

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 5 (89)
май
2012

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р техн. наук,
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного
совета**

д-р техн. наук, заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного
редактора**

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ

А.П. БАБИЧЕВ

В.П. БАЛКОВ

В.М. БАШКОВ

А.И. БЕЛИКОВ

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.А. ЗЕМСКОВ

С.А. КЛИМЕНКО

В.А. ЛАШКО

В.А. ЛЕБЕДЕВ

В.В. ЛЮБИМОВ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО

Х.М. РАХИМЯНОВ

Б.П. САУШКИН

В.П. СМОЛЕНЦЕВ

А.М. СМЫСЛОВ

Г.А. СУХОЧЕВ

В.П. ТАБАКОВ

В.А. ШУЛОВ

М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Е.П. ЗЕМСКОВА

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.

Е-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



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Никифоров Н.И. Совершенствование конструкции обкатников сепараторного типа 3

Попов М.Е., Абухарб М. Поддержка принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР 7



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Букарев И.М., Аборкин А.В. Исследование свойств многослойных покрытий .. 16

Злобин С.Б., Батраев И.А., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Восстановление деталей электроцентробежного насоса детонационным напылением 20

Полетика И.М., Макаров С.А., Крылова Т.А. Влияние бора на процесс карбидообразования, износо- и коррозионную стойкость покрытий при электронно-лучевой наплавке 25

Смоленцев В.П., Печагин А.П., Климова Г.Н. Режимы и технология стабилизации геометрии деталей магнитно-импульсной обработкой 32



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Жуков А.А., Навоев А.П. Определение модуля упругости цементованного слоя 37



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Зверовщиков В.З., Игонин В.А., Соколов А.В. Новая технология упрочнения пластин и шлифования борированных поверхностей алмазными кругами при восстановлении штампов для прессования керамических материалов 41



ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Гадалов В.Н., Абашкин Р.Е., Розина Т.Н., Агеев Е.В., Горецкий В.В. Восстановление рабочих органов почвообрабатывающей и посевной сельскохозяйственной техники 47

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

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 5 (89)
May
2012

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 Assistants

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

S.N. GRIGORIEV

V.A. ZEMSKOV

S.A. KLIMENKO

V.A. LASHKO

V.A. LEBEDEV

V.V. LYUBIMOV

F.I. PANTELEENKO

H.M. RAHIMYANOV

B.P. SAUSHKIN

V.P. SMOLENTSEV

A.M. SMYSLOV

V.A. SHULOV

G.A. SUHOICHEV

V.P. TABAKOV

M.L. KHEIFETS

Edition:

E.P. ZEMSKOVA

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



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Nikiforov N.I. Improvement of construction of separatory type processors 3

Popov M.E., Abuharb M. Decision-making support at a choice of a method
of strengthening processing of details of cars in integrated
CAD/CAM systems 7



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Bukarev I.M., Aborkin A.V. Investigation of the properties of multilayer coatings . . 16

Zlobin S.B., Batraev I.A., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Restoration
of electro-centrifugal pump items by detonation spraying 20

Poletika I.M., Makarov S.A., Krylova T.A. Influence of boron on carbide-forming
process, wear and corrosion resistance of coatings under electron-beam surfacing . . 25

Smolentsev V.P., Pechagin A.P., Klimova G.N. Modes and technology of stabilization
of geometry of details magnetoimpulse processing 32



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Zhukov A.A., Navoyev A.P. Defining carburised layer elastic modulus 37



PROCESSING BY COMBINED METHODS

Zverovschikov V.Z., Igonin V.A., Sokolov A.V. New technology of hardening
of plates and grinding of borated surfaces by diamond wheels at restoration
of dies for pressing of ceramic materials 41



INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Gadalov V.N., Abashkin R.E., Rozina T.N., Ageev E.V., Goretskij V.V. Restoration
of working bodies of soil-cultivating and sowing agricultural machinery 47

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 621.787.4

Н.И. Никифоров (Камышинский технологический институт (филиал)
ГОУ ВПО ВолгГТУ)
E-mail: nikiforovni@rambler.ru

Совершенствование конструкции обкатников сепараторного типа

Проанализированы недостатки, свойственные инструменту сепараторного типа для обработки валов методом поверхностного пластического деформирования роликами. Предложено направление совершенствования конструкции введением дополнительных опорных катков. Приведена расчетная методика определения основных конструктивных параметров улучшенной конструкции обкатника и представлена разработанная на этой основе конструкция инструмента.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, обкатник, конический деформирующий ролик, усилие деформирования.

This article analyzes drawbacks characteristic for a separatory type instrument for shaft treatment with the method of surface plastic deformation by rollers. The direction of improvement of the construction by additional supporting rollers introduction has been suggested. Computational method of testing of the basic constructive parameters of the processor improved construction has been given and the construction of the instrument developed on this basis has been introduced.

Keywords: surface plastic deformation, processor, conic deforming roller, deformation effort.

Инструменты для обработки методом *поверхностного пластического деформирования* (ППД) имеют большое разнообразие по конструктивному исполнению. Это связано с необходимостью решения задач по обеспечению заданных критериев по качеству, производительности, надежности инструмента, себестоимости обработки.

При обработке нежестких цилиндрических деталей наиболее благоприятные условия в отношении устойчивости и жесткости технологической системы создаются применением инструмента с тремя или большим числом роликов в связи с уравновешенностью результирующего усилия деформирования. При этом наиболее предпочтительным является применение роликов конического профиля.

Ограничение по усилию деформирования сужает интервал размеров контактной зоны, а следовательно, и размеров деформирующего ролика. Установка роликов в обкатнике может быть осуществлена на материальную ось вращения или в пазы сепаратора. В последнем случае размеры ролика могут быть выбраны наименьшими из допустимых и, таким образом, может быть достигнуто минимальное усилие деформирования при сохранении параметров качества обработки.

Для создания самоподачи и снижения осевого усилия при обкатывании ролики располагают в гнез-

дах сепаратора под углом $\omega = 0,5...2^\circ$ к оси инструмента (рис. 1). За счет возможного уменьшения диаметра роликов, устанавливаемых в сепараторе, их число больше, чем при установке на ось вращения, но ограничено, с одной стороны, недопустимым увеличением проскальзывания с уменьшением диаметра, а с другой – необходимостью наличия в корпусе сепаратора перемычек определенной толщины. Толщина перемычки должна обеспечивать ее требуемую прочность и жесткость. Положение осей роликов определяется направлением пазов сепаратора под углом самозатягивания.

В процессе обработки под воздействием усилия, действующего со стороны нажимного конуса (см. рис. 1, а), ролики вращаются, соприкасаясь с боковыми поверхностями сепаратора, и интенсивно изнашивают его гнезда (см. рис. 1, б). При этом изменяется ориентация осей роликов, т.е. текущее значение ω_1 постепенно уменьшается, а поскольку угол самозатягивания является небольшим, то его изменение до нулевого значения происходит через непродолжительное время и, следовательно, теряется эффект самоподачи.

Уменьшение интенсивности износа пазов сепаратора достигают применением дополнительных нажимных втулок (см. рис. 1, в) и армированием поверхностей сепаратора, контактирующих с деформи-

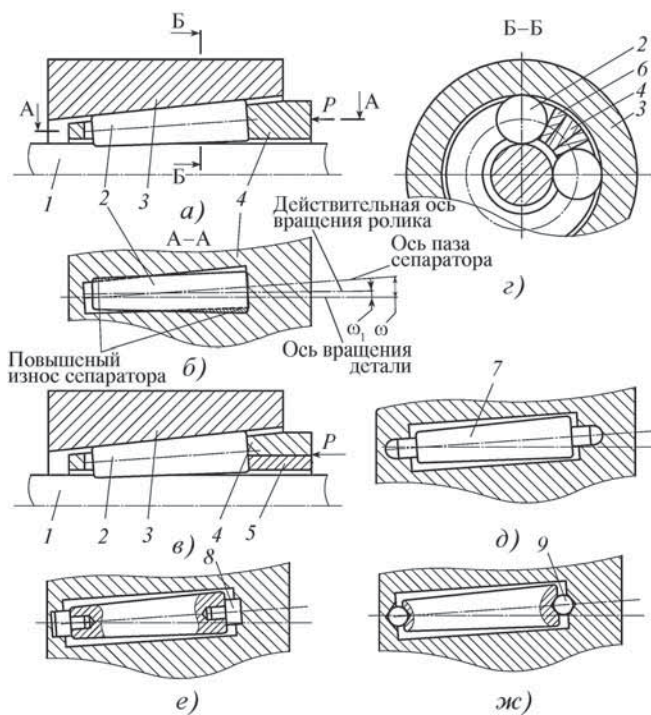


Рис. 1. Установка ролика в пазах сепаратора:
 1 – деталь; 2 – деформирующий ролик; 3 – опорный конус;
 4 – подкатник; 5 – сепаратор; 6 – износостойкая пластина;
 7, 8 – сухарики; 9 – шарик

рующими роликами износостойкими пластинами (см. рис. 1, г). Такое решение увеличивает окружное расстояние между роликами, уменьшает их число, усложняет сборку, снижает технологичность, не устраняет полностью износ.

Другое решение связано с переходом от базирования по наружной рабочей поверхности роликов к базированию по центровым отверстиям с помощью специальных промежуточных сухариков или по поверхностям, выполненным на ролике специальных цапф, перемещающихся в дополнительных пазах сепаратора (см. рис. 1, е, д).

Эта схема установки роликов имеет по существу те же недостатки, что и схема с использованием дополнительных армировочных пластин. Кроме того, необходимо точно выполнить пазы, а поскольку цапфы и сухарики установлены в них с зазорами, то это создает дополнительные погрешности, как и во всех предыдущих случаях. Вместо сухариков могут использоваться шарики (см. рис 1, ж).

Несмотря на описанные конструктивные изменения, обкатники сепараторного типа имеют низкий ресурс, а меры уменьшения износа не обладают высокой эффективностью.

Применяя обкатник в составе установки для совмещенной режуще-деформирующей обработки [1], когда

он за счет фрикционного взаимодействия вращает и перемещает обрабатываемую заготовку, преодолевая усилие резания в режущей головке, возникает необходимость максимального увеличения числа деформирующих роликов. Однако рассмотренные конструкции сепараторов имеют ограничения по числу одновременно устанавливаемых в инструменте роликов за счет наличия перемычки между гнездами сепаратора.

Таким образом, задача сводится к созданию конструкции сепаратора, обеспечивающей стабильное при продолжительной эксплуатации осевое положение деформирующих роликов относительно оси опорного конуса. Так как износ сепаратора происходит вследствие наличия в контакте трения скольжения, то возможное решение может быть основано на замене трения скольжения на трение качения.

Это может быть достигнуто применением в качестве направляющих элементов сепаратора специальных промежуточных опорных катков, которые, располагаясь на подшипниковых опорах, обеспечат стабильное угловое положение контактирующих с ними деформирующих роликов (рис. 2).

Обкатник постоянного усилия содержит расположенные по окружности вокруг обрабатываемой детали 1 с незначительными гарантированными зазорами δ_p деформирующие ролики 2, которые в процессе обработки контактируют также и с нажимными коническими катками 3, установленными на подшипниках качения 4. Нажимной конус 5 вращается на катках 3, а осевое усилие воспринимается упорным подшипником 7.

Оси центров катков повернуты относительно оси обрабатываемой детали 1 на угол самозатягивания ω ,

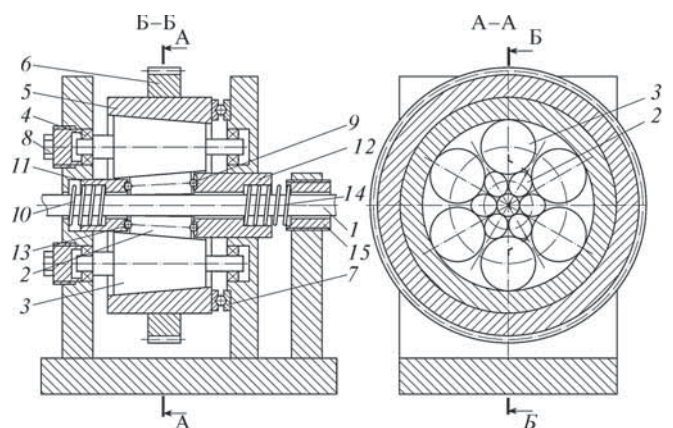


Рис. 2. Устройство обкатника с промежуточными катками:
 1 – обрабатываемая деталь; 2 – деформирующие ролики; 3 – катки; 4 – подшипники; 5 – нажимной конус; 6 – зубчатое колесо; 7 – подшипники; 8 – винты; 9, 13 – шарики; 10 – пружины; 11, 12 – соответственно левый и правый полусепараторы; 14 – пружины нагружения; 15 – винт регулировочный

что обеспечивает расположение осей роликов на тот же самый угол. Вращение детали осуществляется за счет фрикционного взаимодействия с роликами 2, которые, в свою очередь, получают вращение от нажимного конуса 5, на наружной поверхности которого расположено зубчатое колесо 6, посредством которого обкатник соединяется с внешним приводом.

Необходимое усилие деформирования создается пружиной 14, воздействующей на полусепаратор 12 и далее через шарики 9 на ролики 2. Величина усилия регулируется винтом 15. Пружина 10 имеет жесткость меньшую, чем у пружины 14 и служит для поддержания полусепаратора 11 с шариками 13 и предотвращения выпадения роликов при отсутствии заготовки.

Перед началом обработки производят настройку инструмента, заключающуюся в обеспечении одновременного одинакового сближения с нажимным конусом 5 опорных катков 3, создания равных условий их сцепления, а также в обеспечении необходимого усилия деформирования.

Для определения размеров роликов, катков, опорного конуса получены ряд зависимостей. Выражение, определяющее радиус деформирующего ролика в зависимости от радиуса детали, углов установки и числа роликов имеет следующий вид:

$$r_p = \frac{R_d \sin \frac{\psi}{2} - \frac{\delta_p}{2}}{1 - \sin \frac{\psi}{2} \cos \left(1 - \sin \omega \cos \frac{\psi}{2} \right)}, \quad (1)$$

где ψ – угол между двумя смежными роликами, определяемый исходя из числа установленных роликов z_p по формуле

$$\psi = \frac{2\pi}{z_p},$$

где δ_p – зазор между смежными роликами (рис. 3).

Исходя из того, что первое слагаемое в знаменателе выражения (1) близко к единице, упрощенно радиус роликов определяется как

$$r_p = \frac{R_d \sin \frac{\psi}{2} - \frac{\delta_p}{2}}{1 - \sin \frac{\psi}{2}}. \quad (2)$$

Погрешность приближения при числе роликов шесть и более не превышает 5%.

Аналогично получена зависимость для радиуса опорного катка:

$$r_k = \frac{R_k \sin \frac{\psi}{2} - \frac{\delta_k}{2}}{1 - \sin \frac{\psi}{2}}, \quad (3)$$

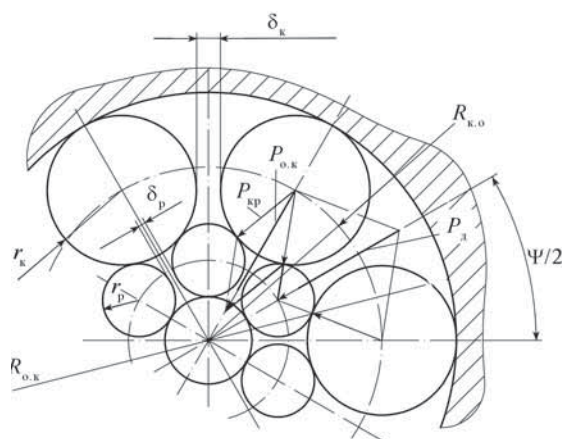


Рис. 3. Схема для определения геометрических параметров и сил, действующих на ролики, катки и деталь

где R_k – радиус, описываемый поверхностью опорных катков (соответствует радиусу опорного конуса);

δ_k – зазор между смежными катками.

После преобразований выражение (3) сведено к виду

$$r_k = \operatorname{tg}^2 \frac{\psi}{2} (r_p - C_1 + \sqrt{C_1^2 - C_2}), \quad (4)$$

где для замены входящих в формулу громоздких выражений применены буквенные обозначения C_1 и C_2 , определяемые по формулам

$$C_1 = \frac{1}{\sin \frac{\psi}{2}} \left(\frac{\delta_k}{2 \sin \frac{\psi}{2}} - \sqrt{R_d^2 + 2 R_d r_p - \delta_p r_p - \frac{\delta_p^2}{4}} \right),$$

$$C_2 = \operatorname{ctg}^2 \frac{\psi}{2} \left(\left(\frac{\delta_k}{2 \sin \frac{\psi}{2}} - \sqrt{R_d^2 + 2 R_d r_p - \delta_p r_p - \frac{\delta_p^2}{4}} \right)^2 + \delta_p r_p + \frac{\delta_p^2}{4} \right).$$

Значения, найденные по формулам (2) и (4), являются текущими и зависят от координаты длины контакта, так как рассматриваются в определенной секущей плоскости. Для нахождения меньшего и большего диаметров роликов и катков необходимо задаться углами их конусности, а также их длиной.

При условии, что ось вращения опорного катка параллельна оси заготовки, радиус центра установки катка находим из выражения

$$R_{к.о} = \frac{2r_k + \delta_k}{2 \sin \frac{\psi}{2}}.$$

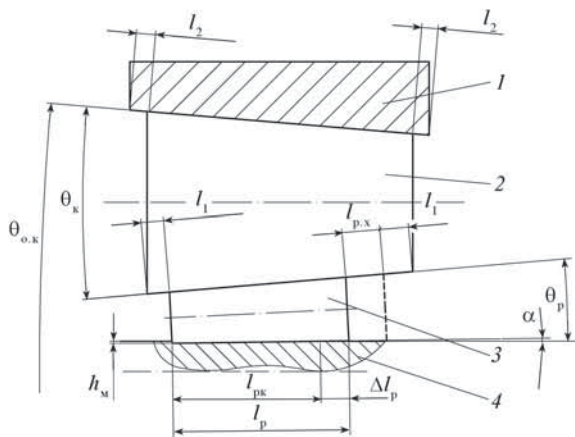


Рис. 4. Схема для определения линейных размеров деформирующих роликов, опорных катков и конуса:
 1 – опорный конус; 2 – каток; 3 – деформирующий ролик;
 4 – деталь

Внутренний диаметр опорного конуса определяем по формуле

$$D_{o.k} = 2(R_{k.o} + r_k).$$

Линейные размеры роликов, опорных катков и опорного конуса находим из соображений обеспечения обработки деталей в заданной области диаметров (рис. 4):

$$l_p = (h_m \operatorname{ctg} \alpha + \Delta l_p) \cos \frac{\theta_p}{2},$$

$$l_k = (h_m \operatorname{ctg} \alpha + \Delta l_p + 2l_1 + l_{p.x}) \cos \frac{\theta_k}{2},$$

$$l_{o.k} = (h_m \operatorname{ctg} \alpha + \Delta l_p + 2l_1 + l_{p.x} + 2l_2) \cos \frac{\theta_{o.k}}{2},$$

где h_m – глубина внедрения ролика;
 α – задний угол внедрения ролика;

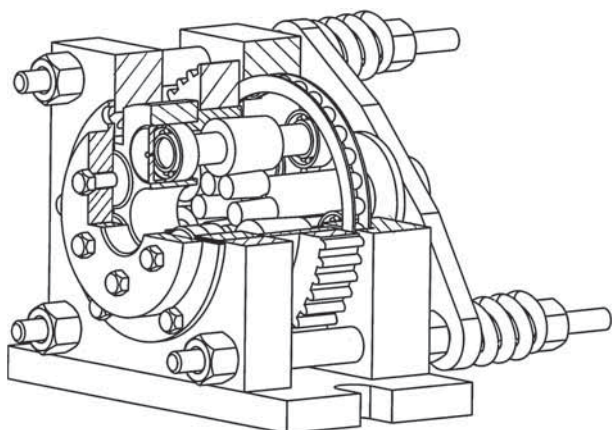


Рис. 5. Конструкция обкатника с двумя нагрузочными пружинами

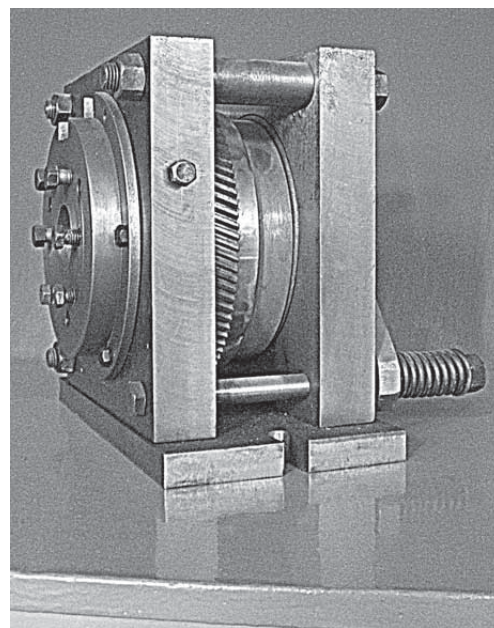


Рис. 6. Экспериментальный образец обкатника с промежуточными опорными катками

Δl_p – длина участка ролика за участком сбega;
 l_1 и l_2 – гарантированные запасы длин рабочих элементов;
 $l_{p.x}$ – длина рабочего перемещения ролика, определяемая по формуле

$$l_{p.x} = \frac{Td_d}{2\sin \alpha},$$

где Td_d – допуск на диаметр обрабатываемых заготовок.

Для определения осевого усилия, которое необходимо приложить к роликам для создания усилия деформирования P_d , получено выражение

$$P_{пр} = P_d \operatorname{tg}(\theta_p + \alpha) z_p. \tag{5}$$

Это же усилие отжимает катки от опорного конуса. Поэтому, чтобы обеспечить сцепление катков с опорным конусом, они должны быть поджаты к нему в продольном направлении с усилием в два раза большим рассчитанного по формуле (5) для обеспечения передачи каткам крутящего момента. Поджатие катков осуществляется винтами δ (см. рис. 2) с расчетным усилием.

На основе предложенной расчетной методики разработана конструкция обкатника с двумя нагрузочными пружинами (рис. 5, 6), что обеспечивает уменьшение габарита установки в направлении подачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комбинированная обработка длинных валов / Я.Н. Отений, Н.И. Никифоров, А.И. Журавлев // Станки и инструменты. 2006. № 6. С. 36–38.

УДК 621.787

М.Е. Попов, Мохаммад Абухариб (Донской государственный технический университет)
E-mail: pme-dgtu@mail.ru

Поддержка принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР

Рассмотрены вопросы формализации задачи выбора метода упрочняющей обработки в процессе конструкторского и технологического проектирования машин в интегрированных САПР. Сформулированы прямая и обратная задачи выбора метода упрочняющей обработки. Предложена система поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР.

Ключевые слова: формализация задачи выбора, упрочняющая обработка, прямая и обратная задачи, интегрированные САПР.

Questions of formalisation of a problem of a choice of a method of strengthening processing in the course of design and technological designing of cars in the integrated systems of automation of designing are considered. Direct and return problems of a choice of a method of strengthening processing are formulated. The system of support of decision-making is offered at a choice of a method of strengthening processing of details of cars in integrated CAD/CAM systems.

Keywords: formalisation of a problem of a choice, strengthening processing, direct and return problems, integrated CAD/CAM systems.

Введение

Качество ответственных деталей машин, их механические и физико-механические свойства в значительной степени зависят от упрочняющей обработки, применяемой на различных стадиях производства. Однако выбор методов, способов и технологии упрочняющей обработки деталей недостаточно формализован, что при частой смене моделей объектов производства приводит к необходимости длительной отработки технологии упрочняющей обработки новых деталей непосредственно на стадии их производства. В современном производстве при использовании интегрированных САПР эта задача должна эффективно решаться еще на стадии проектирования и технологической подготовки производства новых изделий.

Таким образом, разработка теоретических вопросов выбора вида и метода упрочняющей обработки деталей на стадии проектирования и технологической подготовки производства машин имеет большое научное и практическое значение для создания интегрированных САПР. Это создает условия для обеспечения заданных эксплуатационных свойств еще на стадии проектирования ответственных деталей и технологических процессов их упрочняющей обработки, для достижения требуемых характеристик качества поверхностного слоя и точности размеров обрабатываемых поверхностей, определяющих основные эксплуатационные свойства деталей машин.

Постановка задачи

Решение любой задачи на ЭВМ требует наличие аналитических или других видов зависимостей, кото-

рые отражают количественную, а не качественную сторону процесса проектирования. Поэтому для осуществления выбора и технологического проектирования операций упрочняющей обработки с помощью ЭВМ необходимо провести формализацию технологической задачи (или ее части), т.е. провести замену (преобразование) содержательного описания задачи математическими зависимостями и соотношениями [1–3].

Этот процесс, называемый формализацией, обеспечивает возможность создания универсальных алгоритмов и программ относительно конечных и начальных условий, т.е. относительно формы и размеров детали, типа производства, характеристик технологического оборудования и оснастки. Тем самым обеспечивается эффективное применение ЭВМ при проектировании технологических процессов упрочняющей обработки деталей различной формы и размеров.

Формализация задачи превращает процесс технологического проектирования из процесса рассуждений и построения аналогий в процесс строгого расчета. При этом процедуры проектирования структуры технологических процессов и его составных элементов могут быть выражены с помощью аппарата математической логики, содержание технологического процесса, характеризуемое рядом свойств объектов технологии, средствами теории множеств, а качественные отношения — количественными зависимостями и с помощью логических функций.

Одной из трудностей процесса формализации является то, что существующие в технологии машиностроения эмпирические зависимости количественных

отношений выражаются таблицами, имеющими большое число значений, либо формулами, не учитывающими различные условия производства. Основываясь на математическом анализе и статическом исследовании, таблицы и эмпирические формулы можно заменить математическими выражениями, которые исключают эти недостатки. В этом случае повышаются эффективность и точность расчета технологических параметров и уменьшается загрузка памяти ЭВМ.

Однако такие расчеты для операций упрочняющей обработки формализовать гораздо труднее, чем расчеты параметров для процессов обработки деталей резанием на металлорежущих станках, изученных более подробно и описываемых более строгими теоретическими и эмпирическими зависимостями.

Принципы формализации задачи выбора

Проектирование и оптимизация технологических процессов упрочняющей обработки являются сложной задачей, так как требуют учета большого числа факторов, влияющих на результаты процесса. Большое число факторов не позволяет получить строгие функциональные зависимости для выбора метода и расчета оптимальных технологических параметров упрочняющей обработки деталей машин. Эта задача может быть решена двумя путями.

Первый путь – применение типовых технологических решений. На практике в целях обеспечения выбора метода упрочняющей обработки пользуются перечнем методов, применяемых для обработки типовых поверхностей или типовых деталей. При этом сужается количество групп рассматриваемых методов упрочняющей обработки, однако если иметь в виду и другие требования, то необходима дальнейшая конкретизация критериев для последующего сужения круга объектов выбора.

Второй путь – создание автоматизированного банка методов упрочняющей обработки для поиска и выбора с использованием ЭВМ метода упрочняющей обработки наиболее целесообразного для конкретной обрабатываемой детали. Под таким банком подразумеваются хранящиеся в памяти машины все известные методы упрочняющей обработки с перечислением их технологических параметров и стандартные программы, допускающие обновление и необходимую обработку имеющейся информации.

В общем виде модель метода упрочняющей обработки может быть представлена системой (рис. 1), характеризующей внутренними свойствами X , внешними свойствами Y и свойствами окружающей среды Z .

Внутренние свойства метода упрочняющей обработки характеризуются физическим принципом действия (поверхностное пластическое деформирование,

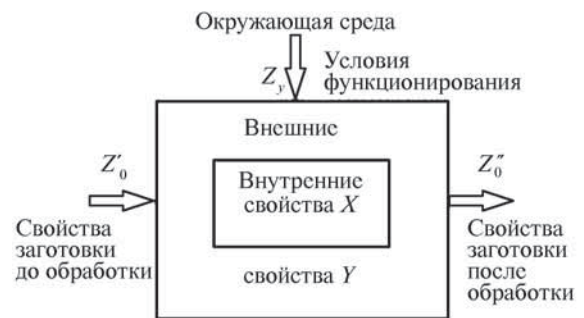


Рис. 1. Системная модель метода упрочняющей обработки

термическая обработка, химико-термическая обработка), формой его реализации (в защитных газах, в магнитном поле и т.д.), применяемой технологической оснасткой (стальные шары, ролики и т.д.).

Внешние свойства метода упрочняющей обработки можно разделить на свойства назначения (производительность, скорость, мощность и др.) и экономической эффективности.

Параметры окружающей среды определяются требованиями к исходным заготовкам и свойствами обработанной детали, а также свойствами, определяющими условия функционирования (пыль, газ, вибрация и др.).

Функция метода поверхностной упрочняющей обработки состоит в преобразовании ϕ обрабатываемой поверхности из начального (исходного) C_n в конечное C_k состояние и описывается отношением

$$\phi: C_n \rightarrow C_k.$$

Состояние поверхностного слоя C_k (качество поверхности) деталей задается набором параметров, описывающих макро- и микрогеометрию поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя:

$$C_k = \{\Delta_f, \Delta_p, \Delta_n, W, Ra, S_\mu, H_\mu, \sigma_0, h, \dots\},$$

где $\Delta_f, \Delta_p, \Delta_n$ – погрешности соответственно формы, размера и положения поверхности, мм;

W, Ra – высота соответственно макро- (волнистость) и микронеровностей (среднее арифметическое отклонение профиля) поверхности, мкм;

S_μ – микроструктура материала поверхностного слоя;

H_μ – микротвердость (наклеп) поверхностного слоя, кПа;

σ_0 – остаточные напряжения в материале поверхностного слоя, кПа;

h – толщина упрочненного слоя, мм.

Если состояние поверхности C_n и C_k задано только двумя параметрами, например Ra и H_μ , то оно отобра-

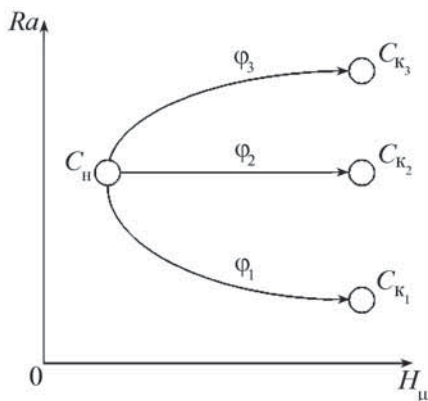


Рис. 2. Возможные реализации функции метода поверхностной упрочняющей обработки

жается точкой в пространстве этих параметров, а дуга, связывающая эти точки, описывает реализацию функции метода поверхностной упрочняющей обработки, т.е. функцию преобразования φ обрабатываемой поверхности из начального состояния C_n в конечное C_k (рис. 2). Причем в результате обработки по отношению к начальному состоянию значение одного или нескольких параметров может улучшаться, ухудшаться или оставаться неизменным (см. рис. 2, кривые φ_1 , φ_2 и φ_3). Вид преобразования φ определяется названием технологического метода упрочняющей обработки, например дорнование, выглаживание, накатывание, виброгалтовка, виброобкатывание и т.д.

В характеристики метода упрочняющей обработки входят такие элементы, как типоразмеры инструментов, величина припуска или натяга, число проходов, скорость обработки, подача, а также машинное и вспомогательное время обработки.

Структура метода упрочняющей обработки как совокупность упорядоченных во времени технологических приемов описывается графом $S_n(W, \Omega)$. В этом графе множеству вершин W соответствуют основные и вспомогательные приемы, а множеству дуг Ω – отношения, характеризующие методы совмещения приемов во времени (последовательный, параллельный и параллельно-последовательный). Дуги графа структуры метода упрочняющей обработки указывают порядок, в котором должны следовать приемы и время между началом i -го и j -го приемов.

Математическая модель процедуры выбора

Пусть имеется некоторый набор методов упрочняющей обработки $M_1, M_2, M_3, \dots, M_i, \dots, M_n$ (M_i – i -й тип метода обработки).

Для каждого из методов упрочняющей обработки, принадлежащих к указанной группе $[M_i]_i^n = 1$, известен набор технологических параметров, достигаемых этим методом:

- $M_1: X_{1(1)}, X_{2(1)}, X_{3(1)}, \dots, X_{j(1)}, \dots, X_{m(1)};$
- $M_2: X_{1(2)}, X_{2(2)}, X_{3(2)}, \dots, X_{j(2)}, \dots, X_{m(2)};$
- ...
- $M_i: X_{1(i)}, X_{2(i)}, X_{3(i)}, \dots, X_{j(i)}, \dots, X_{m(i)};$
- ...
- $M_n: X_{1(n)}, X_{2(n)}, X_{3(n)}, \dots, X_{j(n)}, \dots, X_{m(n)}.$

В пространстве параметров $[X_j]_j^m = 1$ каждому методу упрочняющей обработки $[M_i]_i^n = 1$ будет соответствовать точка M_i с координатами $X_{1(i)}, X_{2(i)}, X_{3(i)}, \dots, X_{j(i)}, \dots, X_{m(i)}$.

Обозначим заданные числовые характеристики параметров упрочненного слоя детали через $X_{1(0)}, X_{2(0)}, X_{3(0)}, \dots, X_{j(0)}, \dots, X_{m(0)}$.

Тогда идеальным (эталонным) методом упрочняющей обработки для рассматриваемой детали был бы метод M_0 , характеристики которого равны требуемым параметрам упрочняемой детали.

В пространстве параметров $[X_j]_j^m = 1$ этому методу упрочнения будет соответствовать точка M_0 с координатами $X_{1(0)}, X_{2(0)}, X_{3(0)}, \dots, X_{j(0)}, \dots, X_{m(0)}$ (рис. 3).

При выборе метода упрочняющей обработки трудно обеспечить полное совпадение всех физико-механических и других параметров с заданными эталонными значениями. Поэтому рассматриваемая задача сводится к определению метода упрочняющей обработки, наиболее близко стоящего по своим параметрам к эталонному методу M_0 , т.е. к удовлетворению условия близости: минимум функционала $F(M_i, M_0)$.

Процесс минимизации может осуществляться по нескольким типам минимизирующих функционалов, например:

$$F(M_i, M_0) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{j(i)} - X_{j(0)})^2 \rho_j},$$

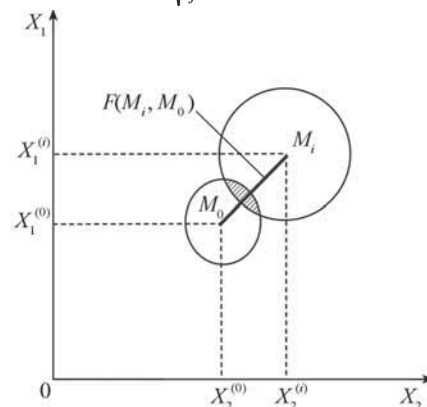


Рис. 3. Схема выбора метода упрочняющей обработки в пространстве параметров X_1 и X_2

где $X_{j^{(i)}}$ и $X_{j^{(0)}}$ – параметры соответственно упрочненного слоя для рассматриваемого метода упрочняющей обработки и эталонные, требуемые по условиям эксплуатации детали;

ρ_j – весовые функции, определяющие степень важности параметра, причем

$$0 \geq \rho_j \leq 1; \sum_{j=1}^m \rho_j = 1.$$

Учет рассеяния конструкторско-технологических параметров

В общем случае параметры $X_{j^{(i)}}$ и $X_{j^{(0)}}$ представляют случайные величины и характеризуются математическим ожиданием $\bar{X}_{j^{(i)}}$, $\bar{X}_{j^{(0)}}$ и дисперсией $\sigma_{x_j^{(i)}}$, $\sigma_{x_j^{(0)}}$. Тогда заштрихованная область на рис. 3 характеризует вероятность достижения требуемых свойств обрабатываемой детали при применении i -го метода упрочняющей обработки.

На практике обычно на параметры свойств детали устанавливается номинал в середине поля допуска. Но это интуитивное решение является априорно оптимальным лишь в том весьма частном случае, когда одновременно имеет место:

а) симметричный (по отношению к номиналу) закон распределения отклонений параметра;

б) одинаковая (симметричная по отношению к центру допуска) цена годной продукции и одинаковая стоимость продукции, выходящей за пределы допуска.

Практически (в очень большом числе реальных случаев) имеет место несимметричное распределение цены результата. Во всех этих случаях подлежит исследованию вопрос о целесообразном смещении номинала относительно середины допуска, т.е. смеще-

нии, создающем наибольшее математическое ожидание цены результата.

Метод оптимума номинала [4] позволяет для любого известного закона распределения отклонений и заданного распределения цен результата определить такое смещение номинала от середины поля допуска, которое дает наибольшее значение математического ожидания цены результата – наибольшую интегральную потребительскую эффективность $U^i(X)$.

Математическое ожидание E (Expectation) интегрального показателя потребительской ценности $U^i(X)$ по каждой i -й альтернативе ($i = 1, 2, \dots, n$) по совокупности показателей $X = [x_j]_j^m = 1$ может быть определено по формуле [5]:

$$E[U^i(X)] = \frac{1}{K} \left\{ \left[\prod_{j=1}^m (Kw_j E[U_j(x_j)] + 1) \right] - 1 \right\},$$

где K – постоянная нормализации;

w_j – весовой коэффициент каждого j -го ($j = 1, 2, \dots, m$) критериального показателя, $\sum_{j=1}^m w_j = 1$;

$$E[U_j(x_j)] = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} U_j(x_j) f(x_j) dx_j,$$

$U_j(x_j)$ – функция потребительской ценности для j -го ($j = 1, 2, \dots, m$) единичного критериального показателя x_j ;

$f(x_j)$ – функция (закон) распределения плотности вероятности j -го ($j = 1, 2, \dots, m$) единичного критериального показателя (параметра) x_j ;

x_j – требуемый уровень j -го критериального показателя ($j = 1, 2, \dots, m$).

Для иллюстрации рассмотрим пример выбора метода упрочнения (восстановления) деталей машин. В табл. 1 приведены технико-экономические показате-

Таблица 1

Технико-экономические показатели методов упрочнения

№ п/п	Методы, варианты методов и их разновидности	Твердость нанесенного покрытия HRC	Толщина слоя материала за один проход, мм	Производительность, кг/ч	Удельная себестоимость 1 г покрытия
i	M_i	$X_{1^{(i)}}$	$X_{2^{(i)}}$	$X_{3^{(i)}}$	$X_{4^{(i)}}$
Металлизация					
1	Плазменно-дуговая	18...61	0,05...10,0	0,8...12,0	1,398...1,95
2	Электродуговая	20...42	0,10...3,0	2,5...38,0	0,146...0,758
3	Высокочастотная	19...20	0,05...12,0	4,0...12,0	0,237...0,370
4	Газовая	43...48		0,8...20,0	0,129...0,784

№ п/п	Методы, варианты методов и их разновидности	Твердость нанесенного покрытия HRC	Толщина слоя материала за один проход, мм	Производительность, кг/ч	Удельная себестоимость 1 г покрытия
Наплавка					
5	Электродуговая	14...63	0,1...20,0	1,8...60,0	0,308...0,337
6	Автоматическая под слоем флюса	17...62	0,5...20,0		
7	Порошковыми проволоками	21...60	2,5...3,0	2,0...20,0	0,254...0,434
8	В среде защитных газов	20...62	0,8...4,0	1,56...4,4	0,242...0,474
9	Электроимпульсная	30...70	0,4...0,75	0,5...1,5	0,907...0,949
10	Вибродуговая	14...63	0,5...5,0	0,6...4,4	0,279...0,746
11	Плазменная	32...70	0,1...12,0	2,0...18,0	0,062...0,373
12	Индукционная	46...63	0,3...5,0	20,0	0,748...0,751
13	Электрошлаковая	51...62	10,0...20,0	10...60	0,028...0,039
14	В среде водяного пара	12...26	1,0...3,0	2,0...2,8	0,182...0,387
15	Ручная (электродами)	25...63		0,4...4,0	0,192...1,64
16	Газовая	13...42	0,5...1,5	1,19...1,69	0,238...0,338
Гальванопокрытие					
17	Хромирование	35...72	0,05...1,0	0,007...0,025	16,644...57,502
18	Железнение	21...62	0,1...5,0	0,011...0,085	6,58...37,13
19	Никелирование	24...72	0,05...1,5	0,018...0,036	11,8...53,98

тели методов упрочнения [6]. Как видно из таблицы, значения единичных показателей варьируют в широких пределах. Соответственно, имеет место и рассеивание значений интегрального показателя потребительской ценности $U^j(X)$ (табл. 2).

На рис. 4 показаны кривые распределения интегрального показателя потребительской ценности $U^i(X)$ для некоторых методов упрочнения. Из табл. 1 и рис. 4 видно, что имеет место пересечение кривых распределения одновременно нескольких методов упрочнения. Поэтому их выбор необходимо производить с учетом наибольшей вероятности достижения цели.

На рис. 5 показана принципиальная схема алгоритма принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки проектируемой детали.

В блоке 2 производится ввод вектора параметров $X_{j^{(0)}}, j = 1, m$, которые требуется обеспечить по условиям эксплуатации детали, а также вводится вектор заданных значений весовых функций $\rho_j, j = 1, m$, определяющих степень важности каждого параметра.

В блоках 3 и 4 производится нормализация данных и формируется цикл расчета массива значений мини-

мизирующего функционала $F(M_i, M_0)$, а в блоке 5 – подпрограмма поиска его минимального значения, т.е. $\min F(M_i, M_0)$.

В блоке 6 выполняется подпрограмма анализа полученного минимального значения $F(M_i, M_0)$ и определяется соответствующий ему рекомендуемый системой метод упрочняющей обработки M_i^* . В соответствии с табл. 2 и рис. 4 анализируются возможные конкурирующие методы упрочняющей обработки, имеющие близкие к M_i^* значения $\min F(M_i, M_0)$ и более высокие значения интегрального показателя потребительской ценности $E[U^i(X)]$ и вероятности достижения цели $f[U^i(X)]$. В блоке 7 выводится окончательное решение по выбору метода упрочняющей обработки M_i^* .

Рассмотрим примеры работы алгоритма поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки детали. В качестве баз данных используем табл. 1 и 2.

Пример 1. Пусть по служебному назначению детали требуется найти метод упрочнения M_0 , обеспечивающий получение следующих эксплуатационных пара-

Рассеяние значений интегрального показателя потребительской ценности

№ п/п	Метод упрочнения (восстановления) M_i	$E[U^i(X)]$	$f_{\max}[U^i(X)]$	$\Delta U^i(X)$	$U^i(X)_{\min}$	$U^i(X)_{\max}$	$\sigma_{U^i(X)}$
Металлизация							
1	Плазменно-дуговая	0,496	0,22	0,322	0,335	0,657	0,054
2	Электродуговая	0,472	0,30	0,242	0,351	0,594	0,040
3	Высокочастотная	0,429	0,49	0,146	0,356	0,503	0,024
4	Газовая	0,547	0,35	0,206	0,444	0,649	0,034
Наплавка							
5	Электродуговая	0,326	0,15	0,487	0,082	0,569	0,081
6	Автоматическая под слоем флюса	0,632	0,12	0,582	0,341	0,923	0,097
7	Порошковыми проволоками	0,494	0,62	0,232	0,378	0,611	0,039
8	В среде защитных газов	0,466	0,32	0,222	0,355	0,577	0,037
9	Электроимпульсная	0,479	0,41	0,175	0,392	0,567	0,029
10	Вибродуговая	0,457	0,27	0,268	0,323	0,592	0,045
11	Плазменная	0,569	0,21	0,336	0,402	0,737	0,056
12	Индукционная	0,583	0,60	0,120	0,523	0,643	0,020
13	Электрошлаковая	0,766	0,23	0,314	0,609	0,923	0,052
14	В среде водяного пара	0,366	0,87	0,083	0,325	0,408	0,014
15	Ручная (электродами)	0,467	0,35	0,206	0,364	0,570	0,034
16	Газовая	0,389	0,54	0,134	0,322	0,457	0,022
Гальванопокрытие							
17	Хромирование	0,442	0,32	0,223	0,331	0,554	0,037
18	Железнение	0,432	0,27	0,266	0,299	0,564	0,044
19	Никелирование	0,314	0,14	0,503	0,062	0,551	0,041

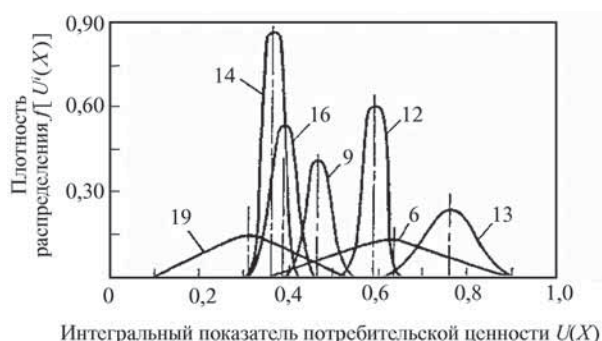


Рис. 4. Кривые распределения плотности вероятности для различных методов упрочняющей обработки (6, 9, 12, 13, 14, 16, 19 (см. табл. 1))

метров: $X_{1(0)} = 50$; $X_{2(0)} = 2$; $X_{3(0)} = 10$; $X_{4(0)} = 0,2$. Зададимся степенью важности $\rho_j, j = 1, m$ каждого параметра: $\rho_1 = 0,5$; $\rho_2 = 0,3$; $\rho_3 = \rho_4 = 0,1$.

По алгоритму (см. рис. 5) рассчитываем значения минимизирующего функционала $F(M_i, M_0)$ для каждого, содержащегося в базе данных (см. табл. 1), метода упрочняющей обработки. Результаты расчетов приведены на рис. 6, а. Из рисунка видно, что минимальное значение функционала $F(M_i, M_0)$ имеет метод упрочняющей обработки M_9 — наплавка электроимпульсная. Близкие значения к $\min F(M_i, M_0)$ имеют методы обработки M_{12} и M_{15} — соответственно наплавка индукционная и наплавка ручная (электродами), причем из них предпочтение имеет метод M_{12} , так как в соответствии с табл. 2 он имеет меньшее

рассеяние значения интегрального показателя потребительской ценности $\Delta U^i(X)$.

Пример 2. Пусть по служебному назначению детали требуется найти метод упрочнения M_0 , обеспечивающий получение следующих эксплуатационных параметров: $X_{1(0)} = 30$; $X_{2(0)} = 5$; $X_{3(0)} = 3$; $X_{4(0)} = 0,1$. Зададимся степенью важности $\rho_j, j = 1, m$ каждого параметра: $\rho_1 = 0,5$; $\rho_2 = 0,3$; $\rho_3 = \rho_4 = 0,1$.

По алгоритму (см. рис. 5) рассчитываем значения минимизирующего функционала $F(M_i, M_0)$ для каждого, содержащегося в базе данных (см. табл. 1), метода упрочняющей обработки. Результаты расчетов приведены на рис. 6, б, из которого видно, что минимальное значение функционала $F(M_i, M_0)$ имеет метод упрочняющей обработки M_1 – металлизация плазменно-дуговая. Близкие значения к $\min F(M_i, M_0)$ имеют методы обработки M_3 и M_{10} – соответственно металлизация высокочастотная и наплавка вибродуговая, причем из них предпочтение имеет метод M_3 , так как в соответствии с табл. 2 он имеет меньшее рассеяние значения интегрального показателя потребительской ценности $\Delta U^i(X)$.

Пример 3. Пусть в процессе проектирования или производства деталей по исходным данным *примера 1* повысились требования к производительности и экономичности процесса упрочняющей обработки. Проектировщик задается новыми значениями степени важности $\rho_j, j = 1, m$ каждого параметра: $\rho_1 = \rho_2 = 0,1$; $\rho_3 = 0,3$; $\rho_4 = 0,5$.

По алгоритму (см. рис. 5) рассчитываем значения минимизирующего функционала $F(M_i, M_0)$ для каждого, содержащегося в базе данных (см. табл. 1), метода упрочняющей обработки. Результаты расчетов приведены на рис. 6, в. Из рисунка видно, что минимальное значение функционала $F(M_i, M_0)$ имеет метод упрочняющей обработки M_7 – наплавка порошковыми проволоками. Близкие значения к $\min F(M_i, M_0)$ имеют методы обработки M_4 и M_{11} – соответственно металлизация газовая и наплавка плазменная, причем из них предпочтение имеет метод M_4 .

Таким образом, алгоритм принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки детали достаточно четко реагирует на изменение условий выбора, задаваемых проектировщиком.

Совокупность всех методов упрочняющей обработки назовем обрабатывающей (производственной) системой P , а совокупность всех деталей, подлежащих упрочняющей обработке, – объектами обработки A . Если объект A рассматривается как неструктурированный, то его модель включает в себя множество $F(A)$ контуров (требуемых свойств) и набор отношений между ними, описываемых булевой матрицей контуров $[A \times F(A)]$ обрабатываемых деталей [7].

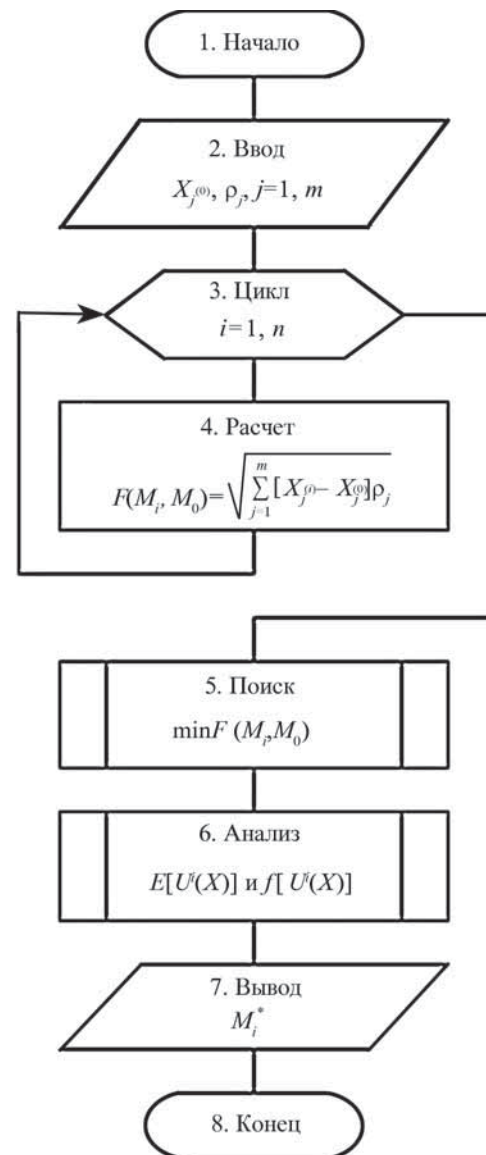


Рис. 5. Схема алгоритма принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки детали

При моделировании воздействия обрабатывающей системы P на объект A математическая модель системы P называется моделью производственной среды (системы), включающей в себя множество $F(P)$ контуров (свойств) достигаемых системой и набор отношений между ними, описываемых булевой матрицей контуров $[P \times F(P)]$ элементов обрабатывающей системы и булевой матрицей $[P \times P]$ взаимосвязи элементов P .

Для осуществления процесса упрочняющей обработки объекта A с составом контуров $F(A)$ в обрабатывающей системе P необходимо, чтобы

$$F(A) \subseteq F(P), \quad (1)$$

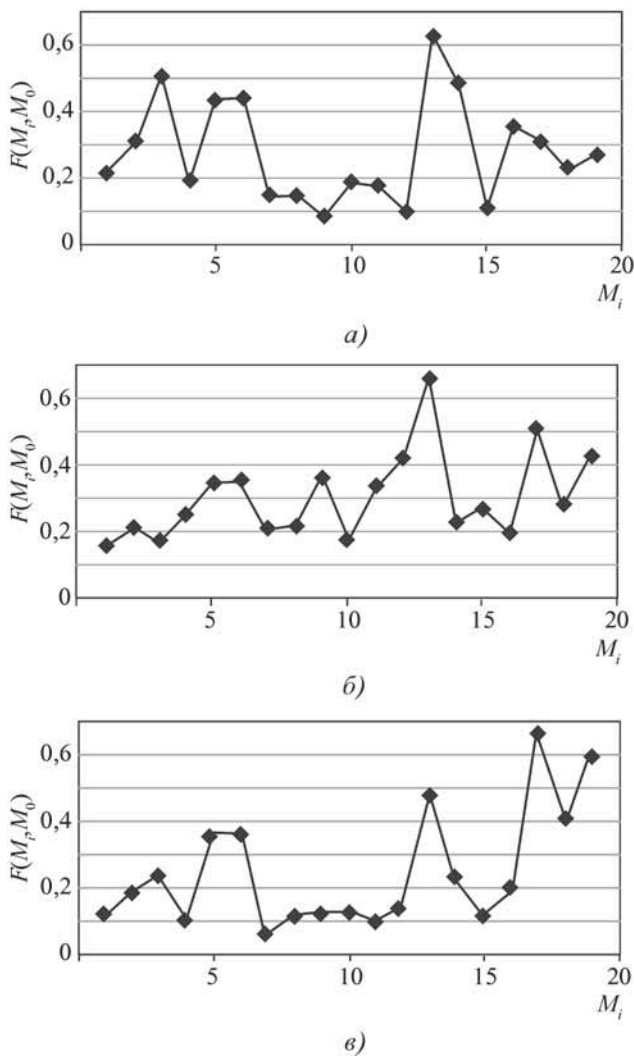


Рис. 6. Расчетные значения минимизирующего функционала $F(M_i, M_0)$

или, на логическом уровне описания,

$$F(A) = F(P) \wedge F(A). \quad (2)$$

Модель производственной среды в виде автоматизированного банка знаний и банка данных методов упрочняющей обработки деталей можно использовать для решения различных задач, в том числе для решения прямой и обратной задач технологического проектирования (рис. 7).

При решении прямой задачи (см. рис. 7, а) на вход модели поступают данные о контурах (требуемых свойствах) объекта обработки $F(A_i)$; на выходе получают набор контуров $F(P)$ и элементов P_i производственной системы, участвующих в обеспечении контуров (требуемых свойств) объекта A , при этом будет достигнут полный состав контуров объекта

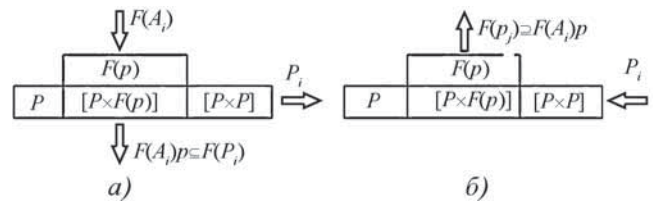


Рис. 7. Прямая (а) и обратная (б) задачи выбора метода упрочняющей обработки на модели производственной системы в интегрированных САПР

$F(A_i)p \subseteq F(P_i)$. Очевидно если $F(A_i)p = F(P_i)$, то выполняются условия (1) и (2) и объект может быть изготовлен в данной производственной системе.

Обратная задача технологического проектирования (см. рис. 7, б) решается по той же модели производственной системы; отличие от прямой задачи заключается в том, что входом является набор P_j элементов производственной системы, а выходом – состав контуров $F(P_j)$, характеризующих контуры всех возможных объектов A , которые могут быть реализованы в заданной производственной системе.

Рассмотренные теоретические подходы [8] были использованы при создании интеллектуальной системы поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР (рис. 8).

С помощью модуля логического вывода (МЛВ) и модуля принятия решения (МПР) при взаимодействии с САПР КИ (конструкции изделий) осуществляется выбор вида и метода упрочняющей обработки при проектировании ответственных деталей машин, а при взаимодействии с САПР ТП – выбор и проектирование технологии упрочняющей обработки таких деталей. При решении этих задач МЛВ использует банк знаний (БнЗн) и банк конструкторско-технологиче-

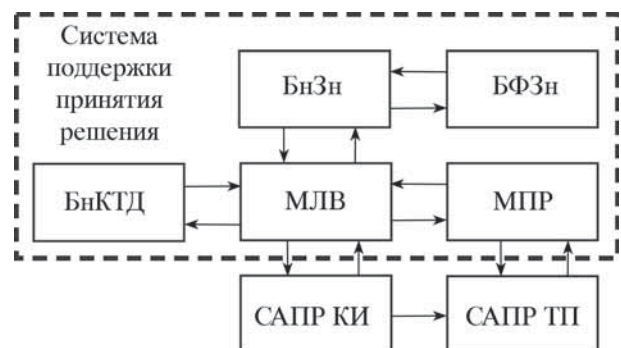


Рис. 8. Схема взаимодействия интеллектуальной системы поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин с автоматизированными системами конструкторского и технологического проектирования

ских данных (БнКТД). Формирование БнЗн осуществляется экспертами с помощью *блока формализации знаний* (БФЗн).

К функциям МЛВ следует отнести:

- отбор из множества рассматриваемых методов упрочняющей обработки группы методов, обеспечивающих достижение требуемых параметров качества поверхностного слоя – первичная выборка;
- построение для каждого элемента первичной выборки математической модели упрочняющей обработки детали, определяющей влияние режимов обработки на формируемые параметры качества поверхностного слоя с учетом технологической наследственности;
- оптимизация математических моделей относительно режимов обработки; расчет параметров качества поверхностного слоя, получаемых в результате упрочняющей обработки при определенных режимах обработки.

МПП предполагает решение следующих задач:

- построение математических моделей формирования себестоимости упрочняющей обработки в зависимости от некоторого уровня долговечности детали для всех элементов первичной выборки;
- определение себестоимости упрочняющей обработки при фиксированных значениях параметров качества поверхностного слоя и режимов обработки; оптимизация математической модели формирования себестоимости относительно режимов обработки при условии обеспечения требуемой долговечности;
- отбор из элементов первичной выборки метода(ов) упрочняющей обработки, обеспечивающего(их) минимальную себестоимость, – вторичная выборка.

Основным результатом работы интеллектуальной системы поддержки принятия решения является выбор метода упрочняющей обработки и назначение режимов обработки, позволяющих обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя, определяемые из условия максимальной долговечности деталей, и имеющего при этом наименьшую себестоимость. Кроме того, интеллектуальная система предполагает возможность проведения расчетов долговечности деталей, а также оценку влияния режимов упрочняющей обработки на долговечность детали.

Интеллектуальная система поддержки принятия решения дает возможность решать прямую и обратную задачи технологического проектирования. Использование интеллектуальной системы выбора метода упрочняющей обработки в интегрированных САПР позволяет конструктору обоснованно назначать требования к упрочняющей обработке ответст-

венных деталей машин, а технологу – обоснованно производить выбор способа и режимов упрочняющей обработки при проектировании технологических процессов их изготовления.

Выводы

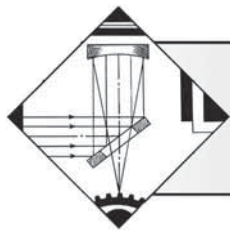
1. Исследования показали, что задача выбора метода упрочняющей обработки в интегрированных САПР может быть решена путем создания интеллектуальных систем поддержки принятия решения на основе автоматизированных банков данных и банков знаний методов упрочняющей обработки.

2. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решения и соответствующих автоматизированных банков данных и банков знаний требует формализации описания технологических возможностей методов упрочняющей обработки, а также разработки соответствующих алгоритмов и программного обеспечения для их выбора.

3. Для решения этих задач требуется обобщение большого объема теоретических и экспериментальных исследований и учет всех накопленных данных в этой области, что является основной задачей дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов М.Е.** Основы САПР технологических операций упрочняющей обработки: учеб. пособие. Ростов-н/Д: РИСХМ, 1987. 91 с.
2. **Попов М.Е.** Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 7. С. 11–20.
3. **Попов М.Е.** Формализованное описание структуры базы данных методов упрочняющей обработки в интегрированных САПР // Вестник ДГТУ. Серия "Проблемы производства машин". Ростов-н/Д, 2000. С. 88–91.
4. **Материалы** консультационно-практического семинара-тренинга "Процесс освоения производства новой продукции в соответствии с требованиями автомобильных стандартов (APQP, FMEA, PPAP, SPC, MSA) и лучшей практики автопроизводителей". Ростов-н/Д, 2011. 313 с.
5. **Попов М.Е., Попов А.М.** Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества // Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 52–58.
6. **Маслов Н.Н.** Эффективность и качество ремонта автомобилей. М.: Транспорт, 1981. 304 с.
7. **САПР.** Типовые математические модели объектов проектирования в машиностроении: методич. указания. РД 50-464–84. М.: Стандарты, 1985. 200 с.
8. **Попов М.Е., Попов А.М.** Интеграция конструкторского и технологического проектирования на основе концепции Concurrent Engineering // Вестник машиностроения. 1998. № 4. С. 41–45.



УДК 621.793:620.179.11

И.М. Букарев, А.В. Аборкин (Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)
E-mail: avaborkin@mail.ru

Исследование свойств многослойных покрытий

Проведено исследование физико-механических, адгезионных и трибологических свойств многослойных покрытий TiN/CrN, AlN/TiN и AlN/CrN, нанесенных на подложки из сталей 40X и P6M5. Выявлены критические нагрузки при испытании покрытий на адгезионную прочность. Приведено сравнение коэффициентов трения полученных покрытий.

Ключевые слова: физико-механические свойства, покрытия, коэффициент трения.

A study of physicomachanical, adhesive and tribological properties of multilayer coatings TiN/CrN, AlN/TiN and AlN/CrN, deposited on a substrate made of steels 40X and P6M5. A critical load test of coatings on the adhesion strength. The comparison of friction coefficients obtained coatings.

Keywords: mechanical properties, coatings, friction coefficient.

Введение

Повышение сопротивляемости контактирующих поверхностей деталей машин, технологической оснастки и инструмента микроразрушению—изнашиванию (повышение стойкости) путем нанесения покрытий с наноразмерной структурой является чрезвычайно важной задачей.

Одними из таких покрытий являются многослойные покрытия [1–8], периодическая многослойная структура которых повышает твердость, снижает коэффициент трения контактирующих поверхностей и является барьером к распространению дислокаций и трещин.

Разработка технологии нанесения таких покрытий и изучение их свойств являются весьма перспективными и актуальными направлениями научных исследований.

Цель работы — изучение и сравнение адгезионной прочности, физико-механических и трибологических свойств многослойных покрытий TiN/CrN, AlN/TiN и AlN/CrN, нанесенных на подложки из сталей 40X и P6M5.

Методика проведения исследований

Методики нанесения и исследования свойств многослойных покрытий TiN/CrN, AlN/TiN и AlN/CrN включали следующие этапы:

1. Предварительную подготовку подложек для нанесения покрытий.
2. Нанесение покрытий.
3. Определение толщины полученных покрытий.
4. Изучение физико-механических свойств покрытий.
5. Испытания на адгезионную прочность.
6. Исследование коэффициента трения.

На первом этапе были подготовлены подложки для нанесения покрытий — диски диаметром 20 мм, изготовленные из сталей 40X и P6M5. Твердость материала подложек составила 525 и 765 HV соответственно для 40X и P6M5. Предварительно поверхности подложек полировали до получения параметра шероховатости $Ra < 0,02$ мкм.

Перед нанесением покрытий подложки подвергали химической очистке с помощью ультразвуковой ванны и промывке в органическом растворителе. Также проводили ионную очистку поверхности подложек в камере напыления. Для этого в камеру закачивали аргон, а на подложки подавали напряжение 800 В, при этом давление в камере составляло менее 0,2 Па.

Нанесение покрытий на втором этапе исследований проводили по методу физического осаждения из паровой фазы на установке "UNICOAT 600 SL". Для улучшения адгезии покрытий предварительно на подложки наносили подслои Ti или Cr, а затем TiN

или CrN. Материал подслоя выбирали исходя из типа наносимого покрытия. Так, например, для покрытия TiN/CrN наносили подслои Ti и TiN, а для покрытия AlN/CrN – Cr и CrN. При нанесении покрытий напряжение смещения, подаваемое на подложки, составило 60...70 В, разрядный ток 14...16 А. Общее время осаждения покрытий не превышало 2 ч.

Исследование свойств покрытий на последующих этапах проводили с помощью оборудования фирмы CSM Instruments (Швейцария).

На третьем этапе определяли толщину покрытий. Для этого использовали метод шарового истирания с добавлением в зону контакта абразивной суспензии. Данный метод реализован на установке "Calotest".

Измерение физико-механических свойств и адгезионной прочности покрытий проводили на четвертом и пятом этапах исследования с помощью установки "MICRO-COMBI TESTER".

При измерении физико-механических свойств использовали индентор типа Виккерса. Результаты измерений обрабатывали по методу Оливера–Фарра. Для минимизации влияния твердости подложки на результаты измерений при индентировании учитывали, что глубина погружения индентора не должна превышать 1/10 толщины покрытия. Исходя из этого максимальная нагрузка при индентировании всех образцов составила 0,05 Н.

При испытаниях на адгезионную прочность использовали индентор типа Роквелл С с радиусом скругления вершины 0,1 мм. Измерения проводили при увеличении нагрузки от 0,3 до 15 Н, скорость перемещения индентора составляла 3 мм/мин. Момент адгезионного разрушения покрытия фиксировали после испытаний визуально с помощью оптического микроскопа, оборудованного цифровой камерой, а также по изменению одного из четырех параметров: акустической эмиссии, силы трения, коэффициента трения и глубины проникновения индентора.

В результате испытаний определяли минимальную (критическую) нагрузку L_c , которая приводила к раз-

рушению покрытия. В качестве критических нагрузок принимали: L_{c1} – первые неглубокие сколы вдоль линии царапания (не до подложки); L_{c2} – одиночные либо повторяющиеся сколы, отслоения покрытия от подложки; L_{c3} – полное отслоение покрытия от подложки.

Для исследования трибологических свойств покрытий на шестом этапе использовали установку "TRIBOMETR".

Измерение коэффициента трения покрытий проводили на воздухе по схеме шарик–диск. В качестве контртела использовали шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм. Испытания осуществляли при нагрузке 10 Н, линейной скорости 40 см/с, длине пути 500 м.

Толщина покрытий. На рис. 1 (см. с. 3 обложки) представлены лунки износа после калотеста, а также увеличенные фрагменты зоны подложка–подслой–покрытие.

На основании геометрических измерений лунок износа установлено, что толщина полученных покрытий на всех образцах составила 3...3,5 мкм при толщине подслоя 0,2...0,3 мкм.

Физико-механические свойства. Значения твердости H , HV и модуля упругости E^* покрытий, нанесенных на подложки из сталей 40X и Р6М5, приведены в табл. 1.

По результатам индентирования установлено, что численные значения твердости покрытий H и HV, а также модуль упругости E^* незначительно зависят от материала подложки. Расхождения в результатах измерений не превышали 3 %, что свидетельствует о правомерности выбора глубины погружения индентора.

Покрытия TiN/CrN и AlN/CrN имели твердость 34...35 ГПа, а модуль упругости 370...410 ГПа. Меньшие значения твердости (28 ГПа) и модуля упругости (340 ГПа) соответствовали покрытию AlN/TiN.

Сравнительный анализ твердости подложек и покрытий показал, что покрытия имеют твердость, пре-

Таблица 1

Основные характеристики покрытий

Покрытие	Физико-механические свойства				
	Твердость H , ГПа	Модуль упругости E^* , ГПа	Твердость по Виккерсу HV	H/E	H^3/E^2 , ГПа
TiN/CrN	35/34	411/406	3315/3265	0,085/0,084	0,25/0,24
AlN/CrN	34/34	388/371	3220/3245	0,088/0,091	0,26/0,28
AlN/TiN	31/28	355/346	2950/2700	0,087/0,081	0,23/0,18

Примечание. В числителе указаны значения для стали Р6М5, в знаменателе – для стали 40X.

Таблица 2

Критические нагрузки для покрытий

Покрытие	Критическая нагрузка, Н		
	Lc_1	Lc_2	Lc_3
TiN/CrN	4,66/7,00	12,34/14,09	12,57/14,17
AlN/CrN	3,77/2,53	8,42/4,29	10,66/7,82
AlN/TiN	4,25/3,23	6,05/4,00	8,64/7,82

Примечание. См. табл. 1.

вышающую твердость подложек до нанесения покрытий в 3,5–6 раз.

По данным работы [9], для оценки стойкости материалов к упругой деформации разрушения возможно использовать индекс пластичности материала H/E (отношение твердости к модулю упругости). Для исследуемых покрытий, нанесенных на подложки из Р6М5 и 40Х H/E изменялся в интервалах 0,085...0,087 и 0,081...0,091 соответственно.

Сравнительный анализ H/E исследуемых покрытий показал, что покрытия TiN/CrN и AlN/TiN обладают равной стойкостью к упругой деформации разрушения, в то время как для покрытия AlN/CrN стойкость к упругой деформации разрушения на 7 % выше.

По данным работы [10], для оценки сопротивления материала пластической деформации возможно использовать параметр H^3/E^2 . Сравнение параметра H^3/E^2 исследуемых покрытий показало, что сопротивление пластической деформации покрытия AlN/CrN на 25 % выше, чем покрытия AlN/TiN.

Адгезионная прочность. Для определения адгезионной прочности покрытия на поверхность алмазным индентором типа Роквелла наносили царапины при непрерывно нарастающей нагрузке.

Значения критических нагрузок для исследуемых покрытий, нанесенных на подложки из Р6М5 и 40Х, приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что критическая нагрузка Lc_1 для всех покрытий колеблется от 2,5 до 7 Н. Однако при этой нагрузке не происходило полного разрушения покрытия. Поэтому адгезионную прочность покрытий определяли в точках Lc_2 и Lc_3 .

На рис. 2 (см. с. 3 обложки) приведены зоны полного отслоения покрытий от подложки Lc_3 , а также указаны нагрузки, при которых происходило отслоение.

Визуальный анализ царапин и параметров, фиксируемых в процессе испытаний, показал,

что покрытие TiN/CrN, нанесенное на сталь 40Х, имеет более высокую адгезионную прочность в сравнении с другими покрытиями. Так, критическая нагрузка для данного покрытия в точке Lc_2 составила 14,09 Н, а в точке Lc_3 – 14,17 Н, что в 2 раза превышает аналогичные показатели двух других покрытий. Адгезионная прочность покрытия TiN/CrN, нанесенного на подложку из стали Р6М5, была на 10 % меньше, чем на образцах из стали 40Х.

Измерение критических нагрузок Lc_2 и Lc_3 для покрытий AlN/CrN и AlN/TiN, нанесенных на подложки из разных материалов, показало их незначительные изменения, не превышающие 3 %. Критическая нагрузка Lc_2 для покрытий AlN/CrN и AlN/TiN изменялась в диапазоне 4...8 Н, а Lc_3 – в диапазоне 8...10 Н.

Трибологические свойства. Трибологические испытания проводили для покрытий, осажденных на подложки из стали 40Х. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента трения от длины пути для образцов с покрытиями и без них.

Сравнительный анализ результатов испытаний показал, что начальный этап притирки пары трения, во время которого коэффициент трения выходил на насыщение, для образцов с покрытиями был достаточно коротким. Длина пути, пройденного шариком, не превышала $l = 20...50$ м. Этап притирки образца без покрытия составил 80 м.

Максимальные значения коэффициента трения на этапе притирки при испытании образцов с покрытиями составили для AlN/TiN – 0,74, а для AlN/CrN и TiN/CrN – 0,65. Коэффициент трения образца без покрытия был больше, чем у образцов с покрытиями 0,82.

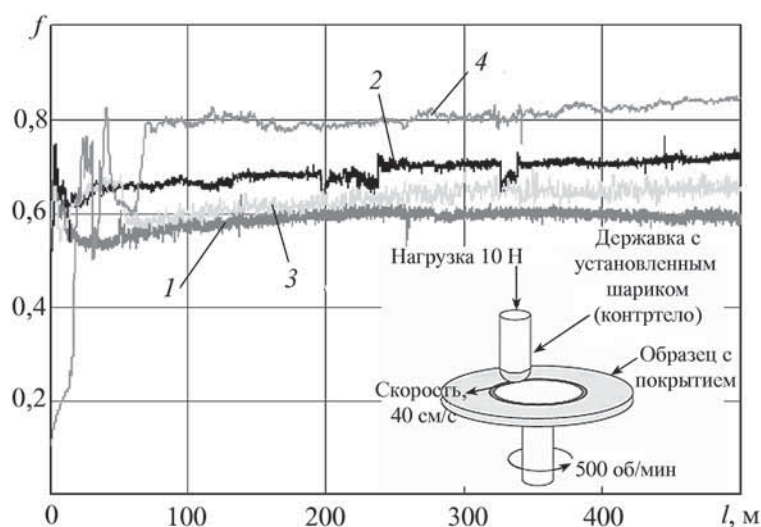


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от длины пути: 1 – AlN/CrN; 2 – AlN/TiN; 3 – TiN/CrN; 4 – без покрытия

С выходом на стационарный режим коэффициенты трения приняли значения 0,59; 0,64; 0,70 и 0,81 соответственно для образцов с покрытиями AlN/CrN, AlN/TiN, TiN/CrN и без покрытия. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что наличие рассмотренных типов покрытий приводит к снижению коэффициента трения на 10...25 % в зависимости от состава покрытия.

После остановки испытаний были изучены канавки износа на образцах и области износа контртела. Установлено, что на дне всех канавок износа видны характерные микроцарапины, свидетельствующие об абразивном характере износа. При испытаниях наблюдали более интенсивный абразивный износ контртела в сравнении с покрытиями, что обусловлено его меньшей твердостью. Абразивный износ трущейся пары сопровождался выносом продуктов износа из канавки и его накоплением в виде черного порошка по краям канавки. Характерные области износа образцов с покрытием и без покрытия после пройденного пути 500 м представлены на рис. 4 (см. с. 3 обложки).

Анализ канавок износа показал, что на образцах с покрытиями AlN/CrN и TiN/CrN разрушение покрытий еще не началось (см. рис. 4, а, в, с. 3 обложки). В то же время в покрытии AlN/TiN процесс разрушения уже начался, что можно объяснить его более низкой адгезионной прочностью. На рис. 4, б (с. 3 обложки) видны отдельные шевронные трещины на дне канавки износа, наличие которых ведет к увеличению локальных напряжений, силы трения и способствует быстрому последующему истиранию покрытия.

Выводы

Проведены комплексные исследования адгезионной прочности физико-механических и трибологических свойств покрытий TiN/CrN, AlN/CrN и AlN/TiN, полученных методом физического осаждения из паровой фазы.

Экспериментально установлено, что покрытия имеют твердость 28...35 ГПа, которая в 3,5–6,3 раза превышает твердость материала подложек. Коэффициент трения покрытий составляет 0,59...0,7, что на

10...25 % ниже коэффициента трения материала подложек без покрытия.

Полученные результаты позволили перейти к нанесению данных типов покрытий на режущий инструмент и элементы оснастки для обработки металлов давлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Азаренков Н.А.** и др. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: учеб. пособие. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. 209 с.
2. **Сутягин В.В., Сайкин С.А.** Повышение ресурса концевого инструмента за счет применения нанокompозитных PVD-покрытий при обработке титановых сплавов в авиационной // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 5. С. 41–44.
3. **Симагина Е.В., Агабеков Ю.В.** Повышение работоспособности режущего инструмента с наноструктурными покрытиями // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 2 (81). С. 98–103.
4. **Veprek S.** Superhard and functional nanocomposites formed by self-organization in comparison with hardening of coatings by energetic ion bombardment during their deposition // Reviews on advanced materials science. 2003. № 5. С. 6–16.
5. **Mayrhofer P.H., Mitterer C.** et al. Microstructural design of hard coatings // Progress in Material Science. 2006. № 51. С. 1032–1114.
6. **Cwil M., Konarski P.** et al. Sims depth profiling of thin nitride- and carbide-based films for hard coatings // Reviews on advanced materials science. 2007. № 15. С. 253–258.
7. **Barshilia H.C., Jain A., Rajam K.S.** Structure, hardness and thermal stability of nanolayered TiN/CrN multilayer coatings // Vacuum. 2004. № 72. С. 241–248.
8. **Golombek K., Dobrzanski L.A.** Hard and wear resistance coatings for cutting tools // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007. № 24. С. 107–110.
9. **Штанский Д.В.** и др. Адгезионные, фрикционные и деформационные характеристики покрытий Ti-(Ca,Zr)-(C,N,O,P) для ортопедических и зубных имплантатов // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. Вып. 7. С. 1231–1237.
10. **Leyland A., Matthews A.** On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. 2000. Vol. 246. P. 1–11.

УДК 534.222.2+621.793

С.Б. Злобин, И.А. Батраев, В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер
(Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск)
E-mail: asterser@mail.ru

Восстановление деталей электроцентробежного насоса детонационным напылением*

Проведены работы по адаптации технологии детонационного напыления с компьютерным управлением CCDS (Computer Controlled Detonation Spraying) к обработке изношенных деталей рабочей ступени насоса с целью их восстановления. Исследованы свойства нанесенных детонационным способом покрытий из ряда порошковых материалов.

Ключевые слова: электроцентробежный насос, детонационное напыление, восстановление деталей, свойства покрытий.

The work was performed to adapt the Computer Controlled Detonation Spraying (CCDS) technology to the process of restoration of aforesaid pump work stage items. The coatings from different powdered materials were made and investigations of their properties were done.

Keywords: electro-centrifugal pump, detonation spraying, item restoration, coating properties.

Введение

Для организации промышленного восстановления деталей электроцентробежного насоса (ЭЦН), применяемого в нефтедобывающей промышленности, проводили работы по детонационному напылению покрытий на изнашиваемые поверхности рабочего колеса (РК) и направляющего аппарата (НА) рабочих ступеней ЭЦН.

Детали насоса изготавливают из сплава нирезист, представляющего собой никельмедистохромистый

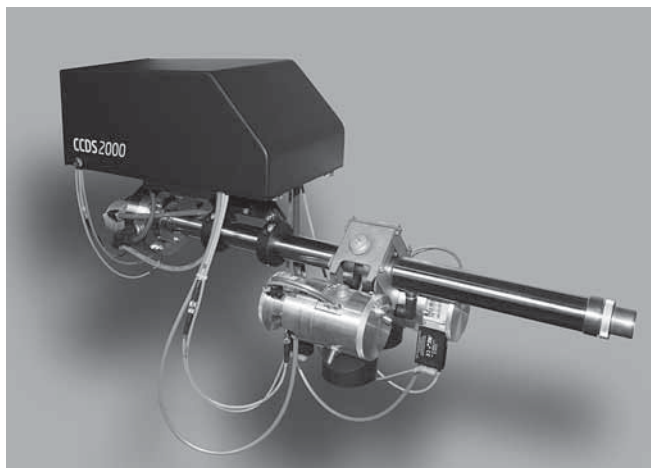


Рис. 1. Рабочий орган детонационного комплекса CCDS2000

* Исследования проводили при поддержке Президиума РАН (проекты № 23.17, 2.7), Президиума СО РАН (интеграционные проекты № 82, 108), гранта РФФИ № 09-01-00433 и научной школы № 5770.2010.1.

чугун. Использовали разработанную в последние годы в ИГиЛ СО РАН технологию CCDS (Computer Controlled Detonation Spraying), подробно описанную в [1] и некоторые применения которой изложены в [2–5]. Для промышленного применения создан детонационный комплекс CCDS2000, рабочий орган которого (ствол с дозаторами, камерой смешивания газов и камерой зажигания) весит не более 20 кг и может монтироваться на стандартном промышленном роботе (рис. 1).

Предусмотрено оснащение комплекса двумя дозаторами, что позволяет наносить композиционные покрытия из компонент с сильно различающимися свойствами. По желанию заказчика оборудование поставляется с манипулятором на шаговых двигателях для обеспечения сканирования ствола относительно обрабатываемой поверхности. Скорострельность комплекса – до 10 выстрелов/с, производительность – до 5 кг/ч.

Для восстановления деталей ЭЦН применяли порошки из чугуна ЧН15Д7, стали 20Х13, а также самофлюсующихся сплавов ПР-НХ13СР (NiCr13Si2B1) и ПР-НХ15СР2 (NiCr15Si3B2). У нанесенных на специальные образцы покрытий исследовали прочностные (твердость, адгезия, когезия) и трибологические (абразивная и эрозионная стойкость) свойства. Для сравнения проводили испытания на абразивный и эрозионный износ объемного материала нирезист.

Нанесение покрытий

Известно, что свойства получаемых газотермическими способами покрытий существенно зависят от

режимов напыления. В детонационном напылении качество покрытия определяется целым рядом параметров, основными из которых являются тип применяемого топлива и окислителя (детонирующая газовая смесь); количество детонирующей смеси, расходуемое за выстрел; степень заполнения ствола детонирующей смесью; место подачи порошка в ствол (расстояние от среза ствола до места инъекции порошка); доза порошка, расходуемая на выстрел; размер частиц порошка; расстояние от среза ствола до обрабатываемой детали, количество выстрелов в единицу времени.

Кроме того, в практическом применении необходимо обеспечить нужную скорость перемещения детали относительно ствола (скорость сканирования). Правильный выбор этих параметров обеспечивает оптимальные температуру и скорость частиц при соударении с подложкой и наложение пятен напыления, что обеспечивает наилучшие прочностные, трибологические свойства и однородность покрытий.

Рекомендуемым топливом в CCDS-технологии является ацетилен, окислителем – кислород. Применение детонирующих смесей $C_2H_2+O_2$ в различных пропорциях позволяет наносить тугоплавкие керамические покрытия, твердосплавные композиты, различные металлы, включая легкоплавкие (алюминий, цинк), на различные подложки, включая полимеры [6]. В данной работе для напыления применяли детонирующую смесь $C_2H_2+1,05O_2$, продукты детонации которой (СО и H_2) создают восстановительную атмосферу в стволе вокруг разгоняемых порошковых частиц и препятствуют их окислению.

Использовавшиеся в работе порошки и их параметры перечислены в табл. 1. Сталь 20Х13 (0,2 % С, 13 % Cr) – коррозионно-стойкая, жаропрочная мартенситного класса, применяется для изготовления деталей с повышенной пластичностью, работающих в условиях ударных нагрузок при температуре до

450...500 °С или в слабоагрессивных средах при комнатной температуре [7].

ЧН15Д7 (3 % С, 15 % Ni, 7 % Cu, до 3,1 % Cr) – аустенитный серый коррозионно-стойкий чугун, имеющий высокую износостойкость в условиях совместного действия высокой температуры и агрессивной среды [8].

Порошковые самофлюсующиеся сплавы ПР-НХ13СР и ПР-НХ15СР2 выпускаются компанией ОАО "Полема" и предназначены для напыления износостойких покрытий и восстановления деталей машин и механизмов.

Для каждого из порошков экспериментально определяли оптимальный режим напыления, соответствующий максимальному коэффициенту использования порошка (КИП). Полученные данные представлены в табл. 1. Для исследования прочностных и трибологических свойств покрытий их наносили в оптимальных режимах.

Методика проведения исследований

Основными свойствами покрытий, как правило, являются твердость (микротвердость), адгезия и когезия. Покрытия, изнашиваемые в процессе эксплуатации, подвергаются трибологическим испытаниям. В данном случае, учитывая специфику работы деталей, проводили испытания покрытий на абразивный и эрозионный износ.

Твердость покрытий измеряли стандартным способом на НРС-твердомере ТР 5006-02 при нагрузке 1,5 кН. Также твердость измеряли по Роквеллу (HRC) динамическим твердомером ТЭМП-4, который удобен в работе с покрытиями, особенно на больших деталях.

В [2] было отмечено, что значения твердости по шкале Виккерса, полученные с применением прибора ТЭМП-4, практически совпадают со значениями микротвердости, полученными на приборе ПМТ-3 при нагрузке 2,9 Н. Это означает, что ТЭМП-4 обеспечивает на покрытиях получение данных, достаточно близких к истинным значениям. Измерения же на твердомере ТР 5006-02 дают заниженные значения твердости, поскольку этот прибор не рассчитан для тонких покрытий.

Адгезию измеряли по штифтовой методике [9]. Методика измерения когезии описана в [2], для этого покрытие напыляли на область стыка двух установленных соосно торцом к торцу трубок и полученные образцы подвергали растяжению на разрывной машине TC-FR/00TL A4K фирмы Zwick/Roell, установленной в центре коллективного пользования "Механика" СО РАН.

Таблица 1

Напыляемые порошковые материалы и максимальный КИП

Материал	Плотность материала, г/см ³	Размер частиц, мкм	КИП, %
Сталь 20Х13	7,67	< 40	57,0
Чугун ЧН15Д7	7,50		45,5
ПР-НХ13СР		20...63	59,0
ПР-НХ15СР2	7,74	< 40	42,0
Примечание. Порошки ПР-НХ13СР и ПР-НХ15СР2 известны также под названиями соответственно ПГСР-1 и ПГСР-2.			

Трибологические исследования покрытий проводили на абразивно-эрозионном стенде (АЭС), спроектированном и изготовленном в ИГиЛ СО РАН, обеспечивающем параметры испытаний в соответствии со стандартами ASTM G65 и G76 соответственно для абразивного и эрозионного тестирования.

Образцы для трибологических испытаний изготавливали путем напыления покрытий толщиной около 300 мкм на пластины из стали Ст3 размером 25×75 мм и толщиной 2 мм. В абразивных испытаниях плоский образец прижимали с усилием 45 Н к обрешиненному диску диаметром 235 мм, вращающемуся со скоростью 240 об/мин. На поверхность трения подавали порошок – электрокорунд нормальный марки 13А зернистость 20П ГОСТ 28818–90 (размер частиц 200...250 мкм). Расход абразива 120...130 г/мин.

В каждом испытании проводили 8–10 тестов по 200 оборотов диска, после каждого теста образец взвешивали на аналитических весах ЛВ 210–А. Затем строили кривую износа и определяли износ за 200 оборотов диска. Рассматривали объемный износ, определяемый соотношением потери массы к плотности материала покрытия.

В эрозионных испытаниях на образец из сопла диаметром 5 мм подавалась воздушно-абразивная струя. Давление воздуха на входе в сопло 0,4 МПа, средняя скорость абразивных частиц 65 м/с, расстояние от сопла до поверхности образца 11 мм, угол между осью сопла и поверхностью образца 90°. Использовался тот же порошок электрокорунда, что и в абразивных испытаниях. Расход порошка 1,3 г/мин.

В каждом испытании проводили 8–10 тестов по 5 мин. После каждого теста образец взвешивали на аналитических весах и определяли потерю массы. Далее, как и в абразивных испытаниях, строили кривую износа и определяли потерю объема за 5 мин. Абразивные и эрозионные испытания проводили на одном и том же плоском образце.

Результаты исследований

Прочностные свойства покрытий. Значения твердости, адгезии и когезии покрытий, нанесенных на поверхность стали Ст3, предварительно подвергнутой пескоструйной обработке, приведены в табл. 2.

Отметим, что покрытия из чугуна отличаются высокими остаточными напряжениями, так что при напылении толстого слоя (более 1 мм) при изготовлении образцов для штифтовых испытаний возникали проблемы, связанные с отрывом покрытия от подложки.

Пескоструйная обработка поверхности детали перед напылением представляет собой дополнительную операцию, которая увеличивает себестоимость напыления и требует организации отдельного рабочего мес-

Таблица 2

Твердость, адгезия и когезия покрытий

Покрытие	Твердость HRC, измеренная на		Адгезия, МПа	Когезия, МПа
	ТР 5006-02	ТЭМП-4		
20X13	42,0	48,1	85,0	231,1
ЧН15Д7	43,4	53,5	74,0	482,0
ПР-НХ13СР	38,6	44,3	100,0	427,7
ПР-НХ15СР2	37,0	42,3		493,0

Примечание. В таблице указаны средние значения. Разброс значений относительно средних составляет до ±12 %.

та на производстве. Вместе с тем она необходима для получения максимальной адгезии. Тем не менее выявлено, что покрытия из некоторых материалов имеют хорошую адгезию и без предварительной пескоструйной обработки поверхности. Таким материалом, в частности, является твердый сплав ВК25.

Для снижения себестоимости целесообразно заменить операцию пескоструйной обработки нанесением тонкого подслоя из ВК25 перед напылением основного покрытия, поскольку нанесение и подслоя, и основного покрытия можно выполнять на одной и той же установке на одном и том же рабочем месте.

Были проведены опыты по нанесению покрытий из стали 20X13 и чугуна ЧН15Д7 для штифтовых испытаний в режимах: пескоструйная обработка + напыление подслоя ВК25 + напыление основного слоя и напыление подслоя ВК25 + напыление основного слоя. Результаты измерения адгезии этих покрытий приведены в табл. 3.

Видно, что при наличии подслоя ВК25 адгезия существенно повышается даже без пескоструйной обработки поверхности. Без подслоя покрытие из чугуна обладает меньшей адгезией, чем сталь 20X13, а с подслоем, наоборот, у чугуна адгезия выше.

Таблица 3

Адгезия покрытий с подслоем ВК25

Покрытие	Адгезия, МПа, после	
	пескоструйной обработки и нанесения подслоя ВК25	нанесения подслоя ВК25
20X13	143,0	132,0
ЧН15Д7	185,1	172,4

Абразивная и эрозионная стойкость покрытий

Покрытие	Абразивный износ, мм ³ , за 200 оборотов		Эрозионный износ, мм ³ , за 5 мин	
	Значения по образцам	Среднее значение	Значения по образцам	Среднее значение
20X13	13,4	13,8	0,28	0,28
	13,8			
	14,2			
ЧН15Д7	23,1	22,8	0,42	0,415
	22,3			
	23,1			
ПР-НХ13СР	13,3	13,8	0,32	0,35
	14,0			
	14,2			
ПР-НХ15СР2	21,3	23,0	0,53	0,65
	24,7			
Нирезист	11,6	12,9	0,14	0,14
	14,1			

Отметим, что в данной работе нанесение покрытий ПР-НХ13СР и ПР-НХ15СР2 с подслоем ВК25 не проводили, но более ранние исследования показывают, что адгезия таких покрытий находится на уровне около 200 МПа.

Абразивный и эрозионный износ покрытий. Данные по абразивному и эрозионному износу покрытий представлены в табл. 4 и на рис. 2, 3. Наряду с покрытиями также тестировали объемный материал нирезист, из которого изготавливают детали насоса ЭЦН.

С учетом разброса данных видно, что наилучшей и практически одинаковой абразивной стойкостью обладают объемный материал нирезист, покрытия из 20X13 и ПР-НХ13СР.

Объемный материал нирезист обладает наибольшей эрозионной стойкостью, у покрытия из 20X13 стойкость в 2 раза ниже.

Восстановление деталей ЭЦН

РК в сборе с НА представляют собой рабочую ступень ЭЦН. Весь насос состоит из блоков, в

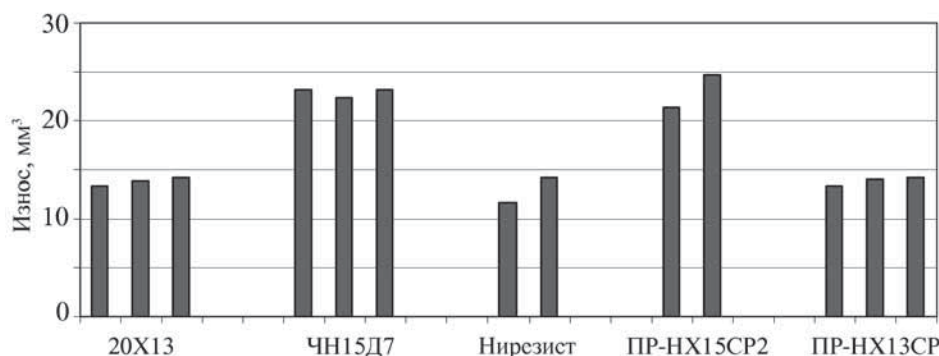


Рис. 2. Абразивный износ покрытий и объемного материала нирезист за 200 оборотов диска

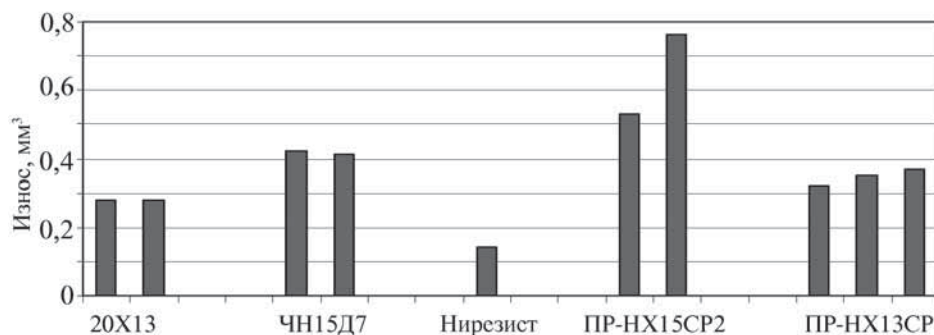


Рис. 3. Эрозионный износ покрытий и объемного материала нирезист за 5 мин

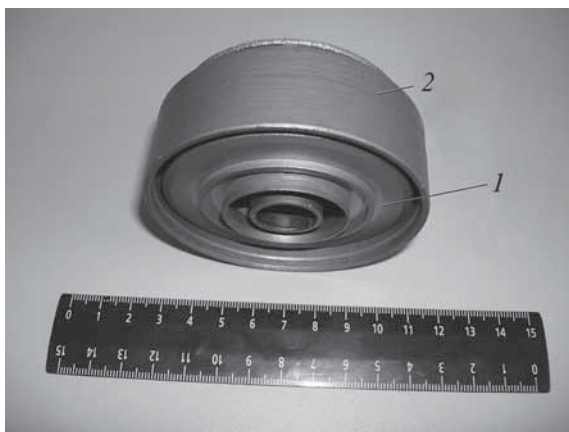


Рис. 4. Рабочая ступень ЭЦН в сборе:
1 – РК; 2 – НА

каждом из которых находятся десятки ступеней. Рабочая ступень показана на рис. 4.

РК вращается внутри НА и перемещает лопастями жидкость в радиальном направлении, за счет чего в рабочей ступени создается избыточное давление. На рис. 5 показаны поверхности РК и НА, которые изнашиваются в процессе эксплуатации и которые необходимо восстанавливать напылением.

Поверхности А2 и А3 являются труднодоступными, поэтому обрабатывались специальные приемы напыления и использовались стволы разного диаметра – стандартного 20 мм и нестандартных 16 и 13 мм. Чтобы минимизировать газопорошковый поток, попадающий на части детали, не подлежащие напылению, применяли специальные маски из фторопласта. В некоторых случаях после напыления нежелательные покрытия снимали стеклоструйной обработкой.

При отработке технологии было произведено напыление покрытий на РК и НА партии из 140 шт. рабочих ступеней ЭЦН. Для напыления использовали перечисленные в табл. 1 порошки. После проведения испытаний восстановленных деталей технология была внедрена на предприятии компании "Ойлпамп Сервис" (г. Нижневартовск), где организован участок напыления с тремя детонационными аппаратами CCDS2000 ("Дракон"). За два с половиной года экс-

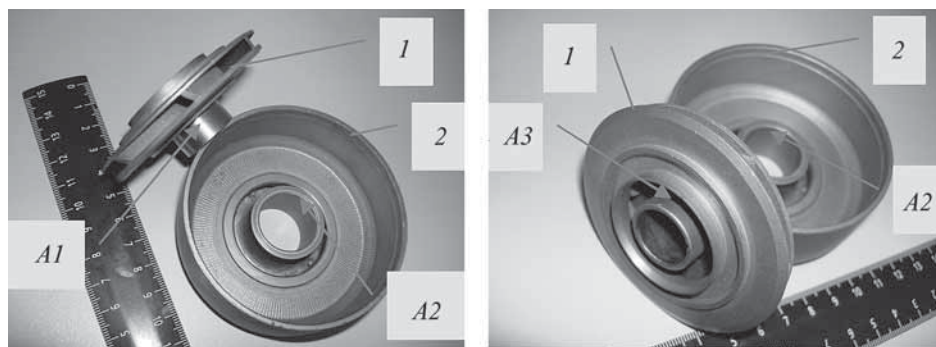


Рис. 5. Рабочая ступень ЭЦН в разобранном виде:
1 – РК; 2 – НА; А1, А2, А3 – поверхности для напыления

плуатации аппаратов восстановлено более 500 тыс. деталей ЭЦН.

Заключение

Проведены исследования и отработана технология детонационного напыления с компьютерным управлением CCDS восстановительных покрытий на детали, применяемых в нефтедобывающей промышленности ЭЦН.

Технология позволяет наносить покрытия, обладающие высокой адгезией и когезией. В частности, при нанесении покрытий с подслоем из ВК25 адгезия превышает 100 МПа. Когезия покрытий из ЧН15Д7, ПР-НХ13СР и ПР-НХ15СР2 превышает 400 МПа, а покрытий из 20Х13 – 200 МПа. Испытания на абразивный и эрозионный износ показали, что предпочтительными для применения являются покрытия из 20Х13 и ПР-НХ13СР.

Применение аппаратов CCDS2000 позволяет путем применения защитных масок, сменных стволов с различным диаметром, изменением циклограмм работы установки и т.д. в широких пределах варьировать параметры нанесения покрытий и дает возможность обрабатывать детали со сложным рельефом поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Computer-Controlled Detonation Spraying: from process fundamentals toward advanced applications / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, I. Smurov // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. P. 791–801.
2. Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Злобин С.Б. Детонационное напыление и исследование свойств покрытий из сплавов на никелевой основе и чугуна // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 36–41.
3. Злобин С.Б., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Сравнительный анализ свойств наноструктурных и микроструктурных керметных детонационных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 3. С. 3–11.
4. Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Злобин С.Б. и др. Структура и трибологические свойства износостойких детонационных покрытий // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 4. С. 87–92.
5. Злобин С.Б., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Детонационные покрытия из сплавов на основе никеля для восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9-й Междунар. практич. конф. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. Ч. 1. С. 109–116.
6. Metallization of plastics by detonation spraying / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, I. Smurov // International Thermal Spray Conference – 2008 (ITSC–2008). Netherlands: CD publication, 2008. P. 987–989.
7. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.
8. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990.
9. О штифтовом методе измерения прочности связи термических покрытий / Т.П. Гавриленко, С.Б. Злобин, Ю.А. Николаев, В.Ю. Ульяницкий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 8. С. 54–56.

И.М. Полетика, С.А. Макаров, Т.А. Крылова
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск)
E-mail: poletika@list.ru

Влияние бора на процесс карбидообразования, износ- и коррозионную стойкость покрытий при электронно-лучевой наплавке *

Получены износ- и коррозионно-стойкие покрытия методом электронно-лучевой наплавки на ускорителе электронов порошковых смесей карбида хрома с карбидом бора в различных весовых соотношениях на низкоуглеродистой стали и при изменении параметров излучения изучена природа формирования этих свойств. Показано, что при содержании 30...35 % об. B_4C в наплавочной смеси и плотности энергии излучения $W = 7...8$ кДж/см² за счет образования заэвтектической структуры с грубыми выделениями карбоборидов достигаются максимальные значения износостойкости. При содержании карбида бора в смеси менее 25 % об. возрастает коррозионная стойкость.

Ключевые слова: релятивистские электроны, наплавка, коррозионная стойкость, структура, микротвердость, износостойкость.

Wear and corrosion resistance coatings were fabricated by method of electron-beam surfacing of powders of different weight fraction of chromium carbide with boron carbide composition on the low-carbon steel using an electron accelerator. The coatings properties were studied based on investigation of coatings structure and phase composition. As was shown, if B_4C content in composition was 30...35 weight per cent and power density $W = 7...8$ kJ/cm², the wear resistance of coating was highest as the result of hypereutectic structure forming with carbide precipitation. Corrosion resistance of coatings increases if boron content low 25 weight per cent in composition.

Keywords: relativistic electron beam, surfacing, corrosion resistance, structure, microhardness, wear resistance.

Введение

Доля технологий формирования износостойких покрытий с использованием концентрированных источников энергии в машиностроении и металлургии постоянно увеличивается. В ряду таких технологий выделяется новая технология, основанная на использовании электронов со значительно увеличенной энергией – релятивистских электронов.

В ИЯФ СО РАН созданы промышленные ускорители электронов, позволяющие выводить концентрированный пучок энергией 1...1,6 МэВ и мощностью 100 кВт в атмосферу. Эффективная глубина проникновения электронов в металл составляет 0,5...1 мм. Производительность обработки при наплавке достигает 30 см²/с. Метод получения и результаты исследований подобных покрытий описаны в работах [1–5].

Особый интерес представляет получение многофункциональных покрытий, сочетающих в себе несколько свойств, например износ- и коррозионную стойкость, т.е. способных сопротивляться износу в агрессивной среде. В практике электродуговой наплавки долгое время считалось, что высокая стой-

кость против абразивного износа достигается наплавкой карбида вольфрама. Затем в качестве замены была предложена более дешевая и перспективная система Cr–C–W [6], высокая износостойкость в которой достигается за счет выделения карбоборидов. Одновременно хром, не связанный в фазу, находясь в твердом растворе, образует защитную оксидную пленку на поверхности покрытия и обеспечивает коррозионную стойкость.

Исходя из вышесказанного, представляло интерес получить износ- и коррозионно-стойкие покрытия на основе Cr–C–W при наплавке в пучке релятивистских электронов, изучить их структуру и свойства, найти оптимальные составы наплавочных смесей и режимы облучения.

Методика проведения исследований

Наплавку осуществляли на ускорителе электронов ЭЛВ-6, разработанном в ИЯФ СО РАН. В качестве подложки для наплавки использовали низкоуглеродистую листовую сталь Ст3 (толщина листа 14 мм) обыкновенного качества ГОСТ 380–94.

На подложку в пучке релятивистских электронов наплавляли однослойные покрытия с использованием для наплавки порошковых смесей карбида хрома Cr_3C_2 с карбидом бора B_4C (плотность насыпки 0,45 г/см²). Наплавочная смесь содержала 10 % флюса

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-03-00148-а).

MgF_2 . В первом случае содержание карбида бора в смеси менялось от 9 до 35 % (всего 8 составов).

Использовали следующие параметры облучения: энергия электронов 1,4 МэВ; сила тока пучка 22,5 мА; расстояние от выпускного окна до поверхности образца 90 мм; диаметр пучка 1,2 см. Ускоритель работал в режиме сканирования с амплитудой колебания пучка 50 мм и скоростью поступательного перемещения образца под пучком 0,67 см/с.

Во второй серии экспериментов содержание карбида бора оставалось постоянным, равным 30 %, но при энергии электронов 1,4 МэВ и скорости обработки 0,67 см/с силу тока пучка меняли от 21 до 25,5 мА, а при скорости обработки 1 см/с – в пределах 22,5...30 мА, что соответствовало изменению плотности энергии излучения 8,8...10,7 и 6,3...8,4 кДж/см².

Структуру металла наплавки исследовали на металлографическом микроскопе "Neophot" (×500). Образцы готовили механическим шлифованием, полированием и травлением в 4%-ном растворе азотной кислоты. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-2М. Твердость измеряли по Роквеллу, распределение микротвердости – на приборе ПМТ-3 в направлении от поверхности наплавленных слоев в глубь образца с переходом через границу сплавления при нагрузке 0,5 Н с шагом 40...100 мкм.

Проводили испытания на абразивный износ о нежестко закрепленные абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом (ГОСТ 23.208–79). Коррозионную стойкость определяли путем измерения потери массы образца при выдержке в концентрированной азотной кислоте. Вычисляли относительное изменение массы в процентах по формуле

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \cdot 100,$$

где M_0 – масса исходного образца, кг;

M_1 – масса образца после растворения в кислоте через время t_1 .

Результаты исследований

В случае варьирования состава наплавочной смеси на поверхности стали образуются слои толщиной 2,5...3,5 мм, примеры распределения микротвердости в которых приведены на рис. 1, а, б. Зависимость твердости по Роквеллу от содержания карбида бора в наплавочной смеси изображена на рис. 2, а. Видно, что с увеличением содержания карбида бора в смеси твердость возрастает.

Несколько по-иному ведет себя износостойкость. Вплоть до содержания карбида бора 25 % об. коэффициент износостойкости K_n изменяется незначительно и составляет 3,3...7 (рис. 2, б). При содержании карбида бора 30 % об. коэффициент износостойкости возрастает до 36, а при содержании 35 % об. V_4C – до 89,5. Наблюдаемые изменения свойств обусловлены изменением структуры и фазового состава слоя наплавки.

При содержании 9 % об. V_4C структура состоит из зерен твердого раствора и ледебуритной эвтектики (рис. 3, а). При содержании 12,6 % об. V_4C объемная доля эвтектики возрастает (рис. 3, б).

Рентгеноструктурным фазовым анализом зафиксировано наличие α -Fe и соединения $M_{23}(C,V)_6$, по своим параметрам близкого к карбиду хрома $Cr_{23}C_6$ (таблица). Это карбоборид со сложной кубической решеткой, в которой часть атомов углерода замещена атомами бора.

При 16,2 % об. V_4C на рентгенограммах появляются рефлексы цементитной фазы, что соответствует выделению на фоне ледебуритной эвтектики игл цементита Fe_3C (рис. 3, в), т.е. переходу от доэвтектической к заэвтектической структуре. Данное соединение, очевидно, также является карбоборидом, в котором часть атомов углерода замещена на атомы бора (см. таблицу).

Преобразование не охватывает целиком весь объем слоя, протекая в отдельных его областях. Наряду с заэвтектическими участками обнаруживаются доэвтектические, по составу близкие к эвтектике, в которых зерна твердого раствора очень малы.

При содержании 19,8 % об. V_4C иглы цементита разрастаются, достигая значительных размеров в окружении ледебуритной эвтектики (рис. 3, г). При 22,5 % об. V_4C структура меняется незначительно, а при 25...30 % V_4C наблюдается возврат к доэвтектической структуре из-за уменьшения в сплаве содержания хрома (увеличения относительного содержания карбида бора) (рис. 3, д). Вместе с тем общее количество карбидной и карбоборидной фаз растет, встречаются области с заэвтектической структурой.

При содержании 35 % об. V_4C структура вновь становится заэвтектической с избыточными выделениями карбидов и карбоборидов (рис. 3, е). К обнаруженным ранее фазам добавляется карбид хрома Cr_7C_3 , который, судя по изменению межплоскостных расстояний (см. таблицу), также является карбоборидом.

Выделение большого количества избыточных фаз приводит к значительному росту коэффициента износостойкости. Наблюдаемое явление связано с существенным увеличением в слое содержания углерода и бора. Бор, по-видимому, еще и смещает на диаграмме состояний системы эвтектическую точку

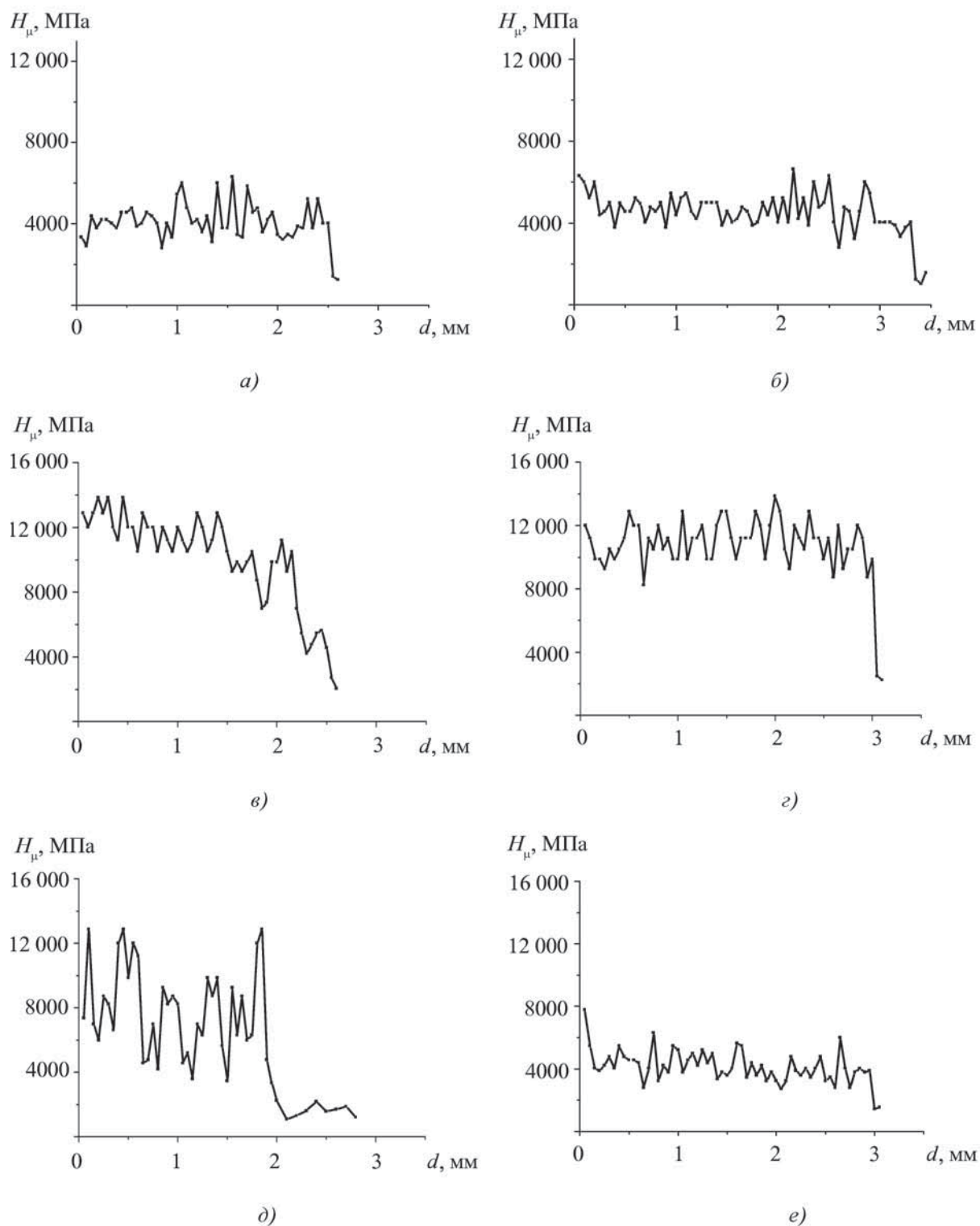


Рис. 1. Распределение микротвердости в наплавленных покрытиях при изменении содержания карбида бора в наплавочной смеси 12,6 (а), 30,0 (б) % об. и плотности энергии излучения 8,78 (в), 10,66 (г), 7,84 (д), 8,40 (е) кДж/см²

влево, способствуя выпадению избыточных карбидов при меньшем содержании углерода и карбидообразующих элементов и облегчая переход к заэвтектической структуре.

Поскольку в слоях наплавки хром не только связан в карбиды и карбориды, но и входит в состав твердого раствора, были проведены испытания образцов, вырезанных из наплавки, на коррозионную

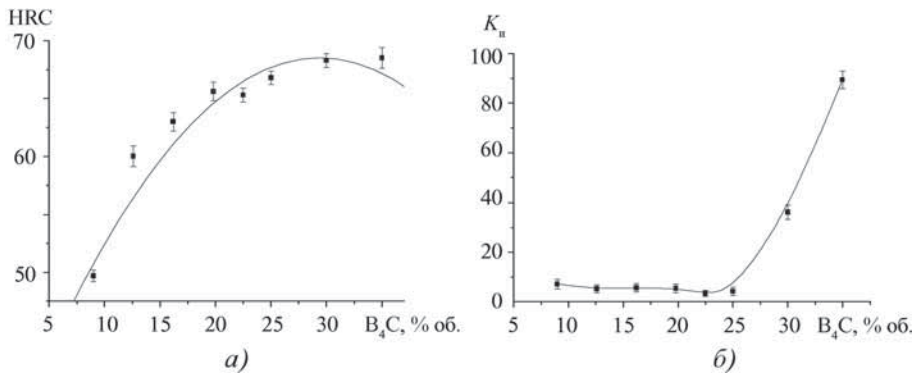


Рис. 2. Зависимости твердости (а) и коэффициента износостойкости (б) покрытия от содержания В₄С в наплавочной смеси

стойкость в концентрированной азотной кислоте. Для сравнения в этих же условиях испытывали образцы аустенитной коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и стали Ст3, используемой в качестве подложки.

Результаты испытаний приведены на рис. 4. Видно, что коррозионная стойкость слоев наплавки заметно выше, чем стали Ст3, и при содержании карбида бора, не превышающем 25 % об., приближается к коррозионной стойкости коррозионно-стойкой стали.

Сталь 12Х18Н10Т в концентрированной азотной кислоте растворяется очень медленно – через сутки ее масса уменьшается всего на 0,05 %. Сталь Ст3 через сутки выдержки в азотной кислоте теряет 3 % от первоначальной массы (см. рис. 4). Для указанных составов (до 25 % об. В₄С) после выдержки в кислоте более 5 ч коррозионное разрушение замедляется, и кривые выходят на насыщение, что связано с образованием на поверхности защитной пленки оксидов (Cr,Fe)₂O₃.

По-иному ведут себя слои наплавки с содержанием карбида бора в наплавочной смеси 30 и 35 % об. Для этих сплавов потери массы в азотной кислоте продолжают возрастать и после 5 ч выдержки (см. рис. 4). Очевидно, решающую роль в данном случае начинает играть коррозия по границам раздела карбидных и карборидных фаз, которые выделяются в большом количестве в заэвтектической структуре (см. рис. 3, е). Коррозия развивается на межфазной поверхности, уходя в глубь образца, что

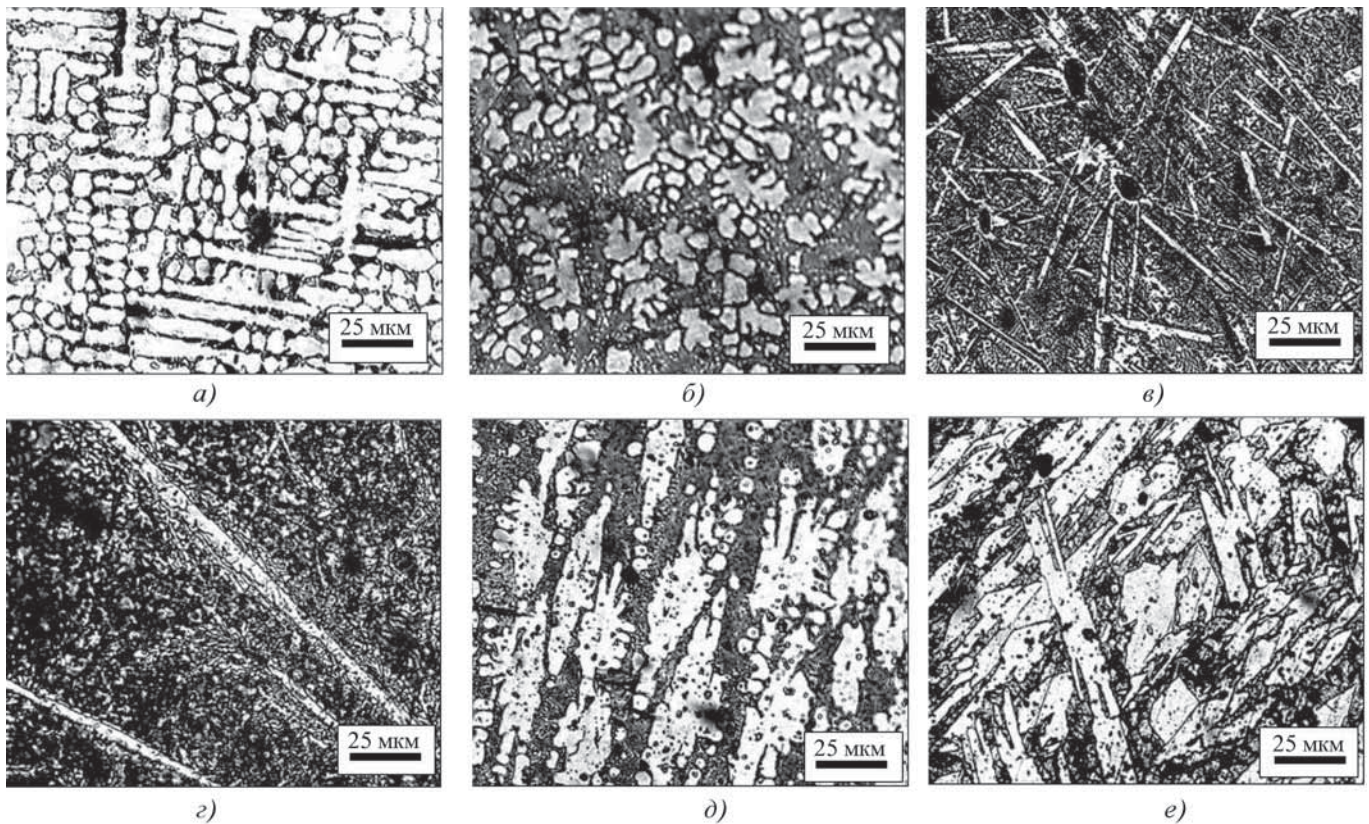


Рис. 3. Структуры металла наплавки при содержании карбида бора в наплавочной смеси, % об.: а – 9; б – 12,6; в – 16,2; г – 19,8; д – 30; е – 35

Таблица

Данные рентгеноструктурного анализа для слоя электронно-лучевой наплавки при содержании 35 % В₄С в наплавочной смеси

Фаза	2θ _{эксп}	d _{hkl} ^{эксп}	d _{hkl} ^{ASTM}	hkl
Cr ₂₃ (C,B) ₆	43,9	2,395	2,375	420
	48,3	2,189	2,168	422
	56,6	2,060	2,044	511
	56,3	1,888	1,878	440
	64,8	1,810	1,796	531
Fe ₃ (C,B)	44	2,389	2,38	112
	50,9	2,083	2,104	121
	51,2	2,072	2,065	210
	53,3	1,996	2,001	022
	54	1,972	1,971	211
	56,6	1,888	1,867	113
	57,3	1,867	1,850	112
Cr ₇ (C,B) ₃	49	2,160	2,120	202
	57,8	2,050	2,040	421
	59,5	1,800	1,810	402
	61,4	1,750	1,740	440

препятствует образованию сплошной оксидной пленки на поверхности.

Целью второй серии экспериментов было изучение влияния режима облучения на свойства слоя при достижении в наплавочной смеси максимальной концентрации карбида бора. Для этого первоначально при неизменной концентрации В₄С, равной 30 %, и скорости обработки 0,67 см/с увеличивали плотность энергии излучения за счет увеличения силы тока пучка от 21 до 25,5 мА.

Зависимость плотности энергии излучения W от энергии электронов U, силы тока пучка I и скорости обработки v по аналогии с теорией сварочных процессов [6] будет определяться как

$$W = UI/v. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае толщина наплавленного слоя возрастала от 2,5 до 3 мм (см. рис. 1, в, з), структура менялась от заэвтектической к доэвтектической с большим количеством эвтектики (рис. 5, а, б), а твердость и износостойкость падали (рис. 6, а, б).

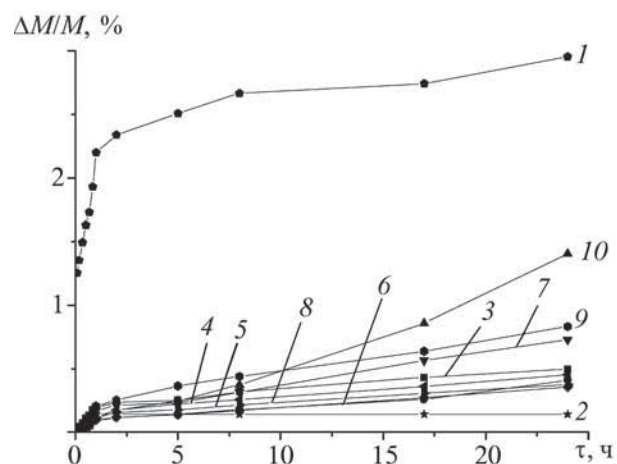


Рис. 4. Зависимости относительной потери массы образцов из сталей Ст3 (1), 12Х18Н10Т (2) и образцов наплавки от времени выдержки в азотной кислоте при содержании карбида бора в наплавочной смеси, % об.:

3 – 9; 4 – 12,6; 5 – 16,2; 6 – 19,8; 7 – 22,5; 8 – 25; 9 – 30; 10 – 35

Методом рентгеноструктурного фазового анализа фиксировались фазы Cr₂₃(C,B)₆ и Fe₃(C,B).

Чтобы исследовать данную систему при меньших значениях энергии, увеличили скорость обработки v до 1 см/с. Силу тока пучка меняли в пределах 22,5...30 мА. Энергия W при этом менялась от 6,3 до 8,4 кДж/см². Наблюдался следующие изменения в структуре и фазовом составе слоя наплавки.

При энергии W = 6,3...6,7 кДж/см² в верхней части слоя преобладает заэвтектическая структура с избыточными выделениями карбидов и карбоборидов (рис. 5, в). Это карбобориды M₂₃(C,B)₆ и Fe₃(C,B). Встречаются области с доэвтектической структурой. В нижней части слоя наплавки структура преимущественно доэвтектическая. Наблюдаемая картина свидетельствует о недостаточной величине энергии W для полного перемешивания материала насыпки с основной. Продукты выделения, связанные с наплавочной смесью, скапливаются в основном в верхней части наплавленного слоя.

С увеличением плотности энергии излучения до 7,3 кДж/см² совершается переход в сторону больших концентраций легирующих элементов. Наблюдается преимущественно заэвтектическая структура с грубыми выделениями карбидов и карбоборидов (рис. 5, з). При W = 7,8 кДж/см² структура доэвтектическая и состоит из зерен твердого раствора и прослоек ледебуритной эвтектики по границам зерен (рис. 5, д). При достижении энергии 8,4 кДж/см² структура становится еще менее легированной, а количество ледебуритной эвтектики уменьшается (рис. 5, е).

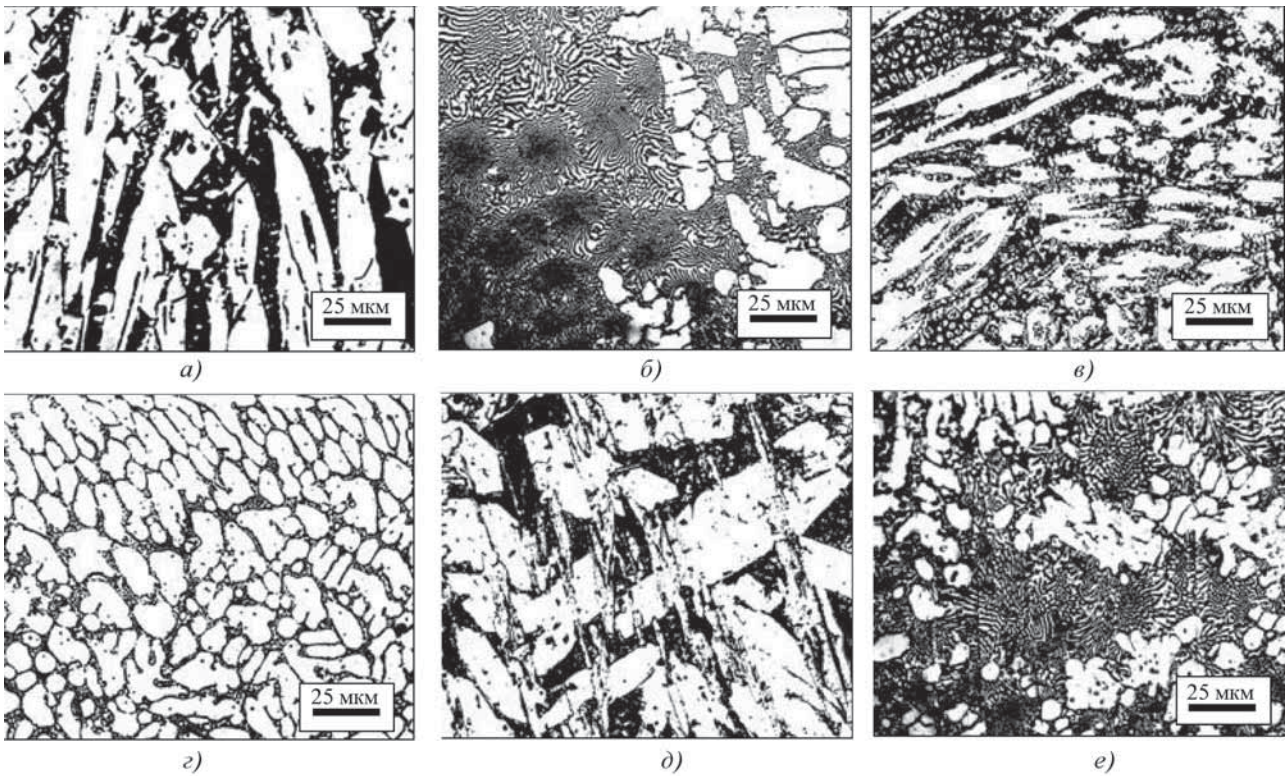


Рис. 5. Структуры металла наплавки при содержании 30 % об. V_4C в наплавочной смеси и плотности энергии излучения, $кДж/см^2$: а – 8,78; б – 10,66; в – 6,72; г – 7,28; д – 7,84; е – 8,4

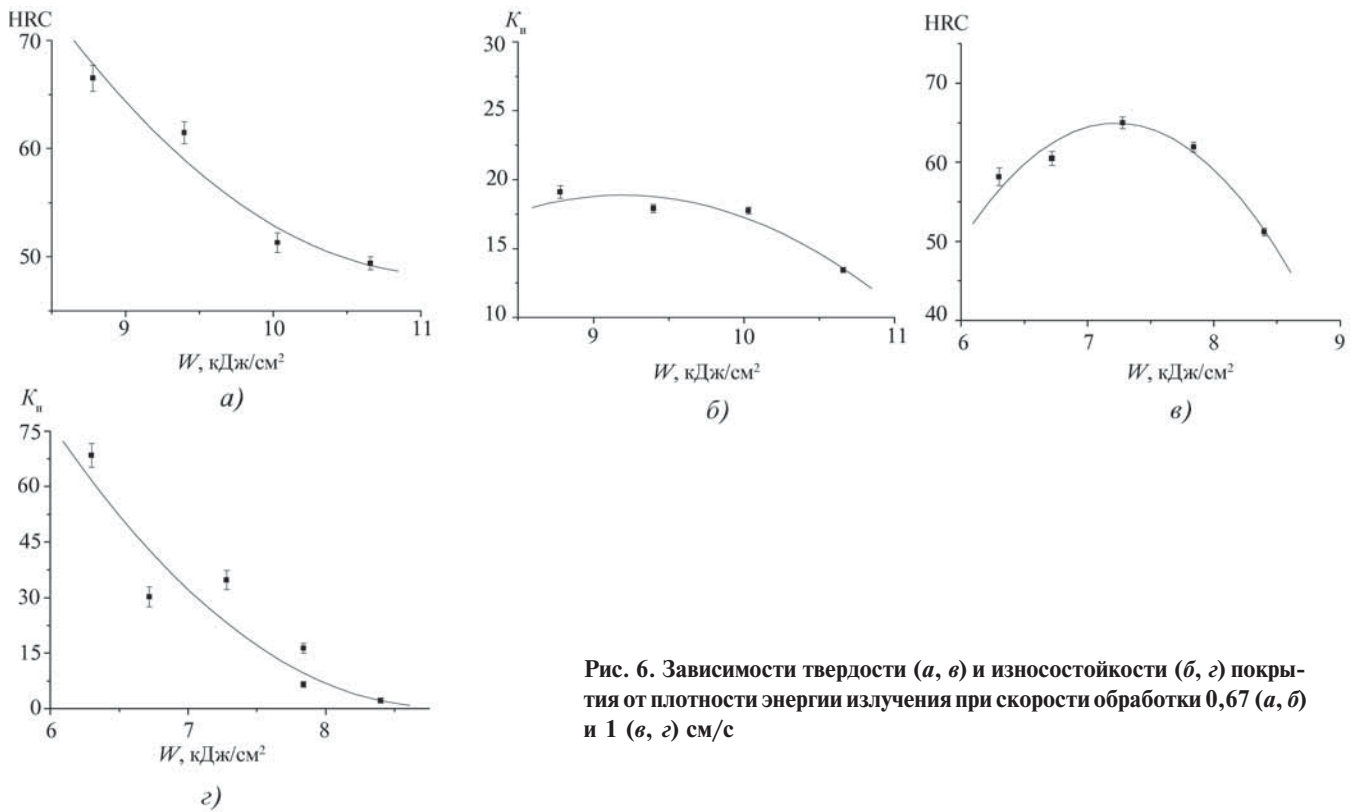


Рис. 6. Зависимости твердости (а, в) и износостойкости (б, г) покрытия от плотности энергии излучения при скорости обработки 0,67 (а, б) и 1 (в, г) см/с

Наблюдаемые изменения структуры в обоих случаях связаны с ростом глубины переплавленного слоя при увеличении плотности энергии излучения и уменьшении вследствие этого среднего содержания легирующих элементов на единицу объема слоя. Это хорошо видно из распределений микротвердости, снятых в поперечных сечениях покрытий (см. рис. 1, *в-е*), которые наглядно показывают увеличение толщины наплавки.

Характер изменения твердости, износо- и коррозионной стойкости соответствует структурным изме-

нениям в слое. При скорости обработки 0,67 см/с с переходом от заэвтектической к доэвтектической структуре твердость и износостойкость уменьшаются (см. рис. 6, *а, б*).

При скорости обработки 1 см/с коэффициент износостойкости с увеличением плотности энергии излучения уменьшается (рис. 6, *з*), а твердость проходит через максимум в области значений 7...8 кДж/см² (рис. 6, *в*) в соответствии с образованием здесь заэвтектической структуры по всей глубине наплавленного слоя.

Результаты измерения коррозионной стойкости приведены на рис. 7. Видно, что коррозионная стойкость наплавленных слоев для обоих случаев изменения плотности энергии излучения выше, чем коррозионная стойкость подложки из стали Ст3 и при малых временах выдержки в агрессивной среде приближается к коррозионной стойкости коррозионно-стойкой стали. Но кривая потери массы $\Delta M/M(\tau)$ тем дальше расположена от аналогичной кривой для коррозионно-стойкой стали, чем больше в структуре количество избыточных карбидов и карбоборидов (меньше плотность энергии излучения и тоньше слой наплавки).

В отличие от первого случая (см. рис. 4) ни одна из кривых рис. 7 не выходит на насыщение – при выдержке в азотной кислоте 24 ч потери массы продолжают нарастать. Очевидно, границы раздела фаз в структуре (как в эвтектической, так и в заэвтектической) при всех режимах облучения служат эффективными источниками коррозионного разрушения.

Заключение

1. При электронно-лучевой наплавке смесей карбида бора с карбидом хрома на низкоуглеродистую сталь (плотность энергии излучения $W = 8,05$ кДж/см²) при содержании 30...35 % об. V_4C в смеси в покрытиях достигаются максимальные значения твердости (67...69 HRC) и коэффициента износостойкости (36...89,5). Структура наплавленного слоя заэвтектическая с грубыми выделениями карбидов и карбоборидов.

2. С ростом плотности энергии излучения W при неизменной скорости обработки 0,67 см/с заэвтектическая структура покрытий сменяется доэвтектической – твердость и износостойкость уменьшаются. С увеличением скорости обработки до 1 см/с зависимость твердости от W проходит через максимум, что соответствует образованию по всей глубине наплавленного слоя заэвтектической структуры.

3. Коррозионная стойкость покрытий при содержании 30...35 % об. V_4C низкая за счет выделения большого количества избыточных фаз и развития коррозии на их границах. Коррозионная стойкость повышается при содержании V_4C в наплавочной сме-

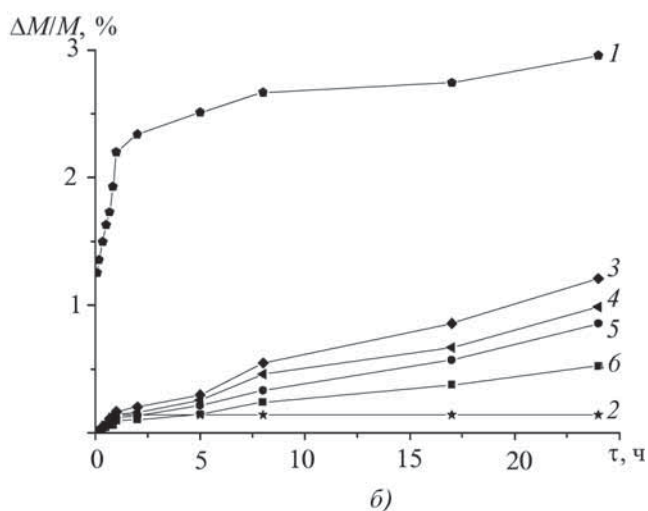
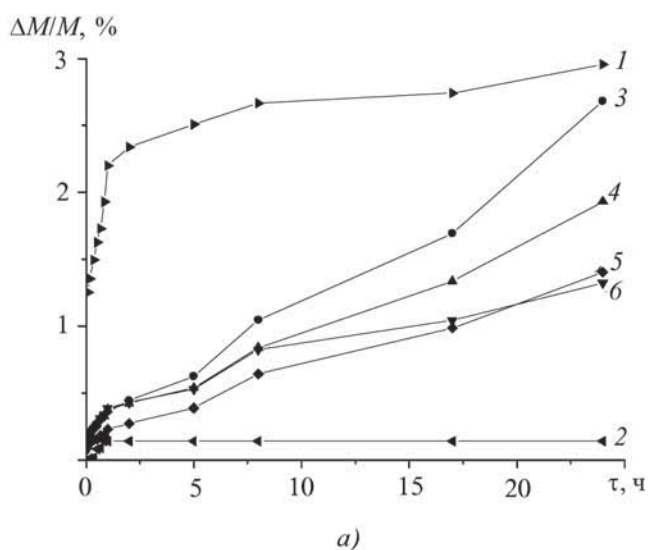


Рис. 7. Зависимости относительной потери массы образцов из сталей Ст3 (1), 12Х18Н10Т (2) и образцов наплавки от времени выдержки в азотной кислоте при плотности излучения, кДж/см²:

а – 8,78 (3); 9,4 (4); 10,03 (5); 10,66 (6); *б* – 6,3 (3); 7,28 (4); 7,84 (5); 8,4 (6)

си менее 25 % об., приближаясь к коррозионной стойкости коррозионно-стойкой стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полетика И.М., Голковский М.Г., Борисов М.Д. и др. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 5. С. 29–41.
2. Полетика И.М., Голковский М.Г., Беляков Е.Н. и др. Формирование коррозионно-стойких покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Перспективные материалы. 2006. № 2. С. 80–86.
3. Полетика И.М., Голковский М.Г., Перовская М.В. и др. Создание бифункциональных покрытий методом элек-

тронно-лучевой наплавки // Перспективные материалы. 2007. № 1. С. 78–85.

4. Полетика И.М., Иванов Ю.Ф. и др. Структура и свойства покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой вне вакуума // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 6. С. 48–56.

5. Полетика И.М., Крылова Т.А., Перовская М.В. и др. Структура и механические свойства металла вневакуумной электронно-лучевой наплавки до и после термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 4. С. 44–53.

6. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.

УДК 621.7.04

В.П. Смоленцев, А.П. Печагин, Г.Н. Климова
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Режимы и технология стабилизации геометрии деталей магнитно-импульсной обработкой

Рассмотрена специфика разработки технологических режимов и особенности проектирования технологического процесса повышения точности литых и сварных деталей путем импульсных воздействий электромагнитного поля.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, режимы, технология, геометрия деталей.

In clause specificity of development of technological modes and features of designing of technological process of increase of accuracy of cast and welded details by pulse influences of an electromagnetic field is considered.

Keywords: magnetoimpulse processing, modes, technology, geometry of details.

Введение

При изготовлении крупногабаритных деталей, особенно корпусных изделий станкостроения, возникает проблема удаления внутренних остаточных напряжений литых и сварных заготовок, так как предприятия малого, среднего и частично крупного бизнеса не имеют оборудования для термической обработки. Это вызывает изменения геометрии изделий в процессе изготовления и, что самое нежелательное, потерю точности в период эксплуатации оборудования.

Некоторые зарубежные фирмы (например, в Швейцарии) применяют естественное старение литых корпусов и станин. Однако такой процесс весьма длительный (как правило, он занимает несколько лет), что неприемлемо в гибкоструктурных производствах. Кроме того, изменение геометрии литых заготовок в процессе старения вызывает необходимость в назначении больших припусков, что заметно повышает расход материалов и трудоемкость последующей механической обработки.

Локальная термическая обработка участков с высокой концентрацией внутренних напряжений не получила развития, так как перераспределение сил, устраненных в процессе нагрева и охлаждения, продолжается за счет внутренних напряжений в других элементах конструкции, что становится неприемлемым для точного машиностроения, в частности в станкостроении.

В [1] рассмотрен новый процесс стабилизации размеров корпусных деталей оборудования методом магнитно-импульсной обработки. К достоинствам метода следует отнести снижение энергозатрат на операцию (в сравнении с термообработкой в печах), малые габариты установки, ускорение процесса (несколько минут, что на несколько порядков быстрее нормализации и отжига), достижение стабильных размеров крупногабаритных литых (чугун) и сварных (сталь) деталей (погрешность геометрических размеров 10...30 мкм).

Расчет и назначение технологических режимов

В качестве исходных данных при проектировании технологических режимов используют:

1. Сведения о заготовке: габариты; геометрия участков, требующих стабилизации размеров; марка материала; способ получения заготовки (литье в формы, точное литье, специальные виды заготовительных процессов, сварка (электродуговая, с защитной средой, под слоем флюса) и др.); геометрические размеры мест установки индукторов и др.

2. Технологические требования к заготовке и детали: предельные, экономически обоснованные, припуски; механическая обдирка участков, подлежащих стабилизации; допуски на размеры деталей; шероховатость и волнистость контактных поверхностей; наличие переходных участков с минимальными радиусами, допустимыми для магнитно-импульсного формообразования; ограничения толщин стенок в диапазоне, требуемом для прохождения электромагнитного поля; отсутствие на поверхности заготовки канавок, разрывов, выемок, искажающих поле.

3. Технологические возможности имеющегося оборудования: число одновременно работающих индукторов; наибольшие энергетические показатели генераторов (напряжение, емкость конденсаторов и др.); ресурс излучателей; наличие кадров для квалифицированного обслуживания установок.

Режимы обработки выбирают или назначают в следующей последовательности:

1. Выбирают напряжение генератора. По [2, 3] напряжение в импульсе может изменяться от 1 до 50 кВ, что требует защитных мероприятий от негативного воздействия полей на обслуживающий персонал и возможности искрения между металлическими частями соседнего оборудования (например, металлорежущих станков). Исследования, приведенные в [2], показали, что при напряжении в диапазоне 1...10 кВ зона активного воздействия поля не превышает 50 см. Это должно учитываться при проектировании ограждений генератора, а рабочий диапазон напряжений в импульсе ограничивать 20...25 кВ (обычно используют 2...15 кВ).

2. Устанавливают предельно допустимую энергию импульса, не вызывающую разрушения или трещинообразования (для хрупких материалов) заготовки. По [2] таким параметром является возможность перемещения поверхности обрабатываемого участка в пределах упругой деформации, когда выполняется условие

$$\sigma_{им} < [\sigma],$$

где $\sigma_{им}$ — напряжение в заготовке, возникающее под действием импульса магнитного поля;

$[\sigma]$ — допустимое напряжение (для сталей — предел текучести; чугуна — предел сжатия). Берется из справочников.

По [2] $\sigma_{им} \in A_{им}$ ($A_{им}$ — энергия импульса)

$$A_{им} = 0,5\mu_0 (K_n N)^2 J^2, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, при стабилизации на воздухе $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

K_n — постоянная напряженности магнитного поля на внешней стороне заготовки;

N — число витков обмотки индуктора (возбудителя);

J — сила тока в импульсе.

Сила тока оценивается через выбранное напряжение с учетом емкости конденсаторов C и индуктивности L разрядной цепи. Индуктивность включает потери энергии в цепи, зависит от зазора между индуктором и деталью (берется средняя величина), размеров индукторов, электромагнитных характеристик материала детали. При разработке генераторов индуктивность снижают до 1 мкГн, что повышает коэффициент полезного действия установки до 0,4...0,5 [2].

Сила тока J может быть установлена через максимальную расчетную величину J_{max} как среднее значение силы тока J_{cp} за период импульса:

$$J = J_{cp} = 0,5J_{max}.$$

Для первого периода T сила тока (рис. 1) равна

$$J_{max} = 0,5U_{пр} \sqrt{\frac{C}{L}},$$

где $U_{пр}$ — напряжение пробоя промежутка.

Напряжение $U_{пр}$ находят по закону Ома через выбранное напряжение в импульсе, геометрию (зазор)

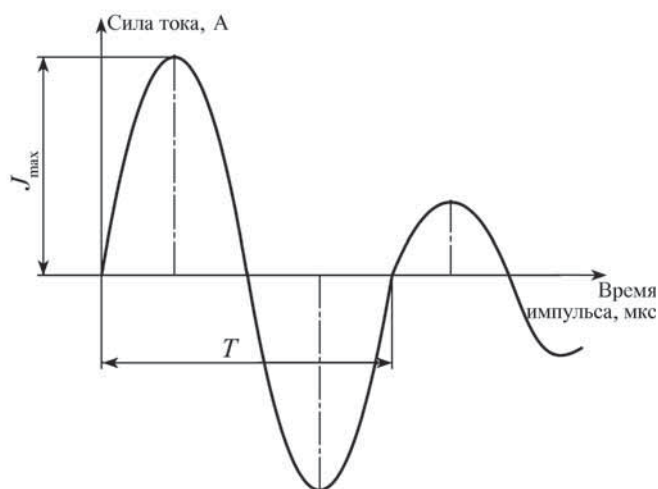


Рис. 1. Изменение силы тока в импульсе

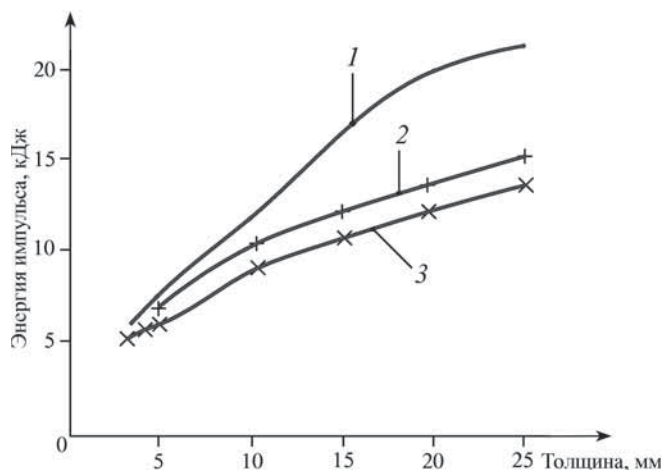


Рис. 2. Минимальная энергия импульса для деталей с различной толщиной (число импульсов – 5):
1 – чугун СЧ20; 2 – сталь 45; 3 – сталь Ст3

промежутка между индуктором и заготовкой и сопротивление среды (воздуха).

Тогда уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$A_{им} = 0,12\mu_0 (K_n N)^2 U_{пр} \frac{C}{L}. \quad (2)$$

Расчет по зависимости (2) представляет определенные сложности, так как не известна емкость C конденсаторов и приходится прибегать к вариантным расчетам, что дает весьма приблизительные результаты.

Поэтому для созданных установок экспериментально определяют предельные энергии импульсов, не вызывающие остаточной деформации заготовок, и приводят их в виде графиков (рис. 2).

Выбор энергии производится по рис. 2 с учетом материала детали, вида заготовки (в рассматриваемом случае литье в формы для чугуна и электродуговая сварка для сталей), наибольшей толщины стенок заготовок. При этом слишком тонкие (менее 2...3 мм) участки по [2] прозрачны для магнитного поля и в них не создаются электромагнитные силы, т.е. не происходит снижения остаточных напряжений. Имеются также ограничения по наибольшей толщине стенки.

3. Для выбранной энергии импульса находят емкость конденсаторов C , мкФ. По [3]:

$$C = 2\eta \frac{A_{им}}{U^2},$$

где η – коэффициент полезного действия импульса.

По [2] до 50 % подводимой к генератору энергии превращается в теплоту на этапе достаточно длительного этапа зарядки конденсаторов. Установлено [2], что с увеличением радиуса r переходных участков η

растет. Рекомендуется для литых деталей иметь соотношение радиусов r к толщине h зоны обработки более 2–3.

Тогда можно принять $\eta = 0,4...0,5$.

На рис. 3 приведена емкость конденсаторов, необходимая для создания требуемой энергии импульса при стабилизации чугунных деталей с толщиной стенки 8...12 мм.

Однако при напряжении импульса 4...5 кВ достаточно иметь емкость конденсаторов 400...500 мкФ, что подтверждается результатами работы на установке.

4. Находят частоту следования импульсов. Обычно интервал между соседними импульсами назначают от нескольких секунд до долей минуты. Чтобы создать расчетную величину энергии импульса, требуется полная зарядка конденсаторов и назначение интервала не менее минимального расчетного значения.

По [2, 3] и рис. 1 зарядка происходит в первую четверть периода T импульса, т.е. период зарядки $\tau_3 = 0,25T$.

По [2]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Обычно $T = 0,1...0,5$ с.

Сквозность g импульсов составляет 10...100. Тогда интервал времени τ_0 между импульсами равен

$$\tau_0 = g\tau_3.$$

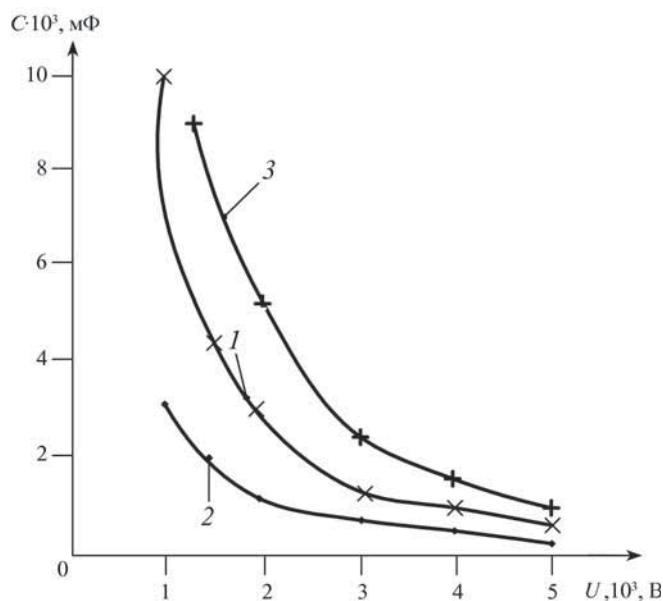


Рис. 3. Зависимости емкости конденсаторов от напряжения ($\eta = 0,5$) при энергии импульса, кДж:
1 – 10; 2 – 5; 3 – 20

Частота ν следования импульсов определяется как

$$\nu = 1/g\tau_3.$$

При назначении частоты следования импульсов следует учитывать, что в зоне магнитно-импульсной обработки реализуется большое количество тепловой энергии, что приводит к нагреву детали. Для сталей нагрев до 500 К не вызывает структурных изменений, но при малой скважности тепло будет накапливаться и могут происходить термические изменения, вызывающие местный рост остаточных напряжений и коробление детали. Поэтому в ряде случаев частоту назначают без учета скважности импульсов и принимают интервал между ними не менее 10 с, чтобы место обработки успело остыть до исходной температуры. В этом случае происходят перегрев детали, нарушающий точность формы и размеров, нежелательные изменения свойств поверхностного слоя материала.

5. Определяют число импульсов, необходимых для устранения остаточных напряжений в заготовках (рис. 4).

На рис. 4 приведено минимальное число импульсов для стабилизации геометрии литых чугунных и сварных полых стальных заготовок с толщиной стенки около 10 мм. Если число импульсов увеличивать, то в поверхностном слое формируются сжимающие напряжения, которые, как правило, не вызывают потери точности детали. Поэтому практически всегда число импульсов n увеличивают

$$n = k_n n_p,$$

где k_n – коэффициент ($k_n = 1,5...2$);

n_p – минимальное число импульсов (см. рис. 4).

Сжимающие напряжения на обрабатываемой части заготовки могут компенсироваться силами растяжения при перераспределении внутренних напряжений в сопрягаемых участках конструкции. Поэтому k_n

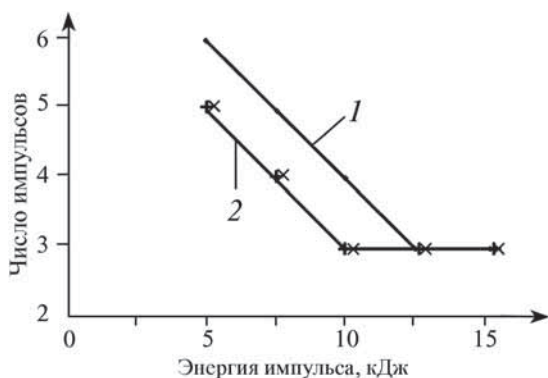


Рис. 4. Число импульсов, необходимое для снятия внутренних напряжений (толщина детали (10 ± 1) мм):

1 – чугун СЧ20; 2 – стали ("×" – сталь 45; "+" – сталь Ст3)

повышают до 4...5. При этом увеличивается время выполнения операции по стабилизации напряжений в детали, однако трудоемкость магнитно-импульсной обработки остается на порядок ниже в сравнении с термообработкой в крупногабаритных печах.

Особенности построения технологического процесса

Технологический процесс включает следующие составляющие:

1. Анализ исходных данных, их связь с обрабатываемой деталью.
2. Выбор средств технологического оснащения.
3. Обоснование схемы размещения индукторов с учетом допустимой величины шероховатости поверхности детали в месте установки индукторов, возможности обеспечения равномерности зазоров между деталью и индуктором в пределах 0,2 мм.

Для известных режимов стабилизации по [2] можно установить минимальную толщину h_{\min} зоны обработки заготовки

$$h_{\min} \geq \frac{\sqrt[4]{LC}}{\sqrt{0,5\chi_3\mu_3}},$$

где χ_3 – удельная проводимость материала заготовки;

μ_3 – магнитная постоянная материала заготовки (справочные сведения).

Далее оценивают геометрию переходных участков, которая, как приведено выше, должна подчиняться соотношению

$$r = k_r h,$$

где k_r – коэффициент для литых деталей из чугуна и сварных из стали должен быть не менее 2.

По результатам отработки технологичности вносят коррективы в чертежи заготовки.

4. Рассчитывают и выбирают технологические режимы (см. выше).

5. Подбирают или проектируют индукторы с требуемым числом витков и стойкостью (одноразовые и многократные конструкции).

6. Создают технологический регламент, включающий вопросы техники безопасности при работе на магнитно-импульсной установке.

Результаты стабилизации геометрии деталей магнитно-импульсной обработкой

Спроектированные режимы и технологический процесс прошли практическую проверку, внедрены в производство на Воронежском станкостроительном заводе и длительное время использовались для повы-

шения точности и стабилизации геометрии корпусных деталей, полученных литьем из чугуна и частично сварных узлов.

Размеры обрабатываемых деталей составляли до 500 мм по ширине и до 850 мм по высоте.

В результате обработки были снижены остаточные напряжения и не наблюдалось изменения геометрических размеров крупных литых и сварных заготовок.

Для литого чугунного рабочего стола (размер 3220×160×898 мм) фрезерного станка отклонения от плоскостности на длине 1000 мм не превышало 20 мкм; для сварной стальной станины габаритами 765×650×5000 мм непараллельность направляющих на длине 1000 мм находилась в пределах 10 мкм (в диапазоне точности измерений).

Выводы

1. Разработана методика проектирования технологических режимов магнитно-импульсной обработки, обеспечивающая высокую точность и стабильность размеров крупногабаритных заготовок без использования дефицитного и дорогостоящего термического

оборудования, что способствует развитию среднего бизнеса в машиностроении.

2. Обоснованы особенности построения технологического процесса стабилизации геометрии крупногабаритных заготовок магнитно-импульсным методом.

3. Приведены результаты экспериментальной проверки процесса магнитно-импульсной обработки на серийных сварных и литых деталях станкостроения. Достигнута точность профиля заготовки в пределах допусков, установленных стандартами для высокоточного технологического оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лисицын А.В.** Моделирование процесса вибрационного старения заготовок // Математическое моделирование и компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: междуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2003. Вып. 8. Ч. 1. С. 237–241.

2. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов: в 2-х т. Т. 2 / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 208 с.

3. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе Международной научно-технической конференции "Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении" (ТМ–2012), которая состоится **3–5 сентября 2012 г.** в ФГБОУ ВПО "Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва".

Конференция посвящена 75-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д-ра техн. наук, профессора Вячеслава Феоктистовича Безъязычного.

Международная научно-техническая конференция ТМ–2012 проводится с целью обмена опытом в решении актуальных проблем инженерных наук, в области разработки инновационных технологий в машиностроении и авиадвигателестроении, повышения конкурентоспособности выпускаемых изделий, а также установления деловых контактов представителей промышленности, технических вузов и научно-исследовательских учреждений регионов России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Основные направления работы конференции:

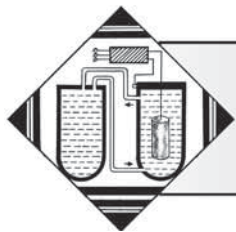
- ✓ инновационные технологии, оборудование и оснастка лезвийной и алмазно-абразивной обработки заготовок
- ✓ научные технологии, оборудование и оснастка отделочно-упрочняющей, электрофизической, электрохимической и комбинированной обработки заготовок
- ✓ инженерия поверхности и конкурентоспособные технологии, оборудование и оснастка модификации поверхностных слоев деталей машин
- ✓ конкурентоспособные заготовительные производства
- ✓ автоматизация технологических процессов изготовления изделий машиностроения и авиадвигателестроения
- ✓ подготовка специалистов для научных технологий в машиностроении и авиадвигателестроении
- ✓ отборочный этап конкурса программы "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" ("У.М.Н.И.К. – 2012")

Адрес оргкомитета конференции:

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, РГАТУ им. П.А. Соловьёва.

Начальник информационного отдела управления НИИР Гуляева Т.В.

Тел. (4855) 21-00-10, факс (4855) 21-39-64, e-mail: info@rgata.ru



УДК 621.785

А.А. Жуков, А.П. Навоев (Рыбинский государственный авиационный
технологический университет им. П.А. Соловьёва)
E-mail: navoev@yandex.ru

Определение модуля упругости цементованного слоя

Представлены методика и результаты определения модуля нормальной упругости поверхностного цементованного слоя на различных марках сталей. Показана необходимость использования модуля упругости цементованного слоя для расчета на прочность зубчатых колес в соответствии с методикой по ГОСТ 21354–87.

Ключевые слова: цементация, зубчатые колеса, модуль упругости, толщина и твердость цементованного слоя, контактные напряжения.

This article describes methods and results of defining surface carburised layer elastic modulus for different steel grades. Special emphasis is made on the necessity of using carburised layer elastic modulus on the basis of the methods for calculating gearwheel strength according to 21354–87 State Standard.

Keywords: carburizing, gearwheel, elastic modulus (Young's modulus), depth and hardness of the carburised layer, contact stress.

Введение

Повышение надежности автомобильных двигателей для увеличения ресурса, межремонтного пробега и сокращения затрат на ремонт и техническое обслуживание – актуальная задача, которая должна решаться за счет совершенствования конструкции наиболее нагруженных деталей двигателей, технологии их изготовления и повышения точности конструктивных расчетов.

К числу деталей, работающих в тяжелых условиях и лимитирующих надежность двигателей, следует отнести зубчатые колеса привода агрегатов, прежде всего форсированных дизелей с повышенной энергетикой впрыска. К таким двигателям можно отнести последние модификации дизелей семейства ЯМЗ, выпускаемые на ОАО "Автодизель" и ОАО "Тутаевский моторный завод" [1].

Повышение мощностных, экономических и экологических показателей последних моделей автомобильных двигателей обеспечивается, главным образом, за счет модернизации системы топливоподачи и увеличением энергетикой впрыска. В сравнении с двигателем ЯМЗ-238, максимальное давление впрыска которого составляет 63...65 МПа, в моделях ЯМЗ-8424 и ЯМЗ-8481 это давление повышено на 40 %, а в двигателях ЯМЗ-7511 и ЯМЗ-658 – в 2 раза [2].

Такое увеличение давления впрыска приводит к необходимости передавать большие крутящие моменты от коленчатого вала через механизм привода агрегатов к кулачковому валу топливного насоса высокого давления. Это приводит к увеличению контактных и изгибных напряжений, действующих на зубья колес привода агрегатов, вызывая их интенсивное изнашивание.

Анализ данных Тутаевского экспериментально-ремонтного завода, занимающегося ремонтом и восстановлением двигателей, по характеру и степени повреждения зубчатых колес в процессе эксплуатации показал [3], что основными видами повреждений являются износ, питтинг, отслаивание и сколы поверхностного слоя зубьев.

В работе [4] выполнен силовой расчет зубчатых колес привода агрегатов дизельных двигателей семейства ЯМЗ-840. Показано, что повышение давления впрыска топлива приводит к увеличению контактных и изгибных напряжений в зубчатых зацеплениях. Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик азотированных и цементуемых зубчатых колес [5] показал, что для изготовления зубчатых колес привода агрегатов двигателей с повышенным давлением впрыска (до 140 МПа) необходимо использовать цементуемые стали, у которых предел контактной выносливости поверхности зуба может достигать

1360 МПа, а предел выносливости по напряжениям изгиба – 800 МПа.

Очевидно, что работоспособность и эксплуатационный ресурс цементованных зубчатых колес в значительной степени зависит от качества цементованного слоя после закалки и низкого отпуска. В настоящее время для оценки качества поверхностного слоя зубчатых колес используются следующие показатели: твердость, эффективная глубина слоя, характер распределения углерода и твердости по глубине слоя, а также структура и фазовый состав.

Для определения этих показателей имеются соответствующие методы и средства контроля [6]. При расчетах зубчатых колес на прочность согласно ГОСТ 21354–87 используется модуль упругости E . Эта характеристика используется для определения контактных напряжений в зубчатых зацеплениях: рассчитываются коэффициент, учитывающий механические свойства материалов колес (для расчетов передач со стальными колесами принимают $Z_m = 275 \text{ МПа}^{1/2}$), и глубина расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений h_n .

Несмотря на то что контакт зубьев происходит между цементованными поверхностями, в расчетах используются значения E для материалов зубьев, т.е. их сердцевины. В настоящее время значения модуля упругости цементованного слоя легированных сталей неизвестны. Очевидно, что это обстоятельство вносит определенные погрешности в результаты расчетов. Кроме того, модуль упругости является структурно-чувствительной характеристикой и может служить показателем качества цементованного слоя.

Таким образом, задача определения упругих свойств цементованного слоя является актуальной и ее решение имеет научную и практическую значимость.

Методика проведения исследований

Решение поставленной задачи осуществляли экспериментально на образцах (диски диаметром 50 мм и толщиной 20 мм) из конструкционных легированных сталей марок 15ХГН2ТА и 18ХГТ. Цементации подвергали только одну сторону образца, а вторая представляла собой исходный материал без цементации. Обе стороны имели шероховатость поверхности не выше 0,63 мкм.

Замер твердости поверхностей образцов производили с помощью портативного ультразвукового твердомера МЕТ-1У, предназначенного для измерения твердости металлических изделий по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора D.

При определении модуля нормальной упругости (модуля Юнга) в тонких поверхностных слоях мате-

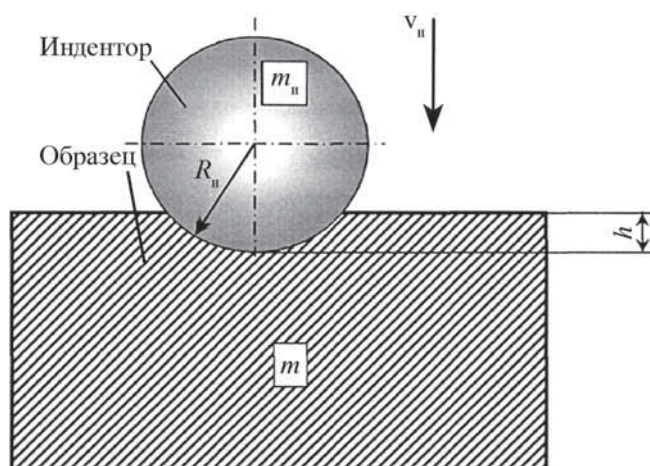


Рис. 1. Схема взаимодействия индентора и образца при определении модуля Юнга динамическим вдавливанием

риала исследуемых образцов использовали метод ударного вдавливания сферического индентора. Все измерения проводили на измерительном комплексе, конструкция и принцип работы которого изложены в работе [7].

Определение модуля Юнга при динамическом вдавливании основано на частном решении задачи Герца о динамическом контакте сферы и пластины (рис. 1) в предположении отсутствия пластической деформации и релаксационных процессов в зоне соударения. Решение задачи позволяет связать продолжительность контакта и глубину упругого проникновения индентора с геометрическими и кинетическими характеристиками соударяющихся тел.

Продолжительность контакта τ сферического индентора и пластины (образца) в первом приближении вычисляется по следующей формуле:

$$\tau = \left[\frac{32}{\sqrt{\pi v_n} \left(\frac{3}{2m_n} + \frac{6}{m} \right)} \right]^{2/5} \left[\frac{9}{16R_n} \left[\frac{1-\mu_n^2}{E_n} + \frac{1-\mu^2}{E} \right]^2 \right]^{1/5}, \quad (1)$$

где v_n – скорость индентора в момент соударения;

m_n, m – массы соответственно индентора и образца;

R_n – радиус индентора;

μ_n, μ – коэффициенты Пуассона соответственно для индентора и образца;

E_n, E – модуль Юнга материала соответственно индентора и образца.

Формулу (1) можно упростить, учитывая, что коэффициент Пуассона для большинства исследуемых

материалов меняется незначительно, а масса индентора $m_{и}$ существенно меньше массы образца m :

$$\tau = \left[\frac{256m_{и}}{\pi R_{и} v_{и}} \left[(1-\mu^2) \left(\frac{1}{E_{и}} + \frac{1}{E} \right) \right]^2 \right]^{\frac{1}{5}}. \quad (2)$$

По измеренной продолжительности контакта τ можно определить модуль Юнга материала образца

$$E_h = \frac{1-\mu^2}{\frac{\sqrt{\pi}}{16\sqrt{2}} \tau^{\frac{5}{2}} \sqrt{R_{и} v_{и}} - \frac{1-\mu^2}{E_{и}}}. \quad (3)$$

Поскольку при динамическом вдавливании индентор проникает в поверхностный слой материала контртела на некоторую ограниченную глубину h , значение модуля Юнга, рассчитываемое по формуле (3), является средним по глубине проникновения индентора.

Глубина h проникновения индентора в поверхностный слой образца определяется как

$$h = 1,24 \left[\frac{m_{и} v_{и}^2}{\sqrt{R_{и} E_{и}}} \right]^{\frac{2}{5}}. \quad (4)$$

Диаметр упругого отпечатка d , соответствующий максимальной глубине проникновения индентора, находится из геометрических соотношений

$$d = 2 R_{и} \sqrt{1 - \left(\frac{R_{и} - h}{R_{и}} \right)^2}. \quad (5)$$

Таким образом, зная характеристики индентора ($\tau_{и}$, $E_{и}$, $R_{и}$), скорость в момент соударения $v_{и}$ и фиксируя в каждом опыте время упругого взаимодействия τ , можно определить глубину h проникновения индентора в поверхностный слой образца, среднее по глубине проникновения индентора значение модуля Юнга E_h , а также приблизительно оценить площадь поверхности материала, в пределах которой происходило усреднение модуля Юнга при измерении.

Принципиальная схема установки для определения модуля Юнга поверхностных слоев металлических материалов приведена на рис. 2. В основе этой установки лежит принцип маятникового динамического эластомера. Исследуемый образец 3 фиксируется с помощью зажимного устройства 2, установленного на основании 1. Сферический индентор 4, подвешенный на нити, в исходном состоянии притянут электромагнитным затвором 5 и отклонен от положения равновесия. Для начала измерения производится отключение питания затвора. Происходит соударение индентора и образца, в процессе которого замыкается

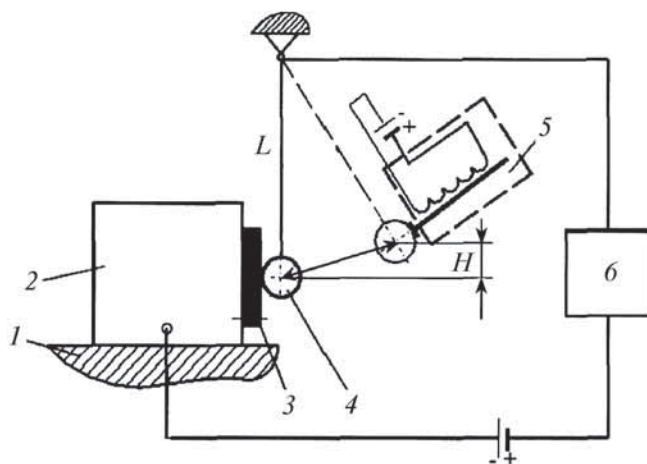


Рис. 2. Принципиальная схема установки для определения модуля Юнга поверхностных слоев металлических материалов: 1 – основание; 2 – зажимное устройство; 3 – образец; 4 – сферический индентор; 5 – электромагнитный затвор; 6 – хронометр

электрическая цепь и на хронометр 6 подается короткий импульс длительностью, равной продолжительности упругого контакта.

В качестве индентора использован полированный шарик из высокоуглеродистой стали ШХ15, подвергнутый термообработке – закалке. Масса индентора $m_{и} = 10,53$ г, радиус $R_{и} = 13,50$ мм, модуль Юнга материала $E_{и} = 150 \cdot 10^9$ Па.

Скорость индентора в момент соударения с образцом вычисляли по формуле

$$v_{и} = \sqrt{2gH}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,8056$ м/с²;
 H – высота падения индентора, м.

Высоту H находили из геометрических соотношений по известному отклонению индентора a и длине нити подвески L (см. рис. 2):

$$H = \frac{a^2}{2L}. \quad (7)$$

На каждом образце производили 100–120 замеров. С помощью программного обеспечения измерительного комплекса выполняли расчеты по формулам (2)–(7) и проводили дальнейшую статистическую обработку результатов измерений.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты проведенных исследований по определению величины цементованного слоя легированных сталей, используемых для изготовления зубчатых колес привода агрегатов двигателей ЯМЗ и коробок пе-

Результаты замеров модуля упругости на цементованном слое и сердцевине образцов

Марка стали	Модуль упругости, ГПа											
	Цементованной поверхности*						Сердцевины**					
	E	E _{min}	E _{max}	Для двух марок сталей			E	E _{min}	E _{max}	Для двух марок сталей		
				E	E _{min}	E _{max}				E	E _{min}	E _{max}
18ХГТ	195,8	186,5	206,1	217,2	209,8	225,1	328,8	299,3	364,1	299,0	276,9	324,5
15ХГН2ТА	235,5	224,4	247,5				228,2	201,1	265,5			

*Твердость 62...64 НРСэ.
 **Твердость 29...39 НРСэ.

ремены передач, представлены в таблице. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что модули упругости цементованного слоя и материала сердцевины отличаются. Разброс значений, полученных для сердцевины и цементованного слоя, связан с тем, что для ряда кристаллов, в том числе и металлических, модуль упругости существенно зависит от направления, в котором происходит деформация решетки.

Для железа значения E для направлений, в которых он максимален и минимален, следующие: E_{max} = 290 ГПа, E_{min} = 135 ГПа. Такая разница значений модуля упругости указывает на высокую анизотропию железа. Модуль упругости зависит только от природы атомов (молекул), образующих тело, и от их взаимного расположения. Изменить его можно путем значительного изменения состава или внутренней структуры твердого тела, например введением в сталь значительного количества легирующих добавок, термической обработкой, холодной деформацией. Анизотропия проявляется и у сплавов на основе железа, следовательно, дисперсия значений модуля упругости будет присутствовать и у них.

При обработке результатов замеров использовали среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра, поэтому помимо среднего значения E определяли максимальное и минимальное значения модуля упругости E_{min} и E_{max}, а также значения E на основании замеров по двум маркам сталей.

Выводы

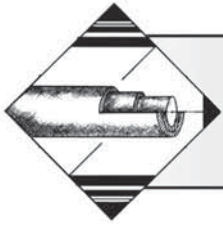
1. Результаты исследований по определению модуля упругости показали, что его значения для поверхностного упрочненного слоя и сердцевины отличаются. Эти различия связаны с тем, что фазовый состав и структура цементованного слоя и основного материала также имеют отличия по свойствам. Это отражает-

ся на параметрах кристаллической решетки и, соответственно, ее упругих свойствах.

2. Определены значения модуля Юнга для цементованного слоя легированных сталей марок 15ХГН2ТА и 18ХГТ. Их можно использовать в соответствии с ГОСТ 21354–87 для расчета коэффициента, учитывающего механические свойства материалов колес Z_м при расчете контактных напряжений в зубчатых зацеплениях, и глубины расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений h_ц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуков А.А., Жуков В.А., Навоев А.П. Повышение надежности зубчатых колес привода агрегатов дизелей ЯМЗ // Автомобильная промышленность. 2009. № 3. С. 32–34.
2. Жуков А.А., Навоев А.П. и др. Влияние повышения давления впрыска топлива на напряженное состояние зубчатых колес привода дизеля // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 18–22.
3. Навоев А.П., Жуков А.А. Анализ технического состояния зубчатых колес привода агрегатов дизельных двигателей ЯМЗ в процессе эксплуатации // Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве: тез. докл. Рос. науч.-техн. конф. Рыбинск: РГАТА, 2007. Т. 2. С. 252–258.
4. Жуков В.А., Корытов С.В., Навоев А.П. Влияние параметров топливоподачи в дизелях на выбор упрочняющей обработки зубчатых колес механизма привода агрегатов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 5. С. 38–43.
5. Дашенко А.И., Гладков В.И., Елхов П.Е. и др. Технология двигателестроения. М.: МГТУ МАМИ, 2001. 496 с.
6. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
7. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. М.: Машиностроение, 2004. 256 с.



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.785:621.923

В.З. Зверовщикова, В.А. Игонин, А.В. Соколов
(Пензенский государственный университет)
E-mail: Lexus-cokol@yandex.ru

Новая технология упрочнения пластин и шлифования борированных поверхностей алмазными кругами при восстановлении штампов для прессования керамических материалов

Описан новый способ упрочнения поверхностного слоя пластин штампов для прессования керамических материалов. Предложена эффективная технология электроэрозионного шлифования пластин после износа алмазными кругами. Определены необходимые параметры электрических импульсов для повышения эффективности электроэрозионного шлифования.

Ключевые слова: диффузионное порошковое борирование, износостойкость, алмазный шлифовальный круг, шлифование, энергия импульса, электрический разряд.

A new method of hardening the surface layer of plates of dies for pressing ceramic materials is described and an effective technology of electroerosive grinding of outworn plates by diamond wheels is proposed. The necessary parameters of electric pulses for efficiency increasing of the process of electroerosive grinding are defined.

Keywords: diffusion powder boriding, resistance, diamond grinding wheel, grinding, pulse energy, electric discharge.

Повышение качества изделий и долговечности технологического оборудования неразрывно связано с созданием новых и совершенствованием известных способов повышения износостойкости деталей машин и механизмов, а также с обеспечением возможности эффективного восстановления исходных параметров рабочих поверхностей деталей после выработки ими ресурса для повторного использования.

Эксплуатационные характеристики многих деталей строительных, дорожных и сельскохозяйственных машин, прессового оборудования по производству керамических изделий, работающих в технологических средах, содержащих абразивные частицы, лимитирует, главным образом, абразивный износ рабочих поверхностей [1]. Для уменьшения абразивного износа и сохранения прочностных свойств в большинстве случаев технологическими методами обеспечивают высокую поверхностную твердость деталей путем изменения химического состава стали только в поверхностных слоях, используя химико-термическую обработку.

В современном машиностроении используют различные технологические методы упрочнения поверхностей, позволяющие повысить эксплуатационные свойства деталей. Одним из эффективных способов является упрочнение поверхностных слоев металла диффузионным порошковым борированием [2].

Цель исследования — повышение долговечности стальных пластин штампов путем упрочнения рабочих поверхностей борированием и электроэрозионного шлифования борированного слоя алмазными кругами для восстановления пластин после износа.

Анализ опыта применения порошковых насыщающих сред на основе карбида бора, наполнителей (оксида алюминия или железной окалины) и галогенных соединений щелочноземельных металлов в качестве активаторов показывает, что существенными недостатками этих рабочих сред для поверхностного химико-термического упрочнения сталей являются необходимость герметизации контейнеров с борлируемыми деталями плавкими затворами, недостаточная скорость насыщения и быстрое снижение насыщающей способности смеси при повторном использовании.

Для устранения указанных недостатков был предложен новый порошкообразный состав для борирования стальных деталей [3], содержащий карбид бора ($B_4C = 50\%$), активатор — фтористый натрий ($NaF = 5\%$), инертную добавку (38%), состоящую из высокоглиноземистого коррозионно-стойкого цемента ВКГЦ-75-0,5 (25%) и окалины Fe_2O_3 (75%), а также древесный угольный (ДУ) карбюризатор (7%) в качестве углеродосодержащего вещества.

Для обеспечения диффузии и повышения скорости диффузионного насыщения поверхности стальных пластин бором необходимо, чтобы температура нагрева обрабатываемой поверхности и концентрация активных атомов бора в газовой среде соответствовали установленным нормам. Диффузия возможна, если атомы диффундирующего бора способны растворяться при заданной температуре в основном металле, который по мере насыщения диффундирующими элементами приобретает новый химический состав и новые свойства.

Введение в состав борсодержащей смеси цемента ВКГЦ-75-0,5 повышает ее технологические свойства путем предохранения смеси от спекания и предотвращения налипания ее на поверхности борлируемых пластин. Порошкообразный ДУ-карбюризатор обеспечивает стабильное образование газовой фазы CO_2 при неоднократном использовании смеси, предохраняет ее от окисления, интенсифицирует доставку бора к поверхности детали и позволяет сохранить высокую насыщающую способность смеси.

Диффузионное борирование предлагается проводить следующим образом. Пластины штампов и экспериментальные образцы, предварительно очищенные от ржавчины и загрязнений, укладывают в контейнер, пересыпают борсодержащей порошковой смесью и закрывают крышкой. Контейнер помещают в печь и выдерживают при температуре $950\text{ }^{\circ}C$ в течение 6 ч. После насыщения поверхности пластин бором контейнер извлекают из печи, промывают пластины водой, а образцы исследуют.

Для оценки стойкости смеси новую партию пластин укладывают в контейнер, засыпают смесью и повторно проводят насыщение. О потере насыщающей способности смеси свидетельствует уменьшение глубины упрочненного слоя в экспериментальных образцах, изготовленных из материала пластин и помещенных с ними в контейнер.

В табл. 1 приведены результаты исследования изменения глубины упрочненного диффузионного слоя методом косых шлифов на приборе ПМТ-3 при неоднократном использовании смеси известного и предложенного составов. Исследования проводили для пластин, изготовленных из конструкционной стали 20 при температуре борирования $(950\pm 10)\text{ }^{\circ}C$ и времени выдержки в течение 6 ч.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что предлагаемый состав борсодержащей смеси позволяет получить стабильный по глубине упрочненный слой при многократном использовании смеси без применения герметичных контейнеров в условиях окислительной атмосферы печи. Уменьшение глубины упрочненного слоя при многократном бор-

Таблица 1

Изменение глубины упрочненного слоя при неоднократном использовании порошковой смеси

Кратность использования борсодержащей смеси, раз	Глубина борированного слоя, мкм	
	Известный состав (герметичный контейнер) (± 1)	Предлагаемый состав (без герметизации контейнера) (± 1)
1	150	170
2	135	160
3	120	145
4	80	135

ировании в известном составе смеси составило 70 мкм, а в предлагаемом – лишь 35 мкм.

Установлено [4], что наибольшей износостойкостью в условиях интенсивного абразивного износа обладают поверхностные слои, состоящие из двух фаз боридов FeB и Fe_2B (рис. 1, 2), микротвердость которых достигает 12...17 и 18...23 ГПа соответственно.

Рекомендуется ограничивать глубину диффузионного насыщения поверхностного слоя величиной 0,1...0,2 мм для избежания возможных дефектов в виде трещин, сколов и отслаивания металла, обусловленные возникновением остаточных напряжений [2].

Исследование влияния основных технологических факторов (концентрации карбида бора (B_4C) и ДУ-карбюризатора в порошковой смеси, а также времени t диффузии бора) на микротвердость H_{μ} поверхности и глубину h диффузионного борированного слоя было выполнено по методике многофакторного

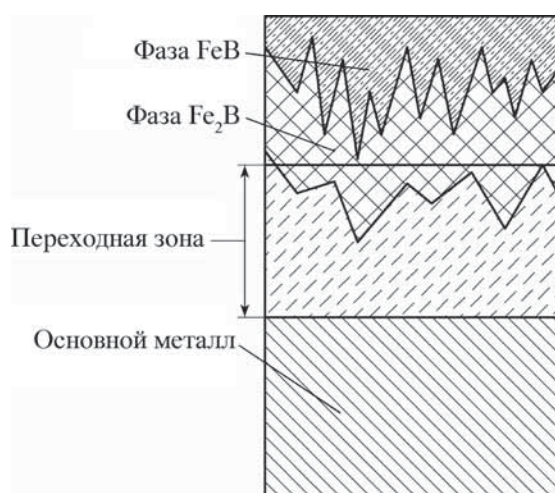


Рис. 1. Схема микроструктуры борированного слоя

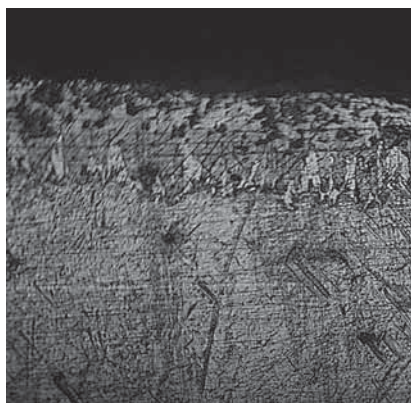


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после порошкового борирования (×200) (цветное травление)

планирования, что позволило получить математические модели в виде

$$h = -8,75 - 32V_4C + 10ДУ - 23,75t - 0,25V_4C \cdot ДУ + 0,625V_4C \cdot t;$$

$$H_\mu = -3,62 + 0,392V_4C + 1,308ДУ + 2,015t - 0,0304V_4C \cdot ДУ - 0,176ДУ \cdot t - 0,038V_4C \cdot t + 0,0038V_4C \cdot ДУ \cdot t.$$

Проверка полученных моделей по критерию Фишера подтвердила их адекватность с доверительной вероятностью 95 %.

Результаты исследований показали, что стабильный двухфазный упрочненный слой образуется при борировании пластин из стали 20 с предварительной цементацией в порошке следующего состава:

$$50\% V_4C + 5\% NaF + 7\% ДУ + 38\% (75\% Fe_3O_4 + 25\% ВГКЦ - 75 - 0,5).$$

Температура диффузионного насыщения составила 950 °С, а продолжительность процесса 6 ч. Толщина упрочненного слоя при этом достигает 135...170 мкм, а микротвердость поверхности — 17,5...18,5 ГПа.

Большое влияние на износостойкость деталей оказывает шероховатость рабочих поверхностей. Поскольку упрочнение пластин штампов диффузионным борированием является, как правило, финишной операцией, то были выполнены исследования влияния процесса борирования на изменение шероховатости поверхности пластин. На рис. 3 приведена диаграмма изменения параметра шероховатости Ra до и после борирования (время борирования $t = 6$ ч, температура борирования 950 °С). На рис. 4 представлены профилограммы этих поверхностей. Ниже даны параметры шероховатости поверхностей:

до борирования:
 $Ra = 0,485$ мкм; $R_{max} = 2,857$ мкм; $Rz = 2,339$ мкм; $Sm = 87,75$ мкм; $S = 20,42$ мкм.

$p, \%$	5	10	15	20	25	30
$tp, \%$	0,0	2,3	3,9	7,0	9,5	18,0
$p, \%$	40	50	60	70	80	90
$tp, \%$	41,5	62,9	71,1	83,0	92,5	96,4

после борирования:

$Ra = 0,500$ мкм; $R_{max} = 3,214$ мкм; $Rz = 2,583$ мкм; $Sm = 137,50$ мкм; $S = 16,40$ мкм.

$p, \%$	5	10	15	20	25	30
$tp, \%$	0,0	1,0	2,8	5,5	10,1	15,6
$p, \%$	40	50	60	70	80	90
$tp, \%$	31,1	43,9	64,3	84,7	94,8	99,0

Полученные результаты свидетельствуют о незначительном изменении параметра шероховатости Ra поверхности. Поэтому необходимая шероховатость поверхности пластин может быть обеспечена до химико-термической операции упрочнения порошковым борированием.

При этом отмечается некоторое увеличение размеров пластин штампов для формования керамических и силикатных изделий (кирпича), причем при глубине борированного слоя 0,15 мм присоединительные размеры пластин увеличились на $(0,07 \pm 0,001)$ мм, а с возрастанием глубины слоя до 0,18 мм — на $(0,095 \pm 0,001)$ мм. Таким образом, величина приращения размеров зависит от глубины борированного слоя, что необходимо учитывать при регламентировании технологических режимов упрочнения пластин штампов.

Результаты исследования влияния эксплуатационных факторов на износостойкость пластин штампов (рис. 5, 6) показали, что наиболее значимыми факторами, влияющими на износ поверхностного слоя пластин после химико-термической обработки, являются относительная скорость v , м/с, движения пластин

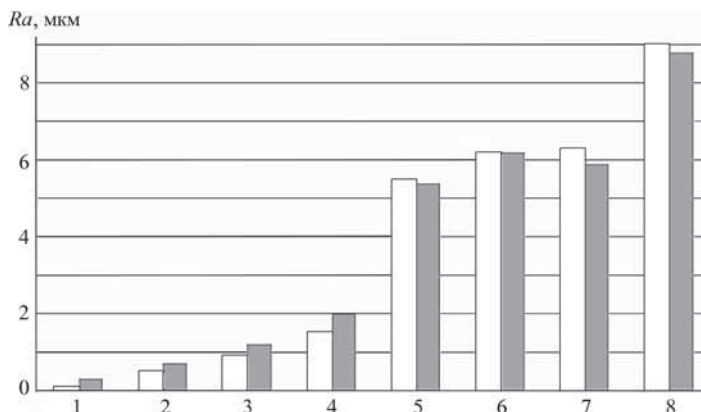


Рис. 3. Диаграмма изменения параметра шероховатости поверхности до (□) и после (■) борирования

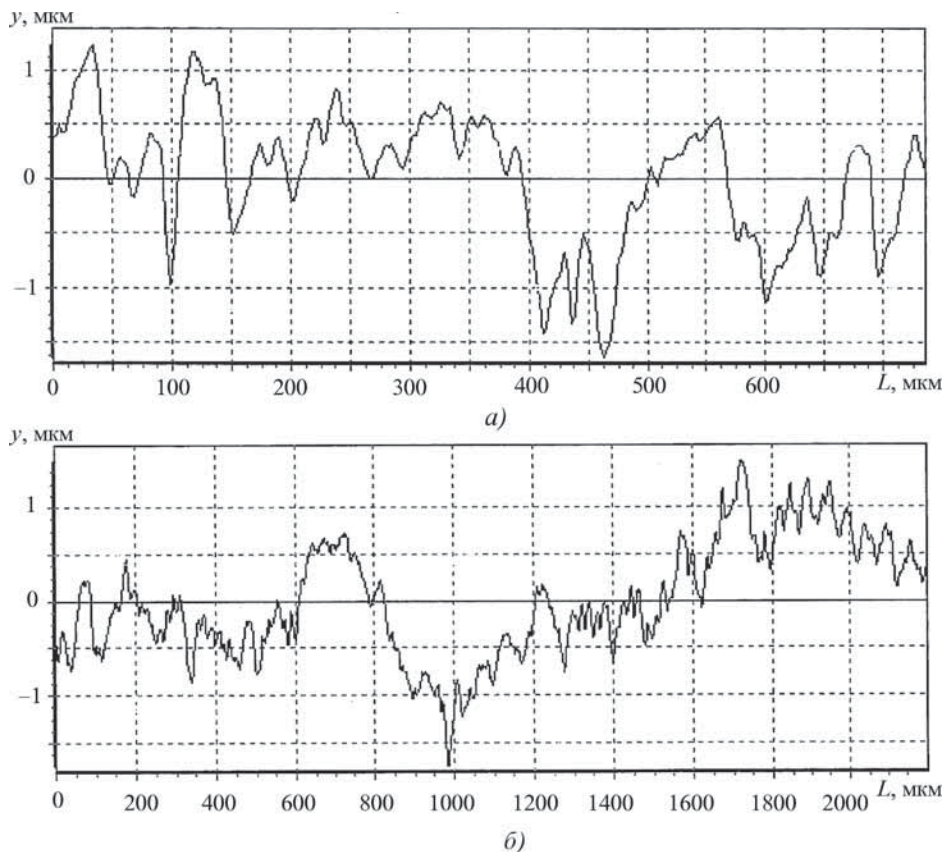


Рис. 4. Профилограммы поверхности:
а – исходная; б – после борирования ($t = 6$ ч)

и уплотняемой мелкодисперсной смеси, размеры z , мм, абразивных частиц, а также контактное давление p , МПа. Для сравнения испытывали образцы, упрочненные борированием и цементацией.

Износ Δu , мг/см², определяли путем взвешивания образцов пластин до и после износа на машине трения, что позволило прогнозировать долговечность работы пластин штампов для различных режимов пресования.

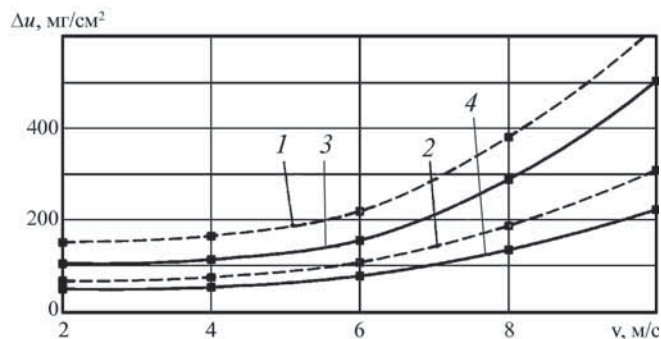


Рис. 5. Зависимости удельного износа упрочненной поверхности пластин от скорости перемещения и времени износа 10 (2, 4) 50 (1, 3) мин ($p = 0,8$ МПа; $z = 0,8$ мм):
1, 3 – после цементации; 2, 4 – после борирования

Проведенные экспериментальные исследования показали, что износостойкость пластин, подвергнутых борированию, в 2–2,5 раза выше, чем образцов из цементованной конструкционной стали 20.

Предельно допустимый износ пластин определяли после пресования керамического кирпича в производственных условиях методом полусухого пресования в количестве 650...700 тыс. шт.

Для этого измеряли износ на 50 торцевых и 50 боковых пластинах штампов. Измерения производили индикатором (цена деления 0,001 мм) в узлах сетки, нанесенной в рабочей зоне пластин до и после износа. При измерении учитывали погрешности изготовления. На основе статистической обработки результатов измерений были построены топографии поверхностей боковых и торцевых борированных пластин штампов после износа (рис. 7).

Анализ полученных топографий поверхностей свидетельствует, что износ боковых пластин штампов (см. рис. 7, а) существенно больше, чем износ торцевых (см. рис. 7, б). Аналогично были выполнены исследования топографии поверхностей после износа пластин штампов, изготовленных по заводской технологии путем цементации поверхности с закалкой.

В работе [2] установлено, что высокое боковое давление, возникающее при взаимодействии боковых

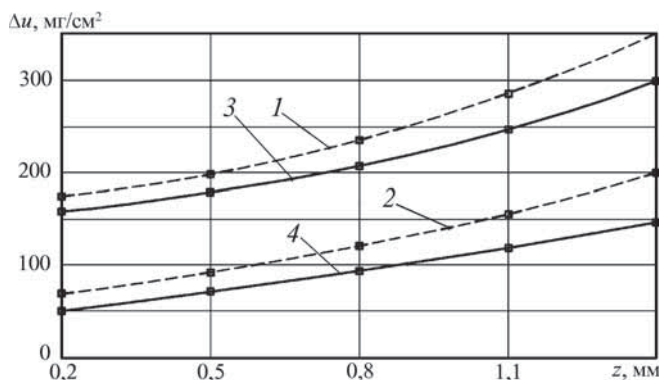


Рис. 6. Зависимости удельного износа упрочненной поверхности пластин от зернистости абразивных частиц и контактного давления 0,8 (3, 4) и 1,2 (1, 2) МПа ($n = 350$ мин⁻¹; $t = 30$ мин):
1, 3 – цементованные образцы; 2, 4 – борированные образцы

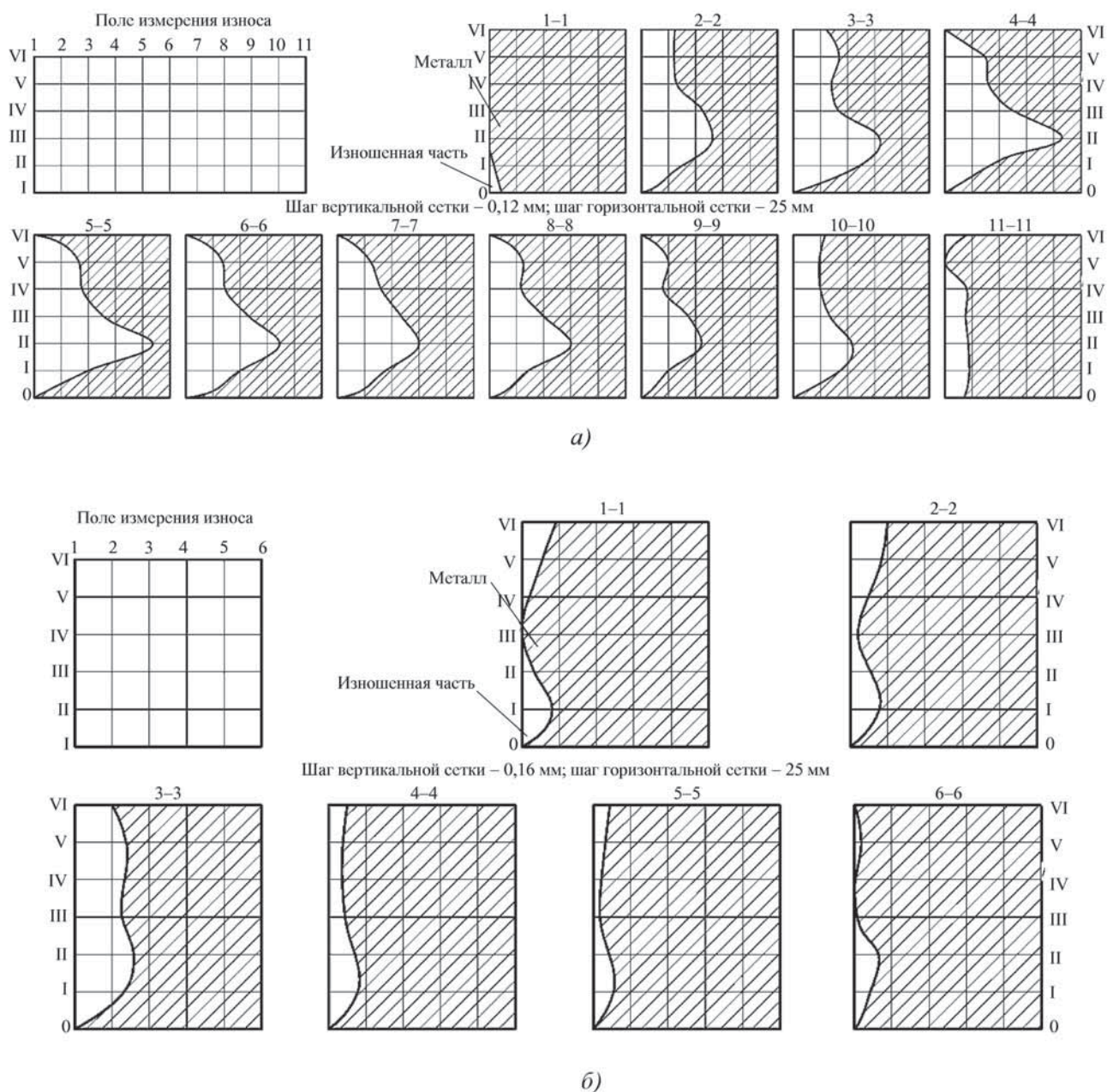


Рис. 7. Топография поверхности боковых (а) и торцевых (б) пластин штампов после износа

и торцевых пластин штампов с абразивной массой при прессовании керамических изделий, приводит к истиранию металла и микрорезанию поверхности острыми выступами абразивных частиц, что сопровождается интенсивным абразивным износом рабочих поверхностей пластин.

Для увеличения долговечности борированных пластин штампов предлагается изношенные поверхности пластин шлифовать алмазными кругами на металлической связке до полного удаления участков износа и нивелирования поверхности, а затем повторно их борировать. Шлифование борированных пластин

абразивными кругами при этом оказывается не эффективным, поскольку микротвердость поверхности достигает 18 ГПа, что приводит к интенсивному износу кругов.

В процессе шлифования алмазными кругами происходит "засаливание" рабочей поверхности. Для сохранения постоянства режущей способности круга необходимо эффективно удалять продукты шлифования из межзернового пространства. Это может быть достигнуто наложением электрических разрядов, для стабилизации режущих свойств круга – за счет "обнажения" алмазных зерен и устранения "засаливания" [5].

Высокие режущие свойства алмазного круга, обеспечиваемые при шлифовании с наложением электрических разрядов, позволяют проводить эффективную обработку материалов при меньших значениях зернистости, чем это рекомендуется при обычном алмазном шлифовании [6], что позволяет уменьшить шероховатость обработанной поверхности пластин.

Наиболее рациональные условия шлифования с наложением электрических разрядов, обеспечивающие непрерывное вскрытие зерен в процессе обработки и стабилизацию режущих свойств алмазного круга, достигаются в том случае, когда электрические режимы процесса согласованы с параметрами круга, характеристикой алмазосодержащего слоя и параметрами электрода-инструмента.

Одним из основных режимов при электроэрозионном шлифовании является напряжение U , которое подается на круг и электрод-инструмент. Для уменьшения воздействия электрических разрядов на материал связки шлифовального круга напряжение U рекомендуется определять по следующей эмпирической зависимости [5]:

$$U = k_c \frac{\pi D_{кр} \Delta}{l_3 Z \eta \beta} \left(1 - \frac{K}{400} \right),$$

где k_c – коэффициент, зависящий от типа связки;
 $D_{кр}$ – наружный диаметр шлифовального круга;
 $\Delta = (4...7) \% Z_{max}$ – толщина алмазоносного слоя, удаляемого с поверхности круга при однократном воздействии, за один двойной ход стола;
 l_3 – длина правящего электрода-инструмента;
 Z – число алмазных зерен, приходящихся на 1 мм^2 рабочей поверхности круга;
 η – коэффициент, определяющий число зерен, участвующих в резании, составляющий $10...12 \%$ от общего числа зерен, находящихся на поверхности круга;
 $\beta = 0,85...0,95$ – коэффициент, учитывающий вероятность возникновения электрических разрядов при стружечном замыкании;

Таблица 2

Рекомендуемые значения напряжения при алмазном электроэрозионном шлифовании

Зернистость алмазов	Напряжение U , В, при концентрации алмазов в круге, %		
	50	100	200
63/50	10	7	6
100/80	13	10	7
160/125	14	12	10
250/200	18	14	12

K – концентрация алмазов в алмазоносном слое круга.

В табл. 2 приведены рекомендуемые значения напряжения для алмазного шлифования кругами различной зернистости на металлической связке М2-01.

В качестве смазочно-охлаждающих жидкостей при алмазном шлифовании борированных пластин рекомендуется использовать жидкости на водной основе, а также смесь раствора кальцинированной соды концентрацией $1...3 \%$ с техническим глицерином. Последние применяются для улучшения отвода тепла из зоны резания и достижения меньшей шероховатости обработанной поверхности с параметрами $Ra = 0,2...0,4 \text{ мкм}$.

Выводы

Таким образом, предложенный новый состав порошковой смеси для диффузионного борирования обладает более высокой насыщающей способностью и позволяет увеличить глубину диффузионного слоя на $20...35 \text{ мкм}$ при многократном использовании смеси, а также снизить трудоемкость процесса борирования за счет использования атмосферы печи без герметизации контейнеров с деталями.

Новый способ восстановления поверхности изношенных пластин штампов шлифованием алмазными кругами на металлической связке с наложением электрических разрядов позволяет эффективно удалить изношенные участки поверхности пластин для их повторного борирования.

Результатом внедрения новой технологии явилось снижение себестоимости керамических изделий и существенное повышение долговечности пластин штампов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Работоспособность** деталей машин в условиях абразивного изнашивания / В.Н. Ткачев. М.: Машиностроение, 1995. 366 с.
2. **Повышение** долговечности борированных пластин штампов после абразивного износа / В.З. Зверовщиков, А.Н. Машков, В.А. Игонин // Новые промышленные технологии. 2010. № 4. С. 24–26.
3. **Пат. 2413034 РФ.** Порошкообразный состав для борирования стальных изделий / В.А. Игонин, А.И. Игонин, В.О. Соколов и др.; № 2009149278/02; заявл. 28.12.09, Бюл. № 6.
4. **Поляк М.С.** Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2-х т. Т. 2. М.: "Л.В.М.–СКРИПТ", "Машиностроение", 1995. 688 с.
5. **Решение о выдаче пат.** на изобретение № 2010105449/02(007665) РФ, МПК В 23 Н 5/04, В 24 В 53/00 от 15.02.10. Способ шлифования сложнопрофильных поверхностей деталей / В.О. Соколов, В.З. Зверовщиков, А.В. Соколов, А.Н. Машков, С.В. Ломакин, П.А. Гурин.
6. **Дорофеев В.Д., Кольчугин С.Ф., Фунтов Н.В.** Профильное алмазное шлифование неметаллических материалов с электроэрозионной коррекцией круга // Электрофизико-химические и комбинированные методы обработки металлов: материалы конф. Пенза: Пенз. дом науч.-техн. пропаганды, 1984.



УДК 669.018

В.Н. Гадалов, Р.Е. Абашкин, Т.Н. Розина, Е.В. Агеев, В.В. Горецкий
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)
E-mail: gadalov_vn@mail.ru

Восстановление рабочих органов почвообрабатывающей и посевной сельскохозяйственной техники

Рассмотрены методы, повышающие долговечность и восстанавливающие рабочие органы (диски) почвообрабатывающих и посевных машин.

Ключевые слова: дисковый рабочий орган, электроискровое легирование, твердый сплав, индукционный нагрев, самозатачивание.

The methods that increase the durability and reducing the working bodies (disks), tillage and seeding machines.

Keywords: disk working body, electrospark alloying, hard alloy, induction heating, self-sharpening.

В настоящее время в Курской губернии и других регионах РФ существует проблема – недостаточное количество почвообрабатывающих и посевных машин. В связи с этим сроки обработки почвы и посева затягиваются, а значительная часть посевных работ выполняется не в агротехнические сроки.

У данных сельскохозяйственных машин наиболее интенсивно изнашиваются рабочие органы, в частности диски, имеющие сравнительно небольшой ресурс работы. Например, ресурс работы дисков сошников в пересчете на одну сеялку составляет 150...400 га в зависимости от почвенных условий. Наиболее интенсивное изнашивание дисков происходит на песчаных и супесчаных, а также щебнистых и каменистых почвах.

В связи с этим выработка мер, направленных на повышение ресурса работы рабочих органов сеялок, является актуальной задачей, требующей неотложного решения [1].

В данной статье рассмотрены методы повышения ресурса работы (долговечности) дисковых рабочих органов.

Диски, изношенные до предельного диаметра, подлежат восстановлению, а не дошедшие до предельного размера, затачиваются на ближайший ремонтный размер. Так, например, в хозяйствах изношенные диски сошников затачиваются на следующие ремонтные размеры: (342+0,5); (334+0,5); (326+0,5) мм.

Недостаток такой технологии заключается в том, что при этом допускается слишком большой диапазон между соседними ремонтными размерами, а это

приводит к значительному снижению ресурса рабочих органов.

Авторами данной статьи предлагается ряд мероприятий по повышению ресурса дисковых рабочих органов с учетом погрешности установки диска при заточке.

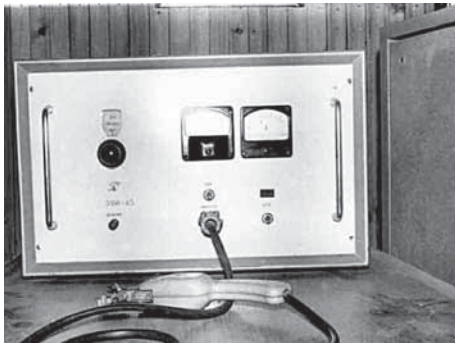
При этом рекомендуемое количество ремонтных размеров дисковых рабочих органов колеблется от 6 до 8: для дисков сошников – шесть ((346+0,5); (338+0,5); (334+0,5); (330+0,5); (326+0,5) мм), для дисков лушителей – восемь ((445,77+1); (441,3+1); (437,3+1); (433,1+1); (428,9+1); (424,7+1); (420,5+1); (416,3+1) мм).

Дисковые рабочие органы, изношенные до предельного диаметра, могут быть восстановлены до номинального размера на предприятиях технического сервиса следующим образом. После очистки и дефектации изношенные диски сошника, имеющие диаметры менее 326 и более 310 мм, а диски лушителя – менее 416 и более 400 мм, обтачивают на токарном станке, диски сошника до диаметра 310 мм, а диски лушителя – до 400 мм с оставлением фаски соответственно $0,7 \times 45^\circ$ и $2,2 \times 45^\circ$.

Из листовой стали изготавливают пластины в виде 1/3 части кольца шириной 20 мм для диска сошника и 1/4 части кольца шириной 25 мм для диска лушителя.

Изготовленные пластины и обточенные диски подвергаются пескоструйной обработке.

Далее диск и пластины прижимаются в специальном приспособлении и свариваются между собой. Сварка осуществляется в среде углекислого газа сва-



Установка ЭФИ-45

рочной проволокой Св-08Г2С или другой марки диаметром 0,8...1,2 мм. Режимы сварки выбирают в зависимости от диаметра сварочной проволоки и необходимой производительности процесса.

Восстановленные диски зажимают в оправку и затачивают на токарном станке или на специальном приспособлении для заточки дисков согласно техническим требованиям. Снимают сварочный шов, если он выступает над поверхностью диска более чем на 1 мм.

Для повышения ресурса дисковых рабочих органов следует стремиться к обеспечению условия самозатачивания их лезвий. Для этого лезвия дисковых рабочих органов следует упрочнять методом *электроискрового легирования* (ЭИЛ). ЭИЛ осуществляется на установке ЭФИ-45 (рисунок), разработанной специально для применения в "любых" условиях, где есть возможность подключения к сети переменного тока с напряжением 25...220 В.

ЭИЛ осуществляют твердыми сплавами ТК, ВК и др. Например, ВК6М легируют порошковыми проволоками на железной и никелевой основах марок ПГ-ФБХ6-2 и ПГН-10-01 соответственно [2].

ЭИЛ является перспективным направлением в области упрочнения поверхностей и представляет собой совокупность эрозионного, термического и термохимического процессов.

При нанесении покрытий в подложке сохраняется исходный фазовый состав, а на поверхности формируется так называемый "белый" слой, имеющий сложный состав.

При помощи ЭИЛ упрочняется та грань лезвия, которая подвергается наименьшему изнашиванию. Если это условие не будет выполняться, то интенсив-

ность изнашивания твердого и мягкого слоев может выровняться, что приведет к быстрому затуплению лезвия. Выбор грани лезвия, которая должна упрочняться, зависит от почвенных условий, где будет применяться рабочий орган. При этом у ротационных рабочих органов плугов и плоскорезов, используемых на песчаных и супесчаных почвах, рекомендуется упрочнять верхнюю, а на тяжелых глинистых и суглинистых почвах – нижнюю грань лезвия. Упрочнение лезвия дисковых рабочих органов у дисков сошников проводится с внутренней стороны, а у дисков шпильников и дисков борон – с передней стороны.

Устройство и порядок работы на установках типа ЭФИ и "Элитрон" с ручным вибратором. В настоящее время в промышленности нашли применение установки с ручным вибратором "Элитрон 12, 20, 21, 22, 23, 50 и 52" и их аналог ЭФИ-45 (см. рисунок).

Установки состоят из блока питания, электромагнитного вибратора и пульта управления.

Авторами установлена возможность дальнейшего совершенствования технологии восстановления и повышения ресурса дисковых рабочих органов путем их индукционного нагрева и заострения лезвия деформированием. При этом восстановление угла заточки осуществляется без снятия металла, во время заострения одновременно происходят его упрочнение за счет пластического деформирования диска роликами и закалка лезвия после нагрева. Предлагаемая технология позволяет повысить ресурс дисковых рабочих органов в 2–2,5 раза, она может быть применена на предприятиях технического сервиса с соответствующим оборудованием.

Таким образом, ресурс дисковых рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин можно существенно повысить совершенствованием технологии восстановления изношенных дисков, а также обеспечением условия самозатачивания рабочих органов путем упрочнения их режущей части.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г. Новые материалы, прогрессивные ресурсосберегающие технологии в машиностроении // *Материалы и упрочняющие технологии* – 2008: сб. материалов XV Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ, 2008. С. 9–26.
2. Гадалов В.Н., Болдырев Ю.В., Горякин И.М. и др. *Материалы для электрофизического нанесения покрытий* // *Материалы и упрочняющие технологии* – 2007. Курск: КГТУ, 2007. С. 55–73.

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 Жиркина С.А. Корректоры Сажина Л.И., Солюшкина Л.Е.
 Сдано в набор 02.03.12 г. Подписано в печать 02.05.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,65. Заказ 236. Свободная цена.
 Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".
 Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15