (2)

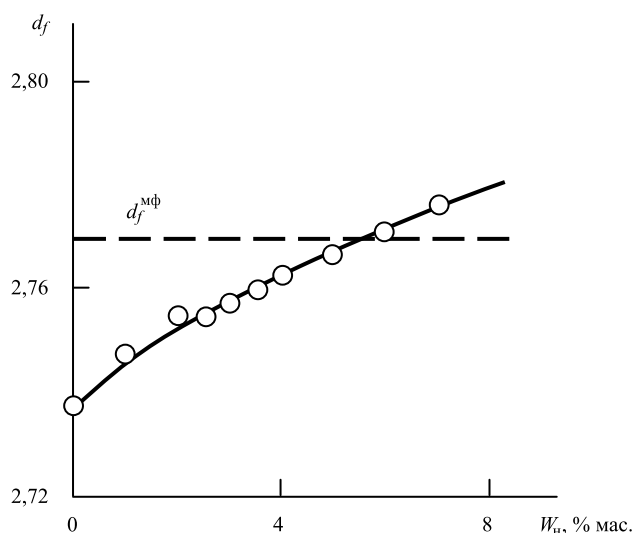


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности структуры d_f от массового содержания нанонаполнителя W_n для нанокompозитов ПП/СаСО₃

На рис. 1 приведены зависимости $l_{мф}(n_i)$, соответствующие соотношению (1), в двойных логарифмических координатах для рассматриваемых нанокompозитов. Как следует из приведенных графиков, обе указанные корреляции линейны, что позволяет определить показатель ε в соотношении (1) из их наклона. Определенная указанным образом величина $\varepsilon = 1,18$ для нанокompозитов ПП/ГНУ и $\varepsilon = 1,30$ для ПП/СаСО₃. Эти значения ε указывают на небольшой вклад диффузионных процессов в формирование межфазных областей рассматриваемых нанокompозитов.

Для сравнения приведем несколько значений ε для других полимерных композитов (нанокompозитов). Для дисперсно-наполненных микрокомпозитов полигидроксиэфир/графит величина $\varepsilon = 1,10$ [8], т.е. практически совпадает с полученными выше. Для дисперсно-наполненных нанокompозитов фенилон/оксинитрид кремний-иттрия и фенилон/ β -сиалон величина $\varepsilon = 1,43$ [3], а для бутадиев-стирольного каучука, наполненного техническим нанокompозитом углеродом и нанокompозитом шунгитом, $\varepsilon = 1,70$ [6]. Следовательно, можно предположить, что переход к формированию межфазных областей, контролируемый диффузией, для последних нанокompозитов обусловлен каучукообразным состоянием полимерной матрицы, фрагменты цепей которой обладают высокой молекулярной подвижностью [9]. Наиболее высокое значение $\varepsilon = 2,26$ получено для нанокompозитов ПП/органоглина [3].

Вариация показателя ε определяет и соответствующее изменение структуры межфазных областей, характеризуемой ее фрактальной размерностью $d_f^{мф}$. Между параметрами ε , d и $d_f^{мф}$ существует взаимосвязь, выражаемая соотношением [5]:

$$\varepsilon = \frac{1}{d_f^{мф} - d + 1}. \quad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что величина $d_f^{мф} = 2,77$ для нанокompозитов ПП/СаСО₃ и $d_f^{мф} = 2,84$ для нанокompозитов ПП/ГНУ, что близко к максимально возможной для реальных твердых тел величине фрактальной размерности 2,95 [10]. Как показали оценки согласно соотношению (2), для нанокompозитов ПП/СаСО₃ с $W_n = 5...7$ % мас. $\phi_{мф} = 0$, т.е. в этих нанокompозитах межфазные области отсутствуют. Рассмотрим физические основы этого эффекта.

На рис. 2 приведена зависимость $d_f(W_n)$ для указанных нанокompозитов, из которой следует монотонное увеличение d_f по мере роста W_n . На этом же рисунке горизонтальной штриховой

линией показана величина $d_f^{\text{мф}}$ для нанокompозитов ПП/CaCO₃. Как показали данные рис. 2, при $W_n = 5\%$ мас. достигается условие $d_f \approx d_f^{\text{мф}}$, т.е. структура полимерной матрицы и межфазных областей становится неразличимой. Как известно [8], модуль упругости полимерного материала E можно оценить следующим образом:

$$E = c(D_f - 3), \quad (15)$$

где c — константа; D_f — размерность областей локализации избыточной энергии, примерно равная C_∞ [9].

Из графика на рис. 2 следует увеличение $D_f \approx C_\infty$ согласно уравнению (11) и, следовательно, повышение E для полимерной матрицы. При $W_n = 5\%$ мас. модули упругости полимерной матрицы и межфазных областей становятся равны, что приводит к потере последними армирующей способности и в конечном итоге к условию $\varphi_{\text{мф}} = 0$, поскольку уравнение (2) определяет величину $\varphi_{\text{мф}}$ именно по армирующей способности межфазных областей.

Выводы

Таким образом, как показали результаты настоящей работы, формирование межфазных областей в рассматриваемых дисперсно-наполненных полимерных нанокompозитах реализуется практически без участия диффузионных процессов. Это обстоятельство приводит к повышению фрактальной размерности структуры межфазных областей. При

достижении равенства фрактальных размерностей структуры полимерной матрицы и межфазных областей последние теряют свою способность армировать (усиливать) полимерный нанокompозит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова Думка, 1980. 260 с.
2. Кнунянц Н.Н., Ляпунова М.А., Маневич Л.И., Ошмян В.Г., Шаулов А.Ю. Моделирование влияния неидеальной адгезионной связи на упругие свойства дисперсно-наполненного композита // Механика композитных материалов. 1986. Т. 22. № 2. С. 231—234.
3. Микитаев А.К., Козлов Г.В., Заиков Г.Е. Полимерные нанокompозиты: многообразие структурных форм и приложений. М.: Наука, 2009. 278 с.
4. Meakin P. Diffusion-limited deposition on fibers and surfaces // Phys. Rev. A. 1983. V. 27. № 5. P. 2616—2623.
5. Meakin P. Diffusion-controlled deposition on surfaces: cluster size distribution, interface exponents and other properties // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. № 8. P. 4207—4214.
6. Козлов Г.В., Заиков Г.Е. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокompозитов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. 112 с.
7. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Солломатов В.И. Синергетика композитных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 154 с.
8. Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ. М.: Альянстрансатом, 2008. 363 с.
9. Козлов Г.В., Овчаренко Е.Н., Микитаев А.К. Структура аморфного состояния полимеров. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. 392 с.
10. Баланкин А.С. Синергетика деформируемого тела. М.: Министерство обороны СССР, 1991. 404 с.

Вниманию читателей!

В журнале "Упрочняющие технологии и покрытия" № 9 за 2018 г. в статье "Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания" допущена ошибка — указан один автор статьи В.П. Табаков. Правильный вариант: В.П. Табаков, Л.В. Худобин.

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

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

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

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

Сдано в набор 07.08.2018 г. Подписано в печать 25.09.18 г. Формат 60×88 1/8.

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

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

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

Сайт: www.aov.ru

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

