

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 10 (118)
октябрь
2014

Издается с января 2005 г.

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

**Председатель редакционного
совета**

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

**Заместитель главного
редактора**

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

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

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
А.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

➔	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ	
	Бабичев А.П., Коваль Н.С., Романовский И.Н. Виброволновая упрочняющая обработка режущих ножей сельскохозяйственных машин	3
➔	МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА	
	Исаев А.Н., Лебедев А.Р., Федоренко А.А. Параметрическая модель формообразования многослойного соединения дорнованием.....	6
➔	ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	
	Пинахин И.А., Иванов В.В., Копченков В.Г., Черниговский В.А. Повышение эксплуатационного ресурса твердосплавных режущих инструментов методом объемного импульсного лазерного упрочнения	11
➔	ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	
	Козлов А.А., Смоленцев В.П., Клименченков А.А. Маркирование металлических изделий с эластичными покрытиями без их разрушения	16
	Кусков Ю.М., Евдокимов А.И. Электрошлаковая наплавка износостойких легированных чугунов	21
	Севостьянов Н.В., Мурашева В.В., Ефимочкин И.Ю. Обеспечение сплошной химической металлизации комбинированной поверхности металломатричного композиционного материала Al – SiC.....	25
➔	ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ	
	Дринберг А.С. Применение винилированных алкидных олигомеров для модификации различных полимеров и олигомеров.....	29
	Филимонов С.В., Филимонов В.И., Марковцева В.В., Лисин И.О. Влияние контактных напряжений на стойкость полимерных покрытий при профилировании.....	36
➔	ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ	
	Николенко С.В., Сую Н.А., Пугачевский М.А., Метлицкая Л.П. Комбинированная обработка стали 45 электроискровым легированием и лазерным излучением.....	42
<p>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</p>		
<p>Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней</p>		

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 10 (118)
October
2014

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

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

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

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

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

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

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

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

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Babichev A.P., Koval N.S., Romanovsky I.N. Vibration wave strengthening processing of farm machinery cutting blades.....3



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Isaev A.N., Lebedev A.R., Fedorenko A.A. Parametrical model of deformation of the compound cylinder at calibration6



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Pinahin I.A., Ivanov V.V., Kopchenkov V.G., Chernigovskiy V.A. Increase the service life of hard alloy cutting tools by volume pulsed laser hardening 11



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Kozlov A.A., Smolentsev V.P., Klimenchenkov A.A. Marking of elastic-coated metal parts without their destruction.....16

Kuskov Yu.M., Evdokimov A.I. Electroslag surfacing wear-resistant alloy cast irons21

Sevostyanov N.V., Murasheva V.V., Efimochkin I.Yu. Providing uniformity of combination surface metal matrix composite material Al – SiC chemical metal plating.....25



POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

Drinberg A.S. Using vinyl alkyd oligomers for modifying various polymers and oligomers ...29

Filimonov S.V., Filimonov V.I., Markovtseva V.V., Lisin I.O. Effect of contact stresses on polymer coating resistance during the roll-forming.....36



PROCESSING BY COMBINED METHODS

Nikolenko S.V., Syuy N.A., Pugachevsky M.A., Metlitskaya L.P. The combined processing of a steel 45 by electrospark alloying and laser radiation42

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



УДК 621.9.048.6

А.П. Бабичев, Н.С. Коваль (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону),
И.Н. Романовский (ООО «Комбайновый завод Ростсельмаш»)
E-mail: vibrotech@mail.ru

Виброволновая упрочняющая обработка режущих ножей сельскохозяйственных машин

Формулируется проблема, стоящая перед сельскохозяйственным машиностроением, — повышение надежности и ресурса работы изделий, работающих в тяжелых условиях, на примере режущих ножей зерноуборочного комбайна. Приводится сравнительная характеристика методов обработки, используемых для решения рассматриваемой проблемы. Установлена и обоснована возможность повышения износостойкости режущих ножей сельскохозяйственной техники методом упрочняющей виброволновой обработки. Показаны технологические возможности метода и механизм формирования показателей качества поверхностного слоя изделий. Представлены результаты поисковых экспериментальных исследований влияния виброволновой обработки на величину упрочненного поверхностного слоя и износ режущих ножей, изготовленных из закаленных сталей R6M5, X12M, R18. Приведены результаты исследований влияния режимов виброволновой обработки: амплитуды и частоты колебаний, диаметра стальных шаров на изменение глубины упрочненного слоя режущих ножей, изготовленных из стали X12M.

Ключевые слова: нож, поверхностный слой, износостойкость, виброволновая обработка, микроудар, микротвердость, упрочненный слой.

We formulate the problem facing agricultural engineering — improving the reliability and service life of products, heavy duty cutting blades on the example of combine harvesters. Comparative characteristics of processing methods used to solve the problem. Established and proved the possibility of increasing the wear resistance of the cutting knives agricultural machinery reinforcing methods vibration wave treatment. The paper presents the technological capabilities of the method and mechanism of formation of the surface layer of quality products. The results of experimental researches of influence search vibration wave treatment on the hardened surface layer and wear of cutting blades made of hardened steel R6M5, X12M, R18. The results of studies on the effect of vibration wave processing: amplitude and frequency of vibration diameter steel balls to change the depth of the hardened layer of knives made of steel X12M.

Keywords: knife, the surface layer, wear resistance, vibration wave processing, microshot, microhardness, hardened layer.

Введение

Сельскохозяйственное машиностроение как отрасль занимает значительное место в агропромышленном комплексе (АПК) нашей страны, так как именно данная отрасль изготавливает средства производства для сельского хозяйства. Таким образом, проблемы АПК непосредственно связаны с проблемами сельскохозяйственного машиностроения. Повышение экономической эффективности, надежности, долговечности, увеличение ресурса безотказной работы, а также снижение затрат на изготовление и эксплуатацию агропромышленного оборудования и агрегатов являются важнейшими задачами сельскохозяйственного машиностроения.

Перерабатывающее оборудование сельскохоз-

ственной техники занимает одну из основных позиций в цепочке переработки сельскохозяйственного сырья. Надежность работы перерабатывающего оборудования сельскохозяйственной техники связана с качеством поверхностного слоя режущего инструмента — ножей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства ножа, его износостойкость, коррозионная стойкость и др.

Применение виброволновой обработки для упрочнения режущих ножей

Повышение качества режущих ножей сельскохозяйственной техники, повышение их стойкости и долговеч-

ности является актуальной задачей, поскольку от этих показателей зависят условия процесса резания, эксплуатации оборудования и качество результатов. В этой области выполнен ряд работ [1—3], тем не менее дальнейшее повышение качества режущих инструментов и методов их упрочнения остается актуальной задачей.

Актуальной в настоящее время является разработка технологии получения поверхностного слоя материала, обладающего по сравнению с традиционным высокими физико-механическими свойствами, устойчивостью к износу и изменению геометрической формы [4].

Наиболее важной частью режущих ножей сельскохозяйственной техники, определяющей продолжительность их работы, является режущая поверхность, которая подвергается наиболее интенсивному воздействию при контакте с обрабатываемым материалом и в результате максимально изнашивается и деформируется.

Одним из эффективных методов упрочнения поверхностным пластическим деформированием является виброволновая обработка. Износостойкость поверхности, полученной этим методом, в несколько раз выше, чем при шлифовании, и на 20...30 % выше, чем при полировании [4].

На измельчающих устройствах зерноуборочных комбайнов используют ножи, режущее лезвие которых быстро изнашивается и затупляется. Это обуславливает необходимость их переточек или замены. Ножи, изготовленные из сталей 65Г, 9ХС, 40Х и У8 с последующей закалкой и отпуском, выходят из строя через 2...3 ч работы [5].

Область использования виброволновых процессов в различных отраслях народного хозяйства достаточно многогранна и имеет тенденцию к дальнейшему рас-

ширению. В технологии машиностроения и приборостроения — это отделочно-зачистная и отделочно-упрочняющая обработка, вибрационная стабилизирующая обработка, совмещенные процессы отделочной обработки и покрытий, мойка и сушка, транспортирование, совершенствование процесса сборки, интенсификация гальванических и химических процессов, усталостные испытания материалов, изменение параметров процесса и состояния материала и др. [6—8].

Использование ударно-волновых процессов для интенсификации упрочняющей и стабилизирующей обработки — одно из направлений вибрационных технологий. В связи с этим при исследовании волновых процессов представляется возможным решение таких технологических задач, как изменение состояния среды, подвергнутой воздействию ударных волн (например, изменения структуры и физико-механических свойств материала обрабатываемой детали), или использование последних для передачи ударных импульсов на обрабатываемую поверхность (например, создание многоконтактных виброударных инструментов для упрочняющей обработки и механических волноводов).

Основой виброволновой упрочняющей обработки является динамический характер протекания процесса, сопровождаемый множеством микроударов частиц рабочей среды по поверхности обрабатываемой детали и обеспечивающий пластическое деформирование поверхностного слоя, следствием чего являются повышение микротвердости, образование сжимающих остаточных напряжений первого рода и уменьшение шероховатости поверхности. При этом достигается равномерное упрочнение тонкого поверхностного слоя детали.

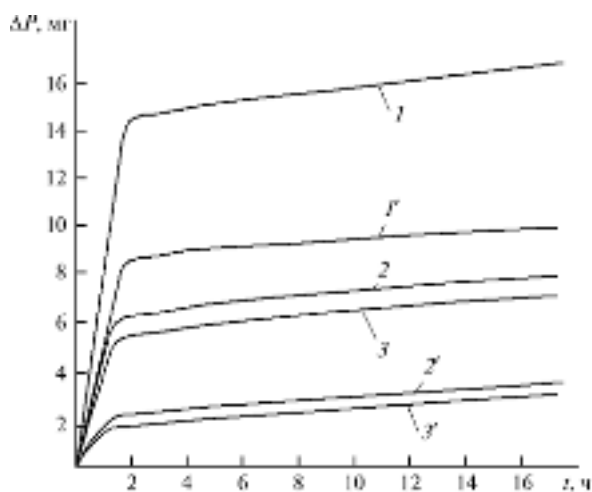


Рис. 1. Влияние виброволновой обработки на износ ΔP поверхностного слоя закаленных сталей:

1...3 — исходные образцы из сталей Р6М5; Х12М, Р182 соответственно; 1'...3' — упрочненные образцы из сталей Р6М5, Х12М, Р182 соответственно

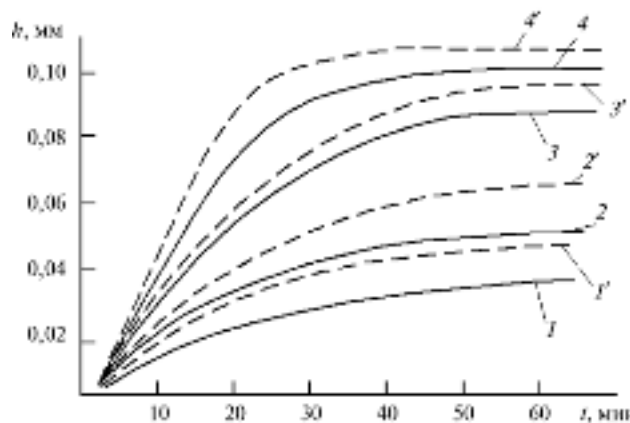


Рис. 2. Влияние амплитуды колебаний A и диаметра обрабатываемой среды (стальных шаров d) на глубину упрочнения h стали Х12М в течение 40 мин при частоте колебаний $f=35$ Гц:

1...4 — образцы, обработанные при A , равной 1,6; 2; 2,5; 3,5 мм, соответственно в среде стальных шаров диаметром $d=8$ мм; 1'...4' — образцы, обработанные при A , равной 1,6; 2; 2,5; 3,5 мм, соответственно в среде стальных шаров диаметром $d=14$ мм

Физическая природа волновых процессов, связанных с ударными явлениями, достаточно сложна, в связи с чем значительный интерес представляют экспериментальные исследования [9, 10]. При анализе их результатов отмечено изменение микротвердости и структуры по сечению образца. В отличие от статического при динамическом (виброударном) нагружении очаги деформации образуются одновременно во многих зонах по сечению образца: образуются узлы, сетки, решетки из дислокаций, имеющие как плоскую, так и пространственную ориентацию. Отмечается рост количества и плотности дислокаций. У поверхности, воспринимающей ударные импульсы, и у противоположной (свободной) поверхности отмечается повышение микротвердости.

Таким образом, при динамических методах упрочнения имеет место качественно иной механизм структурных преобразований и протекания пластической деформации.

С применением виброволновой обработки велись поисковые экспериментальные исследования на некоторых марках инструментальных сталей. На рис. 1 представлены результаты исследований износостойкости поверхностного слоя образцов, подвергнутых виброволновой обработке в среде шаров из закаленной стали ШХ15.

На рис. 2 приведены результаты исследований, отражающих влияние режима обработки (A, f, t) и диаметра шаров на микротвердость поверхности; с их увеличением возрастает и глубина упрочненного слоя.

Выводы

Анализ методов упрочнения поверхности режущих ножей показал, что эффективность каждого метода зависит от большого числа факторов, что требует проведения дальнейших экспериментальных исследований, как по отработке технологии упрочнения, так и по определению оптимальных условий эксплуатации ин-

струмента. Минимальная интенсивность изнашивания инструмента обеспечивается поверхностным упрочнением режущего инструмента. Применяя виброволновую обработку режущего инструмента, возможно получить изделия с высокими физико-механическими свойствами, повышенным сроком службы при низкой себестоимости обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Применение** вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А.П. Бабичев и др. Ростов н/Д., ДГТУ, 2006. 213 с.
2. **Бабичев А.П.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д., ДГТУ, 1999. 621 с.
3. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев и др. Ростов н/Д., ДГТУ, 2003. 192 с.
4. **Ткачев В.Н.** Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 2001. 342 с.
5. **Баскаков В.А.** Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Чебоксары, 1991. 37 с.
6. **Обеспечение** качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей ударно-волновыми методами ППД // Механика ударно-волновых процессов в технологических системах: Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Ростов н/Д., 2012. С. 293—297.
7. **Бабичев А.П. и др.** Использование виброволнового воздействия (вибраций) в процессах разборки неподвижных разъемных соединений в условиях ремонта и утилизации изделий машиностроения // Вестник ДГТУ. 2012. № 1. С. 50—55.
8. **Бабичев А.П. и др.** Разборка резьбовых соединений виброволновым методом при ремонте и утилизации изделий машиностроительного производства // Вестник ДГТУ. 2012. № 8. С. 23—27.
9. **Ганиев Р.Ф.** Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. Киев: Техника, 1980. 254 с.
10. **Фортов В.Е.** Избранные статьи и доклады. Черноголовка, ИПХФ РАН, 2005. 575 с.





УДК 539.374:621.787

Исаев А.Н., Лебедев А.Р., Федоренко А.А.

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

E-mail: anis101@yandex.ru

Параметрическая модель формообразования многослойного соединения дорнованием

Рассмотрены особенности геометрии очага деформации и определены задачи конечно-элементного моделирования контактных напряжений в процессе упругопластического деформационного формообразования составного цилиндра методом дорнования отверстия.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, контактное напряжение, конечно-элементное моделирование.

Singularities of geometry of the center of deformation are considered and tasks of finite-element modeling of contact tension in the course of local ring elasto-plastic deformation of the compound cylinder by a method of holes mandrelling are defined.

Keywords: intense-deformed state, contact pressure, finite-element modeling.

Введение

В приводах исполнительных механизмов металло-режущих станков, гидропрессов, сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин широко используются силовые цилиндры, корпуса которых изготавливают из трубчатых заготовок. Для придания рабочим поверхностям корпусов специфических свойств по параметрам износостойкости, твердости, теплопроводности и др., в том числе за счет использования различных материалов, целесообразно применять составные (многослойные) конструкции цилиндров. Составные цилиндры, полученные запрессовкой с некоторым натягом одной трубчатой заготовки в другую, обладают повышенной прочностью [6].

Наиболее эффективным методом сборки составных цилиндров является метод дорнования отверстия внутренней трубчатой заготовки, основанный на деформационном упругопластическом изменении диаметральных размеров соединения. После деформирования за счет сил упругой разгрузки на контактной поверхности соединяемых заготовок образуется напряжение (контактное давление), соответствующее условиям образования соединения с достаточно большим натягом. Сборка составного цилиндра дорнованием не требует высокой исходной точности сопрягаемых поверхно-

стей. Повышенная прочность корпуса обеспечивается дополнительными внутренними силами упругости, поэтому при одинаковых поперечных сечениях составной цилиндр допускает более высокие нагрузки по сравнению с монолитным. Дорнование позволяет достаточно просто изготовить многослойный цилиндр, отдельные слои которого выполнены из обычного трубного проката [1].

Особенности геометрии очага деформации при дорновании

Составной цилиндр выполняется путем деформационного соединения двух или более тонкостенных цилиндров. Тонкостенность исходных заготовок позволяет отнести получаемый цилиндр к телам типа «оболочка вращения». Очаг деформации, образующийся в процессе локально-кольцевого упругопластического формообразования составного цилиндра, условно можно представить неразрывной последовательностью плавно сопряженных упругих и упругопластических участков (рис. 1) [1]. Средний участок контактирует с инструментом, его напряженное состояние характеризуется как объемное. Остальные участки — неконтактные, находятся в упругом или упругопластическом состоянии. Инструментом деформиро-

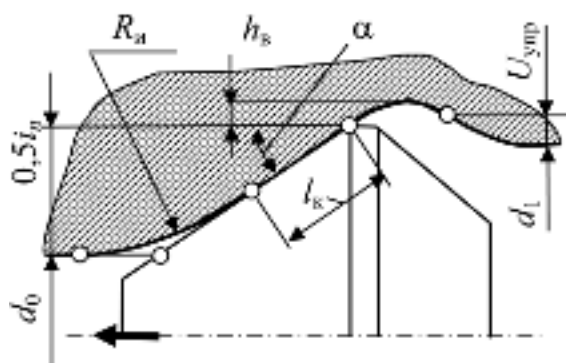


Рис. 1. Схема очага деформации трубчатой заготовки при дорновании отверстия

вания является дорн, его кольцевая форма ограничена передним (заборным) и задним конусами, разделенными цилиндрической ленточкой. Диаметр отверстия d_0 изменяется благодаря раздате цилиндра дорном на величину натяга i_n . Заборный конус дорна выполнен под углом α . Внеконтактные части очага деформации в продольном сечении, передняя и задняя, имеют форму, приближенно описываемую дугой окружности радиусом R_d . Позади цилиндрической ленточки дорна образуется волна высотой h_b . Контактная часть ограничена участком шириной l_k . Окончательный размер отверстия d_1 после прохода дорна зависит от высоты волны h_b и упругой разгрузки $2U_{упр}$.

Известные аналитические методы определения напряжений, сил и деформаций обрабатываемого дорнованием цилиндра [2, 3] построены в предположении, что направления главных напряжений и деформаций совпадают с его координатными осями, что позволяет не учитывать касательные напряжения и существенно упростить способ решения задачи. Естественно, что аналитические зависимости недостаточно полно отражают особенности процесса формирования составного цилиндра, их практическое использование не всегда эффективно. В этой связи применение методов математического моделирования процесса дорнования отверстий на ЭВМ путем приближенного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих состояние материала под воздействием локальной кольцевой нагрузки, позволяет существенно сократить материальные затраты на проведение экспериментальных исследований.

Задачи исследования процесса дорнования методом конечных элементов (МКЭ)

Задачи анализа деформационного процесса формообразования составных оболочек вращения локально-кольцевым упругопластическим деформированием с использованием МКЭ применительно к дорнованию целесообразно рассматривать поэтапно в следующей последовательности [4]:

1. Идентификация задачи и выбор пути решения.
2. Создание трехмерной модели соединения.
3. Разбиение модели на конечные элементы.
4. Описание граничных условий, определяющих условия закрепления модели на границах и/или граничные нагрузки.
5. Численное решение системы уравнений.
6. Анализ результатов.

На каждом из перечисленных этапов необходимо определить возможности применения МКЭ для решения задачи моделирования деформационного процесса формообразования составных цилиндров.

Общая характеристика задачи

Главная проблема контактной задачи применительно к процессу дорнования заключается в том, что истинная контактная зона до решения задачи неизвестна, так как ее параметры зависят от нагрузок, свойств материала, граничных условий и других факторов. Контактующие поверхности могут входить в контакт друг с другом и выходить из него внезапно и непредсказуемо. Задача многосвязного контакта обуславливает учет взаимного влияния контактных поверхностей деталей.

Получение общего решения, определяющего напряженно-деформированного состояния деталей в процессе локально-кольцевого деформирования, справедливого для упругих и упругопластических зон деформаций, с учетом контактных взаимодействий приводит к физическим нелинейным соотношениям. Нелинейная связь напряжений с деформациями является обычной причиной нелинейного поведения конструкции. Для расчета нелинейных задач используется метод Ньютона—Рафсона [5], основанный на разделении нагрузки на серию элементарных приращений. Для улучшения сходимости задачи могут применяться различные методы, такие как поиск на линии, автоматическое назначение шага нагрузки и деление его пополам. Если сходимость не может быть достигнута, проводится расчет с уменьшенным приращением нагрузки.

Разработка геометрической модели

Геометрическая модель в зависимости от типа задачи разбивается на осесимметричные или объемные конечные элементы (рис. 2). Для повышения точности расчета используются элементы второго порядка. В предполагаемых зонах концентраций напряжений и их градиентов (контактных зонах и торцевых участках деталей) производится сгущение конечно-элементной сетки. Особенностью расчета МКЭ является необходимость использования для промежуточных деталей в целях корректной передачи нагрузок от охватываемой

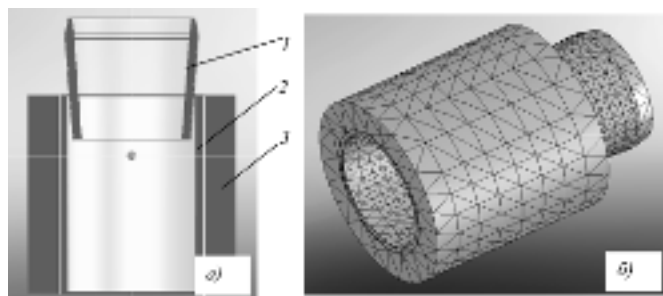


Рис. 2. Конечно-элементная модель формирования составных оболочек вращения с объемными тетраэдральными элементами: а — схема размещения элементов в составных оболочках вращения (1 — инструмент; 2 — втулка; 3 — обойма); б — конечно-элементная сетка в модели

детали к охватываемой и обратно минимум тройного слоя конечных элементов [4]. Контактное взаимодействие может определяться с помощью контактных пар, состоящих из контактных конечных элементов соответствующего основным элементам порядка.

Наличие натягов в составных оболочках вращения обуславливает возникновение узловых сил. В собранном состоянии соединение находится в состоянии равновесия (сумма всех действующих внутри соединения сил равна нулю). Это касается и зон контакта.

В рамках решаемой задачи граничные условия — это только условия симметрии, т. е. подразумевается статическая задача теории прочности без приложения внешних нагрузок.

Представив составную оболочку вращения в виде охватываемой (внешний элемент составной оболочки вращения — обойма), промежуточной (внутренний элемент составной оболочки вращения — втулка) и охватывающей (инструмент — инструмент) деталей, получим систему трех линейных уравнений

$$\begin{cases} [K_1]\{X_1\} = \{P_1\}; \\ [K_2]\{X_2\} = \{P_2\}; \\ [K_3]\{X_3\} = \{P_3\}, \end{cases} \quad (1)$$

где $[K]$ — матрица коэффициентов жесткости детали; $\{X\}$ — перемещения узлов сетки конечных элементов; $\{P\}$ — поверхностные и объемные силы, действующие в узлах сетки; индекс 1 соответствует охватываемой детали, 2 — промежуточной, 3 — охватывающей.

Получить общее решение системы (1) сложно, поэтому реализуется следующий алгоритм определения контактных давлений в составных оболочках вращения, в котором контактные зоны рассматриваются по отдельности, но во взаимосвязи. Выделим контактную зону 1 — «инструмент—втулка» и контактную зону 2 — «втулка — обойма».

Начальные матрицы жесткости деталей $[K_1]$, $[K_2]$ и $[K_3]$ формируются в соответствии с теорией МКЭ [4, 5].

Построение модели

Для построения модели процесса дорнования отверстий деталей многослойного соединения использовалось программное обеспечение Ansys-V12. Исследуемая модель выбрана в виде трех тел — втулки, обоймы и движущегося со скоростью V дорна. В качестве исходных параметров были приняты d_0 , D_0 , L — внутренний и наружный диаметры и длина втулки соответственно; d_1 , D_1 , L — внутренний и наружный диаметры и длина обоймы; d_d , L_d , α — диаметр, длина и угол рабочего (заборного) конуса дорна; $\lambda = i/d_0$ — относительный натяг дорнования ($i = d_d - d_0$).

При разбиении твердых тел на конечные элементы использовались следующие типы элементов: для цилиндра — *Solid 164*, для дорна — *Shell 163*. Элемент *Solid 164* имеет вид параллелепипеда и описывается восемью точками (узлами), степенями свободы которых выбраны перемещение, скорость и ускорение узлов по осям X , Y , Z . Элемент *Shell 163* — четырехузловой, имеющий указанные степени свободы по осям X , Y , Z и вращения вокруг узлов в плоскостях XY , YZ и XZ . Оптимальная длина граней элементов (1 мм) установлена по критерию минимизации необходимых системных ресурсов ЭВМ, удовлетворяющих условиям получения приемлемого результата.

Исследования процесса дорнования проводились для цилиндров из стали 45 со следующими линейными свойствами: плотность — 7800 кг/м^3 ; модуль продольной упругости — $2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона — $0,3$; предел прочности при растяжении — 610 МПа ; предел текучести — 360 МПа . Упрочнение материала в процессе пластической деформации учитывалось путем ввода пяти наиболее характерных точек зависимости $\sigma_i = f(\epsilon_i)$, соответствующей кривой упрочнения стали 45 [2]. Модуль упругости E твердосплавного дорна составляет $0,45...0,55 \text{ ГПа}$, что примерно в $2,5$ раза выше, чем у материала детали. Поэтому считали дорн абсолютно твердым телом, не испытывающим внутренних напряжений и деформаций. Параметры перемещения дорна и граничные условия для детали определены запретом перемещения одного из торцов заготовки вдоль оси Z , а дорну — перемещения по всем осям, кроме Z . Задача является осесимметричной, поэтому достаточно исследовать лишь четверть модели в продольном направлении, что позволяет сократить время решения дифференциальных уравнений и системные ресурсы вычислительной техники. Но в этом случае необходимо наложить условия симметричности на поверхности, полученные в результате разреза.

При определении контактных пар необходимо задавать коэффициенты трения между поверхностями дорна и отверстия втулки, наружной поверхностью втулки и внутренней поверхностью обоймы.

Результаты исследований

В результате расчета получены значения деформаций, напряжений, контактных давлений в любой точке построенной модели, в любой момент времени, в процессе дорнования и после него (рис. 3). Это дает возможность наблюдать в динамике за процессами, протекающими в материале детали.

Проведен численный эксперимент по исследованию рабочих и остаточных контактных давлений, геометрии очага деформации при сборке многослойного соединения.

Целевые параметры исследований: P_1 — рабочее давление в соединении дорн—штулка (дорн в средней части соединения), МПа; P_2 — рабочее давление в соединении штулка—обойма, МПа; P_3 — остаточное дав-

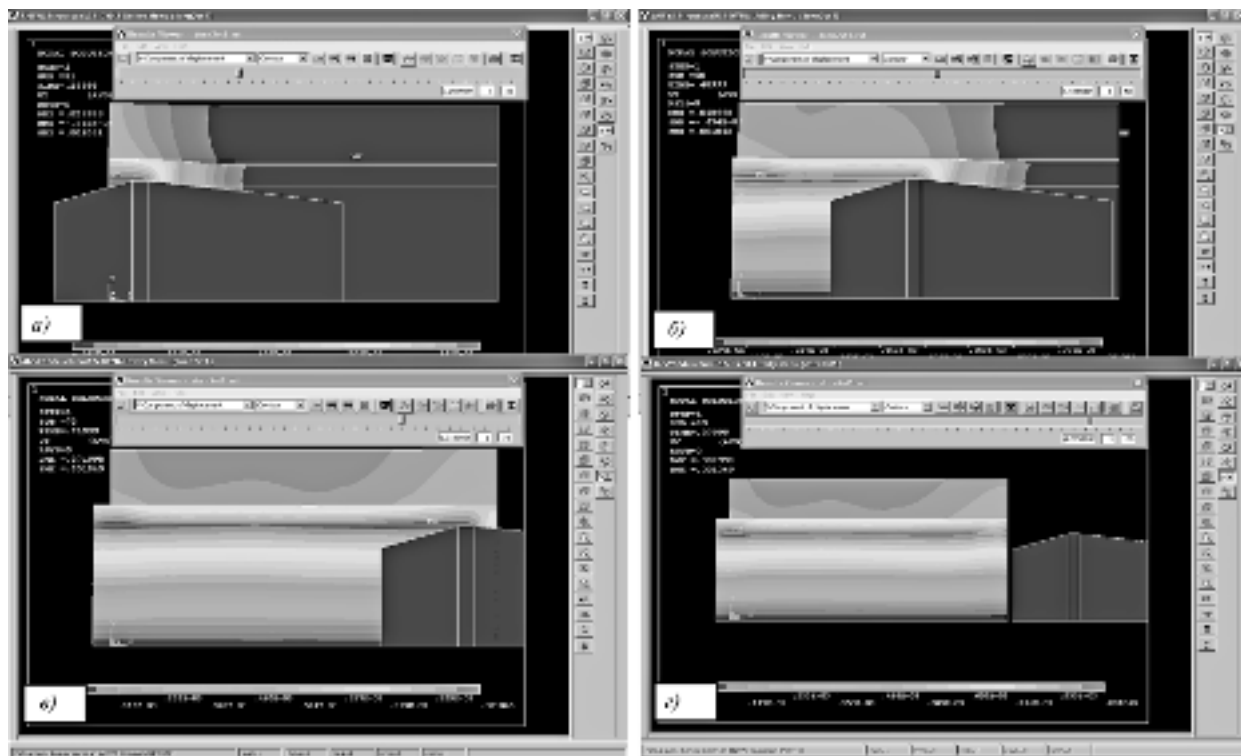


Рис. 3. Моделирование процесса дорнования многослойного соединения на различных этапах:
a — при заходе дорна; *б* — дорн в средней части соединения; *в* — конечный этап деформирования; *г* — при выходе дорна — снятие нагрузки

Анализ регрессионных зависимостей

Коэффициенты модели	Целевые параметры исследований									
	P_1		P_2		P_3		P_4		P_5	
	Коэф.	Зн.	Коэф.	Зн.	Коэф.	Зн.	Коэф.	Зн.	Коэф.	Зн.
B_0	657,4	+	468	+	31,6	+	5,96	+	33,7	+
$B_1\lambda$	-191	-	-105,6	+	13,8	+	5,12	+	1,12	+
$B_2m_{вт}$	-4,81	+	-36,9	+	5,34	+	0,17	-	0,06	-
$B_3m_{об}$	-4,48	-	91,3	+	3,95	+	0,52	+	0,08	+
$B_4\lambda m_{вт}$	7,39	-	-4,1	-	2,82	-	-0,58	+	0,048	-
$B_5\lambda m_{об}$	-28,2	-	-33,6	+	1,7	-	-0,41	-	0,042	-
$B_6m_{вт}m_{об}$	18,8	+	50,1	+	-6	+	-0,46	-	-0,196	+
$B_7\lambda m_{вт}m_{об}$	2,88	+	10,4	-	-5,85	+	-0,53	-	-0,13	+
Адекватности коэффициентов модели										
$F_t = 1,67$	$F_r = 4,1$		$F_r = 9,1$		$F_r = 3,92$		$F_r = 6,9$		$F_r = 14,3$	
Примечания: 1. Оценки адекватности и значимости (Зн.) проведены по критерию Фишера (F_t, F_r — табличное и расчетное значения) для вероятности $P = 0,95$.										
2. Значимость коэффициентов (Коэф.) оценивалась по критерию Стьюдента для $P = 0,95$ (“+” — значимые; “-” — незначимые).										

ление в соединении обойма—втулка (дорн вышел из отверстия), МПа; P_4 — длина контакта дорн — втулка, мм; P_5 — остаточный диаметр отверстия втулки, мм.

Варьируемые параметры исследований: λ — относительный натяг дорнования; $m_{вт}$, $m_{об}$ — относительные толщины стенок втулки и обоймы.

По данным моделирования проведен факторный анализ, результаты которого признаны удовлетворительными, что отражено в таблице.

Заключение

Моделирование дает возможность исследовать напряженно-деформированное состояние многослойного соединения как во время проведения процесса дорнования, так и после прохода инструмента.

Перечень регистрируемых параметров напряженно-деформированного состояния в узлах элементов:

- смещения по осям X, Y, Z (u_x, u_y, u_z);
- компоненты суммарных деформаций ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$);
- компоненты упругих деформаций ($\varepsilon_{упрx}, \varepsilon_{упрy}, \varepsilon_{упрz}, \gamma_{упрx}, \gamma_{упрy}, \gamma_{упрz}$);
- компоненты пластических деформаций ($\varepsilon_{плx}, \varepsilon_{плy}, \varepsilon_{плz}, \gamma_{плx}, \gamma_{плy}, \gamma_{плz}$);
- интенсивность деформаций (ε_i);
- компоненты напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z$);
- интенсивность напряжений (σ_i).

Следует отметить, что при снятии нагрузки, т. е. при выходе дорна из отверстия многослойного соединения, регистрируются параметры остаточных напряжений и деформаций.

Кроме этого, анализ получаемых результатов позволяет определять важные технологические параметры процесса дорнования, которые аналитически и экспериментально трудно или невозможно установить. К ним относятся длина контакта дорна с втулкой, мм; радиус изгиба продольного сечения втулки, мм; высота волны внеконтактной деформации, мм; рабочее давле-

ние в зоне контакта дорна и втулки, МПа; рабочее и остаточное давления в зоне контакта втулки и обоймы, МПа.

Полученная модель открывает широкие возможности для проведения дальнейших исследований по следующим направлениям:

моделирование многозубого дорнования с оптимизацией распределения натягов на зубьях и их осевого расположения;

моделирование процессов сборки многослойных соединений с применением свернутых втулок со специальными свойствами;

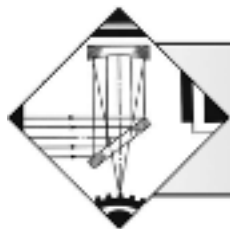
моделирование процессов сборки многослойных соединений с применением проволочных наполнителей со специальными свойствами;

моделирование процессов сборки неосесимметричных многослойных соединений;

моделирование процессов сборки многослойных соединений для обоймы с произвольным наружным контуром.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исаев А.Н., Лебедев А.Р.** Геометрия очага деформации при локально-кольцевой раздаче пустотелого цилиндра методом дорнования // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ—23: Сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф. В 12 т. Т. 5. Секция 5 /под общ. ред. В.С. Балакирева. Саратов, Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. С. 153—156.
2. **Безухов Н.И., Лужин О.В.** Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. М.: Высш. шк., 1974. 200 с.
3. **Ильюшин А.А., Огибалов П.М.** Упругопластические деформации полых цилиндров. М., изд-е МГУ, 1960. 224 с.
4. **Зенкевич О., Морган К.** Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 318 с.
5. **Митчел Э., Уэйт Р.** Метод конечных элементов для уравнений с частными производными: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 185 с.
6. **Зайдес С.А., Исаев А.Н.** Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.



УДК 621.9.048.7

И.А. Пинахин, В.В. Иванов, В.Г. Копченков, В.А. Черниговский
(Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь)
E-mail: ipinakhin@list.ru

Повышение эксплуатационного ресурса твердосплавных режущих инструментов методом объемного импульсного лазерного упрочнения

Представлен метод объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ). Приведены перспективы применения ОИЛУ, его сравнение с известными методами упрочнения с использованием лазера. Установлено, что новый метод лазерного упрочнения позволяет улучшить свойства твердых сплавов по локальному объему за счет однократного лазерного импульса вследствие возникновения и прохождения в материале ударной волны. Указано, что оптимизация режимов ОИЛУ производится при помощи рентгеноструктурного анализа при применении режимов упрочнения, для которых наблюдалось наибольшее увеличение степени дефектности структуры образцов. Приведены результаты производственных стойкостных испытаний твердосплавных режущих инструментов.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, твердосплавный режущий инструмент, ударная волна, рентгеноструктурный анализ, средняя стойкость инструментов, коэффициент вариации стойкости, гамма-процентная стойкость.

Presented a method to volume pulsed laser hardening (VPLH). Given application prospects VPLH by comparison with the known methods using a laser hardening. It is shown that the new method of laser hardening can improve the properties of hard alloys on the local volume due to a single laser pulse due to the occurrence and the passage of the shock wave in the material. Indicated that the optimization of VPLH produced by X-ray diffraction analysis through the use of modes of hardening, in which there was the greatest increase in the degree of imperfection of the sample structure. The results of field tests cemented carbide cutting tools for resistance plants.

Keywords: laser hardening, carbide cutting tools, shock wave, X-ray analysis, the average tool life, the coefficient of variation of resistance, gamma-percent resistance.

В настоящее время область применения твердых сплавов в основном ограничена изготовлением из них режущих инструментов. При этом режущий инструмент относится к изделиям, которые при некотором допустимом изменении геометрических параметров (износе, затуплении и т. п.) сохраняют свою работоспособность. Кроме того, часто в целях снижения производственных затрат используется перетачиваемый режущий инструмент, в том числе и твердосплавный, т. е. наблюдается несколько периодов стойкости.

Возможный путь повышения эффективности использования режущего инструмента заключается в применении методов упрочнения, которые позволяют улучшать механические свойства инструментального материала по объему. Следует отметить, что важным условием при разработке метода упрочнения являются его универсальность, т. е. возможность воздействовать на как можно большее количество материалов, и до-

стижение относительно минимальных затрат времени, энергии и средств при упрочнении.

Большой потенциал, на взгляд авторов, имеет метод объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ), разработанный в Северо-Кавказском федеральном университете. Метод ОИЛУ хорошо зарекомендовал себя при проведении лабораторных и производственных испытаний на ряде предприятий России и Украины [1].

Метод ОИЛУ относится к методам обработки материалов концентрированными потоками энергии, а именно энергии лазерного излучения. Используются импульсные твердотельные лазеры, работающие в режиме свободной генерации, со следующими характеристиками: энергия в лазерном пучке до 400 Дж при диаметре луча 1,0...2,5 мм. Требуемыми эксплуатационными показателями обладают лазеры отечественного производства с активным элемен-

том из стекла или алюмоиттриевого граната с добавкой неодима, как выпускавшиеся ранее (ГОС-1001, Ст.:Nd), так и современные (ЛИС-200, АИГ:Nd). Данные лазеры могут обеспечивать работу в одномодовом режиме с достаточно высокими требованиями по когерентности, монохроматичности и расходимости излучения.

В основе метода ОИЛУ лежит изменение свойств упрочняемого материала по локальному объему за счет однократного лазерного импульса (рис. 1).



Рис. 1. Схема упрочнения режущего инструмента при использовании ОИЛУ

Исследования, проведенные рядом авторов (А.Х. Клэр, В.С. Коваленко, М.А. Криштал, А.Г. Григорьянц, Н.Н. Рыкалин, А.А. Веденов) [2], показали, что в результате лазерного воздействия в материале возникают ударные волны. Область их действия была до 3,0 мм (чаще до 1,0 мм) и перекрывалась областью термического воздействия. Считалось, что природа ударной волны, вызванной лазерным излучением, ничем не отличается от природы ударной

волны, инициированной другими источниками (например, взрывом или ударом). Отсюда следует, что возникновение ударной волны в твердом материале после лазерного воздействия возможно исключительно при воздействии сверхкороткого импульса на режимах модулированной добротности ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) или синхронизации мод (10^{-12} с) для выполнения условия

$$\tau < \frac{d}{c_{зв}^*}, \quad (1)$$

где d — диаметр луча лазера; τ — продолжительность импульса; $c_{зв}^*$ — скорость звука в твердом теле.

В случае ОИЛУ наблюдается несколько иная картина. Для синхронизации происходящих процессов по времени при ОИЛУ была использована система LabVIEW. Образцы кубической формы (длина грани 30 мм) из твердых сплавов ВК8, Т5К10, ТТ7К12, КНТ-16 облучались при следующих режимах: энергия в лазерном пучке $E = 200 \dots 400$ Дж; диаметр луча $d = 1,4 \dots 2,0$ мм; длительность импульса $0,8 \cdot 10^{-3}$ с. На образцы наклеивались тензорезисторы цепочками, состоящими из 4 и 5 штук с базой 1 мм и шагом 6 мм, в продольном и поперечном направлениях предполагаемого движения ударной волны.

Как показано на рис. 2, ударная волна проходит по материалу с некоторым запозданием, величина которого зависит от режимов ОИЛУ и марки твердого сплава. При этом для всех случаев наблюдается одинаковая картина — прохождение ударной волны с последующим затуханием.

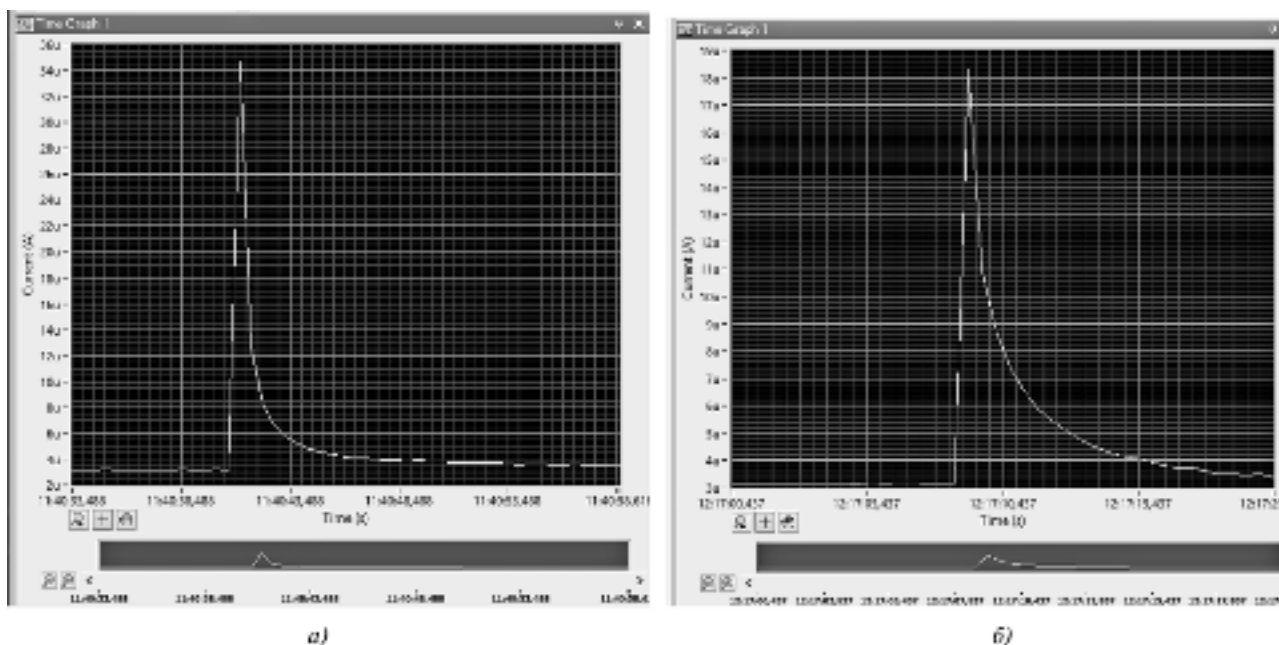


Рис. 2. Зависимость распространения ударной волны от времени при ОИЛУ: а — Т5К10; $E = 200$ Дж; $d = 1,6$ мм; расстояние от места воздействия лазерного импульса 12 мм; б — КНТ-16; $E = 400$ Дж; $d = 1,8$ мм; расстояние от места воздействия лазерного импульса 24 мм

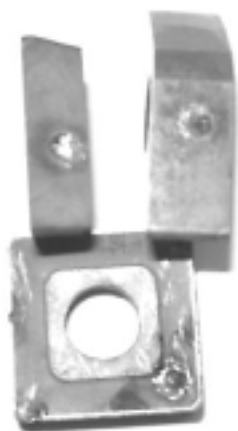


Рис. 3. Твердосплавные пластины, прошедшие ОИЛУ

В месте воздействия лазерного импульса образуется кратер (рис. 3). При этом наблюдается потеря массы образца, величина которой зависит от диаметра луча лазера и полезной энергии облучения (рис. 4), а также химического состава материала.

Проведенный рентгеноструктурный анализ с использованием рентгеновских дифрактометров ARL Xtra, «Дифрей-401» и «Минилаб-6» для образцов из твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, ТТ7К12, КНТ-16, Sandvik показал увеличение степени дефектности структуры образцов (уширение дифракционных линий, уменьшение межплоскостных расстояний, повышение интенсивности отраженных импульсов), что говорит об изменении структуры материала [3]. Результаты рентгеноструктурного анализа с расчетом размеров блоков мозаики, микроискажений кристаллической решетки и плотности дислокаций приведены в [4].

Многочисленные лабораторные испытания образцов из различных марок твердых сплавов, прошедших ОИЛУ, с использованием методов форсированных испытаний, исследования твердости согласно стандарту ИСО 3878, износостойкости согласно стандарту ASTM В611-85 и прочности согласно стандарту ISO/CD 3327 показали прямую корреляционную связь между изменением механических свойств и степенью дефектности структуры упрочненных образцов. При этом с увеличением степени дефектности структуры образцов наблюдалось повышение твердости, износостойкости и прочности. Поэтому при выборе оптимальных режимов ОИЛУ в дальнейшем использовался рентгеноструктурный анализ исходных и упрочненных образцов, что позволило значительно снизить трудоемкость подготовительных работ, особенно при переходе на другие материалы (быстрорежущие и износостойкие

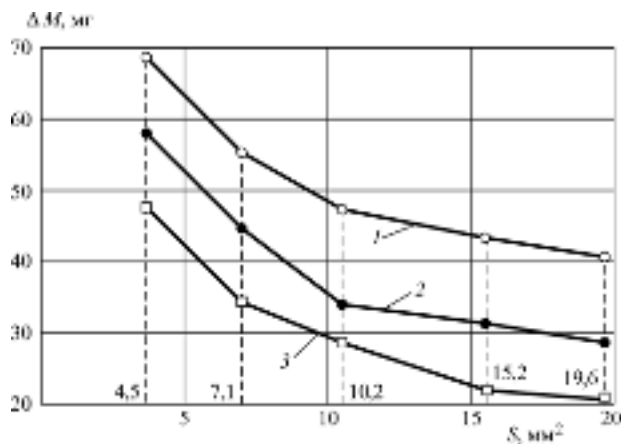


Рис. 4. Зависимость потери массы ΔM твердого сплава Т5К10 от площади луча лазера S при различной энергии облучения:
1 – 400 Дж; 2 – 200 Дж; 3 – 100 Дж

стали, титановые сплавы и др.), а также замены устаревшего лазера ГОС-1001 на высокопроизводительный лазер ЛИС-200.

Производственные испытания твердосплавных режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, были проведены на 8 предприятиях России и Украины.

Всего было испытано 12 партий режущих инструментов общим количеством 1200 штук. При проведении испытаний контролировалась чистота эксперимента, что заключалось в сравнении результатов испытаний исходного упрочненного инструмента и исходного неупрочненного, упрочненного и неупрочненного после первой переточки,

упрочненного и неупрочненного после второй переточки и т. д. Это связано с тем, что в результате заточной операции могли изменяться свойства режущих инструментов.

Для оценки стойкости режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, были использованы следующие показатели: средняя стойкость инструментов \bar{T} , коэффициент вариации стойкости K_v , гамма-процентная стойкость T_γ , которые определялись по формулам

$$\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (2)$$

где T_i — стойкость инструмента при i -м испытании; n — число испытаний;

$$K_T = \frac{\sigma}{\bar{T}}, \quad (3)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение;

$$T_\gamma = \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}} a, \quad (4)$$

где a, b — параметры закона Вейбулла.

В табл. 1 представлены результаты производственных испытаний твердосплавных резцов. Все данные говорят о росте объемной стойкости инструментов, прошедших ОИЛУ, в 1,42...2,18 раза (для сплавов российского производства в 2,04...2,18 раза). Для всех партий инструментов наблюдается снижение коэффициента вариации стойкости в 1,2...3,1 раза. Более существенные результаты имеют место в повышении гамма-процентной стойкости (без учета твердого сплава Sandvik). Так, при вероятности 0,9 это повышение составляет 2,11...2,56 раза.

Таблица 1

Результаты производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов после ОИЛУ

Предприятие	Твердый сплав	Режущий инструмент	\bar{T} , мин	K_T	T_γ , мин
Ковровский завод имени В.А. Дегтярева	BK8	Проходные резцы с напайными пластинами	$\frac{36}{74}$	$\frac{0,28}{0,21}$	$\frac{18}{38}$
Ставропольский завод автоприцепов	T5K10, T15K6, TT7K12	Проходные резцы с 3-, 4-, 5-гранными пластинами	$\frac{22}{48}$	$\frac{0,28}{0,09}$	$\frac{16}{34}$
Новокраматорский машиностроительный завод	T5K10, T15K6	Проходные резцы с 4-гранными пластинами	$\frac{4,4}{9,2}$	$\frac{0,15}{0,1}$	$\frac{1,8}{4,6}$
ПО "Волгоцеммаш", г. Тольятти	КНТ-16	Проходные резцы с напайными пластинами	$\frac{52}{106}$	$\frac{0,2}{0,15}$	$\frac{21}{48}$
ОАО "СТАПРИ — Ставропольский завод поршневых колец"	BK8	Проходные резцы с напайными пластинами	$\frac{34}{72}$	$\frac{0,24}{0,18}$	$\frac{26}{52}$
ЗАО «КомТех-Плюс», г. Ростов н/Д.	Sandvik	Проходные резцы с 4-гранными пластинами	$\frac{48}{68}$	$\frac{0,12}{0,1}$	$\frac{28}{42}$

Примечание. В знаменателях дробей показаны значения \bar{T} , K_T , T_γ для режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, в числителе — для неупрочненных.

Таблица 2

Условия проведения производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов после импульсной лазерной обработки

Вид режущего инструмента	Токарный расточной резец, $\varphi = 75^\circ$	
Марка твердого сплава	BK8	
Оборудование	Станок 1E365	
Обрабатываемый материал, твердость	ВЧ, 156...197 НВ	
Состояние обрабатываемой поверхности	Литейная корка	
Число неупрочненных и прошедших ОИЛУ резцов	По 100	
Режим резания	Глубина t , мм	3,25
	Подача S , мм/об	0,35
	Скорость V , м/мин	37

Таблица 3

Результаты производственных испытаний в условиях, приведенных в табл. 2

Показатель	Неупрочненные инструменты					Прошедшие ОИЛУ инструменты				
	Период стойкости									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
\bar{T}	33,8	33,6	34,2	34,4	34,0	70,8	72,6	73,8	72,1	71,2
K_T	0,26	0,24	0,23	0,25	0,22	0,16	0,19	0,20	0,18	0,17
T_γ	28	27	24	26	25	51	52	54	53	50
$\bar{T}_{\text{ОИЛУ}}/\bar{T}_{\text{исх}}$	—	—	—	—	—	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1
$K_{T\text{исх}}/K_{T\text{ОИЛУ}}$	—	—	—	—	—	1,6	1,3	1,2	1,4	1,3
$T_{\gamma\text{ОИЛУ}}/T_{\gamma\text{исх}}$	—	—	—	—	—	1,8	1,9	2,3	2,04	2,0

Наибольший эффект от использования метода ОИЛУ наблюдался для перетачиваемого режущего инструмента. В табл. 2, 3 приведены условия проведения и результаты производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, в условиях ОАО «СТАПРИ—Ставропольский завод поршневых колец».

Следует отметить тяжелые условия резания — обработка по литейной корке высокопрочного чугуна.

Как видно из табл. 3, для прошедших ОИЛУ режущих инструментов наблюдается повышение стойких характеристик для каждого периода стойкости (переточки), что подтверждает объемный характер упрочнения. При упрочнении перетачиваемого режущего инструмента очень важным является правильный выбор расстояния от места облучения до главной режущей кромки. Ранее проведенные исследования показали, что степень дефектности структуры твердого сплава ВК8 является наибольшей на расстоянии 18 мм от места облучения. В рассматриваемом случае с учетом расхода материала на износ и переточки выбиралось расстояние от места облучения до главной режущей кромки, равное 22 мм, чтобы пик улучшения механических свойств пришелся на середину назначенного ресурса резцов (третий период стойкости).

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработан метод объемного упрочнения твердосплавного режущего инструмента (до 30 мм от места воздействия лазерного луча).

2. Разработанный метод ОИЛУ имеет низкие трудоемкость и энергоемкость за счет однократного воздействия лазерного луча.

3. Оптимизация режимов ОИЛУ (полезная энер-

гия облучения, длительность импульса, диаметр луча лазера) проводится при помощи рентгеноструктурного анализа по оценке изменения степени дефектности структуры материалов.

4. Результаты производственных испытаний режущих инструментов из твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, ТТ7К12, КНТ-16, Sandvik показали повышение стойкости упрочненных инструментов в 1,42...2,18 раза, снижение коэффициента вариации стойкости в 1,2...3,1 раза, повышение гамма-процентной стойкости в 2,11...2,56 раза.

5. Снижение коэффициента вариации стойкости и повышение гамма-процентной стойкости говорят о целесообразности использования режущих инструментов, упрочненных ОИЛУ, на автоматических линиях, когда производится принудительная смена инструментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пинахин И.А., Копченков В.Г., Гончаров В.М. Влияние импульсной лазерной обработки твердосплавных режущих инструментов на эффективность обработки металлов резанием // Вестник ДГТУ. 2010. № 8. С. 1235—1241.

2. David W., Allan H., Clauer R. Ravindranath Application of laser peening to titanium alloys // ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Division Conference. San Diego. CA. July 2529. 2004.

3. Покровский С.Г. Образование упрочненного слоя в стали Х20Н20 при обработке лазерными импульсами // Технология металлов. 2000. № 9. С. 8—14.

4. Пинахин И.А., Иванов В.В., Черниговский В.А. Исследование изменения наноструктуры твердых сплавов после объемного импульсного лазерного упрочнения // Нанотехнологии. 2014. № 2. С. 14—20.





УДК 621.9.047

А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, А.А. Клименченков
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: soy4astnik@mail.ru

Маркирование металлических изделий с эластичными покрытиями без их разрушения

Предложен новый способ нанесения информации на металлические изделия с эластичным диэлектрическим покрытием, позволяющим создавать стандартные текстовые и цифровые обозначения на деталях, в том числе при их эксплуатации, без нарушения сплошности покрытий в процессе дальнейшего использования изделий.

Ключевые слова: способ, покрытие, нанесение информации.

We propose a new method of marking of metal parts with elastic dielectric coating, which allows us to implement standard text and numerical labeling of parts, including those in operation, making no harm to the continuity of the coating in the process of the further use of the parts.

Keywords: method, coating, marking.

Введение

В период эксплуатации изделий требуются проведение их многократных осмотров, периодические дефектации. Сведения о результатах анализа состояния деталей вносятся в сопроводительную документацию и должны быть отражены на элементах изделий. В случае испытания деталей, имеющих эластичные покрытия из резины, клеев, лаков, полиуретана и других материалов, доступ к их металлической основе ограничен и для нанесения долговременной информации требуется удалять покрытие в месте маркирования, а также приходится вносить при маркировании напряжения в поверхностный слой основы. Как правило, такие операции возможны на ненагруженных участках деталей, которые могут оказаться недоступными без разборки узлов.

Предложенный ранее способ [1] дает возможность выполнить в металле контур информационных знаков, но при этом могут возникать местные напряжения и нарушается защитное диэлектрическое покрытие, восстановление которого не всегда возможно и осуществимо.

Авторам удалось создать метод нанесения информации без углубления в поверхность металла и исключить разрушение эластичного покрытия после маркирования.

Механизм нанесения информации

В [2] предложен способ нанесения в магнитном поле информации на немагнитные металлические изделия путем локального наращивания магнитореологической жидкости по контуру знаков с помощью элементов, размещенных в форме раstra и позволяющих создавать магнитное поле в месте формирования информации. Полученные таким методом знаки требовали последующей защиты от разрушения и были недолговечны. Покрытия, защищающие информацию, как правило, наносятся в процессе изготовления детали, и их нарушение в период эксплуатации изделия не допускается. Нанесение информации на магнитные сплавы возможно, если они имеют диэлектрическое покрытие, позволяющее формировать на нем знаки локальным магнитным полем. Значительное количество применяемых в технике покрытий выполнено из эластичных диэлектрических материалов, позволяющих пропускать струю жидкости или металлическую иглу и обеспечить смыкание краев отверстия без нарушения сплошности покрытия. Наиболее употребляемые эластичные материалы приведены в табл. 1.

Характеристики эластичных покрытий

Материал эластичного покрытия	Толщина слоя, пригодного для маркирования, мм	Удельное сопротивление, Ом · см	Адгезия к стали, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Пробойное напряжение, кВ, не менее
Резина	Более 0,05	$2 \cdot 10^{15}$	1,5...1,8	1,49...2,63	12...15	30...50
Натуральный каучук	Более 0,05	$2 \cdot 10^{15}$	1,46...1,87	2,4...3,5	10...16	15...32
Искусственный каучук	Более 0,10	$2 \cdot 10^{15}$	1,2...2,2	1,2...2,0	6...10	10...30
Полиуретан	0,20...0,50	10^7	1,8...2,0	10...12	4...6	15...20
Эмаль типа ЭП	0,02...0,20	10^{14}	10...12	9...14	1,1...1,2	10...15
Клеи, лаки	0,02...0,30	10^{16}	8...10	3,4...3,9	4...6	15...20
Грунтовка	0,15...0,50	10^{15}	10...13	2,9...3,4	4...6	15...30
Фторопласт	0,10...0,50	10^{14}	1,1...1,3	1,83...1,95	4,0...5,2	20...30
Фотохимическое покрытие из светочувствительных материалов (например, фотоэмульсии)	0,05...0,10	$10^{12}...10^{14}$	5...6	1,2...1,5	6...10	12...18

Нанесение информации с вскрытием покрытия

В [3] приведен положительный опыт нанесения информации на любые (магнитные и немагнитные) металлические детали с диэлектрическим покрытием путем получения знаков высоковольтными электрическими разрядами, формирующими растровое изображение контуров. Здесь исследованы различные, в том числе эластичные, покрытия. Установлено, что получить стандартные шрифты этим методом удастся при высоте знаков более 3,5 мм. Кроме того, при использовании в качестве покрытия каучука и резины не удалось обеспечить получение углубления по контуру знаков, так как продукты горения покрытий экранировали прохождение тока к металлической основе детали. Поэтому контур знаков под покрытием формировался нечетким и достаточную контрастность имел только при крупных шрифтах.

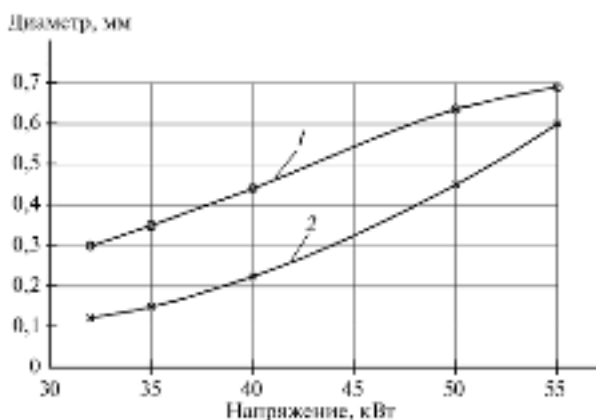


Рис. 1. Изменение диаметра отверстий в покрытии из эластичной резины при растровом маркировании (толщина покрытия 0,12 мм): 1 — диаметр цветного изображения на металлической основе детали; 2 — диаметр отверстия в покрытии после разряда

На рис. 1 показаны диаметры отверстий (кривая 2), остающихся в резиновом покрытии после электрических импульсов, формируемых разрядником из вольфрама. Кривая 1 показывает зону действия разряда на деталь под покрытием. Из табл. 1 следует, что для резины и каучука относительное удлинение покрытия в местах действия импульса составляет от 6 до 16 %, поэтому диаметр отверстия в покрытии (см. рис. 1) может снижаться до 3 раз, хотя для других эластичных покрытий, приведенных в табл. 1, степень изменения в них диаметра отверстия относительно контрастного пятна на металлической основе может оказаться меньшей, чем для резины.

В большинстве случаев присутствие отверстий в покрытии после маркирования нежелательно, так как при этом деталь лишается защиты от воздействия внешней среды (от коррозии, загрязнений и др.).

Маркирование без разрушения покрытия

Эластичные покрытия позволяют пропустить через них к металлической основе струю жидкости под высоким давлением, после чего под действием упругих сил место прохождения жидкости полностью закрывается. Такая задача была решена при создании инжекторов, применяемых в технике, быту, медицине, где жидкости, поступающие через сопло под давлением 20...22 МПа, проходили через эластичное покрытие толщиной до 0,5...0,6 мм, после чего отверстия полностью закрывались. Испытания инжекторов показали (рис. 2), что для рабочих сред на базе воды их можно использовать для растрового маркирования деталей с покрытиями, приведенными в табл. 1.

Плотный прижим сопла к покрытию (кривая 1 на рис. 2) позволяет подавать рабочую среду под покры-

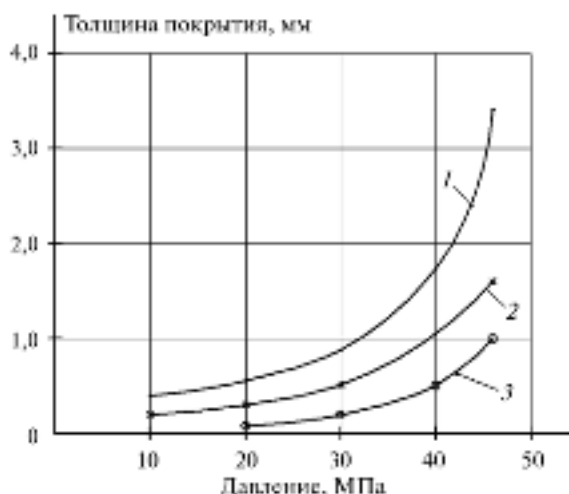


Рис. 2. Толщина эластичного покрытия, пробиваемого струей жидкости под давлением (материал покрытия – эмаль типа ЭП). Расстояние от среза сопла до покрытия: 1 — вплотную; 2 — 10 мм; 3 — 30 мм

тие толщиной до нескольких миллиметров. Это возможно, если жидкость дозируется и адгезия покрытия к металлической основе детали незначительна (см. табл. 1). При высокой адгезии (лаки, краски, эмали) сопротивление от упругих сил (прочность растяжения в табл. 1) может оказаться недостаточным для отрыва покрытия, поэтому потребуется значительно снизить толщину слоя, рекомендованного на рис. 2.

При назначении режима маркирования следует учитывать возможное изменение начальной длины эластичного покрытия после прохождения через него струи (относительное удлинение в табл. 1) и время релаксации деформированного слоя.

Обычно при маркировании (особенно труднодоступных мест) сопло инжектора размещают на некотором удалении от объекта (кривые 2 и 3 на рис. 2).

В зависимости от диаметра сопла инжекторы могут создавать давление до 45 МПа, хотя доза жидкости в этом случае снижается до десятых долей миллилитра. При расчете режимов выполнения операции маркирования целесообразно ограничить объем рабочей среды с учетом ее

потребности только на нанесение индексов (в зависимости от числа, высоты знаков и др.) Излишек жидкости, который может оказаться между покрытием после его регенерации и металлической основой детали, нежелателен, так как он нарушает адгезию покрытия, может вызвать коррозию в месте нанесения информации.

Формирование знаков под покрытием может выполняться путем анодного растворения металла локальным электрическим полем, подаваемым растровым инструментом. Для крупных знаков (высота более 5 мм) такой метод позволяет нанести различимую информацию с ограниченной контрастностью.

Применение в качестве рабочих сред реологических жидкостей (табл. 2) дает возможность сформировать информационные знаки высокой контрастности, сохраняющие контрастность и долговечность под эластичным покрытием в течение всего срока эксплуатации изделия.

В табл. 2 в качестве поверхностно-активной добавки (ПАВ) рабочих сред приводится олеиновая кислота. Опыт показал, что стойкость реологических жидкостей без ПАВ невысока и при использовании магнетита с крупными частицами наблюдаются быстрая агрегация и утрата рабочей средой свойств по реологии.

Из рассмотренных жидкостей для реологических сред предпочтительнее оказалась техническая вода с небольшим содержанием ПАВ (олеиновой кислоты), так как ее стойкость достаточна для нанесения информации в течение десятков дней, а напряженность магнитного поля в процессе маркирования не превышает критического уровня, вызывающего пробой диэлектрического покрытия. Если есть возможность использовать при маркировании свежеприготовленную реологическую жидкость, то удастся относительно дешево получить четкие знаки с высокой контрастностью и устойчивостью к истиранию.

Износостойкость информации зависит от степени защиты ее от контакта с разрушающей средой (механические, тепловые, химические воздействия). Вязкое покрытие, восстанавливающее целостность после прохождения струи рабочей жидкости, хорошо фиксирует контур знака и препятствует нарушению его качества,

Таблица 2

Реологические жидкости, используемые для нанесения информации

Основа	Состав				Напряженность поля, мВ/м	Вязкость, Па · с	
	Добавки					жидкости	локальная
	Магнетит		Соляная кислота, %	ПАВ, %			
Размер частиц, нм	Содержание, %						
Дистиллированная вода	5...15	65...70	—	10...15	6...8	0,007	0,75
Техническая вода	5...15	50...55	—	3...5	4...5	0,007	0,7
	80...100	30...40	2	—	2,5...3	0,014	1,5

что значительно улучшает эксплуатационные показатели маркирования.

При нанесении информации на детали без покрытия было выявлено, что на четкость (а следовательно, и читаемость) знаков большое влияние оказывает шероховатость исходной поверхности металлической основы детали, которая должна быть по Ra от 0,16 до 5 мкм. При меньшей высоте неровностей жидкая рабочая среда скатывается с места маркирования и не всегда удается получить качественное нанесение информации. В случае высоты неровностей по Ra более 5 мкм нарушается четкость знаков.

Проведенные эксперименты показали, что реологическая жидкость хорошо удерживается в месте локального действия магнитного поля (по контуру знаков), поэтому после расширения эластичного покрытия (см. табл. 1) нанесенная информация стойко сохраняется в первоначальном виде даже на полированных поверхностях ($Ra < 0,16$ мкм). Это заметно расширяет технологические возможности маркирования с наложением электрического поля, особенно при дефектации изделий без их разборки.

Контрастность знаков зависит от толщины нанесенного на них слоя реологической жидкости с высокой объемной концентрацией ферромагнетиков. Как видно из рис. 3, толщина выпуклого знака зависит от вида эластичного покрытия и интенсивности действия магнитного поля.

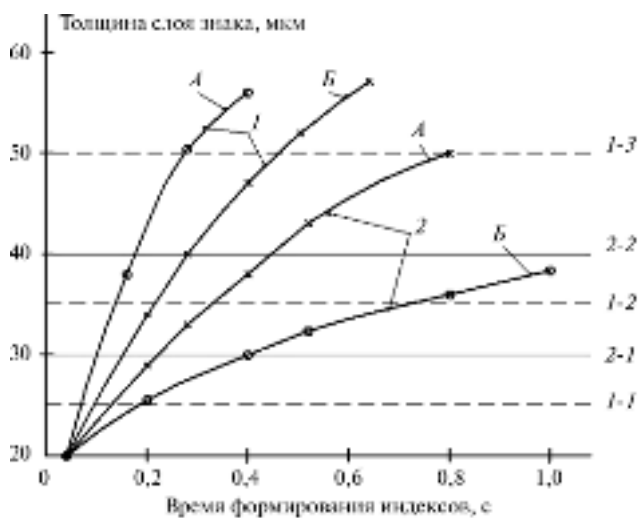


Рис. 3. Растровое маркирование материала с диэлектрическим покрытием (толщина 0,3 мм) и получением выпуклых знаков:

1 — на металлической немагнитной детали с тонким (0,05...0,1 мм) диэлектрическим сплошным покрытием; 2 — на металлической немагнитной детали с толстым (0,3...0,5 мм) диэлектрическим сплошным покрытием. Частота следования импульсов: А — 400 Гц; Б — 50 Гц. Граница читаемости информации: 1-1 — на стали; 1-2 — на титановом материале; 1-3 — на алюминиевом сплаве; 2-1 — на резиновом покрытии; 2-2 — на лакокрасочном покрытии

Для тонких покрытий нарастание толщины контура знаков на немагнитных металлах идет интенсивнее, так как здесь упругое сопротивление покрытий (см. табл. 1) в меньшей степени тормозит образование штриха. Частота подачи импульсов для создания магнитного поля, формирующего профиль знаков, существенно влияет на их толщину, которая определяет контрастность (читаемость) информации. Увеличение частоты повышает качество маркирования, хотя и усложняет конструкцию источника тока.

Для немагнитных материалов информация может наноситься на металл под слоем покрытия или же на внутреннюю поверхность покрытия. При маркировании нержавеющей стали толщина слоя покрытия, формирующего знаки, должна быть не менее 30 мкм (граница 1-1 на рис. 3); для титановых материалов — 35 мкм (граница 1-2); для алюминиевых сплавов 40...50 мкм (граница 1-3), так как в последнем случае слабоконтрастная реологическая жидкость на базе воды требует формирования более высоких выступов по контуру знаков, увеличивающих читаемость информации.

Если информация наносится на внутреннюю часть эластичного диэлектрического покрытия (например, в случае маркирования магнитных материалов), то толщина слоя контура знаков (как правило, имеющих зеркальное отображение) зависит от цвета материала покрытия: на темной резине она составляет около 30 мкм (линия 2-1 на рис. 3); для цветных эмалей, красок — несколько больше (линия 2-2).

Нанесение информации на детали с толстым покрытием

Реологическая жидкость может формировать знаки с толщиной в несколько десятых долей миллиметра, но имеются детали (например, обрешиненные), где слой резины измеряется десятками миллиметров и более. Тогда потребуется чрезмерно высокое давление жидкой рабочей среды (см. рис. 2) и целесообразнее использовать для этого металлические иглы специальной конструкции, не вызывающие разрыва эластичного покрытия. Авторами разработан вариант групповой заточки игл электроабразивным методом, не нарушающим режущую кромку и не вызывающим образования заусенцев [4]. Получение режущей части каплевидной формы дает возможность выполнять проколы в эластичных материалах без разрезания кромок с последующим полным перекрытием отверстия за счет упругих свойств покрытий. В рассматриваемом случае после прокола поверхностного слоя под давлением подается (например, игольчатым инжектором) нормированная доза жидкости в пространство под металлической основой детали, после чего

растровым инструментом из сплошных стержней под покрытием формируется магнитное поле по контуру знаков, обеспечивающих получение информации с требуемой контрастностью. Такая информация удерживается эластичным покрытием, а излишек жидкости с малым содержанием ферромагнетиков испаряется или распределяется под покрытием, не нанося вреда созданной информации.

Выводы

1. Проведены исследования по нанесению растровым методом информации на металлические детали, имеющие слой эластичного диэлектрического покрытия, с сохранением его сплошности и без необходимости удаления металла по контуру знаков.

2. Разработаны технологические схемы маркирования магнитных и немагнитных материалов с использованием реологических жидкостей на базе воды. При этом для деталей из магнитных сплавов информация может наноситься на внутреннюю сторону покрытий, что ранее не применялось.

3. При большой толщине диэлектрических эластичных покрытий предлагается вводить жидкую рабочую среду через иглы, раздвигающие отверстие прокола без разрезания покрытия, с последующим формировани-

ем растровых знаков, что значительно расширяет возможности маркирования, позволяет в процессе диагностики и ремонта изделий наносить необходимую информацию без разрушения покрытий.

4. Применение реологических жидкостей для маркирования упрощает конструкцию растрового электрода-инструмента за счет замены пустотелых элементов, формирующих знаки, на стержни из стандартной проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 973271 СССР. Способ маркирования деталей из токопроводящих материалов / Смоленцев В.П. и др. 1982. Бюл. № 42.

2. Пат. 2229966 РФ. Электрод-инструмент для электрохимического маркирования и способ его изготовления / Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Левин А.В., Рабу Р.Х. 2004. Бюл. № 6.

3. Осекон А.Н. Механизм размерного формирования информационных знаков в диэлектрических покрытиях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4/3. С. 62—66.

4. Пат. 2237569 РФ. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / Некрасов А.Н., Смоленцев В.П., Бондарь А.В. и др. 2004. Бюл. № 28.

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка
на научно-технический и производственный журнал
«УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ»

Подписные индексы по каталогам:

«Роспечать» — **85159**,
«Пресса России» — **39269**,
«Почта России» — **60252**.

*Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи
или непосредственно в издательстве по адресу:*

*Россия, 107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4,
ООО «Издательство Машиностроение»
Тел.: (499) 269-66-00 (отдел реализации), (499) 268-40-77 (редакция);
e-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru*

Ю.М. Кусков, А.И. Евдокимов,
(Институт электросварки им. Е.О. Патона, Киев, Украина)
E-mail: evdokimow@i.ua

Электрошлаковая наплавка износостойких легированных чугунов

Легированные чугуны являются одним из наиболее износостойких материалов среди сталей и сплавов, используемых при работе в абразивных средах. Одним из существенных их недостатков является невозможность восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей, изготовленных из этих материалов, либо изготовления новых биметаллических изделий с помощью дуговой наплавки. Решить эту задачу возможно в случае применения электрошлаковой технологии наплавки дискретным наплавочным материалом в специальном секционном устройстве — токоподводящем кристаллизаторе. Устройство обеспечивает одновременное выполнение нескольких функций: осуществляет электрошлаковый процесс, вращает шлаковую и металлическую ванны в горизонтальной плоскости, инокулирует кристаллизующийся металл, формирует наплавляемый металл с повышенными скоростями охлаждения.

Результаты выполненных опытных наплавов (оси, валки, втулки, плиты) и промышленных испытаний (валки прокатных станков) позволяют рекомендовать этот способ наплавки для широкого внедрения в промышленность. Дополнительным преимуществом способа может стать технологический процесс дифференцированного управления при наплавке скоростью охлаждения наплавленного металла.

Ключевые слова: износостойкие легированные чугуны, электрошлаковая наплавка, дискретная присадка, токоподводящий кристаллизатор.

Alloyed cast irons are one of the most wear-resistant materials among steels and alloys applied for operation in abrasive environments. One of their significant drawbacks is the inability of rebuilding worn working surfaces of parts made from these materials or manufacturing new bimetal products using arc surfacing. This task can be solved by application of electroslag technology of surfacing by discrete surfacing material in a special sectioned device — current-conducting mould. The device supports simultaneous multiple functions: performs the electroslag process, rotates the slag and metal pools in the horizontal plane, inoculating the solidifying metal, and forms the deposited metal with increased cooling rates.

Results of the performed test surfacing (axles, rolls, bushings, plates) and production trials (mill rolls) allow recommending this methods for wide introduction into industry. Technology of differentiated control of deposited metal cooling rate in surfacing can become an additional advantage of this process.

Keywords: wear-resistant alloyed, cast iron, electroslag welding, discrete additive, current-conducting mould.

Разработанный в Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона токоподводящий кристаллизатор (ТПК) предназначен для электрошлаковой наплавки различных типов материалов, в том числе обладающих высокой износостойкостью, включая такие распространенные стали и сплавы, как быстрорежущие, высокоуглеродистые и комплексно-легированные стали, нелегированные, низколегированные и легированные чугуны, содержащие повышенные количества карбидов типа MC , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ [1, 2]. Последний тип материалов наиболее интересен для износостойкой наплавки. Практически к нему можно отнести четыре вида чугунов: хромоникелевые (наиболее известные из них — чугуны типа НИХАРД), высокохромистые — с содержанием хрома 15...28 % (либо с пониженным до 5...11 % содержанием Cr при комплексном легировании сплава), ванадиевые — с 5...10 % V и высокомарганцевые — с 5...15 % Mn .

Основной структурной характеристикой этих сплавов является их гетерогенность. Высокая износостойкость гетерогенных сплавов может быть обеспечена при наличии твердой износостойкой составляющей в виде

мелких изолированных включений и более мягкой, но достаточно прочной и вязкой основы. Именно такой тип износостойкого гетерогенного материала позволяет получить разработанная технология электрошлаковой наплавки дискретной присадкой в токоподводящем кристаллизаторе [4]. Возможности данной технологии определяются как конструктивными особенностями ТПК, так и присущими любой электрошлаковой технологии с использованием водоохлаждающих формирующих устройств преимуществами. Благодаря своему конструктивному исполнению ТПК является универсальным устройством, позволяющим без применения дополнительных технических средств осуществлять сколь угодно долгое протекание электрошлакового процесса, вращение шлаковой и металлической ванн в горизонтальной плоскости (воздействие на кристаллизующийся металл) и формирование наплавленного металла в условиях плавления в шлаковой ванне дискретной присадки в виде дроби, зерен, гранул, частиц и т. п. (формирование равноосной мелкозернистой структуры) и ускоренного охлаждения жидкой металлической ванны небольших размеров (измельчение структурных состав-

Механические свойства литого и наплавленных хромистых чугунов

Способ получения чугуна	Содержание элементов, % мас.								σ_B , МПа		KCV, Дж/см ²		$\sigma_{\text{итр}}$, МПа	Стрела прогиба, мм	HRC
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	20 °C	600 °C	20 °C	600 °C			
Наплавленный	2,4	0,9	0,8	19,0	1,4	1,0	—	—	645	599	7,0	12,3	1267	1,71	47
->-	2,6	0,7	0,9	15,2	1,2	0,9	—	—	542	556	8,0	7,3	924	1,15	50
->-	2,5	1,0	0,8	28,0	1,2	1,1	1,0	—	817	796	13,0	20	1654	2,89	48
->-	2,4	0,8	0,8	15,5	—	1,0	—	0,3	504	639	4,0	8,7	1224	1,99	43
Литой	3,0	0,5	0,2	16,5	—	—	—	—	420	320	—	—	400	0,32	45

ляющих, повышение механических свойств). Помимо этого, как и большинству электрошлаковых технологий, способу наплавки в ТПК присущи высокая производительность процесса (десятки и сотни килограммов наплавленного металла в час), получение металла высокого качества за счет его обработки высокоактивными шлаками и «мягкое» тепловое воздействие на основной и кристаллизующийся металл за счет распределенной в шлаке теплоты, в отличие от дуговой наплавки с ее локальным нагревом в зоне дуги (что не позволяет выполнять наплавку металлов, содержащих твердые и хрупкие структурные составляющие).

Особенности кристаллизации наплаваемого в ТПК дискретной присадкой металла определяют не только его износостойкие свойства, но и механические. В таблице представлены механические свойства некоторых типов наплавленных хромистых чугунов и чугуна, полученного методом литья.

ТПК может применяться для наплавки изделий любой формы. Форма наплавленного слоя определяется видом поверхности формирующей секции ТПК: цилиндр, прямоугольник, квадрат и др. В настоящее время фактически опробована лишь технология наплавки наружных и внутренних поверхностей цилиндрических деталей и деталей прямоугольной формы, а также плоских поверхностей с формированием на них наплавленного слоя цилиндрической формы. В данной статье представлена информация по наплавке легированными чугунами деталей цилиндрической формы и плоских деталей.

Наибольший опыт промышленной эксплуатации ТПК получен при кольцевой наплавке прокатных валков (рис. 1). Прокатные валки обычно изготавливают либо из сталей типа 40ХН, 9Х, 50 и т. д., либо из нелегированного или низколегированного чугуна с пластинчатой или шаровидной формой графита (в объеме тела валка) и карбидной составляющей (отбеленная зона) в поверхностном рабочем слое толщиной до 20 мм (чаще 10...15 мм).

Стальные валки (изготовленные в основном из среднеуглеродистых сталей) после эксплуатации обычно восстанавливают методами дуговой наплавки под флюсом. Чугунные валки любых химического состава и структуры сдают в металлолом (после разбивания на копрах) либо отправляют изготовителям валков в качестве возвратного шихтового материала.

Долговечность валков, как стальных, так и чугунных, можно значительно повысить, используя восстановительную либо изготовительную наплавку с применением в качестве наплавочного материала легированного чугуна в виде дискретной присадки – дроби.

Как показала практика, толщина износостойкого слоя может быть от 25 до 100 мм. Это означает, что толщина рабочего слоя после наплавки может быть увеличена практически на порядок. Ее ограничения могут

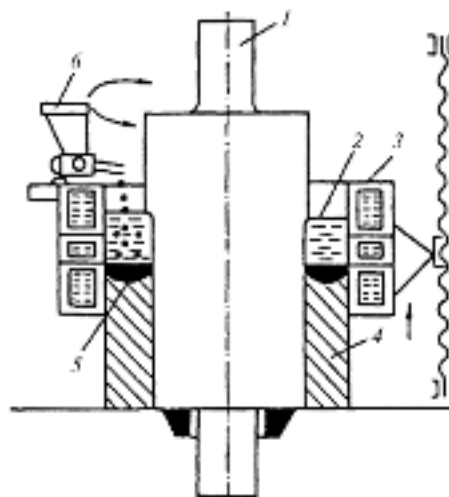


Рис. 1. Электрошлаковая наплавка валков в токоподводящем кристаллизаторе дробью:

1 – прокатный валок; 2 – шлаковая ванна; 3 – токоподводящий кристаллизатор; 4 – наплавленный слой; 5 – металлическая ванна; 6 – дозатор с дробью

быть связаны лишь с конструктивными особенностями прокатного стана (возможностью снижать в клетке межосевое расстояние между валками).

Нами опробована наплавка в ТПК стальных валков дробью из хромоникелевого и хромистого чугуна, а также чугунных (с пластинчатой и шаровидной формами графита) дробью из хромистого чугуна. Хромоникелевый чугун имел следующий химический состав, % мас.: 3,6 С; 1,2 Si; 0,7 Mn; 1,5 Cr; 2,5 Ni; 0,7 Mo. Составы наплавленного хромистого чугуна (15...28 % Cr) представлены в таблице.

Присадка в виде дроби из хромистого чугуна выбрана в связи с тем, что в настоящее время этот материал показывает наилучшие результаты при эксплуатации изготовленных из него чугунных валков (на наших металлургических предприятиях по разным причинам такие валки почти не применяются).

Восстанавливали валки станов горячей прокатки 250, 300, 350, 2000 с диаметром бочки от 250 до 1000 мм. Наплавляли слой толщиной 35...70 мм. Время наплавки стальных и чугунных валков, например, стана 350 составляет соответственно 1,5...2 и 1,0...1,5 ч. Результат эксплуатации наплавленных валков на станах 300 и 350 — повышение стойкости в 1,5...2,0 раза.

Широкому внедрению данной технологии наплавки препятствуют следующие трудности: необходимость изготовления наплавочной установки повышенной металлоемкости (хотя для наплавки можно

использовать не находящиеся в эксплуатации электрошлаковые печи) и ТПК разных типоразмеров соответственно номенклатуре восстанавливаемых валков; высокая стоимость присадочных материалов (с учетом их химического состава и технологии изготовления); в связи с существующими в промышленности кризисными явлениями и, соответственно, спадом производства прокатной стали (в основном, низколегированной) проблема повышения стойкости валков потеряла свою былую актуальность. Что касается последних двух причин, то в случае изменения конъюнктуры рынка решение задачи повышения долговечности прокатных валков может вновь стать экономически целесообразным и актуальным.

Восстановительная наплавка плоских поверхностей показана на примере ремонта верхней плиты камеры дробеметной установки (рис. 2). Плита изготовлена из высокохромистого чугуна. В качестве наплавочного присадочного материала использовали дробь производства ОАО «Торезтвёрдосплав» следующего химического состава, % мас.: 2,5 С; 26,2 Cr; 0,7 Si; 0,7 Mn; 1,3 Ni; 0,9 Mo.

Металлографические исследования биметаллических образцов, вырезанных из наплавленных деталей, позволили установить отсутствие каких-либо дефектов в наплавленном слое, зоне сплавления и поверхностном слое основного металла. Микроструктура наплавленного металла состоит из карбидов хрома различной степени дисперсности, аустенитной матрицы и карбидной эвтектики. В целом наплавленный металл имеет мелкозернистую структуру, определяемую характером плавления и кристаллизации присадочного материала — дроби. Соотношение размеров структурных составляющих в наплавленном и основном металлах хорошо видно на рис. 3, где представлена зона их сплавления.

Полученные результаты позволили рекомендовать представленный способ наплавки для восстановления

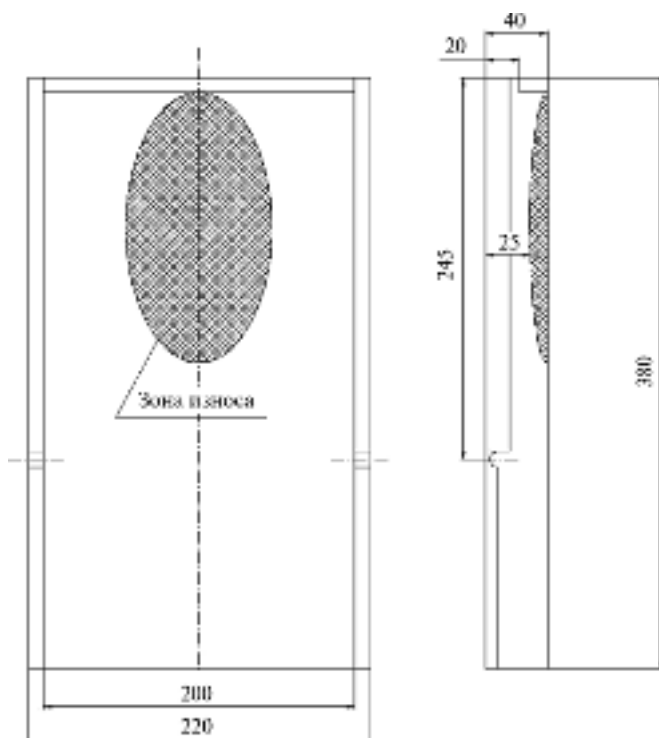


Рис. 2. Верхняя плита камеры дробеметной установки фирмы Bduhuis с зоной абразивного износа

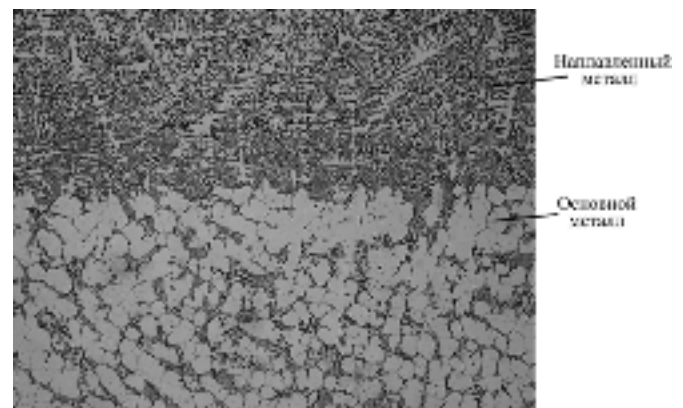


Рис. 3. Микроструктура зоны сплавления высокохромистых чугунов, $\times 100$

плоских деталей, изготовленных из высокохромистого чугуна, имеющих локальные зоны износа.

Известно, что свойства хромистого чугуна можно еще более улучшить, в особенности это касается повышения твердости (в большинстве случаев, соответственно, и износостойкости) от примерно 50...55 до 58...62 HRC за счет применения термической обработки.

Термическая обработка при выполнении наплавочных работ используется крайне редко. На практике нашли применение лишь два приема регулируемого теплового воздействия на наплавляемое изделие: предварительный и сопутствующий нагрев детали при наплавке и ее замедленное охлаждение после наплавки (реже отпуск). Зачастую это связано с нежеланием усложнять (удорожать) технологический процесс наплавки. В ряде случаев такой подход связан с отсутствием или недостаточным рабочим объемом нагревательных печей либо ограниченными возможностями печей по максимальным температурам нагрева.

Дальнейшим развитием технологии наплавки в ТПК может стать совмещение процесса наплавки с регулированием скорости охлаждения наплавляемого изделия. Для решения этой задачи нами сконструирована водовоздушная форсунка (рис. 4), предназначенная

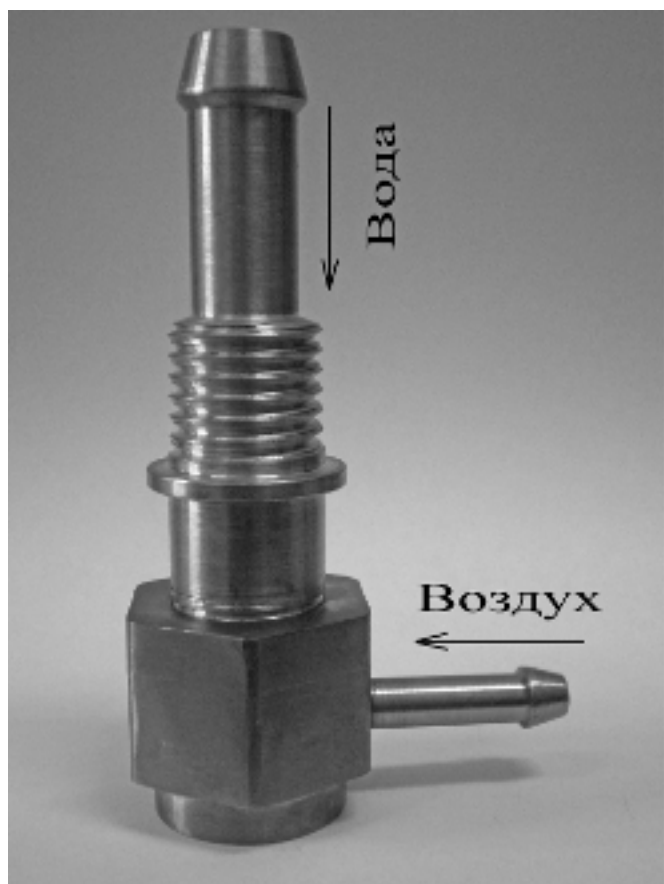


Рис. 4. Водовоздушная форсунка

для охлаждения наплавленной торцевой поверхности цилиндрических заготовок.

Приведем один из примеров технологии совмещенного процесса наплавки и регулируемого охлаждения наплавленного металла. На торцевую поверхность стальной заготовки $\varnothing 180$ мм наплавляли в неподвижном ТПК дробью хромистого чугуна $\varnothing 0,8...2,5$ мм слой толщиной 30...40 мм. После наплавки слоя ТПК кареткой аппарата А-550 постепенно поднимали вверх; при этом шлаковая ванна сливалась в специальные стальные карманы, обнажая наплавленную торцевую поверхность заготовки. После чего наплавленный слой (совместно с заготовкой) охлаждался с помощью форсунки в трех режимах ее работы: водяном, водовоздушном, воздушном.

Проведенные эксперименты подтвердили возможность осуществления такой технологии наплавки и охлаждения для реальных изделий. В настоящее время она совершенствуется с точки зрения выбора оптимального соотношения между температурой поверхности наплавленной заготовки и скоростью ее охлаждения в целях полного исключения появления трещин в наплавленном металле.

Выводы

1. Возможность наплавки материалов, содержащих в своей структуре твердые и хрупкие составляющие, не только доказана в лабораторных условиях, но и подтверждена проверкой способа электрошлаковой наплавки в ТПК с использованием дискретной присадки — дробы из хромистого чугуна в промышленных условиях.

2. Дальнейшим развитием представленного способа наплавки может стать введение в его технологический процесс дифференцированного управления при наплавке скоростью охлаждения наплавленного металла и изделия в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. М.: Металлургия. 1983. 176 с.
2. Гарбер М.Е. Отливки из белых износостойких чугунов. М.: Машиностроение. 1972. 112 с.
3. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение. 1984. 104 с.
4. Кусков Ю.М. Электрошлаковая наплавка в секционном токоподводящем кристаллизаторе // Тез. докл. ... науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки сталей и цветных металлов», 25–26 октября 2012 г., Киев. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона. 2012. С. 17–18.

Н.В. Севостьянов, В.В. Мурашева, И.Ю. Ефимочкин
 (ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» («ВИИМ»)
 Государственный научный центр РФ
 E-mail: kolia-phone@mail.ru

Обеспечение сплошной химической металлизации комбинированной поверхности металломатричного композиционного материала Al—SiC

Поверхность композиционного материала Al—SiC представляет собой комбинацию участков из алюминия и карбида кремния. В целях обеспечения паяемости поверхности и высокой теплопроводности требуется сплошная металлизация никелем. В ВИИМ разработан процесс химического осаждения никеля, позволяющий получить сплошную металлизацию с высокой адгезией. Рассмотрена кинетика процесса осаждения и дана оценка качества покрытия в сравнении с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: композит, покрытие, комбинированная поверхность, осаждение, никель, карбид кремния, алюминий.

The surface of composite material Al—SiC consists from combination of areas aluminum and silicon carbide. The continuous metallization by nickel is required to ensure the surface solderability and high thermal conductivity. A process of chemical deposition of nickel coatings was developed in FSUE «VIAM» that enabled to obtain uniformity metallization with high adhesion. The kinetics of deposition process was considered and comparison quality cover was given with foreign analogues.

Keywords: composite, coating, combination surface, deposition, nickel, silicon carbide, aluminum.

Применение металлического композиционного материала (МКМ) Al—SiC для силовой электроники

Современные приборы силовой электроники предназначены для передачи токов 6...3600 А и коммутации напряжений 600...6500 В [1, 2]. Из всего разнообразия приборов силовой электроники наибольшее распространение получили биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) [3, 4].

Основными преимуществами функционирования IGBT-приборов являются малое значение остаточного напряжения (не более 2,5 В), устойчивость к большим импульсам тока, малые емкости и заряды затворов, большие допустимые энергии переключения, расширенный температурный диапазон безопасной работы, высокие частоты переключения. Благодаря этому они имеют высокие надежность, быстродействие и удобны в эксплуатации.

Современный IGBT-модуль выполняется в виде многослойной конструкции (рис. 1), обеспечивающей эффективный теплоотвод и электробезопасность при работе. Кристалл IGBT размещается на изолирующей пластине — DBC-плате (технология Direct Bonded Copper — прямое нанесение меди) из специальной керамики с низким коэффициентом термического расширения, высокими теплопроводностью и электрической прочностью, выполненной на основе Al_2O_3 , а в последнее время — AlN.

Работа IGBT-элементов с большими значениями

коммутируемых токов приводит к высоким значениям выделяющейся тепловой энергии, которую необходимо «безопасно» (для силового модуля) и эффективно отвести. Тепловыделение столь значительно, что применение

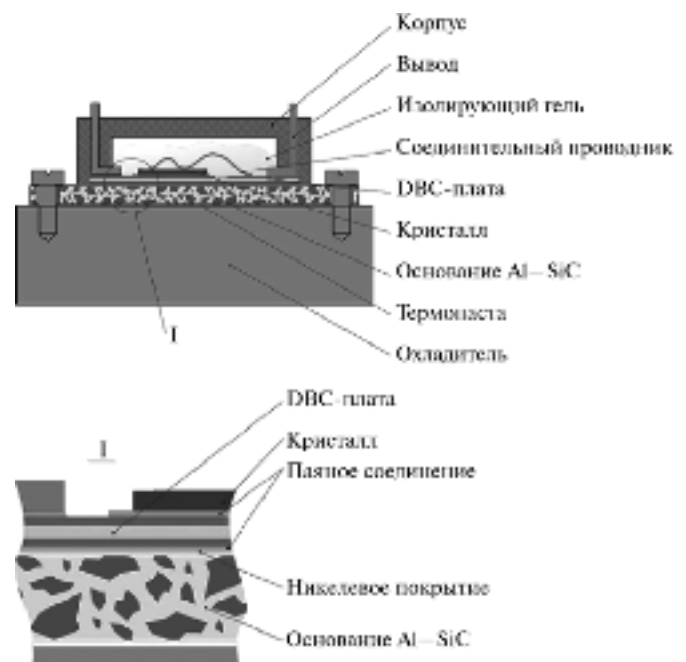


Рис. 1. Конструкция IGBT-модуля и схема крепления DBC-платы с напаянным полупроводниковым кристаллом с теплоотводящим основанием

традиционных теплоотводов, таких как медь, алюминий уже недостаточно для обеспечения длительного ресурса. В результате многократных циклических тепловых расширений и сжатий вследствие различных коэффициентов теплового расширения (КТР) чипа и теплоотвода возникают внутренние напряжения, которые приводят к разрушению полупроводниковых кристаллов.

Устранить проблему возможно, используя в качестве теплоотвода материал с близким к полупроводниковому кристаллу КТР, высокой теплопроводностью и доступностью. Набором таких качеств обладает металлический композиционный материал на основе алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния (Al—SiC) [5 – 10]. Данный материал обладает уникальными свойствами, такими как высокая теплопроводность, низкий КТР, низкая плотность, высокая механическая прочность. В отличие от традиционных материалов, варьируя соотношение Al-матрицы и SiC-наполнителя, можно точно подстроить физические свойства нового материала в соответствии с техническими требованиями для применения во многих ответственных областях. Совокупность указанных свойств позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции силовых модулей. Этим достигаются высочайшие надежность и ресурс при циклических нагрузках (не менее 100 тыс. циклов) силовых IGBT-модулей с применением МКМ [10–13].

Особенность химической металлизации МКМ Al—SiC

Крепление DBC-платы с полупроводниковым чипом к теплоотводящему основанию осуществляется при помощи паяного соединения оловянным припоем. Как известно, ни алюминий, ни карбид кремния паяемостью оловянным припоем не обладают. Одновременно важно реализовать равномерную пайку по всей поверхности для эффективного теплоотвода. В этих целях на поверхности теплоотводящей пластины из МКМ Al—SiC обеспечивают сплошное никелевое покрытие.

Наиболее простым и дешевым методом получения покрытия металлом на поверхности материала является химический метод. Однако поверхность МКМ Al—SiC представляет собой комбинацию участков алюминиевой матрицы и карбида кремния (рис. 2).

В случае столь разнородной поверхности обеспечение сплошного никелевого покрытия химическим методом затруднительно. При нанесении металлических покрытий на подобные комбинированные поверхности возникают трудности, связанные с различными способами подготовки поверхности разных материалов перед химической металлизацией.

Используя классический способ химического никелирования алюминия с применением цинкатной обработки, невозможно получить никелевое покрытие на участках карбида кремния МКМ Al—SiC, так как она не приводит

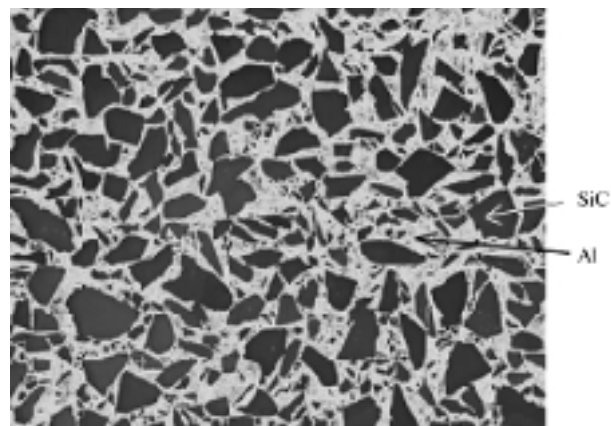


Рис. 2. Макроструктура МКМ Al—SiC

к активации поверхности SiC [15], что в результате ведет к осаждению металла только на участках алюминия.

Известны также способы химической металлизации диэлектриков и полупроводников [14–17], включающие дополнительные стадии обработки, такие как сенсбилизация и активация, что значительно усложняет процесс и не является подходящим для алюминия.

В ВИАМ разработан процесс химической металлизации комбинированной поверхности МКМ Al—SiC, позволяющий получать сплошное покрытие на участках алюминия и карбида кремния с высокой адгезией.

Материалы и оборудование для исследований

Растворы готовились из солей марки «ХЧ» на дистиллированной воде. Исследование технологических закономерностей и получение образцов проводились в стеклянной термостатированной ячейке емкостью 1,5 л. Выработка раствора по ионам металлов не превышала 10 %. Поддержание концентраций состава производили своевременной заменой растворов. Взвешивание компонентов растворов и образцов осуществляли на лабораторных электронных весах AJ-4200CE. Площадь покрываемых образцов из МКМ Al—SiC составляла 1 дм².

Количественный и качественный составы осаждаемых покрытий определяли рентгено-флуоресцентным методом портативным анализатором поверхности Innov-X Alpha Series. Контроль толщины никелевого покрытия осуществлялся анализатором покрытий X-STRATA 980. Контроль внешнего вида покрытия осуществляется с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-21.

Контроль равномерности покрытия производили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM 35.

Термоциклические испытания проводились в климатической камере MS-81 Excal 2221TA.

Результаты исследований и их обсуждение

Разработанная технологическая схема химического никелирования не имеет сложных и дорогостоящих

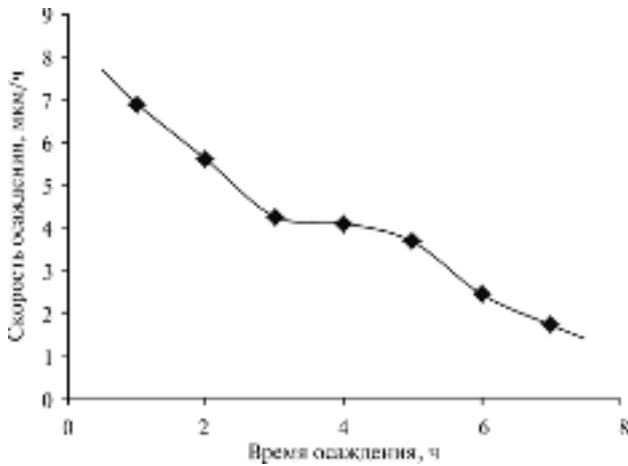
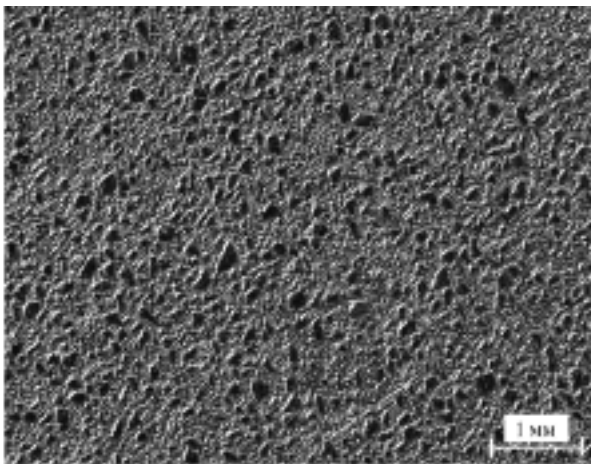


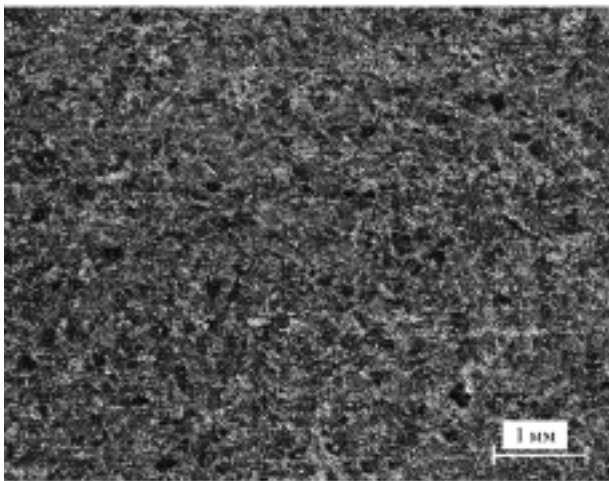
Рис. 3. Скорость осаждения никеля

операций, а предложенный раствор для химического никелирования обладает повышенной стабильностью.

В результате того что в раствор для химического никелирования в качестве восстановителя входит гипофосфит, осаждаемые никелевые покрытия содержат фосфор. В за-



а)



б)

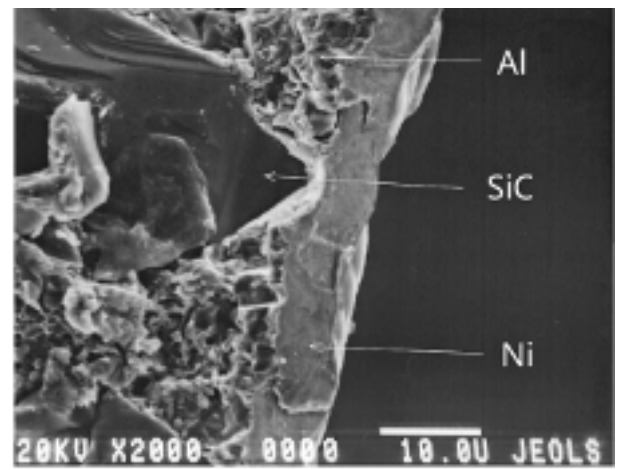
Рис. 4. Никелированная поверхность:

а — зарубежный образец; б — образец ФГУП «ВИАМ»

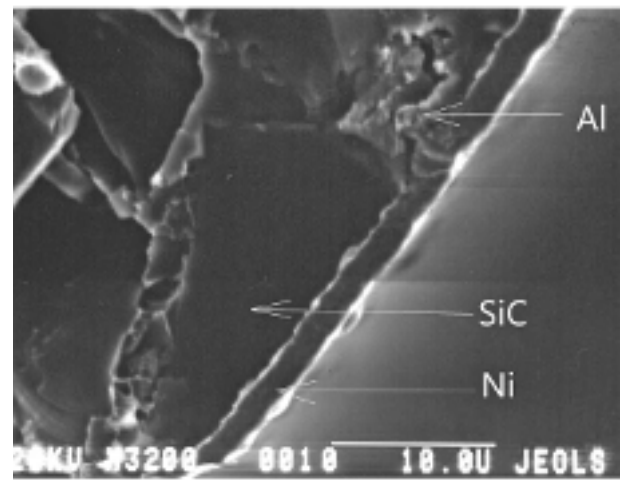
висимости от сработанности раствора содержание фосфора варьируется от 6 до 12 %. С увеличением выработки раствора содержание фосфора в покрытии увеличивается. Элементарный фосфор катодно восстанавливается и включается в покрытие в виде фазы фосфида никеля Ni_3P [18].

На рис. 3 приведена скорость осаждения никеля. На графике выявляются три области. В первые три часа скорость осаждения линейно снижается, что можно связать с выработкой реагентов в растворе. Линейное снижение скорости реакции осаждения никеля резко сменяется горизонтальным участком. В результате протекания химических реакций (осаждение никеля, выделение водорода и восстановление фосфора) в растворе накапливаются продукты реакций, которые оказывают тормозящее действие на процесс полезной реакции — осаждение никеля. По мере выработки активных реагентов в растворе скорость осаждения никеля вновь начинает убывать.

На рис. 4 приведены никелированные поверхности зарубежного образца и ФГУП «ВИАМ». Зарубежный образец отличается заметной рельефностью поверхности, что связано с особенностями технологии изготовления. Содержание



а)



б)

Рис. 5. Изображение СЭМ:

а — зарубежный образец; б — образец ФГУП «ВИАМ»

фосфора в никелевом покрытии данного образца достигает 16 %, что свидетельствует о химическом способе нанесения никелевого покрытия. Также благодаря высокой равномерности осаждения никеля химическим способом сохраняется исходная рельефность поверхности практически без искажений и заметны выступающие кристаллы карбида кремния.

Поверхность образцов ФГУП «ВИАМ» выполняется с чистотой $Ra \leq 0,8$, в результате чего рельефность не наблюдается. Неоднородность структуры никелевого покрытия вызвана разнородностью основы алюминия и карбида кремния. Гальванические покрытия толщиной до 3 мкм способны сохранять структуру основы [19].

На рис. 5 приведены изображения СЭМ изломов МКМ Al—SiC с осажденным никелевым покрытием зарубежного образца и образца ФГУП «ВИАМ». На изображении излома зарубежного образца видно, что толщина никелевого слоя составляет от 5 до 7 мкм. Покрытие является непрерывным и закрывает участки алюминия и карбида кремния, одновременно повторяет геометрию поверхности.

Никелевое покрытие на поверхности образца ФГУП «ВИАМ» при толщине 2 мкм является непрерывным и равномерным по толщине на участках алюминия и карбида кремния.

Оценку качества сцепления материала и покрытия проводили путем нагрева образцов до +200 °С [20], по пять циклов. По завершении испытаний растрескиваний, отшелушиваний и вспучиваний не обнаружилось.

Заключение

Разработанный в ВИАМ процесс химического никелирования поверхностей из материала Al—SiC позволяет обеспечить сплошное металлическое покрытие, равномерное по толщине на разнородных участках. При толщине в 2 мкм покрытие является сплошным и однородным по толщине. При необходимости толщина покрытия может быть увеличена при соответствующей корректировке времени процесса. На поверхность слоя химически осажденного никелевого покрытия можно осадить требуемое функциональное гальваническое покрытие, в том числе и золотое.

Таким образом, разработанный процесс химического никелирования не уступает зарубежным аналогам и полностью удовлетворяет технологическим потребностям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колпаков А. Trench 4 — первая универсальная технология IGBT // Силовая электроника. 2007. № 3.
2. Бербенец А. Силовые IGBT-модули Infineon Technologies // Силовая электроника. 2008. № 2. С. 36—38.

3. Sarajjot Singh, B. Tech Junior, Heiner Ryssel. Lifetime of power modules. 7 Indo-German winter academy, 2008.

4. Ken Gilleo. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes. McGraw-Hill Nanoscience and Technology Series, 2005.

5. Ken Gilleo. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes. McGraw-Hill Nanoscience and Technology Series, 2005.

6. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А. и др. Свойства и применение высоконаполненного металломатричного композиционного материала Al—SiC // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 3—1. С. 56—59.

7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В. и др. Металломатричные композиционные материалы на основе Al—SiC // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 373—380.

8. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А. и др. Повышение надежности IGBT-модулей с применением металлического композиционного материала Al—SiC // Экономика и управление в машиностроении. 2011. № 2. С. 49—52.

9. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из МКМ Al—SiC в силовой электронике и преобразовательной технике // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 20—23.

10. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (прил. к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М., ВИАМ. 2012. С. 7—17.

11. Няфкин А.Н., Шавнев А.А., Гращенков Д.В. Теплоотводящие основания для силовой электроники и преобразовательной техники // Сб. Гагаринские чтения. XXXVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Науч. тр. 2011. С. 140—141.

12. Каблов Е.Н., Гращенков Б.В., Щетанов Б.В. и др. Металлические композиционные материалы на основе Al—SiC для силовой электроники // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18. № 3. С. 359—368.

13. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А. и др. Повышение надежности силовых IGBT-модулей с помощью высоконаполненного МКМ системы Al—SiC // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 4. С. 3—6.

14. Никандрова Л.И. Химические способы получения металлических покрытий. Л.: Машиностроение, 1971. С. 104.

15. Пат. РФ 2219284, 18.05.2002.

16. Пат. РФ 2350687, 22.05.2007.

17. Шалкаускас М., Вашкялис А. Химическая металлизация пластмасс. Л.: Химия, 1985. 144 с.

18. Ильин В.А. Металлизация диэлектриков. Л.: Машиностроение, 1977.

19. Гамбург Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М.: Янус-К, 1997. 384 с.

20. ГОСТ 9.302—88. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.



УДК 667.621.6

А.С. Дринберг

(Холдинговая компания «Пигмент», г. Санкт-Петербург)

E-mail: drinberg@mail.ru

Применение винилированных алкидных олигомеров для модификации различных полимеров и олигомеров

Винилированные алкидные олигомеры (ВАО) могут совмещаться с многими олигомерами и полимерами, в отличие от обычных алкидных олигомеров. Обнаружено, что при модификации сополимерами поливинилхлорида и винилацетата 10 % ВАО увеличивает показатель относительного удлинения пленки на 100...120 %. При модификации полистирола введение 50 % ВАО увеличивает относительное удлинение пленки на 25 %. При модификации эпоксидного олигомера введение 25 % ВАО увеличивает прочность на разрыв пленки в два раза. Это улучшает физико-механические и защитные свойства перечисленных полимеров в покрытиях. На основании данных исследований были разработаны материалы для окраски рулонного металла.

Ключевые слова: винилированные алкидные олигомеры (ВАО), поливинилхлорид, поливинилацетат, полистирол, эпоксидные олигомеры, окраска рулонного металла, метод coil-coating.

Vinyl alkyd oligomers (VAO) can be combined with many oligomers and polymers, unlike conventional alkyd oligomers. It is found that by modifying a vinyl acetate copolymers, polyvinyl chloride and 10 % VAO increases the film elongation 100...120 %. Modifications polystyrene 50 % VAO increases elongation of the film is 25 %. When the epoxy oligomer modification 25 % VAO increases the tensile strength of the film in two-fold. This improves the physical and mechanical properties of these polymers protective coatings. On the basis of these development were created materials for painting rolled metal — coil-coating.

Keywords: vinyl alkyds oligomers (VAO), polyvinylchloride, polyvinyl acetate, polystyrene, epoxy oligomers, painting rolled metal, coil-coating.

Винилированные алкидные олигомеры (ВАО) благодаря своей структуре могут совмещаться со многими полимерами и сополимерами [1]. Поэтому в представленной в статье работе было решено провести исследования влияния ВАО на свойства различных полимеров. Для исследований были взяты полимеры, выпуск которых в России является наиболее многотоннажным, обладающие повышенной жесткостью; для создания защитных покрытий это свойство необходимо нивелировать. Было решено модифицировать сополимеры поливинилхлорида и винилацетата, полистирол и эпоксидные смолы, улучшая их физико-механические характеристики.

Модификация сополимеров поливинилхлорида и винилацетата

Одним из наиболее распространенных в мировой практике полимеров является поливинилхлорид (ПВХ). Его выпуск составляет 35 млн т в год [2]. Это

продиктовано как комплексом ценных свойств материалов на основе ПВХ и продуктов его модификации (хорошие физико-механические показатели, высокая химическая стойкость, негорючесть), так и возможностью их эксплуатации в достаточно широком температурном интервале: от -50 до 80 °С. ПВХ нашел применение в строительстве, при изготовлении упаковочной тары, кабельной изоляции и медицинского оборудования. Сополимеры ПВХ также широко распространены в различных отраслях промышленности, например сополимер ПВХ и винилацетата (ВЦ) активно используется в лакокрасочной промышленности [3]. Однако такие сополимеры имеют ряд недостатков: низкую адгезию и недостаточную эластичность.

Известен способ получения модифицированного поливинилхлорида путем суспензионной полимеризации винилхлорида в присутствии сополимера этилена и винилацетата, но такой полимер дает довольно жесткую пленку [4].

Таблица 1

Существует метод модификации поливинилхлорида сополимером винилхлорида с сополимером этилена с винилацетатом [5]. Полученные таким методом сополимеры имеют хорошие защитные и физико-механические показатели, но обладают низкими адгезией и эластичностью — важнейшими показателями для пленкообразователей.

Поэтому было решено провести модификацию сополимера ПВХ и винилацетата (ПВХ/ВЦ) винилированным алкидом, улучшение пленкообразующих свойств растворов сополимеров поливинилхлорида и физико-механических свойств пленок на их основе. На рис. 1 представлена зависимость относительного удлинения пленки от содержания в сополимере ПВХ/ВЦ добавки ВАО. Для создания пленкообразователя с хорошими физико-механическими характеристиками достаточно ввести 5...7 % ВАО в сополимер.

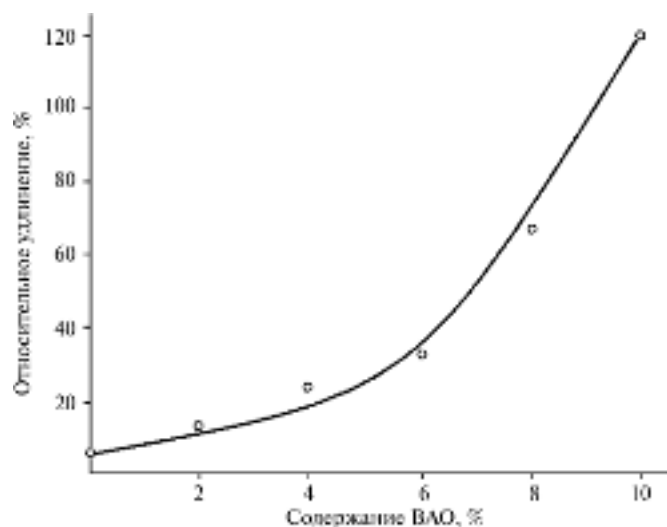


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения пленки сополимера ПВХ/ВЦ от содержания ВАО

Для получения такого модифицированного сополимера ПВХ/ВЦ в емкостном реакторе сополимер растворяли в смесевом растворителе при температуре 50...60 °С, а затем в реакционную смесь вводили ВАО и перемешивали в течение 1...2 ч до полного растворения,

После завершения смешения смесь охлаждали до 20 °С и доводили до соответствующих показателей.

Готовая смесь имела следующие конечные показатели:

Содержание нелетучих веществ, %.....20...25
 Вязкость (по ВЗ-246 при 20 °С), с.....83...90
 Время высыхания пленки при 20 °С, мин.....20...25

Введение в раствор сополимера поливинилхлорида винилированного алкида повышает адгезию и прочностные характеристики — эластичность (см. рис. 1) и прочность пленки при изгибе (см. табл. 1).

Модифицированный сополимер имеет показатели, представленные в табл. 1.

Технологические показатели различных сополимеров

Технологический показатель	Сополимер ПВХ/ВЦ	Модифицированный сополимер с ВАО
Массовая доля нелетучих веществ (ИСО 3251), %	20...25	20...25
Вязкость по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре (20,0 ± 0,5) °С (ИСО 2431), с	80...90	83...90
Адгезия (ИСО 2409, ГОСТ 15140—78), баллы	3	1
Прочность пленки при изгибе на 180° (ГОСТ 30246—94)	4Т	1Т
Эластичность пленки при изгибе (ИСО 1520), мм	4	1
Твердость (по ТМЛ 2124), у. е.	0,25	0,3
Время сушки до степени (ст.) 3, при температуре (20,0 ± 2,0) °С, ч	1	1

Как видно из табл. 1, пленки из раствора сополимера ПВХ/ВЦ с ВАО имеют улучшенные характеристики по адгезии, прочности при изгибе, эластичности, твердости после нанесения. Из такого пленкообразователя можно изготавливать широкий ассортимент лакокрасочных материалов (ЛКМ), и прежде всего химически стойкие.

Надо отметить, что сополимеры ПВХ и винилацетата на сегодняшний день являются одними из самых дешевых пленкообразователей.

Модификация полистирола

Полистирол (ПС) — тоже один из полимеров, имеющих наиболее крупнотоннажное производство. По объему производства он занимает третье место в мире после полиэтилена и поливинилхлорида [6, 7]. Доля выпуска ПС в отечественной промышленности практически всегда составляла около 15 % производства всех пластмасс [8]. Особенно привлекательными являются сравнительная дешевизна используемого продукта, что связано с доступностью сырья, несложной технологией изготовления, и ценные свойства.

Полистирол является аморфным полимером, обладающим хорошей термопластичностью, хотя возможно получение кристаллического полимера с высокой молекулярной массой. ПС обладает прозрачностью, светостойкостью, стойкостью к ионизирующему излучению, высокими диэлектрическими свойствами, но характеризуется относительно низкой механической прочностью и хрупкостью при ударном воздействии [9—11]. Полистирол имеет плотность при 20 °С около 1,05 г/см³, показатель преломления $n_d^{20} = 1,59$, темпера-

туру стеклования $T_g = 100\text{ }^\circ\text{C}$. ПС хорошо растворяется в мономере и многих растворителях: ароматических, хлорированных углеводородах, сложных эфирах, кетонах, скипидаре; не растворяется в спиртах, алифатических углеводородах, простых эфирах, фенолах. Полистирол стоек к действию щелочей и галогенопроизводных кислот, но разрушается концентрированной азотной и ледяной уксусной кислотами. При нагревании выше $100\text{ }^\circ\text{C}$ полистирол разлагается, а при $200\text{ }^\circ\text{C}$ в воздушной среде начинает деструктурировать. Под действием УФ-излучения и повышенной температуры ($100\text{...}200\text{ }^\circ\text{C}$) происходит частичное окисление полистирола и наблюдается пожелтение, однако путем введения светостабилизаторов, к которым относятся амины и аминоспирты (N-циклогексилэтаноламин, диоктиламин и др.), вводимые в количестве 1 %, существенно снижают этот процесс [12]. В промышленности полистирол получают радикальной полимеризацией стирола преимущественно в массе (блочный способ), в эмульсии, реже в суспензии [13].

Различают блочный полистирол и ударопрочный (УПС). Средняя молекулярная масса таких полистиролов составляет $250\text{...}270$ тыс.

Блочный ПС достаточно полидисперсен. Полимер, полученный суспензионной и эмульсионной полимеризацией, имеет меньший разброс по молекулярной массе. Ударопрочный ПС является композиционным материалом — смесью полистирола с каучуком. Полистиролы с улучшенными физико-механическими свойствами (АБС-пластики) являются смесью ПС с акрилонитральным и бутадиеновым или бутадиенстирольными каучуками [14].

Полистирол, являющийся одним из важнейших термопластичных полимеров, имеющих крупнотоннажное производство, крайне ограниченно применяется в лакокрасочной промышленности. Одной из причин, приводящих к осторожности в использовании этого полимера, является его высокая температура хрупкости $T_{xp} = 90\text{ }^\circ\text{C}$, практически близкая к температуре T_g . Разность между нижней границей температурной области эксплуатации покрытий (T_{xp}) и верхней (T_g) небольшая, что вызывает опасность растрескивания покрытий при отрицательных температурах [13]. Вместе с тем в работе [11] показано, что способность к пластификации полистирола находится на уровне поливинилхлорида, что дает возможность регулировать в широких пределах физико-механические свойства полимера.

Другое укоренившееся возражение против использования полистирола в качестве пленкообразующих, по мнению авторов [15], связано с его низкой адгезией к металлическим подложкам. Этот вопрос рассматривался в литературе, и было рекомендовано для устранения данного недостатка полистирольных пленкообразователей вводить небольшое количество карбоксильных групп [16].

Повышение адгезии возможно путем использова-

ния грунтовок, в том числе цинкнаполненных протекторных на основе полистирола, применение которых в России известно более 60 лет [7, 17]. Так, на основе блочного или эмульсионного полистирола, растворенного в ксилоле или скипидаре при соотношении полистирола и цинка 5:95, были разработаны протекторные грунтовки [17]. Грунтовки подобного типа: ПС-084 и ПС-2 нашли применение в судостроении [18]. В настоящее время фирмой Galvatech (Великобритания) разработана грунтовка Zinga, которая внедрена на отечественном рынке [19, 20]. Кроме указанных выше ЛКМ на основе ПС полистирол применяется в эмали НП-425 с индексом «Н» и «Т» [21].

Полистирол плохо совмещается с широко распространенными пленкообразователями, маслами, алкидами, фенолформальдегидными смолами и др. [15]. Вместе с тем нашли широкое применение сополимеры на основе мономеров перечисленных выше пленкообразователей, а также с бутадиеном и акрилатами [21, 22]. Последние, например смолы Piolete фирмы Cood Year, используемые в ЛКМ растворного типа, соответствуют алкидным смолам, а по скорости высыхания и защитным свойствам их превосходят. В отечественной промышленности подобные полистирольные пленкообразователи отсутствуют.

Дополнительным недостатком ПС, ограничивающим его применение в ЛКМ, является эффект нитеобразования при нанесении покрытий методами распыления, что связано с ориентацией макромолекул при высоких скоростях сдвига [23]. Таким образом, основным показателем, обуславливающим ограничение использования ПС в ЛКМ, является его высокая молекулярная масса.

Проведенные исследования показали, что успешное использование ПС возможно и в лакокрасочных материалах.

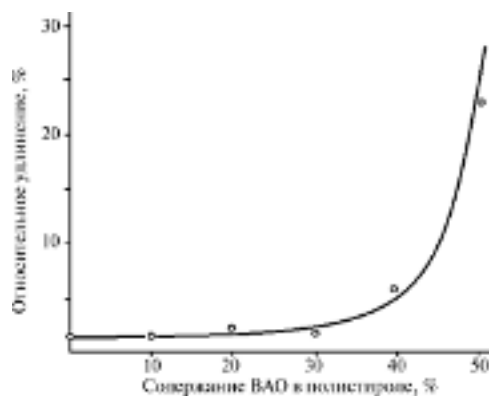


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения пленки ПС от содержания ВАО

Благодаря своим свойствам совмещаться со многими олигомерами и полимерами ВАО можно использовать для модификации ПС. Для этого ПС модифицировали различным количеством ВАО. На рис. 2 представлена зависимость относительного удлинения от содержания

ВАО. Видно, что в случае модификации ПС ВАО олигомер ведет себя по-другому. Это, скорее всего, связано с молекулярной массой (ММ): ПС имеет ММ 50...80 тыс., а ММ сополимера ПВХ/ВЦ — 25...27 тыс.

Для создания пленки с более менее нормальными характеристиками оптимальное содержание ВАО в структуре ПС должно составлять 40...45 %. Это позволяет получить пленки с хорошими физико-механическими показателями. В табл. 2 приведены показатели пленок из чистого ПС и ПС, модифицированного ВАО и СПП (сланцево-пиролизной) смолой.

Таблица 2

Технологические показатели различных пленок

Технологический показатель	Раствор полистирола	Раствор полистирола, модифицированного ВАО (ВАО/ПС)
Массовая доля нелетучих веществ (ИСО 3251), %	20...25	20...25
Вязкость по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре (20,0 ± 0,5) °С (ИСО 2431), с	80...90	85...95
Адгезия (ИСО 2409, ГОСТ 15140—78), баллы	5	1
Прочность пленки при ударе (ГОСТ 4765—73), см	Не держит	40
Эластичность пленки при изгибе (ИСО 1520), мм	4	1
Время сушки до ст. 3 при температуре (20,0 ± 2,0) °С, ч	1	1

Как видно из табл. 2, пленки из раствора ВАО/ПС имеют улучшенные характеристики по адгезии, прочности пленки при ударе. Из такого пленкообразователя можно изготавливать широкий ассортимент ЛКМ, и прежде всего химически стойкие.

Эмали на основе модифицированного винилированного алкида полистирола (ВАО/ПС) можно использовать для наружной окраски металлических, деревянных и бетонных поверхностей. Они также могут быть нанесены по старым масляным и алкидным покрытиям. Такое покрытие предназначено для защиты от коррозии сооружений в условиях повышенной влажности, при воздействии воды и атмосферы в условиях морского климата и наличии химических предприятий в условиях умеренного климата. Свойства данного покрытия в сравнении с алкидными, нитроцеллюлозным (НЦ-25) и перхлорвиниловыми (ПФ-115) покрытиями приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 1, по содержанию нелетучих веществ эмали ВАО/ПС приближаются к алкидным

материалам, а по времени высыхания соответствуют перхлорвиниловым. Вместе с тем ВАО/ПС значительно устойчивее к различным средам (водостойкость, бензостойкость, химическая стойкость), чем алкидные покрытия (см. табл. 2).

Таблица 3

Стойкость покрытий в различных средах

Среда	Стойкость, ч		
	ВАО/ПС	НЦ-25	ПФ-115
Дистиллированная вода	150	24	2
3 %-й раствор NaCl	170	24	2
10 %-й раствор NaOH	20	5	0,5
10 %-й раствор H ₂ SO ₄	20	1	1
Бензин	170	6	—
Минеральное масло	170	6	—

Таблица 4

Светостойкость покрытий на различной основе

Пленкообразователь	Изменение белизны через 15 ч, %
Фторуретановый	0
Акрилуретановый	1
Эпоксидно-полиамидный	2
Пентафталевый	3
ВАО/ПС	4
Перхлорвиниловый	8

Недостатком ВАО/ПС при использовании для атмосферостойких покрытий является его сравнительно низкая светостойкость. В табл. 4 приведены данные по изменению белизны покрытия после выдержки под УФ-лампой ДРТ-375 в течение 15 ч. Здесь представлен практически весь ряд материалов на различной основе, использующихся для специальных покрытий. Конечно, ввиду своего строения эмали на основе ВАО/ПС не обладают высокой светостойкостью, но они имеют лучшие показатели, чем перхлорвиниловые ЛКМ, которые активно используются для создания специальных атмосферостойких покрытий.

Модификация эпоксидных смол

Эпоксидные смолы обладают весьма ценным качеством — превосходной адгезией почти ко всем материалам: металлам, фарфору, керамике, стеклу, пластмассам, дереву и др. Отвержденные эпоксидные смолы стойки к действию соляной и серной кислот средней и низкой концентрации, к щелочам и бензину. Они обладают высокими диэлектрическими показателями, хорошими теплостойкостью и водостойкостью. Это замечательный материал для создания специальных ЛКМ. Однако в процессе отверждения эпоксидные смолы образуют довольно жесткие полимеры пространственного строения,

которые для создания ЛКМ с хорошими физико-механическими характеристиками требуют пластификации [24].

Пластификаторы добавляют для изменения тех или иных показателей отвержденных эпоксидных смол до введения в них отвердителя. Добавка к эпоксидной смоле пластификатора уменьшает вязкость жидкой и хрупкость отвержденной смолы. Для пластификации эпоксидных смол чаще всего используют дибутилфталат, дифенилфталат, окись стирола, тиокол и др. [25].

Использование смол других типов, совмещение диановых эпоксидных смол с различными реакционноспособными олигомерами и полимерами, участвующими в образовании трехмерной сетки, а также подбор рецептуры позволяют варьировать в широком диапазоне режимы переработки композиций на основе эпоксидных смол и физико-механические показатели продуктов их отверждения.

По прочностным показателям продукты отверждения эпоксидных смол превосходят все применяемые в промышленности полимерные материалы на основе других синтетических смол.

Важной практической задачей являются придание отвержденным эпоксидным смолам стойкости к резким перепадам температур (термическим ударам) и снижение их модуля упругости при использовании композиций в качестве заливочных и герметизирующих компаундов. Если отвердителем служит ангидрид, в композиции вводят простые или сложные олигоэфиры с кольцевыми ОН-группами, а также полиангидриды алифатических дикарбоновых кислот (например, себациновой, адипиновой). Если отвердитель — амин, наилучшие результаты дает применение жидких низкомолекулярных каучуков, например карбоксилатных, бутадиен-нитрильных, полисульфидных (тиоколов) [26].

До настоящего времени нет работ, в которых было бы достаточно полно рассмотрено влияние различных пластификаторов на свойства эпоксидных смол.

Как известно, пластификаторы вводят для повышения эластичности эпоксидных смол, т. е. для уменьшения их модуля упругости и повышения предельной деформации, а также для снижения вязкости. Пластификатор не может превратить жесткую эпоксидную смолу в эластичный материал, но он уменьшает хрупкость материала, увеличивает сопротивление удару и, самое главное, улучшает работу при заливке конструкций. Однако улучшение одних свойств может привести к ухудшению других. Поэтому окончательный выбор добавки определяется всем комплексом необходимых свойств, причем окончательный состав композиции является результатом компромиссного изменения ряда характеристик. Именно это и приводит к появлению большого числа марок эпоксидных смол со сходными физико-механическими показателями [27]. Пластифицирующие добавки обычно вводят для уменьшения растрескивания при

заливке конструкций с большим числом металлических деталей, и особенно для повышения стойкости к растрескиванию при циклах нагревание — охлаждение.

Некоторые авторы [28] различают термины “пластификатор”, который означает инертное соединение, вводимое в полимер для изменения механических свойств, и “флексibilизатор” — компонент, вступающий в реакцию с отверждающейся системой и увеличивающий гибкость и подвижность трехмерной сетки. При введении пластификаторов и флексibilизаторов наблюдается увеличение ударной вязкости и разрывного удлинения образцов. Однако при этом происходят снижение температуры стеклования, уменьшение термо- и химической стойкости и, как правило, возрастают диэлектрические потери и водопоглощение.

Одной из отрицательных сторон пластификации является увеличение термического коэффициента расширения в стеклообразном состоянии. Это может привести к тому, что в некоторых случаях при низких температурах внутренние напряжения будут возрастать даже в большей степени, чем в отсутствие пластификатора. Наиболее распространенными пластификаторами для эпоксидных смол холодного отверждения являются дибутилфталат и другие сходные соединения.

В качестве флексibilизаторов обычно применяют низкомолекулярные каучуки и другие линейные соединения с реакционноспособными концевыми группами; часто используют также алифатические эпоксидные смолы. Кроме того, для флексibilизации эпоксидных смол применяют различные олигомеры, способные вступать в реакцию с эпоксидными группами, и некоторые отвердители, используемые иногда для увеличения эластичности эпоксидных компаундов [29].

При введении пластификатора в эпоксидную смолу может наблюдаться явление антипластификации, заключающееся в повышении модуля упругости при сравнительно небольших содержаниях пластификатора. Температура стеклования иногда проходит через максимум, но при значительно меньших количествах пластификатора. Прочность при пластификации хрупких эпоксидных полимеров, как правило, вначале возрастает. Можно предположить, что антипластификация является результатом возрастания при малых концентрациях пластификатора плотности упаковки цепей и уменьшения свободного объема системы; при дальнейшем же увеличении содержания пластификатора свободный объем возрастает, модуль упругости, твердость и прочность снижаются, а удлинение возрастает [30].

Большое влияние на свойства эпоксидных смол оказывает совместимость пластификатора с отвержденными полимерами, а также способность пластификаторов к диффузии в полимере [31]. При создании композиций следует учитывать тот факт, что с увеличением молекулярной массы полимера и изменением строения его мо-

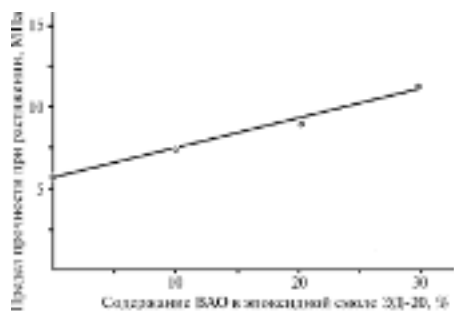


Рис. 3. Зависимость показателя предела прочности при растяжении пленок эпоксидной смолы, модифицированных ВАО, от содержания ВАО

лекул при отверждении возможно появление несовместимости, проявляющейся в уменьшении предела растворимости пластификатора в отвержденном полимере, особенно в случае высокомолекулярных пластификаторов, хотя практически все пластификаторы хорошо растворимы в неотвержденных эпоксидных композициях.

В данной работе в качестве модификатора эпоксидной смолы был взят ВАО. Для этого эпоксидную смолу ЭД-20 модифицировали различным количеством ВАО. На рис. 3. представлена зависимость предела прочности при растяжении пленок эпоксидной смолы модифицированных ВАО от содержания ВАО. Видно, что введение ВАО в структуру эпоксидного олигомера увеличивает его прочность. Также при введении ВАО в эпоксидный олигомер увеличивается относительное удлинение пленки, но незначительно.

Модифицированную ВАО эпоксидную смолу ЭД-20 использовали в промышленно выпускаемой эмали «Субкор» (ТУ 2312-149-46953478—2001). В табл. 5 приведены сравнительные показатели эмали «Субкор», содержащей в своем составе низкомолекулярный каучук и ВАО.

Таблица 5

Технологические показатели эмали «Субкор» с различными модификаторами

Технологический показатель	Эмаль «Субкор» с низкомолекулярным каучуком	Эмаль «Субкор» с ВАО
Массовая доля летучих веществ, %, не более	3,0	3,0
Время высыхания до ст. 3 при температуре (20 ± 2) °С, ч, не менее	16	14
Эластичность пленки при изгибе, мм	3	4
Прочность при ударе на приборе У-1, см, не менее	40	50
Адгезия пленки, баллы, не более	1	1
Время желатинизации, мин	40	40

Из табл. 5 видно, что эмаль «Субкор», модифицированная ВАО, по своим свойствам не уступает эмали «Субкор», модифицированной низкомолекулярным каучуком, который стоит в несколько раз дороже винилированного алкида.

Рассмотренная технология модификации эпоксидных олигомеров была применена на практике для производства эмали для обратной стороны рулонного металла ЭП-1704 (ТУ 2312-221-56271024—2008). Основа лака ПЭ-064 (ТУ 2311-224-56271024—2001) (100%-й олигомер) применяется в качестве модифицирующей добавки, которая улучшила физико-механические свойства эпоксидного олигомера (прочность пленки на изгиб, эластичность и прочность пленки на удар). При производстве таких материалов для окраски рулонного металла методом coil-coating [32] он улучшает прочностные характеристики готового покрытия, наносимого в специальных агрегатах. Испытания данной эмали в ОАО «НЛМК» (г. Липецк) и ОАО «ММК» (г. Магнитогорск) показали хорошие технологические и защитные характеристики. На рис. 4 показан участок покраски рулонного металла методом coil-coating с применением эмали ЭП-1704.

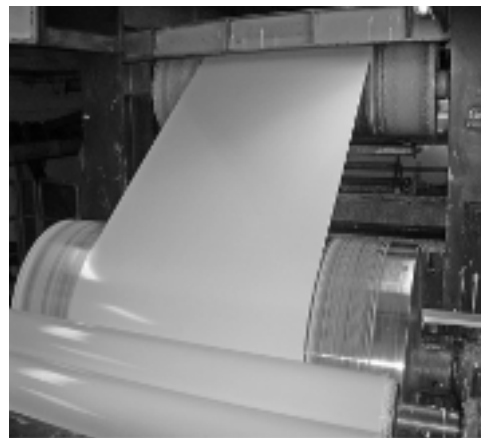


Рис. 4. Участок окраски рулонного металла методом coil-coating

В табл. 6 представлены обобщенные данные по модификации ВАО различных олигомеров и полимеров.

Видно, что введение ВАО в структуру сополимеров поливинилхлорида и винилацетата, полистирола и эпоксидного олигомера улучшает их физико-механические характеристики, такие как адгезия, прочность пленки при изгибе, эластичность и прочность пленки при ударе. Учитывая, что данные полимеры — одни из самых распространенных, можно сделать вывод, что применение такой технологии делает весьма перспективным использование ВАО в больших объемах.

Выводы

1. Проведен ряд дополнительных важных для химической технологии пленкообразующих веществ исследований.

Технологические показатели различных полимеров до и после модификации ВАО

Технологический показатель	Сополимер ПВХ и винилацетата		Полистирол		Эпоксидный олигомер	
	0 % ВАО	10 % ВАО	0 % ВАО	50 % ВАО	0 % ВАО	30 % ВАО
Массовая доля нелетучих веществ (ИСО 3251), %	20...25	20...25	20...25	20...25	3,0	3,0
Адгезия (ИСО 2409, ГОСТ 15140—78), баллы	3	1	5	1	1	1
Прочность пленки при изгибе на 180° (ИСО 1520)	4Т	1Т	—	—	Не держит	3Т
Эластичность пленки при изгибе (ГОСТ 30246—94), мм	4	1	4	1	Не держит	4
Твердость (по ТМЛ 2124), у. е.	0,25	0,3	—	—	0,4	0,4
Прочность пленки при ударе (ГОСТ 4765—73), см	—	—	Не держит	40	Не держит	50

2. Выявлено, что в отличие от обычных алкидных олигомеров ВАО могут совмещаться с многими олигомерами и полимерами.

3. Установлено, что при модификации сополимерами поливинилхлорида и винилацетата 10 % ВАО показатель относительного удлинения пленки увеличивается на 100...120 %.

4. При модификации полистирола введение 50 % ВАО увеличивает показатель относительного удлинения пленки на 25 %.

5. При модификации эпоксидного олигомера введение 25 % ВАО увеличивает показатель прочности на разрыв пленки в два раза. Это улучшает физико-механические и защитные свойства перечисленных полимеров в покрытиях.

6. На основе представленной технологии модификации эпоксидных олигомеров ВАО разработаны и внедрены на практике технологические рецептуры и регламенты эмали ЭП-1704 для покрытия обратной стороны рулонного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. Дринберг. Винилированные алкидные олигомеры. М.: «ЛКМ-пресс», 2014. 152 с.
2. На Российском рынке ПВХ // Полимеры-деньги. 2012, февраль.
3. М.И. Карякина, В.Е. Попцов. Технология полимерных покрытий. М.: Химия, 1983, 336 с.
4. Пат. РФ на изобретение № 2084461. 20.07.1997.
5. Пат. РФ на изобретение № 2086584. 10.08.1997.
6. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М.-Л.: Химия, 1964. 784 с.
7. Дринберг А.Я. Технология пленкообразующих веществ. М.-Л.: Госхимиздат, 1948. 720 с.
8. Технология пластических масс / под ред. В.В. Коршака. М.: Химия, 1976. 608 с.
9. Лосев И.П., Тростянская Е.Б. Химия синтетических полимеров. М.: Химия, 1964. 640 с.
10. Полистирол: физико-химические основы получения и переработки / А.Я. Малкин и др. М.: Химия, 1964. 640 с.
11. Крыжановский В.К., Бурулов В.В. Прикладная физика

полимерных материалов. СПб, СПб технологический институт (технический университет), 2001. 261 с.

12. Фойгт М. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла. Л.: Химия, 1972. 544 с.

13. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1989. 384 с.

14. Бакнелл К.Б. Ударопрочные пластики; пер. с англ. / под ред. И.С. Лишанского. Л.: Химия, 1981. 328 с.

15. Охрименко И.С., Верхоланцев В.В. Химия и технология пленкообразующих веществ. Л.: Химия, 1989. С. 392.

16. Соломон Л.Г. Химия органических пленкообразователей. М.: Химия, 1971. С. 319.

17. Фосфатирующие и протекторные цинковые антикоррозионные грунтовки / А.Я. Дринберг и др. Информац. листок № 34, ЛДНТП, Л., 1957.

18. Искра Е.В., Куцевалова Е.П. Технология окраски судов. Л.: Судостроение, 1974. С. 303.

19. Longer life with latest coating. Tube Int. 1992. 11. № 48. P. 145.

20. Лакокрасочные материалы и их применение. 2002. № 7—8. С. 74—75.

21. Судовые покрытия. Л.: Судостроение, 1982. С. 103.

22. Шампетье Г., Рабатэ Г. Химия лаков, красок и пигментов. Т. 1. М.: ГХИ, 1960.

23. Дринберг С.А., Ицко Э.Ф., Дринберг А.С. Новые лакокрасочные материалы на основе полистирола // Лакокрасочные материалы. 2005. № 4.

24. Благодарова А.А., Непомнящий А.И. Лаковые эпоксидные смолы. М.: Химия, 1970. 248 с.

25. Пакен А.М. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы. Л.: Госхимиздат, 1962. 964 с.

26. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.

27. Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Чалых А.Е. Эпоксидные смолы и отвердители. М.: Пэйнт-Медиа, 2006. 200 с.

28. Ли Х., Невил К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 415 с.

29. Черняк К.И. Эпоксидные компаунды и их применение. Л.: Судостроение, 1967. 400 с.

30. Максия Л.А., Тагер А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968. 536 с.

31. Добавки для пластических масс. М.: Химия, 1978. 184 с.

32. Агафонов Г.И., Дринберг А.С., Ицко Э.Ф. и др. Лакокрасочные материалы для окраски рулонного металла // Лакокрасочные материалы. 2004. № 7.

С.В. Филимонов (ООО «Спецтехнология», г. Ульяновск),
 В.И. Филимонов, В.В. Марковцева, И.О. Лисин (Ульяновский государственный технический университет)
 E-mail: fwiumz@mail.ru

Влияние контактных напряжений на стойкость полимерных покрытий при профилировании

Рассмотрено влияние нормальных и касательных контактных напряжений на стойкость полимерных покрытий в процессах профилирования. Разработаны рекомендации по выбору технологических режимов для обеспечения сохранности покрытия.

Ключевые слова: профилирование, формирующий ролик, контактное напряжение, нарушение покрытия.

The effect of normal and tangential contact stresses on polymer coating resistance during the roll-forming is considered. Recommendations to choose appropriate technological parameters enabling the coating integrity are developed.

Keywords: roll-forming, forming roll, contact stress, coating damage.

Полимерные покрытия рулонных и листовых материалов подразделяются на термореактивные покрытия, термопластичные покрытия и полимерные пленки. Гнутые профили, широко применяющиеся в различных отраслях народного хозяйства, изготавливают из таких материалов на профилировочных станках методом интенсивного деформирования [1]. Интенсификация формообразования сопровождается увеличением давления на валки, что приводит к повышению уровня контактных напряжений и повреждению покрытия.

Вообще, при профилировании в роликах ленты с покрытием нарушение последнего может возникать в местах изгиба заготовки и в местах максимальных контактных напряжений (рис. 1), связанных с подгибкой формируемых полок или локальным обжимом материала заготовки, необходимым для некоторых технологических схем формообразования. Для оценки сохранности покрытия действующие силы следует привести к дей-

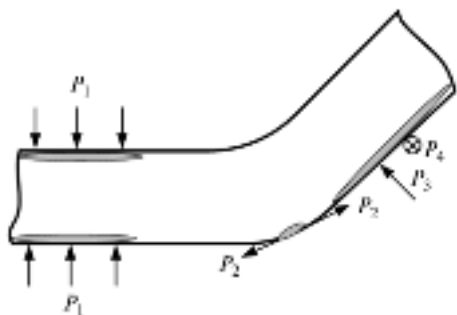


Рис. 1. Участки нарушения покрытий и силовые факторы:

P_1 — сила локального обжима; P_2 — сила растяжения покрытия на наружном контуре зоны изгиба; P_3 — нормальная сила подгибки полки; P_4 — тангенциальная сила трения скольжения

ствующим напряжениям, на основе анализа которых можно прогнозировать состояние покрытия в результате деформирования.

Влияние растяжения покрытия на наружном контуре зоны изгиба заготовки и сжатия на ее внутреннем контуре обычно оптимизируется при конструировании детали заданием радиуса изгиба. Напряжение растяжения наружного контура (результат действия силы P_2) определяется зависимостью

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\tau} \ln\left(\frac{R}{\rho}\right), \quad (1)$$

где σ_{τ} — предел текучести материала подложки, МПа; R — наружный радиус зоны изгиба, мм; ρ — текущее значение радиуса, мм.

Напряжению, определяемому формулой (1), соответствует деформация растяжения периферийного волокна подложки в зоне изгиба

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{s}{2r + s}, \quad (2)$$

где s — толщина заготовки, мм; r — внутренний радиус изгиба, мм.

Значение деформации растяжения в формуле (2) не должно превышать относительного удлинения покрытия δ_c (справочная величина для данного материала), откуда следует соотношение

$$r \geq \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\delta_c} - 1 \right). \quad (3)$$

Значение радиуса изгиба в формуле (3) является естественным технологическим ограничением при

проектировании профиля, а потому выполнение данного условия гарантирует сохранность покрытия в зоне изгиба при профилировании заготовки.

Действие других сил (см. рис. 1) приводит к возникновению значительных контактных напряжений, при которых целостность покрытия может нарушаться. Рассмотрим первоначально локальный обжим заготовки силой P_1 , который в ряде случаев применяется для выравнивания или, наоборот, создания градиента продольных деформаций по поперечному сечению профиля в зависимости от того, требуется ли обеспечить прямолинейность профиля или придать ему продольную кривизну. Некоторые виды профилей имеют элементы двойной толщины, требующие иногда осадки с компенсирующим локальным обжимом других элементов. При формовке в закрытом калибре движение материала в поперечном направлении затруднено, поэтому можно принять схему плоской деформации.

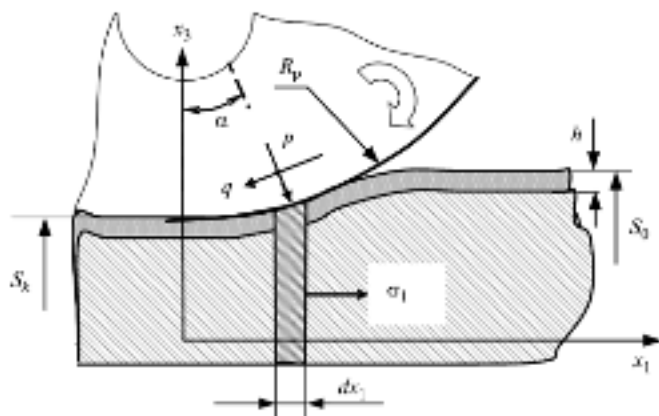


Рис. 2. Схема локального обжима и параметры заготовки и инструмента

Пусть рассматривается локальный обжим участка профиля шириной b и первоначальной толщиной s_0 (рис. 2). Механические характеристики субстрата (основного материала) и покрытия условимся обозначать набором $\{\xi_i(x_3)\}$, задаваемым следующим образом:

$$\xi_i(x_3) = \begin{cases} \xi_i^s, & 0 < x_3 \leq \frac{s}{2} - h; \\ \xi_i^c, & \frac{s}{2} - h < x_3 \leq \frac{s}{2}, \end{cases} \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ указывает на показатели в порядке их следования: модуль Юнга, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и т. д.; s, h — общая толщина заготовки и толщина покрытия (текущие); s, c — верхние индексы, показывающие, что показатель относится к субстрату и покрытию соответственно.

При рассмотрении обжима будем полагать

$$\xi_2 = \frac{\xi_2^s(s_0 - 2h) + 2\xi_2^c h}{s} \approx \xi_2^c \approx \sigma_T, \quad (5)$$

где s_0 — толщина исходной заготовки; σ_T — предел текучести субстрата.

Для выделенного элемента на рис. 2 уравнения равновесия имеют вид

$$\sigma_3 dx_1 = (p \cos \alpha + q \sin \alpha) R d\alpha;$$

$$d(\sigma_1) = (p \sin \alpha - q \cos \alpha) \cdot 2R d\alpha, \quad (6)$$

а условие пластичности с учетом соотношений (4) и (5) принимает форму

$$\sigma_i = \sigma_T. \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) σ_1, σ_3 — главные напряжения; p, q — нормальное и касательное напряжения, действующие на поверхности выделенного элемента; R — радиус формирующего ролика; σ_i — интенсивность напряжений. Комбинируя уравнения (6) и (7) и производя преобразования с учетом связи геометрических параметров, получим разрешающее уравнение для определения контактных напряжений в виде

$$\frac{dp}{dx_1} - \frac{2fR}{Rs_k + x_1^2} p = \frac{4kx_1}{s_k R + x_1^2}, \quad (8)$$

где f — коэффициент трения; s_k — зазор в роликовом калибре; k — максимальное касательное напряжение ($k = \sigma_T / \sqrt{3}$).

Уравнение (8) по виду несколько отличается от упрощенного уравнения Кармана [2], для которого известна асимптотическая оценка, а замкнутое решение получено лишь при дальнейших упрощающих предположениях. Граничные условия для уравнения (8) следует взять нулевыми в начальной точке контакта заготовки и формирующего ролика, определяемой вдоль координаты x_1 формулой

$$x_{10} \approx \sqrt{R(s_0 - s_k)}. \quad (9)$$

Вводя обозначения

$$f(x_1) = -\frac{2fR}{Rs_k + x_1^2}; \quad g(x) = \frac{4kx_1}{s_k R + x_1^2}, \quad (10)$$

представим уравнение в виде

$$p' + f(x_1)p = g(x_1). \quad (11)$$

Решение уравнения (11) с принятыми граничными условиями для точки x_{10} (см. формулу (9)) известно [3]:

$$p(x_1) = \exp(-F(x_1)) \int_{x_{10}}^{x_1} g(x) \exp(F(x)) dx, \quad (12)$$

где $F(x_1) = \int_{x_{10}}^{x_1} f(x) dx$.

Выполнение интегрирования уравнения (12) и последующих несложных, но трудоемких преобразований приводит к следующему результату:

$$p(x_1) = \frac{4k}{fR} \exp(2\eta(x_1)) \times \left[x_{10} \exp(-\eta(x_{10})) - x_1 \exp(-\eta(x_1)) + \int_{x_1}^{x_{10}} \exp(-\eta(x)) dx \right], \quad (13)$$

где $\eta(x) = f \sqrt{\frac{R}{s_k}} \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{\sqrt{R s_k}} \right)$.

Последний интеграл в решении (13) не может быть вычислен аналитически, однако решение легко табулируется с помощью программы MathCAD 2001 Pro. Результаты вычисления приведены на рис. 3, где контактные давления представлены в безразмерном виде: $p(x_1)/(2k)$, а зазор в калибре задан через степень обжима заготовки ϵ_3 .

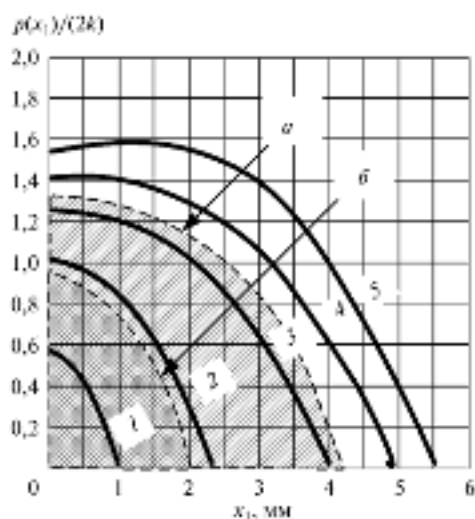


Рис. 3. Распределение относительных напряжений сжатия в контактной зоне в зависимости от степени обжима: 1...5 — $\epsilon_3 = 2; 10; 20; 30$ и 40% соответственно; *a* — граница допустимой области для материалов толщиной менее 2 мм с покрытием более 50 мкм; *b* — граница безопасного локального обжима для материалов толщиной более 2 мм

Для определения технологически допустимых параметров процесса формовки производили локальный обжим заготовок с покрытием на 2, 10, 20, 30 и 40 % на профилигибочном станке ГПС-500М6 в роликах диаметром 150 мм. Из профилированных заготовок вырезали темплеты размером 15 × 20 мм, у которых в целях повышения точности производили многократное измерение толщины с точностью 0,01 мм с последующим осреднением. Темплеты по группам материалов заливали в эпоксидную смолу, шлифовали их торцовую часть и подвергали исследованию на предмет состояния поверхностного слоя на микроскопе МИМ-8М с увеличением в пределах от 340 до 1000. Поверхность образцов изучали с помощью трубки МПБ-2 с 24-кратным увеличением, затем производили оценку прочности слоя покрытия методом царапания иглой с последующим сравнением прикладываемых к игле сил. Механические характеристики субстратов всех исходных материалов укладывались в пределы заданного допуска. Результаты исследований представлены в таблице.

Данные, приведенные в таблице, указывают на слабую зависимость прочности покрытия от толщины субстрата (см. свойства полиэстера в первых трех строках табл.). Рис. 3 показывает, что контактные давления могут превосходить предел текучести без существенного нарушения покрытия, если оно относительно тонкое (см. также табл.). Постановочными экспериментами также выявлено, что у образцов толщиной менее 2 мм при степени обжима 40 % отслоения покрытия толщиной до 70 мкм отсутствуют. Однако метод царапания показывает, что при степенях обжима более 30 % происходит некоторое разрыхление покрытия, так что допустимая степень обжима составляет порядка 25 % (см. рис. 3, кривую *a*).

Для материалов толщиной более 2 мм при локальном обжиме свыше 10 % наблюдаются отслоения даже при толщине покрытий 25 мкм. Величина обжима в 20 % является критической для тонких (менее 1 мм) заготовок с толщиной покрытия более 50 мкм — возникает

Влияние обжима на нарушение покрытия

Материал покрытия	Толщина заготовки S_0 , мм	Толщина покрытия h , мкм	Степень обжима ϵ_3 , %							
			2		10		20		40	
			ПТП	ОП	ПТП	ОП	ПТП	ОП	ПТП	ОП
Полиэстер	0,53	25	—	—	+	—	+	—	+	—
Полиэстер	0,95	25	—	—	+	—	+	—	+	—
Полиэстер*	1,61	25	—	—	+	—	+	—	+	—
Полиуретан	0,63	70	—	—	—	—	+	—	+	+
Пластизоль	0,68	80	—	—	—	—	+	—	+	+

Обозначения: * — без цинкового покрытия; ПТП — наличие продольной текстуры покрытия; ОП — наличие отслоения покрытия.

его повреждение в виде наплывов и разрушений. Таким образом, для сравнительно толстых заготовок допустимая граница обжима составляет порядка 8...10 % (см. рис. 3, кривую *b*). Изменение текстуры покрытия (вследствие обжима) на служебные характеристики профиля существенного влияния не оказывает [1].

При определении уровня контактных напряжений от действия силы подгибки полки $P_3 = \int P(r)dr$ (здесь $P(r)$ — функция распределения сил по конической образующей нижнего формующего ролика) важно установить их точную привязку к рабочей поверхности формующего ролика в осевой плоскости профилирующей клетки с использованием текущей координаты r вдоль средней линии подгибаемой полки, отсчитываемой от угловой зоны, и суммарного угла подгибки полки α_k . Текущий (актуальный) угол подгибки полки в осевой плоскости k -го перехода $\theta_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}$. В дальнейшем геометрические параметры условно не индексируются.

На основе моделирования в среде Ansys (модуль LS-Dуна) и экспериментальных исследований авторами установлено ранее, что функцию распределения сил, действующих на заготовку в текущем переходе, можно задавать в экспоненциальной форме [4]:

$$P(r) = P_0 \exp\left(-\frac{r-x}{n}\right), \quad (14)$$

где P_0 — максимальное значение действующей силы; r — текущая координата, отсчитываемая вдоль образующей конического участка ролика; n — размерный параметр, определяющий форму экспоненты; x — размер “мертвой зоны” (отсутствия контакта в угловой зоне), т. е. расстояние от точки сопряжения образующих цилиндрического и конического участков нижнего ролика до точки контакта заготовки и инструмента.

Размер “мертвой зоны” легко определяется из геометрического рассмотрения положения заготовки в угловой зоне роликового калибра:

$$x = s(\xi + 1) \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right), \quad (15)$$

где ξ — относительный радиус изгиба, равный r_b/s (r_b — внутренний радиус изгиба заготовки; s — толщина заготовки).

Размер “мертвой зоны” растет с увеличением угла подгибки согласно уравнению (15). При этом в угловой зоне роликового калибра образуется так называемая “зона высвобождения”, т. е. зона, где заготовка не ограничена инструментом. Максимальная погонная сила возникает на участке конической части нижнего ролика, примыкающем к этой зоне. Параметр n , зависящий от размера “мертвой зоны”, определяется соотношением

$$n = \frac{3x-b}{\ln k},$$

где k — коэффициент ослабления максимального значения силы.

Зависимость (14) с точностью до 11 % совпадает с экспериментальными данными (по интегральному показателю — силе распора) и полностью определяют распределение действующих сил на подгибаемой полке.

Для вычисления контактных напряжений необходимо найти площадь элементарной контактной зоны, протяженность которой определяется дугой контакта заготовки и конической части ролика $m(r, \alpha_k)$. Поперечный изгиб заготовки перед межосевой плоскостью роликов текущего перехода позволяет ограничить зону обхвата заготовкой формующего ролика геометрическим местом точек пересечений конической поверхности ролика и прямых, проходящих через точки сечения заготовки в $(k-1)$ -м и k -м переходах на уровнях $r \in [x, b]$ (b — ширина полки).

Тогда длина линии контакта на коническом участке формующего ролика будет определяться зависимостью

$$m(r, \alpha_k) = (R_0 + r \sin \alpha_k) \gamma, \quad (16)$$

где R_0 — радиус кривизны базовой цилиндрической поверхности нижнего ролика; γ — угол обхвата ролика заготовкой в k -м переходе.

С учетом значения протяженности зоны плавного перехода согласно работе [3] получим

$$\gamma \approx \frac{4\sqrt{6sb(\alpha_k - \alpha_{k-1})}(\sin \alpha_k - \sin \alpha_{k-1})}{8b(\alpha_k - \alpha_{k-1}) + 3s(\sin \alpha_k - \sin \alpha_{k-1})^2}. \quad (17)$$

Как следует из зависимостей (16) и (17), при одном и том же угле подгибки $\theta_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}$ с увеличением толщины заготовки наблюдается увеличение угла обхвата и длины линии обхвата. Здесь следует иметь в виду, что для более толстых заготовок протяженность зоны плавного перехода меньше, чем для тонких заготовок (ее значение изменяется пропорционально $1/\sqrt{s}$), а кроме того, играет определенную роль и относительный радиус поперечного изгиба заготовки перед входом в калибр. При одном и том же радиусе изгиба заготовка большей толщины имеет меньший относительный радиус кривизны, а потому ее упругие свойства меньше (большая часть сечения охвачена пластическими деформациями).

С увеличением суммарного угла подгибки угол обхвата увеличивается, что объясняется изменением конфигурации конической части нижнего ролика: фактически к последнему переходу коническая рабочая поверхность вырождается в боковую поверхность кольца.

С учетом зависимостей (14) и (16) теперь мож-

но определить величину контактного напряжения на участке подгибки:

$$\sigma_k = \frac{P(r)}{m(r, \alpha_k)} = \frac{P(r)}{(R_0 + b \sin \alpha_k) \gamma} \quad (18)$$

На рис. 4 представлено распределение контактных напряжений на втором переходе в зависимости от толщины заготовки в соответствии с зависимостью (18). Характер кривых 1...4 показывает, что сравнительно высокий уровень контактных напряжений имеет место только вблизи угловой зоны, а затем, по мере движения к кромке заготовки, контактные напряжения падают. По сравнению с нормальными напряжениями при обжиме эти напряжения фактически не могут приводить к нарушению покрытия, если только шероховатость инструмента весьма низка, а касательные напряжения незначительны.

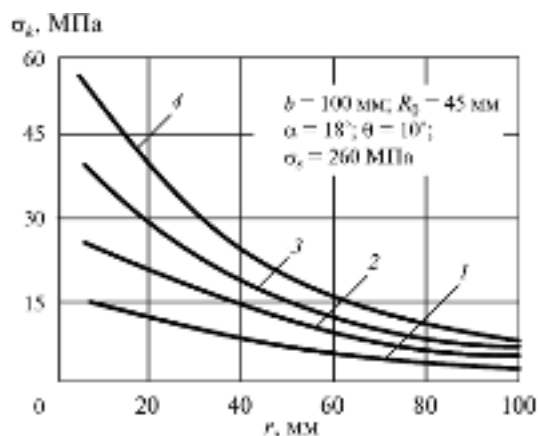


Рис. 4. Распределение контактных напряжений по ширине полки на втором переходе:
1...4 — $s = 1, 2, 3$ и 4 мм соответственно

Увеличение диаметров формующих роликов приводит к существенному снижению контактных напряжений, поскольку знаменатель правой части формулы (18) содержит радиус базовой поверхности формующего ролика. Однако следует иметь в виду, что с увеличением диаметра ролика угол обхвата конической части заготовкой уменьшается, компенсируя в определенной степени эффект снижения контактных напряжений за счет увеличения радиуса базовой поверхности. Впрочем, хорошо известно, что увеличение диаметра формующих роликов положительно влияет на условия формовки, однако с экономической точки зрения оно далеко не всегда целесообразно, особенно в условиях мелкосерийного производства. Ясно, что переход к большему диаметру формующих роликов потребует перехода к профилировочному станку более высокой стоимости с большими энергопотреблением, габаритами; для перевалковки станка придется предусматри-

вать подъемные механизмы, не говоря уже о стоимости самих роликов, изготавливаемых из поковок, а не из круглого проката.

Возвращаясь к касательным напряжениям, соответствующим действию продольной силы P_4 , следует отметить, что они вызваны наличием проскальзывания из-за различия линейных скоростей рабочих поверхностей формующего ролика по отношению к поверхности заготовки. Проскальзывание характеризуется коэффициентом скольжения χ_k , зависящим от геометрических параметров поперечного сечения профиля и суммарного угла подгибки для k -го перехода:

$$\chi_k = \left| \frac{Cs/2 + (b^2 - 2br - Cr) \sin \alpha_k}{R_0(C + 2b) + Cs/2 + b^2 \sin \alpha_k} \right|, \quad (19)$$

где C — ширина дна профиля.

Анализ формулы (19) показывает, что максимумы значений коэффициента скольжения приходятся на участок, примыкающий к зоне изгиба, и периферийную часть полки профиля. На периферийных участках заготовки контактные напряжения незначительны, за исключением случая торцового поджатия, когда напряжения на торце достигают предела текучести и возникает заусенец, что может приводить к нарушению покрытия в области торца в виде отслоений и надрывов. Обычно это происходит из-за нарушения технологии раскроя материала или ошибок определения развертки заготовки.

Касательное контактное напряжение τ должно удовлетворять условию

$$\tau = f \sigma_k \leq [\tau_c], \quad (20)$$

где f — коэффициент трения заготовки и инструмента; $[\tau_c]$ — допускаемое напряжение сдвига для покрытия.

С увеличением нормальных контактных напряжений коэффициент трения в формуле (20) увеличивается. Для его снижения в ряде случаев применяют неагрессивные по отношению к покрытию эмульсии. Существенное значение также имеет чистота рабочих поверхностей формующих роликов. Если для формовки заготовок без покрытия допускается шероховатость рабочих поверхностей роликов $3,2 \dots 1,6$ мкм, то для профилирования заготовок с покрытием — $0,4 \dots 0,2$ мкм. Кроме того, при использовании метода интенсивного деформирования заготовок с покрытием в закрытых калибрах для сохранности покрытия надлежит также учитывать следующие рекомендации при проектировании технологической оснастки:

1. Врезание калибра следует осуществлять в верхний ролик.
2. Линия разъема калибра должна состоять из отрезков образующей конуса/цилиндра и вертикальной линии.

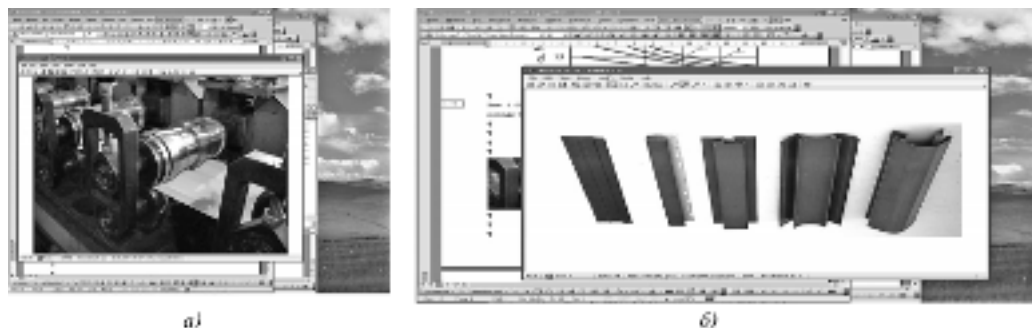


Рис. 5. Профили с покрытием для строительства:

a — изготовление «сайдинга»; *б* — строительные профили для внутренней и наружной отделки помещений

3. Боковое взаимное базирование роликов следует осуществлять буртом охватывающего нижнего ролика.

4. Базирование смыкания целесообразно выполнять по образующим цилиндрических поверхностей буртов.

5. Расположение буртов по отношению к точке начала разъема калибра (местоположение кромки заготовки) должно соответствовать условию центрирования и «стеснения» заготовки с учетом конфигурации калибра предшествующего перехода [3].

На рис. 5, *a* показана формовка профиля с покрытием типа «сайдинг» для наружной облицовки зданий, а на рис. 5, *б* — другие строительные профили с покрытием, изготовленные методом интенсивного деформирования.

Таким образом, для снижения риска нарушения полимерных покрытий при профилировании надлежит выполнять следующие рекомендации:

1. Радиусы зон изгиба при создании конструкции профиля следует назначать с учетом допустимых значений, установленных стандартом на данный материал.

2. При локальном обжиге заготовки надлежит руководствоваться данными по допустимым технологи-

ческим областям, установленным в данной работе.

3. Для обеспечения благоприятного режима деформирования на стадии проектирования технологического оснащения следует осуществлять проверку уровня нормальных и касательных контактных напряжений, а также соблюдать рекомендации по проектированию формующих

роликов для реализации метода интенсивного деформирования.

4. При назначении режимов формообразования следует не допускать возникновения чрезмерных сил торцового поджатия и в обоснованных случаях использовать смазочные материалы, не являющиеся агрессивными по отношению к покрытию заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Илюшкин М.В., Филимонов В.И. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. 200 с.
2. Джонсон К. Механика контактных взаимодействий. М.: Мир, 1989. 509 с.
3. Филимонов С.В., Филимонов В.И. Интенсивное формообразование гнутых профилей. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2008. 444 с.
4. Лапин В.В., Филимонов В.И., Лапшин В.И., Филимонов С.В. Стойкость нижних роликов при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования // Справочник: Инженерный журнал, 2012, № 6. С. 9—15.





УДК 621.9.048.4 + 621.9.048.7

¹С.В. Николенко, ^{1,2}Н.А. Сюй, ^{1,2}М.А. Пугачевский, ¹Л.П. Метлицкая
(¹Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск,
²Дальневосточный университет путей сообщения, г. Хабаровск)
E-mail: nikola1960@mail.ru

Комбинируемая обработка стали 45 электроискровым легированием и лазерным излучением

Работа посвящена комбинируемой обработке стали 45 электроискровым и лазерным воздействием. Исследованы электродные материалы на основе карбида вольфрама с самофлюсующимися добавками и металлами, образующими с материалом катода неограниченно твердые растворы. Представлены данные по исследованию поверхностных слоев, изучено комбинируемое воздействие лазерного излучения на поверхностный слой, полученный электроискровым воздействием. Методами атомно-силовой микроскопии обнаружено формирование в процессе комбинируемого воздействия в поверхностном слое наноструктур, образованных из наночастиц WC с минимальным размером менее 40 нм. Определены оптимальные режимы лазерного воздействия, снижающего шероховатость и улучшающего износостойкость покрытия.

Ключевые слова: электроискровое легирование, лазерная обработка, электродные материалы, карбид вольфрама, самофлюсующиеся добавки, атомно-силовая микроскопия, электронная микроскопия, наноструктуры, шероховатость, микроабразивный износ.

Work is devoted the combined processing of a steel 45 by electrospark and laser in fluence. Electrode materials on the basis of carbide of tungsten with self-fluxing additives and the metals forming with a material of the cathode beyond all bounds firm solutions are investigated. Data on research of blankets are presented, the combined influence of laser radiation on a blanket received by electrospark influence is studied. Methods of atomic-power microscopy formation in the course of the combined influence in surface layer nanostructure, formed of nanoparticles WC with the minimum size of particles less than 40 nanometers is revealed. Optimum modes of laser influence reducing a roughness and improving wear resistance of a covering are defined.

Keywords: electrospark alloying, laser processing, electrode materials, tungsten carbide, self-fluxing additives, atomic-power microscopy, electronic microscopy, nanostructures, the roughness, microabrasive deterioration.

Введение

Создание и исследование упрочняющих покрытий на металлических поверхностях, в том числе в наноструктурном и аморфном состоянии, являются одним из перспективных направлений развития и получения новых материалов. На сегодняшний день существуют многочисленные методы изменения физико-химических и эксплуатационных свойств металлических поверхностей в заданном направлении, каждый имеет свои области применения. К числу современных методов упрочнения и нанесения защитных покрытий относится электроискровое легирование (ЭИЛ). К достоинствам ЭИЛ относятся возможность нанесения на обрабатываемую поверхность компактным электродом любых токопроводящих материалов и нетокопроводящих порошковых материалов, высокая прочность сцепления наносимого слоя с материалом основы, низкая энергоемкость процесса

(0,5...2 кВт), простота осуществления технологических операций, возможность механизации технологического процесса, незначительный расход электродного материала [1—6]. Однако ЭИЛ имеет ряд существенных недостатков: невысокую эффективность процесса формирования легированного слоя, существенное ограничение по толщине наносимого слоя, повышенную шероховатость при грубых режимах, поры и трещины в легированном слое. В связи с этим представляет интерес проведение исследования по комбинируемому воздействию на металлическую поверхность электроискрового легирования и лазерного выглаживания в целях уменьшения шероховатости, устранения дефектов слоя, а также получения поверхностных слоев с высокими физико-химическими и эксплуатационными свойствами [7—12, 14, 15].

Формирование наноструктурного состояния в тонком поверхностном слое является альтернативным способом повышения механических свойств металлических

материалов. Поверхностные слои имеют наименьшую сдвиговую устойчивость в нагруженном материале, в них зарождаются первичные деформационные дефекты, которые распространяются в объем материала. Наноструктурирование поверхностных слоев может существенно задерживать развитие усталостных трещин и, как следствие, повышать усталостную прочность материала.

При формировании качественных легированных слоев (ЛС) особое внимание должно быть уделено электродным материалам (ЭМ) для ЭИЛ. При создании ЭМ необходимо учитывать влияние межэлектродной среды и возможность образования карбидных и боридных фаз непосредственно в процессе легирования, а также последующей лазерной обработки. Для уменьшения образования оксидных пленок в формируемой поверхности целесообразно в состав электрода вводить компоненты, выполняющие роль флюсов (бор, кремний, кальций, марганец, щелочные металлы). В качестве флюсов рационально введение минеральных ассоциаций, выполняющих одновременно роль микролегирующих добавок поверхностного слоя. Введение бора также целесообразно в целях уменьшения эрозионной стойкости легирующих электродов [9, 10]. В этом аспекте представляет интерес использование в ЭМ добавок датолитового концентрата (ДТК).

Методики и материалы

Процесс ЭИЛ физически основан на искровом разряде в газовой среде, при котором происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии на катод. На поверхности катода образуется слой с сильно модифицированной структурой и составом, что обусловлено как перемещением материала, так и действием импульсных тепловых и механических нагрузок, возникающих при воздействии искрового разряда (рис. 1).

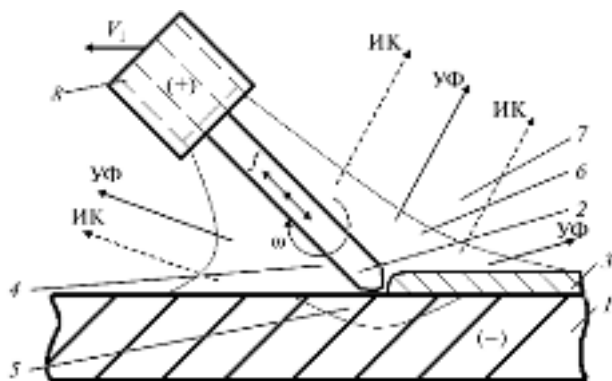


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ЭИЛ:
 1 — материал основы (катод); 2 — электрод (анод); 3 — легированный слой (ЛС); 4 — плазма разряда; 5 — зона термического влияния (ЗТВ); 6 — инертный газ; 7 — воздух; 8 — держатель электрода; УФ — ультрафиолетовое излучение; ИК — инфракрасное излучение

Электродные материалы на основе карбида вольфрама получали традиционными методами порошковой металлургии. Порошок WC—Co со средним размером 2,4 мкм был смешан с самофлюсующимися добавками и металлами, образующими с материалом катода неограниченно твердые растворы (Ni—Cr—B—Si), в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 15 мин при частоте вращения 250 об/мин; отношение массы шаров к массе материала 4:1. Затем данные смеси были спрессованы под давлением 145 МПа. Спекание производилось в вакууме и давлении 10 Па. Выдержка при температуре 1440 °С составила 1 ч. Охлаждение производилось со скоростью 50 °С/мин. Полученные образцы ЭМ были отшлифованы и отполированы до зеркального состояния. Микроструктуру образцов исследовали на растровом электронном микроскопе EVO 40.

Металлографический анализ шлифов электродов и легированных слоев проводился с использованием микроскопа MMP-2P и конфокального оптического микроскопа FV1000, дюрометрический — с использованием микротвердомера ПМТ-3М с нагрузкой 50 Н. Фазовый состав покрытий исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в CuK α -излучении. Для расшифровки дифрактограмм использовали программное обеспечение PDWin. Использованы также рентгеновский анализатор JCSA-733, микроанализатор MAP-3 и масс-анализатор ЭМАЛ-2.

Фазовый анализ проводили также с помощью просвечивающего электронного микроскопа ZEISS Libra-120, оснащенного HAADF-детектором и энергетическим Ω -фильтром. Исследования проводились в режимах на просвет, темного поля и электронной микродифракции, характеристических потерь электронов для выявления элементного состава в локальной точке образца. Образцы для просвечивающей микроскопии подготавливались методом электролитической полировки и ионным травлением.

Топография поверхности ЭМ изучалась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) системы ЗНЛ NTEGRA. Микроскопические исследования проводились на атомно-силовом микроскопе Aist-NT SmartSPM, комбинационное рассеяние света изучалось на микроспектрометре OmegaScore, интегрированном с Aist-NT SmartSPM.

Обработка велась электрическими импульсами от специально разработанного генератора импульсов модели IMES с возможностью управления от встроенного контроллера или внешнего компьютерного устройства при следующих электрических параметрах: рабочий ток — 210 А; напряжение — 40 В; частота импульсов — 500 Гц; скважность — 33; максимальная энергия разряда — 7,6 Дж.

Лазерная обработка осуществлялась импульсным периодическим воздействием твердотельного YAG:Nd³⁺ лазера с длиной волны 1,06 мкм, входящего в состав лазерного комплекса КВАНТ-15. В зависимости от напряжения на резонаторе мощность импульсов варьировалась

в пределах от 0,5 до 2 кВт. Диаметр фокусного пятна при лазерной обработке задавался от 0,5 до 2 мм. Длительность импульсов составляла 4 мс, частота следования — от 1 до 25 Гц. Обработка производилась по двухкоординатной ХУ-схеме. Параметры обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режимов лазерного излучения

Наименование образца	Мощность, Вт	Диаметр лунки, мкм	Шаг X, мкм	Шаг Y, мкм
К1	500	157	185	185
К2	800	257	143	286
К3	1000	486	171	514
К4	1000	514	200	543
К5	1300	572	228	858
К6	1300	715	200	858
К7	1600	457	286	935
К8	1600	457	286	858
К9	800	215	143	286
К10	800	286	143	286
К11	900	543	143	328
К12	900	486	171	455
К13	1000	572	200	455
К14	1000	715	243	514
К15	1200	457	200	644
К16	1200	457	200	715
К17	Электроискровое легирование без лазерной обработки			
Л1 (без ЭИЛ)	800	215	143	286
Л2 (без ЭИЛ)	900	543	143	455

Шероховатость ЛС определяли профилометром модели «296», соединенным с компьютером с помощью аналого-цифрового преобразователя. Ошибка измерения высоты неровностей составляла $\pm 0,2$ мкм. Параметры шероховатости рассчитывали согласно ГОСТ 2789—73.

Исследования ЛС на микроабразивный износ проводили на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося стального шарика на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы [13]. Испытание на износ проводили по схеме “шар — плоскость” при наклонном рас-

положении образца с прижатием к нему вращающегося шарика за счет собственной массы. Износ обеспечивается добавлением абразивной суспензии, содержащей взвешенные в масле МС-20 частички Al_2O_3 ($d_{cp} \approx 6$ мкм). После проведения испытаний диаметр эрозионной лунки измеряли с применением оптического микроскопа МБС-10.

Результаты и их обсуждение

Электродные материалы на основе карбида вольфрама

На основании разработанных принципов создания ЭМ для ЭИЛ разработаны новые электроды, обеспечивающие эффективность процесса ЭИЛ за счет введения в состав шихты самофлюсующихся добавок и металлов, образующих с материалом катода неограниченно твердые растворы [9]. Микроструктура электродных материалов представлена на рис. 2, а.

Расшифровка рентгенограмм показала, что в электродном материале на основе карбида вольфрама с добавками Ni—Cr—B—Si кроме основной фазы WC появляются бориды никеля, а также карбиды кремния. Электронограммы просвечивающей микроскопии подтвердили присутствие карбидов вольфрама (рис. 2, б), наличие боридов никеля (рис. 2, в) — NiB, Ni₂B, Ni₃B, а также выявили присутствие силицидов никеля.

Исследования топографии поверхности спеченного электрода методом атомно-силовой микроскопии показали, что использование добавки самофлюсующихся порошков снижает размер пор в электродном материале, при этом сохраняется их объем (рис. 3).

Физико-химические и эксплуатационные характеристики покрытий на основе карбида вольфрама, полученных методом ЭИЛ

Были проведены исследования поверхностного слоя после электроискрового легирования. Микрорентгеноспектральным анализом в покрытии, нанесенном электродом со связкой Ni—Cr—B—Si, были обнаружены Fe, Cr, Mn, Co, Si, W. Полуколичественный анализ

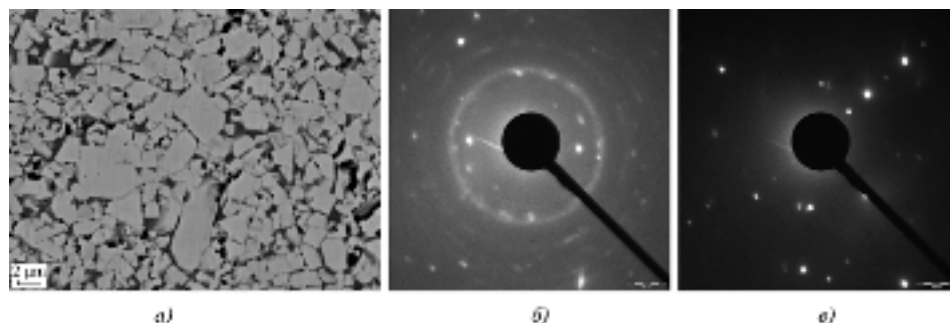


Рис. 2. Микроструктура электрода на основе карбида вольфрама с самофлюсующимися добавками Ni—Cr—B—Si:

а — WC — 8 % Co + 10 % Ni—Cr—B—Si; б — электронная дифрактограмма карбида вольфрама; в — электронная дифрактограмма бориды никеля

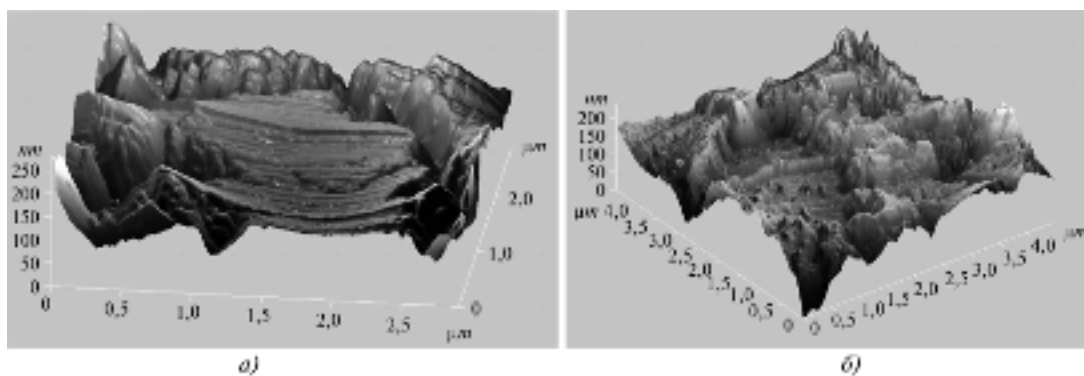


Рис. 3. Топография спеченного электрода на основе WC:

а — без добавки; б — с 10 %-й добавкой самофлюсующихся порошков

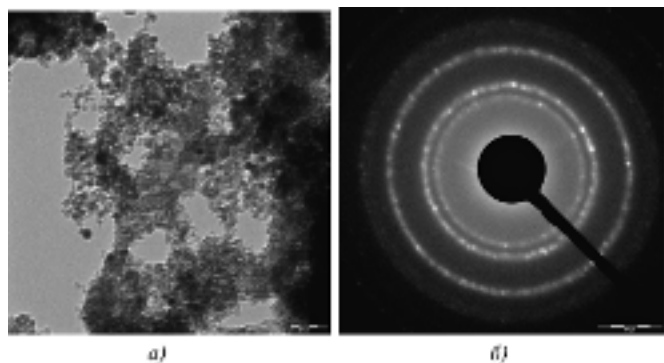


Рис. 4. Микроструктура продуктов эрозии электрода на основе карбида вольфрама с самофлюсующимися добавками Ni—Cr—B—Si:

а — WC — 8 % Co + 10 % Ni—Cr—B—Si; б — электронная дифрактограмма оксида кобальта

показал следующие концентрации элементов в покрытии: хрома — 8,7 %, никеля — 20,9 %. Элементный анализ показал наличие Fe, W, Ni, Co, Cr, Mn, B, Si, C в покрытии, полученном ЭИЛ сплавом с 10 %-й добавкой Ni—Cr—B—Si (элементы указаны в порядке убывания концентрации).

По данным РФА, составы электродов, которые кроме основной фазы WC содержат фазу Co_2C , отличаются от составов полученных из них покрытий. В результате электроискрового легирования на поверхности катода образуется слой, состоящий из «белого слоя», представляющего механическую смесь WC, Fe_3W_3C , Co_6W_6C . Наряду с основной фазой карбида вольфрама в составе электроискровых покрытий присутствуют также α -Fe и оксиды Fe_2O_3 и WO_3 . Фаза W_2C образуется в результате диссоциации фазы WC.

Были исследованы частицы продуктов эро-

зии, из которых формируется ЛС. Электронограммы просвечивающей микроскопии показали наличие частиц размером от 5 до 20 нм (рис. 4), а также оксида кобальта и C, O, Fe, Co.

Физико-химические и эксплуатационные характеристики покрытий на основе карбида вольфрама, полученные нанесением методом ЭИЛ с последующей лазерной обработкой

Были проведены эксперименты по лазерному выглаживанию ЛС. При воздействии лазера на поверхность происходит расплавление материала и образуются лунки расплава, которые затем застывают с образованием литой структуры закалки. При перемещении лазерного пучка лунки могут перекрываться, тогда на предыдущем участке происходит частичный отпуск закаленного материала. В результате лазерной обработки ЛС подвергается оплавлению и гидродинамическому перемешиванию совместно с нижележащими слоями подложки. За счет этого формируется новый поверхностный слой, отличающийся по составу и свойствам от материала подложки. На рис. 5 приведена микроструктура поверхности стали после лазерного и комбинированного воздействий.

На рис. 5, в видно, что с увеличением мощности лазерного излучения растет толщина «белого слоя» и происходит увеличение зоны термического воздействия.

На основании результатов металлофизических исследований в работе установлено, что в зонах лазерной

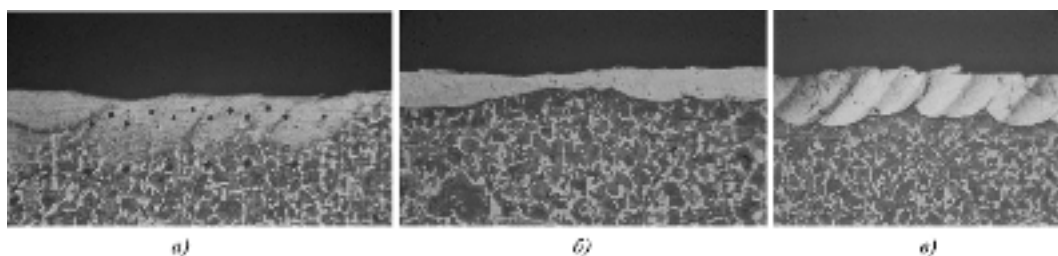


Рис. 5. Микроструктура поверхности стали 45 ($\times 100$):

а — после лазерной обработки; б — после комбинированного воздействия (мощность лазера 0,8 кВт); в — после комбинированного воздействия (мощность лазера 1,6 кВт)

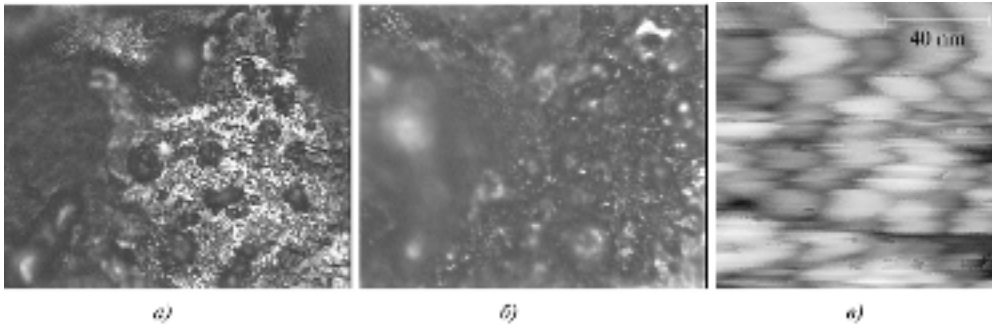


Рис. 6. Конфокальное изображение (а), (б) и сканограмма ЛС (в):
 а — фотография поверхности ЛС после ЭИЛ; б — фотография поверхности ЛС после комбинированного воздействия; в — АСМ-сканограмма размером 3 × 3 мкм

обработки из жидкого состояния вследствие температурных и концентрационных градиентов возникает высокая степень неравновесности жидкой фазы, бифуркационная неустойчивость расплава. Возникающие вихри при турбулентном течении жидкого расплава обеспечивают на разных масштабных уровнях диссипацию энергии, высокоградиентные потоки массопереноса и диспергирование кристаллических зерен, т. е. наноструктурные эффекты. Таким образом, лазерная обработка покрытий позволяет получить нанокompозитный материал с заданными составом, структурой и свойствами.

Исследования с помощью АСМ позволили выделить области на поверхности ЛС, где предположительно про-

исходило наноструктурирование после комбинированного воздействия. Такие области отличались цветом вплоть до фиолетового (рис. 6, а, б).

Из АСМ-сканограммы, представленной на рис. 6, в, видно, что наименьший размер наночастиц был обнаружен в составе ЛС, полученном после комбинированного воздействия на сталь. Минимальный размер частиц составил менее 40 нм (рис. 6, в).

Были проведены РФА-исследования легированного слоя после комбинированного воздействия. В результате лазерного выглаживания на поверхности катода образуется слой, состоящий из «белого слоя», представляющего механическую смесь WC , полуторного карбида W_2C и интерметаллида $FeNi$ (рис. 7).

В табл. 2 приведены значения микротвердости легированного слоя при нагрузке 0,5 Н, толщина максимального проплавления при обработке лазером, максимальная толщина для слоя ЭИЛ.

Таблица 2

Характеристики покрытий, полученных при ЭИЛ стали 45 после электроискровой и лазерной обработки

Образец	Электроискровое легирование		Лазерная обработка	
	Толщина T_{max} , мм	Микротвердость $HV_{0,5}$, ГПа	Толщина, T_{max} , мм	Микротвердость $HV_{0,5}$, ГПа
K1	0,025	9,84	0,025	12,60
K2	0,010	9,25	0,150	7,26
K3	0,015	10,03	0,620	7,52
K4	0,030	11,67	0,130	7,51
K5	0,010	9,25	0,850	8,02
K6	0,015	9,25	0,160	8,34
K7	0,020	10,97	0,070	7,26
K8	0,010	8,36	0,070	7,34
K9	0,020	9,78	0,030	11,48
K10	0,010	11,46	0,110	7,74
K11	0,010	12,76	0,700	6,11
K12	0,030	13,88	0,130	7,62
K13	0,010	12,86	1,100	4,97
K14	0,010	11,33	0,150	7,85
K15	0,020	12,94	0,080	6,73
K16	0,020	12,67	0,070	6,87
K17	0,012	10,47	—	—
Л1	—	—	0,140	4,93
Л2	—	—	0,140	5,16

Примечание. Микротвердость основного металла $HV_{0,5} = 2,84$ ГПа.

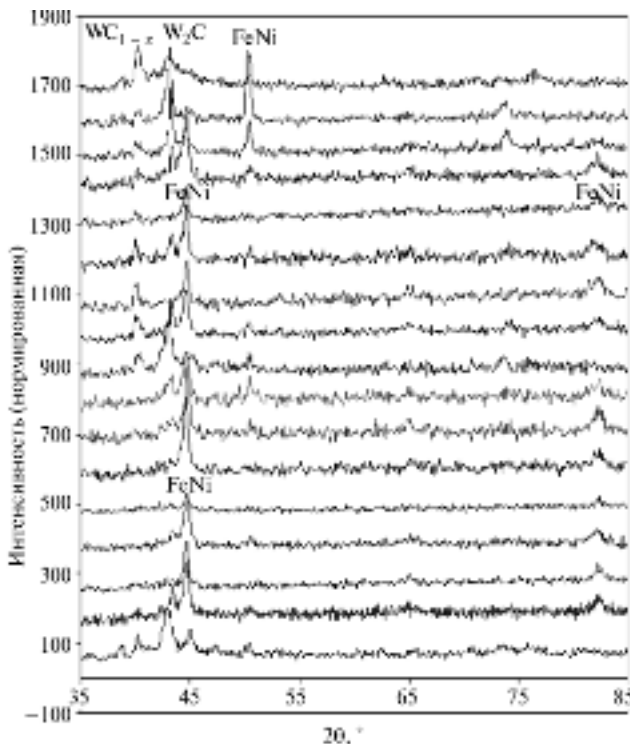


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы ЭИЛ-покрытий на стали 45 ЭМ на основе карбида вольфрама с самофлюсующимися добавками Ni—Cr—W—Si после комбинированного воздействия

В обработанных поверхностных слоях образцов стали 45 наблюдались следующие структуры и дефекты:

К1: слой ЭИЛ в изучаемом перпендикулярном сечении выглядит без изменений;

К2: слой ЭИЛ оплавляется, новая поверхность формируется за счет перекрытия лунок расплава ниже исходной;

К3...К6: глубокое проплавление. Структура К2. Есть поры и микротрещины, перпендикулярные поверхности;

К7...К8: слой ЭИЛ оплавляется, новая поверхность формируется за счет перекрытия лунок расплава ниже исходной. Есть единичные поры;

К9: структура К2. Есть поры и микротрещины, перпендикулярные поверхности;

К10: неравномерная толщина слоя. Структура К2. Есть поры и микротрещины, перпендикулярные поверхности;

К11...К16: глубокое проплавление;

К17: электроискровое покрытие, неравномерное по толщине, есть микротрещины.

Л1...Л2: лазерная обработка. Новая поверхность формируется за счет перекрытия лунок расплава ниже исходной поверхности. Частичный отпуск при перекрытии соседних лунок. Диаметр лунки на поверхности ~ 270 мкм для Л1 и ~ 300 мкм для Л2. Микротвердость слоя по сравнению с комбинированной обработкой ниже.

Одним из главных недостатков покрытий, созданных методом электроискрового легирования, является шероховатость поверхности, формирующаяся за счет локальности воздействия разрядов и неравномерности распределения перенесенного вещества (табл. 3). Исследования параметров шероховатости поверхности показали, что высота неровностей лежит в пределах 33...64 мкм. В табл. 3 представлены значения среднего арифметического отклонения профиля Ra ; наибольшей высоты профиля $Rmax$; высоты неровностей профиля по

десяти точкам Rz . Более гладкая поверхность наблюдается у образца с комбинированным покрытием К9. Однако в большинстве случаев шероховатость поверхности после комбинированного воздействия в указанных режимах обработки увеличивается, что не противоречит данным работы [11]. Поэтому перед использованием изделия с данным покрытием в узлах трения потребуется дополнительная сглаживающая обработка.

Таблица 3

Характеристики шероховатости модифицированного поверхностного слоя стали 45

Образец	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Rz , мкм
К1	5,37	49,23	38,50
К2	6,31	46,10	29,33
К3	8,65	63,80	61,27
К4	6,99	50,40	49,51
К5	8,55	63,92	63,91
К6	8,80	63,58	61,25
К7	6,39	55,05	37,51
К8	6,71	53,78	39,60
К9	4,84	33,71	23,56
К10	6,32	43,70	38,16
К11	8,72	63,80	49,71
К12	7,51	44,63	41,10
К13	8,99	63,98	63,97
К14	7,37	55,76	42,27
К15	5,33	41,00	33,56
К16	6,66	54,01	41,53
К17	6,44	48,81	38,79
Л1	3,76	30,78	22,66
Л2	4,11	40,45	32,47

Результаты исследований ЛС на микроабразивный износ приведены на рис. 8. Видно, что существуют наиболее оптимальные режимы лазерной обработки при ее интенсивности 5...7 МВт/см². Наихудшие результаты у лазерного воздействия без электроискровой обработки, что объясняется окислением поверхности стали и снижением ее физико-механических характеристик.

Наилучшей износостойкостью обладают покрытия с режимами обработки образцов К5 и К13, что можно объяснить появлением в покрытии износостойкой фазы карбида вольфрама и наноструктурированием поверхностного слоя.

Выводы

1. Предложен способ комбинированного электрофизического воздействия на сталь 45, а именно электроискрового легирования с последующим лазерным выглаживанием. Он дает возможность получать покрытия с высокими эксплуатационными свойствами

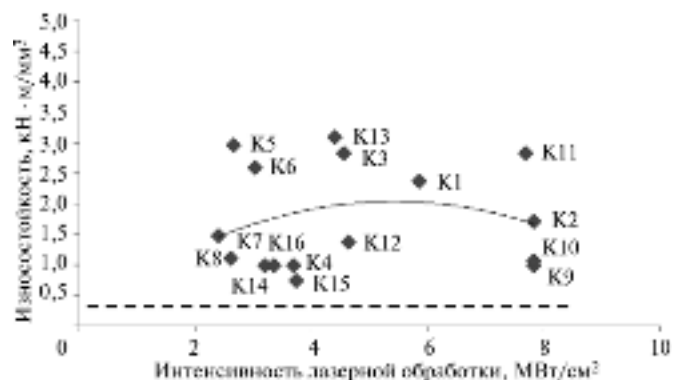


Рис. 8. Зависимость микроабразивного износа ЛС от интенсивности лазерной обработки. Штриховой линией показана износостойкость лазерной обработки без ЭИЛ

за счет уменьшения шероховатости и устранения таких дефектов покрытия, как трещины и поры.

2. Исследованиями установлено, что метод электроискрового легирования, обладающий простотой технологии, низкой энергоемкостью, незначительным расходом электродного материала и др., может быть использован для формирования легирующего подслоя при комбинированной наплавке.

3. Установлено, что подслоя, нанесенный электродом-инструментом из сплава на основе карбида вольфрама с самофлюсующимися добавками, при комбинированной наплавке формирует покрытие с твердостью, вдвое большей твердости покрытия с подложкой, выполненной лазерным упрочнением.

4. В результате исследований с помощью АСМ установлено, что в процессе ЭИЛ, как и после комбинированного воздействия, происходит наноструктурирование поверхностного слоя стали 45. Минимальный размер частиц менее 40 нм.

5. Наилучшей износостойкостью обладают покрытия с режимами обработки образцов К5 и К13, что можно объяснить появлением в покрытии износостойкой фазы карбида вольфрама и наноструктурированием поверхностного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Nikolenko S.V., Pyachin S.A., Burkov A.A.** Formation of electrospark coatings of the VK8 hard alloy with the Al_2O_3 additive // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011. Vol. 52. N 1. P. 56–61.
2. **Galinov I.V., Luban R.B.** Mass transfer trends during electrospark alloying // Surface & Coatings Technology. 1996. Vol. 79. P. 9–18.
3. **Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E., et al.** Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC—Co electrodes: Deposition process, structure, and properties // Surface & Coatings Technology. 2008. Vol. 202. P. 3715–3722.
4. **Liu J., Wang R., Qian Y.** The formation of a single-pulse electrospark deposition spot // Surface & Coatings Technology. 2005. Vol. 200. P. 2433–2437.
5. **Agarwal A., Dahotre N.** Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy // Surface & Coatings Technology. 1998. Vol. 106. P. 242–250.
6. **Chen Z., Zhou Y.** Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization / Z. Chen. // Surface & Coatings Technology. 2006. Vol. 201. P. 1503–1510.
7. **Nikolenko S.V.** Surface Nanostructuring of Steel 35 by Electrospark Machining with Electrodes Based on Tungsten Carbide and Added Al_2O_3 Nanopowder // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. № 6. P. 556–561.
8. **Nikolenko S.V., Kuz'menko A. P., Timakov D. I., Abakymov P. V.** Nanostructuring a Steel Surface by Electrospark Treatment with New Electrode Materials Based on Tungsten Carbide // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Vol. 47. N 3. P. 217–224.
9. **Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D.** Novye elektrodnye materialy (New Electrode Materials). Vladivostok: Dal'nauka, 2005.
10. **Николенко С.В.** Повышение эффективности применения функциональных электроискровых покрытий на сталях и титановых сплавах путем создания электродных материалов с минеральными и самофлюсующимися добавками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Комсомольск-на-Амуре. 2013. 44 с.
11. **Radek N., Bartkowiak K.** Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam // Physics Procedia. 2010. N 5. P. 417–423.
12. **Chen Z., Scotchmer N., Zhou N.** Surface Modification of Resistance Welding Electrodes by Electro-Spark Deposited Coatings // Materials Science & Technology. 2005. P. 59–62.
13. **Kusano Y., Van Acker K., Hutchings I. M.** Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates // Surf. Coat. Technol. 2004. Vol. 183. N 2–3. P. 312–327.
14. **Лазаренко Б.Р., Михайлов В.В., Гитлевич А.Е. и др.** Лазерное воздействие на покрытия, полученные методом электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. 1978. № 3. С. 24–25.
15. **Паустовский А.В., Ботвинко В.П.** Влияние импульсного лазерного излучения на структуру и свойства электроискровых покрытий из сплавов типа ВК и ТК // Порошковая металлургия. 1991. № 2. С. 55–58.

Авторы благодарят профессора Юго-Западного государственного университета (г. Курск) А.П. Кузьменко за помощь в проведении исследований на АСМ, а также сотрудников ИМ ХНЦ ДВО РАН за помощь в проведении аналитических исследований.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.

Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Беликова Е.И.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 04.08.2014 г. Подписано в печать 10.09.14 г. Формат 60×88 1/8.

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

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солишнз".

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49