

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 11 (71)
ноябрь
2010

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

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.Ю. ЗАМЯТИН

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.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован
в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Гаврилова Т.М., Пегашкин В.Ф., Балдин Е.В., Якимов М.А. Оценка скорости деформации при ультразвуковом раскатывании 3

Губанов В.Ф. Параметры шероховатости выглаженных поверхностей 6

Тамаркин М.А., Проскорякова Ю.А. Методика выбора рациональных режимов технологических процессов центробежной обработки 9

Щеголев Н.Г. Исследование сил деформирования, создаваемых инерционным рычажным раскатывающим устройством 14



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Ковалевская Ж.Г., Клименов В.А., Бутов В.Г., Жуков А.П., Зайцев К.В. Численное описание процесса кристаллизации газотермически напыленного материала на основу с разным микрорельефом 18

Рощин М.Н., Алисин В.В., Владиславлев А.А., Петрова И.М. Оценка сопротивления усталости стали 30ХГСА после лазерной наплавки металлокерамического покрытия с ультратонкой упрочняющей фазой 27

Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Злобин С.Б. Применение детонационного напыления для формирования градиентных покрытий керамика–металл 30



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Марфицын В.В. Поверхностное упрочнение ферритно-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом хрома 36



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Кадырметов А.М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров 41

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

№ 11 (71)
November
2010

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. BEZYAZCHNYI

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

Chairman Assistants:
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN

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

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV

S.N. GRIGORIEV
V.Yu. ZAMYATIN
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. SUHOCEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
E.P. ZEMSKOVA
T.V. PARAYSKAYA

CONTENTS



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Gavrilova T.M., Pegashkin V.F., Baldin E.V., Yakimov M.A.** Estimation of deformation speed at ultrasonic plastic deformation 3
- Gubanov V.F.** Parameters of a roughness of the burnished surfaces 6
- Tamarkin M.A., Proskoryakova Yu.A.** Method of a choice of rational modes of technological processes of centrifugal processing 9
- Sheogolev N.G.** Research of efforts of deformation of created by inertial lever rolling device 14



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

- Kovalevskaya Zh.G., Klimenov V.A., Butov V.G., Zhukov A.P., Zaitzev K.V.** Numerical simulation of the crystallization process of gas-thermal material sprayed on a substrate with various microrelief 18
- Roschin M.N., Alisin V.V., Vladislavlev A.A., Petrova I.M.** Estimation of fatigue strength of steel 30XГСА covered by laser cermet coating with ultrafine strengthening phase 27
- Shtertser A.A., Ulianitsky V.Yu., Zlobin S.B.** Use of detonation spraying for formation of gradient ceramic-metal coatings 30



CHEMICAL, CHEMICO-TERMALAND AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

- Gurevich Yu.G., Frolov V.A., Marfitsyn V.V.** Hardfacing of hypoppearlitic gray cast iron by liaison with chrome oxide 36



PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

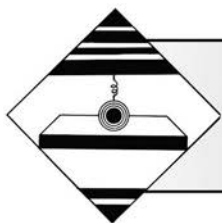
- Kadymetov A.M.** The equipment for the plasma-spraying and coat-strengthening processes with electric parameters modulation 41

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

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



УДК 621.778.4.07:534.8

Т.М. Гаврилова, В.Ф. Пегашкин, Е.В. Балдин, М.А. Якимов
(ГОУ ВПО "Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина",
Нижнетагильский технологический институт (филиал))
E-mail: Gavrilova-TM@ntiustu.ru

Оценка скорости деформации при ультразвуковом раскатывании

Предложена новая модель для оценки скорости деформации на основе расчета объема вытесненного материала при раскатывании с введением в зону деформации крутильных ультразвуковых колебаний.

Ключевые слова: ультразвуковое раскатывание, ультразвуковые крутильные колебания, скорость деформации, расчет скорости деформации при ультразвуковом раскатывании.

New model for the estimation of the speed of distortion on the base of calculation of the volume of displaced material, rolled with introduction it into the zone of distortion of ultrasonic twisting fluctuations is given.

Keywords: ultrasonic rolling, ultrasonic twisting fluctuations, speed of deformation, account of deformation speed at ultrasonic rolling.

Введение

Одним из параметров, характеризующих импульсные методы обработки, к которым относится ультразвуковое раскатывание, является скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ [1]. В работе [2] отмечено, что именно скорость деформации определяет эффективность импульсных методов *поверхностного пластического деформирования* (ППД). Однако $\dot{\varepsilon}$ можно определить только в том случае, если известна схема деформирования, направление деформирующей силы и имеется возможность оценить перемещение (течение) металла при обработке.

В зависимости от направления *ультразвуковых колебаний* (УЗК), вводимых в очаг деформации, будет существенно изменяться схема деформирования материала, а следовательно, и все остальные параметры процесса. Поэтому актуальна разработка различных методик определения скорости деформации для многообразных условий ультразвукового ППД.

Скорость деформации определяют по соотношению [1, 2]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \quad (1)$$

где ε — степень деформации;
 τ — время деформации.

Применительно к ультразвуковой обработке для определения $\dot{\varepsilon}$ предложена зависимость [2]

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{(l-a)}{a\tau}, \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\text{ср}}$ — средняя скорость деформации за период колебания деформирующего элемента;

l — длина дуги сегмента в плоскости, нормальной к обрабатываемой поверхности;

a — проекция дуги l на плоскость, перпендикулярную направлению смещения деформирующего элемента.

Однако зависимость (2) справедлива лишь тогда, когда амплитуда УЗК направлена по нормали к обрабатываемой поверхности [1]. В работе [3] проанализирован расчет скорости деформации по методике, описанной в [1], и показано, что при прочих равных условиях скорости деформаций зависят от схемы обработки и направления действия амплитуды УЗК.

Введение в зону деформации крутильных УЗК, со-общение обрабатываемой детали или инструменту вращательных и поступательных движений приводят к перемещению деформирующего элемента одновременно по трем координатным осям. В связи с этим для данного случая было предложено при расчете скорости деформации учесть изменение объемов вытесненного металла.

Методика расчета скорости деформации при ультразвуковом раскатывании

На рис. 1 представлена схема раскатывания внутренней поверхности детали с введением в зону деформации крутильных УЗК.

Схема к расчету объема вытесненного деформирующим элементом металла за четверть периода колебаний инструмента представлена на рис. 2.

При определении объемов вытесненного металла при первоначальном внедрении деформирующего элемента V_0 и металла, вытесненного за четверть периода колебаний инструмента V_ϕ , были сделаны следующие допущения:

– под действием статической нагрузки P деформирующий элемент первоначально внедрен в обрабатываемый материал на глубину h ;

– деформирующий элемент совершает рабочий ход при постоянной глубине внедрения h .

Скорость деформации при сообщении деформируемому элементу крутильных УЗК с учетом выражения (2) может быть рассчитана как

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_\phi - V_0}{V_0 \tau} \quad (3)$$

Объем вытесненного металла V_ϕ определяется по формуле

$$V_\phi = V'_\phi + V_0 = S_{к.с} l_\Sigma + V_0, \quad (4)$$

где V'_ϕ – приращенный объем (объем деформированного металла), $V'_\phi = S_{к.с} l_\Sigma$;

$S_{к.с}$ – площадь кругового сегмента в нормальном сечении деформирующего элемента;

l_Σ – относительное перемещение деформирующего элемента и детали за первую четверть периода колебаний инструмента.

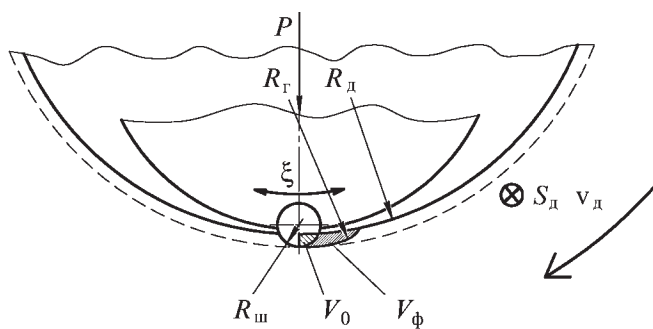


Рис. 1. Схема ультразвукового раскатывания:
 R_r, R_d – радиусы соответственно раскатной головки и обрабатываемой детали

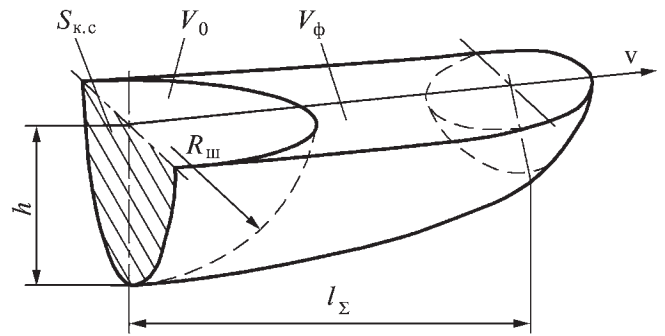


Рис. 2. Схема к расчету объема вытесненного металла за полу-период колебаний инструмента

На рис. 3 представлена схема к определению $S_{к.с}$, которая рассчитывается по формуле [4]

$$S_{к.с} = \frac{1}{2} [R_\text{ш} l - a(R_\text{ш} - h)], \quad (5)$$

где $R_\text{ш}$ – радиус деформирующего элемента-шарика;
 l – длина дуги внедрения деформирующего элемента в материал детали;

a – длина хорды, образованной при внедрении деформирующего элемента в металл обрабатываемой детали на глубину h ;

h – глубина внедрения деформирующего элемента в обрабатываемый материал.

Величины l, a определяются как [4]:

$$l = \frac{\pi \alpha R_\text{ш}}{180}; \quad (6)$$

$$a = 2\sqrt{h(2R_\text{ш} - h)}; \quad (7)$$

$$\sin \alpha/2 = \frac{a}{2R_\text{ш}}; \quad (8)$$

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{\sqrt{h(2R_\text{ш} - h)}}{R_\text{ш}}, \quad (9)$$

где α – угол раскрытия хорды.

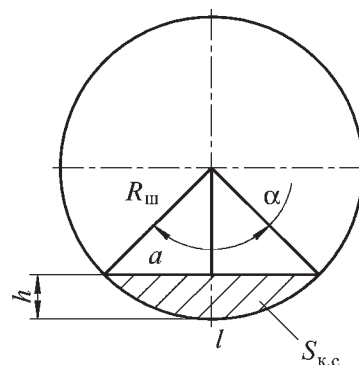


Рис. 3. Схема к определению площади $S_{к.с}$

Относительное перемещение деформирующего элемента за первую четверть периода колебаний инструмента l_{Σ} представляет собой суперпозицию движения инструмента с амплитудой УЗК ξ , вращения детали со скоростью v_d , минутной подачи детали S_d и рассчитывается по формуле

$$l_{\Sigma} = \sqrt{(\xi + \tau v_d)^2 + (\tau S_d)^2}. \quad (10)$$

Скорость вращения и минутная подача детали определяются [4]:

$$v_d = \frac{2\pi R_{ш} n}{1000}, \quad (11)$$

$$S_d = S n, \quad (12)$$

где n – частота вращения детали;

S – подача детали в долях оборотов деталей.

Объем вытесненного металла V_0 при первоначальном внедрении представляет собой 1/2 объема шарового сегмента при первоначальном внедрении деформирующего элемента на глубину h и может быть выражен формулой [4]

$$V_0 = \frac{1}{12} \pi h (3a^2 + h^2). \quad (13)$$

Время деформации (четверть периода УЗК деформирующего элемента) определяется

$$\tau = \frac{1}{4f}, \quad (14)$$

где f – частота УЗК деформирующего элемента.

Подставив соотношения (4)–(14) в выражение (3), получим модель для определения скорости деформации при сообщении деформирующему элементу крутильных УЗК

$$\dot{\epsilon} = \frac{24fR_{ш}^2 \left[\frac{\pi \arcsin \frac{\sqrt{h(2R_{ш} - h)}}{R_{ш}}}{90} - \sin \left(2 \arcsin \frac{\sqrt{h(2R_{ш} - h)}}{R_{ш}} \right) \right] \sqrt{\left(\xi + \frac{\pi n R_{ш}}{120f} \right)^2 + \left(\frac{S n}{240f} \right)^2}}{\pi h (12h(2R_{ш} - h) + h^2)}. \quad (15)$$

Результаты исследований и их обсуждение

Предлагаемая модель была применена для оценки скорости деформации $\dot{\epsilon}$ при ультразвуковом раскатывании с введением в зону деформации крутильных УЗК деталей типа кольцо из стали 45 при первоначальной глубине внедрения деформирующего элемента в обрабатываемый материал $h = 5$ мкм и варьируемых параметрах обработки (таблица). Амплитуда

Режимы обработки и результаты расчета скорости деформации при ультразвуковом раскатывании

$R_{ш}$, мм	S_d , мм/об	n , об/мин	$\dot{\epsilon}$, 10^6 , с ⁻¹
2,35	0,14	31,5	4,29
6	0,56	90	6,94

и частота УЗК составляли соответственно $\xi = 60$ мкм, $f = 18$ кГц. Результаты расчетов приведены в таблице.

Столь высокие скорости деформации, по мнению авторов, обусловлены наличием (формированием) в зоне деформации касательных и тангенциальных составляющих амплитуды УЗК за счет кинематики процесса (в частности, за счет сообщения деформируемому элементу крутильных УЗК). Расчет по модели (15) дает хороший результат сходимости полученных значений $\dot{\epsilon}$ с результатами исследований [1, 3], основанных на теоретических положениях, изложенных в [2].

Влияние скорости деформации на свойства материалов после упрочнения оказывается неоднозначным и не является одинаковым в диапазоне возможных скоростей [3].

При динамических методах упрочнения, к которым относится и ультразвуковое раскатывание, с увеличением скорости деформации характерно изменение диаграммы напряжение–деформация. Эта диаграмма отличается от обычной тем, что разница между пределом текучести и пределом прочности меньше.

Порог скорости деформации, выше которого начинается резкое увеличение предела текучести данного материала, служит границей между квазистатической и динамической деформацией. Для большинства мате-

риалов это критическое значение скорости деформации составляет $\dot{\epsilon} > 5 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^4$ [1]. При этом изменяется механизм пластической деформации. При $\dot{\epsilon}$ меньше критической происходит квазистатическая деформация, при которой наблюдается скольжение. При $\dot{\epsilon}$ больше критической совершается переход к динамической деформации двойникования.

Интервал скоростей, в котором обнаруживается заметное изменение прочностных свойств, зависит не

только от самого материала, но и от его исходной микроструктуры, а следовательно, от предварительной обработки [1]. С увеличением скорости деформации растут пределы текучести и прочности, повышается коэффициент упрочнения, наблюдаются существенные структурные изменения (полиморфные превращения, происходит фазовый переход).

Прочностные свойства железа резко повышаются за счет увеличения сопротивления решетки движению дислокаций. Для повышения прочностных свойств металлов не обязательно иметь большое число дислокаций. Важно только при любой плотности дислокаций создать условия, затрудняющие их перемещение, например, увеличить силу трения, которую необходимо преодолеть дислокации при перемещении через кристалл из одного равновесного состояния в другое.

При ультразвуковом деформировании с высокими значениями $\dot{\epsilon}$ (динамическом упрочнении) повышение скорости перемещения дислокаций приводит к увеличению силы трения, в результате чего происходит дополнительное упрочнение металла в сравнении с упрочнением без введения ультразвука в зону деформации (квазистатическим упрочнением).

Вывод

Таким образом, сообщение крутильных УЗК деформирующему элементу при раскатывании позво-

ляет достичь скоростей деформации в интервале $(4,29...6,94) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, превышающих критическое значение, при которых происходит существенное повышение прочностных свойств поверхностного слоя [5, 6] за счет протекания пластической деформации по механизму двойникования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия. 1971. 198 с.
2. Муханов И.И. Импульсно упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом: учеб. пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по применению ультразвука в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 44 с.
3. Семенов С.В. Разработка технологии безабразивной обработки ультразвукового полирования, основанной на адиабатическом сдвиге металла поверхностного слоя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук (05.02.01). М., 1994.
4. Серебrenицкий П.П. Общетехнический справочник. СПб.: Политехника, 2004. 445 с.: ил. – (Сер.: В помощь технологу-машиностроителю. Вып. 1).
5. Гаврилова Т.М. Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей после ультразвукового раскатывания // Технология машиностроения. 2008. № 8. С. 36–40.
6. Гаврилова Т.М. Оценка уровня остаточных напряжений после ультразвукового раскатывания // Технология машиностроения. 2009. № 1. С. 12–16.

УДК 621.92

В.Ф. Губанов (Курганский государственный университет)
E-mail: drviktm@kgsu.ru

Параметры шероховатости выглаженных поверхностей

Рассмотрено формирование профиля шероховатости поверхностей деталей при выглаживании. Приведена парная корреляция между параметрами шероховатости выглаженных поверхностей, показывающая важность выбора определенного диапазона режимов выглаживания. Предложена формула для оценки опорной способности шероховатости поверхности. Представлены результаты экспериментальных исследований наследственных связей между параметрами шероховатости исходной и выглаженной поверхности. Установлено, что для гарантированного обеспечения заданного профиля шероховатости поверхности при выглаживании необходимо выявить численные значения наследственных связей для каждого обрабатываемого материала детали и затем экспериментально подобрать режимы обработки, варьируя преимущественно скоростью выглаживания.

Ключевые слова: выглаживание, шероховатость, корреляция, режимы, наследственность.

Formation of a profile of a roughness of details surfaces at burnishing is considered. Pair correlation between parameters of a roughness of the burnished surfaces, showing importance of a choice of a certain range of modes of burnishing is resulted. The formula for an estimation of basic ability of a roughness of a surface is offered. Results of experimental researches of hereditary communications between parameters of the initial and burnished roughness of a surface are presented. It is established, that for the guaranteed maintenance of the set profile of a roughness of a surface at burnishing it is necessary to reveal numerical values of hereditary communications for each processed material of a detail and then experimentally to pick up processing modes varying mainly in the speed of burnishing.

Keywords: burnishing, roughness, correlation, modes of operation, heredity.

Выглаживание, как известно, представляет собой способ отделочно-упрочняющей обработки ответственных поверхностей деталей, который заключается в

деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней индентором [1]. В результате прикладываемого давления происходит значительное уп-

рочнение поверхностных слоев детали и образование благоприятного, с позиции износостойкости, сглаженного профиля шероховатости поверхности $Ra = 0,087$ мкм (рис. 1).

При выглаживании достижение требуемого упрочнения поверхностных слоев детали не представляет особой сложности, а формирование профиля шероховатости поверхности еще недостаточно изучено, поскольку в большинстве случаев регламентируется только среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности. Очевидно, что с одинаковым параметром Ra возможно получение различных профилей шероховатости, которые будут отличаться по своим эксплуатационным свойствам. Поэтому гарантированное обеспечение заданного профиля шероховатости поверхности представляет собой важную как научную, так и практическую задачу.

Из параметров профиля шероховатости поверхностей деталей такие параметры, как Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; Sm – средний шаг неровностей профиля; S – средний шаг местных выступов профиля; Rp – высота сглаживания профиля шероховатости; tp – относительная опорная длина профиля на уровне p ; $Rmax$ – наибольшая высота профиля, оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства деталей [2].

Экспериментальные исследования профилограмм выглаженных поверхностей [3] показывают, что обеспечение заданного значения Ra автоматически приводит к получению заданных значений $Rmax$ и Rp (табл. 1). Это означает также, что обеспечение заданного значения Ra автоматически не обеспечит, в большинстве случаев, такие важные составляющие профиля шероховатости, как Sm , tp , S .

Учитывая вышесказанное, в каждом конкретном случае необходимо экспериментально искать определенный диапазон режимов обработки, в котором гарантированно обеспечиваются заданные значения параметров шероховатости выглаженной поверхности. При этом в качестве варьирующего фактора целесообразно выбирать скорость выглаживания (см. табл. 1).

Многочисленными исследованиями установлено, что для многих эксплуатационных свойств деталей машин боль-

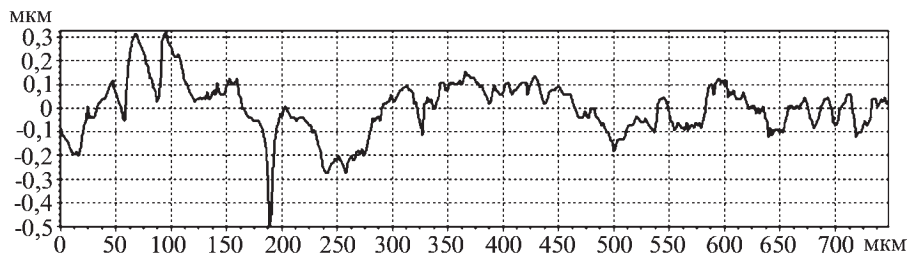


Рис. 1. Профилограмма выглаженной поверхности детали

шое значение имеет опорная способность шероховатости поверхности [4].

Для оценки опорной способности шероховатости поверхности можно использовать коэффициент $\chi_{ш}$, характеризующий среднюю опорную способность шероховатости поверхности и рассчитывающийся через стандартизованные параметры шероховатости поверхности по следующей формуле:

$$\chi_{ш} = \frac{Ra}{1000Smt_{cp}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где t_{cp} – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, %.

Понятно, что при меньших значениях $\chi_{ш}$ выше опорная способность шероховатости поверхности, шероховатость получается "сглаженной", т.е. при $\chi_{ш} \rightarrow 0$ поверхность становится "зеркальной". Например, чем меньше значение Sm при прочих равных параметрах, тем профиль шероховатости получается более "мелкоэлементный", и если деталь работает в условиях трения, то эта "мелкоэлементность" приведет

Таблица 1

Парная корреляция между Ra и другими параметрами шероховатости поверхности для различных условий выглаживания

Параметры шероховатости	Изменяемая характеристика процесса выглаживания			
	Подача S_0 , мм/об	Заданный натяг h_s , мкм	Частота вращения шпинделя станка n , мин ⁻¹	Профиль исходной шероховатости поверхности
Sm , мм	–	–	+	–
tp , %	–	–	+	–
$Rmax$, мкм	+	+	+	+
Rp , мкм	+	+	+	+
S , мм	–	–	–	–

Примечание. "+" – указывает на наличие корреляционной связи; "–" – на отсутствие корреляционной связи.

к более ускоренному изнашиванию рабочей поверхности детали в сравнении со "сглаженной" шероховатостью.

На практике предлагается использовать коэффициент улучшения опорной способности шероховатости:

$$v_{ш} = \frac{\chi_{ши}}{\chi_{ш}} = \frac{Ra_{и}}{Ra} \frac{Smt_{ср}}{Sm_{и}t_{ср_{и}}}, \quad (2)$$

где $\chi_{ши}$ – коэффициент, характеризующий среднюю опорную способность исходной шероховатости поверхности.

Из технико-экономических соображений процесс выглаживания будет оправдан в качестве финишной операции по улучшению опорной способности исходной шероховатости поверхности, если после выглаживания $v_{ш} \geq 1,5$.

Параметры исходной шероховатости поверхности оказывают сильное влияние на получаемые параметры шероховатости поверхности при выглаживании, что характерно для многих способов отделочно-упрочняющей обработки [5].

Анализируя результаты, представленные в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения заданного значения Ra необходимо на предшествующем переходе получить определенные значения $Ra_{и}$, $Sm_{и}$ (учитывая [2], что при лезвийной обработке значения $Ra_{и}$ взаимосвязаны с $Rmax_{и}$ и $Rp_{и}$, эти исходные параметры шероховатости здесь и далее не учитывают). Одновременно с заданными значениями Ra фиксированными (связанными с указанными исходными параметрами шероховатости) будут значения Sm ($Rmax$, Rp).

2. Для обеспечения заданного значения Sm необходимо на предшествующем переходе получить опре-

деленные значения $Ra_{и}$, $Sm_{и}$, $t_{50и}$. Одновременно при заданных значениях Sm фиксированными будут и значения Ra ($Rmax$, Rp), t_{50} .

3. Для обеспечения заданного значения t_{50} необходимо на предшествующем переходе получить определенные значения $t_{50и}$, $Sm_{и}$. Одновременно при заданном значении t_{50} фиксированным будет и значение Sm .

4. Для обеспечения заданных значений $Rmax$ и Rp достаточно иметь заданное значение Ra .

5. Параметр S формируется независимо от других параметров исходной шероховатости, что вполне закономерно, поскольку этот параметр возникает вследствие действия "случайных" факторов, например вибраций в технологической системе.

Следовательно, функциональные зависимости между параметрами шероховатостей исходной и выглаженной поверхностей будут выглядеть следующим образом:

$$Ra = f(Ra_{и}, Sm_{и});$$

$$Sm = f(Ra_{и}, Sm_{и}, t_{50и});$$

$$t_{50} = f(t_{50и}, Sm_{и});$$

$$Rmax, Rp = f(Ra).$$

Численные значения этих наследственных связей необходимо устанавливать для каждого обрабатываемого материала, чтобы гарантированно обеспечить заданные значения параметров шероховатости выглаженной поверхности детали.

На рис. 2 показано наследование параметров шероховатости поверхности при выглаживании деталей из стали 20X13. Если необходимо обеспечить при выглаживании $Ra = 0,08$ мкм; $Sm = 0,07$ мм, $t_{50} = 56$ %, нужно, например, получить исходные параметры шероховатости поверхности $Ra_{и} = 0,2$ мкм; $Sm_{и} = 0,13$ мм, $t_{50и} = 50$ %. В данном случае речь идет о выглаживании с применением классических конструкций инструментов [6]. Применение современных нестандартных конструкций выглаживателей [7] дает возможность значительно снизить требования, предъявляемые к значениям исходных параметров шероховатости поверхности, в частности к $Ra_{и}$.

Таким образом, установлено, что при разных режимах выглаживания автоматически не обеспечивается заданная совокупность параметров шероховатости выглаженной поверхности, на которую также значительное влияние оказывает исходная шероховатость поверхности детали.

Для гарантированного обеспечения заданного профиля шероховатости поверхности при выглаживании необходимо для каждого обрабатываемого

Таблица 2

Парная корреляция между отношением параметров выглаженной и исходной шероховатостей поверхности

	$Ra/Ra_{и}$	$Sm/Sm_{и}$	$t_{50}/t_{50и}$	$Rmax/Rmax_{и}$	$Rp/Rp_{и}$	$S/S_{и}$
$Ra/Ra_{и}$		+	-	+	+	-
$Sm/Sm_{и}$	+		+	+	+	-
$t_{50}/t_{50и}$	-	+		-	-	-
$Rmax/Rmax_{и}$	+	+	-		+	-
$Rp/Rp_{и}$	+	+	-	+		-
$S/S_{и}$	-	-	-	-	-	

Примечание. См. примечание к табл. 1.

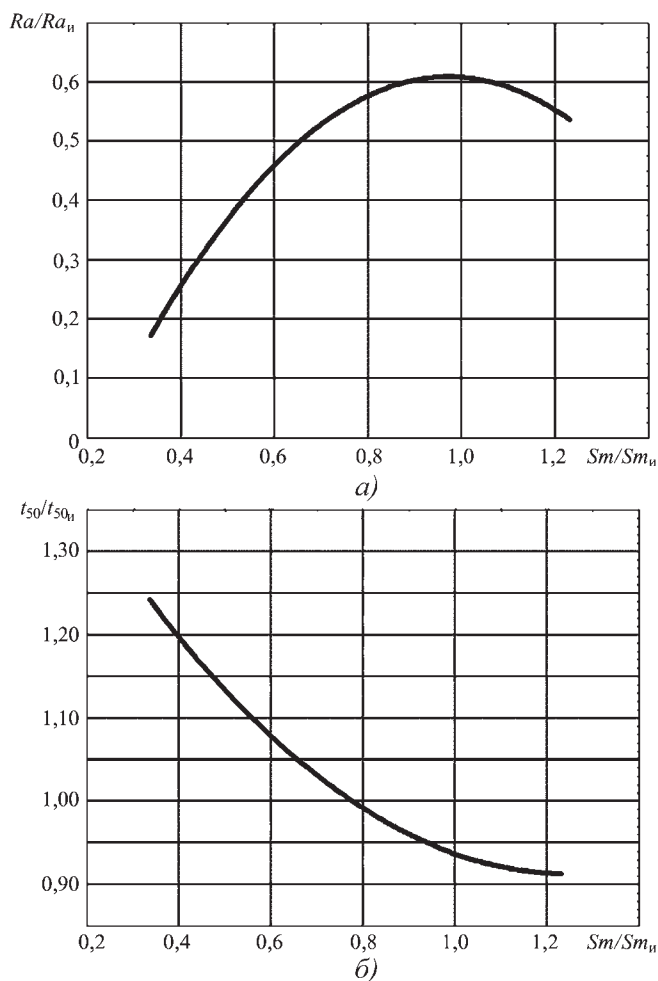


Рис. 2. Взаимосвязи отношений среднего арифметического отклонения профиля шероховатости (а) и относительной опорной длины профиля на уровне 50 % (б) выглаженной и исходной поверхностей с отношением среднего шага неровностей профиля выглаженной и исходной поверхностей

материала детали экспериментально искать определенный диапазон режимов обработки и учитывать численные значения наследственных связей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 311 с.
2. Сулов А.Г., Горленко О.А. Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин: Монография. М.: Машиностроение-1, 2003. 303 с.
3. Губанов В.Ф., Орлов В.Н. Виброконтроль параметров шероховатости поверхности при выглаживании // Технология машиностроения. 2005. № 5. С. 39–41.
4. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.
5. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
6. Выглаживание: специфика, управление качеством и инновации: учеб. пособие / В.Ф. Губанов, В.В. Марфицын и др. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. 106 с.
7. Губанов В.Ф. Комплексное обеспечение профиля шероховатости и микротвердости поверхности при алмазном выглаживании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 49–52.

УДК 621.9.06:629.735.45

М.А. Тамаркин, Ю.А. Проскорякова (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: freundin111@bk.ru

Методика выбора рациональных режимов технологических процессов центробежной обработки

Предложена методика проектирования технологических процессов центробежной обработки. Получены зависимости для определения шероховатости обрабатываемой поверхности, степени и глубины упрочнения.

Ключевые слова: центробежная обработка, качество поверхностного слоя, установившаяся шероховатость поверхности, степень упрочнения, глубина упрочненного слоя.

The technique of designing of technological processes of centrifugal processing is offered. Dependences for definition of a roughness of a processed surface, degree and depth of hardening are received.

Keywords: centrifugal processing, quality of the blanket, the established roughness of a surface, hardening degree, depth of the strengthened layer.

Одной из важных задач современного машиностроения является повышение надежности и долговечности деталей. Надежность и ресурс деталей машин в значительной мере определяются состоянием

их поверхностного слоя, его несущей способностью, которая формируется на финишных операциях изготовления деталей и определяется технологией изготовления [1].

Как правило, причиной разрушения деталей при эксплуатации служат процессы, протекающие именно в поверхностном слое: концентрация напряжений, развитие микротрещин, разупрочнение, изнашивание, окисление и т.д. Поэтому отделочно-упрочняющая обработка, изменяющая в широких пределах свойства поверхностного слоя, занимает важное место среди технологических способов, повышающих надежность деталей [2].

В машиностроении широко применяются методы *поверхностного пластического деформирования* (ППД) с целью повышения таких эксплуатационных характеристик, как износостойкость, сопротивление усталости, коррозионная стойкость и др.

Центробежная обработка (ЦО) является одним из упрочняющих динамических методов обработки ППД. Этот метод применяют для повышения сопротивления усталости деталей машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. ЦО происходит путем воздействия на обрабатываемую поверхность рабочих элементов (шариков), свободно сидящих в радиальных отверстиях вращающегося диска. Рабочие элементы под действием центробежных сил занимают крайнее положение в радиальных отверстиях, а при ударе об обрабатываемую поверхность отскакивают на определенную глубину, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой.

К основным преимуществам ЦО в сравнении с другими динамическими методами относятся: высокая интенсивность обработки; простое по конструкции оборудование; возможность обработки длинномерных маложестких изделий сложной формы; большая энергия воздействия на поверхность детали, что позволяет получать высокую степень упрочнения для деталей из высокопрочных материалов [2].

Типичным примером ЦО длинномерных маложестких деталей является ЦО труб лонжеронов вертолетов. Схема обработки длинномерных маложестких деталей напоминает схему токарной обработки (рис. 1), где вместо резца используется упрочнитель: заготовка вращается в центрах вокруг своей оси, инструмент-упрочнитель со скоростью подачи движется вдоль оси заготов-

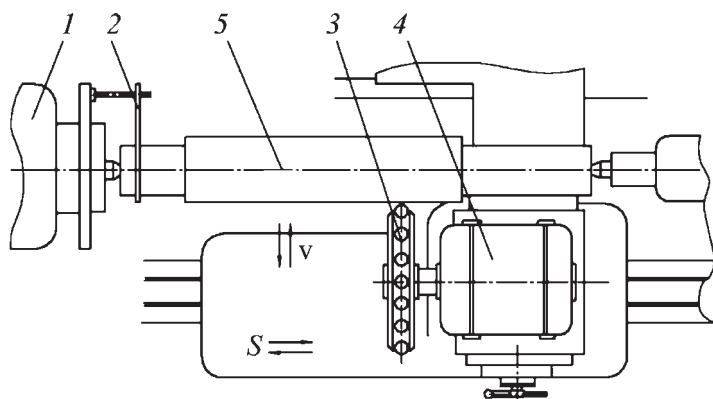


Рис. 1. Схема ЦО наружной цилиндрической поверхности

ки. Токарный станок мод. 163 положен в основу одной из установок ЦО с некоторыми изменениями, отвечающими требованиям технологического процесса.

Заготовку 5 с помощью хомутика 2 устанавливают в центрах. Вращение заготовки производит механизм передней бабки 1 станка. Электродвигатель 4 приводит во вращение шпиндель станка с инструментом-упрочнителем 3.

Необходимый натяг i обеспечивается установкой инструмента-упрочнителя на определенном расстоянии от заготовки при помощи поперечного винта суппорта станка [2].

Однако несмотря на преимущества ЦО и многолетнее использование в авиационной промышленности, недостаточно проработаны вопросы формирования физико-механических параметров качества поверхностного слоя (глубины упрочненного слоя, степени упрочнения). Нет рекомендаций по расчету и выбору эффективных технологических параметров ЦО.

Одним из важных вопросов при исследовании основных технологических параметров ЦО (производительности процесса и качества обработанной поверхности) является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия стальных полированных шариков с поверхностью обрабатываемой детали.

Разработка теоретических зависимостей, описывающих форму и размеры следов обработки, позволит в дальнейшем перейти к теоретико-вероятностному описанию распределения отпечатков на поверхности детали, что в свою очередь даст возможность разработать модель формирования профиля шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя детали.

Для построения модели процесса единичного взаимодействия при ЦО воспользуемся методикой работы Е.Ф. Непомнящего, предложенной для исследования трения и износа под действием потока твердых сферических частиц. Поверхность обрабатываемой детали сначала рассмотрена без учета шероховатости.

Известно, что при косом ударе пятно контакта шарика представляет собой эллипс с большой и малой полуосями a и b соответственно. Малую полуось b можно определить из геометрической схемы внедрения шарика в поверхность детали в поперечном направлении (рис. 2)

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}, \quad (1)$$

где R – радиус шарика;

h_{\max} – максимальная глубина внедрения шарика.

Учитывая длину траектории следа, а также то, что на глубине h_{\max} шарик оставляет отпечаток диаметром $2b$, получим

$$a = \frac{\pi}{2} h_{\max} (\operatorname{ctg} \alpha - f) + b, \quad (2)$$

где α – угол встречи шарика с поверхностью детали;

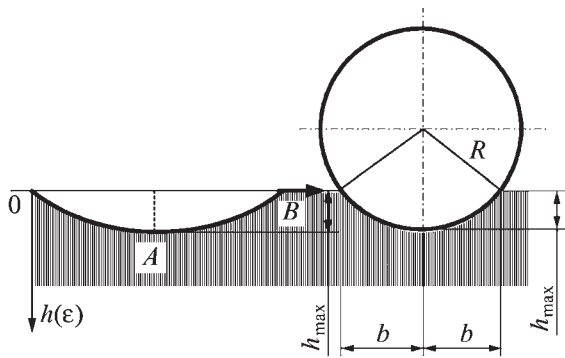


Рис. 2. Геометрическая схема процесса внедрения шарика

f – коэффициент трения шарика по поверхности детали.

В результате теоретических исследований получена зависимость для расчета максимальной глубины внедрения шарика h_{\max} при ЦО:

$$h_{\max} = 2\omega_c R_c R \sin \alpha \sqrt{\frac{k_c \rho_{\text{ш}}}{3k_s c \sigma_s}}, \quad (3)$$

где ω_c – угловая скорость вращения инструмента-упрочнителя;

R_c – радиус инструмента-упрочнителя;

k_c – коэффициент, учитывающий влияние сепаратора диска;

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала шарика;

k_s – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали;

c – коэффициент несущей способности контактной поверхности;

σ_s – предел текучести материала детали.

Одной из главных задач при проектировании технологических процессов является расчет параметров шероховатости обработанной поверхности. При ЦО, как и при других динамических методах обработки ППД, изменение шероховатости происходит от исходной до некоторой характерной для данного метода и конкретных технологических режимов шероховатости, получившей название установившейся [3]. Профиль установившейся шероховатости образуется в результате пересечения и наложения следов единичного взаимодействия. Дальнейшая обработка может привести к появлению полидеформационных разрушений.

В работе [3] предложено теоретико-вероятностное описание формирования шероховатости обрабатываемой поверхности при различных видах абразивной обработки. Подобное описание можно применить и для динамических методов обработки ППД.

В результате проведения теоретических исследований получена зависимость для определения среднего арифметического отклонения установившейся шероховатости поверхности $Ra_{\text{уст}}$:

$$Ra_{\text{уст}} = 0,08 \sqrt{\frac{h_{\max} l_{\text{ед}} n_{\text{д}}}{n_c z_p}}, \quad (4)$$

где $l_{\text{ед}}$ – единичная длина;

$n_{\text{д}}$ – частота вращения детали, об/мин;

n_c – частота вращения инструмента-упрочнителя, об/мин;

z_p – число шариков в одном ряду упрочнителя.

При проектировании технологических процессов ЦО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемых толщины упрочненного слоя и степени упрочнения. От глубины упрочненного слоя h_n зависят многие эксплуатационные свойства деталей: сопротивление усталости и долговечность. Глубина упрочненного слоя определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокации кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки.

Аналитическое определение толщины упрочненного слоя и степени упрочнения в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Существующие математические зависимости, выведенные несколькими авторами, были получены на основе теории упругости или пластичности после принятия многочисленных упрощений и допущений. Исследования в этой области проведены И.В. Кудрявцевым [1].

В работе [1] приведена зависимость для определения глубины наклепанного слоя в зависимости от характеристик следа:

$$h_n = 3rk,$$

где r – радиус пластического отпечатка;

k – коэффициент, зависящий от степени наклепа.

В случае эллиптической формы отпечатка

$$r = \sqrt{ab},$$

где a и b – полуоси эллипса контакта (для ЦО определяются по формулам (1) и (2)).

Тогда

$$r = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} h_{\max} (\text{ctg} \alpha - f) + b\right) \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}. \quad (5)$$

Следовательно, для ЦО глубину упрочненного слоя можно определить по формуле:

$$h_n = 3k \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} h_{\max} (\text{ctg} \alpha - f) + b\right) \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}. \quad (6)$$

В работе [1] также приводится зависимость для определения степени упрочнения ϵ . Используя эту зависимость для ЦО, можно получить следующую формулу:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\left(\frac{\pi}{2} h_{\max} (\text{ctg} \alpha - f) + b\right) \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}}{R}. \quad (7)$$

Для проверки адекватности полученных зависимостей (4), (6) и (7) были проведены комплексные экспериментальные исследования ЦО.

Эксперименты проводили в заводских условиях на предприятии ОАО "РОСТВЕРТОЛ" на специальном токарном станке мод. 163, на котором вместо реза применяли двухрядные и пятирядные инструменты-упрочнители.

Для определения шероховатости поверхности использовали цилиндрические и призматические образцы. Материал образцов – сталь 40ХН2МА.

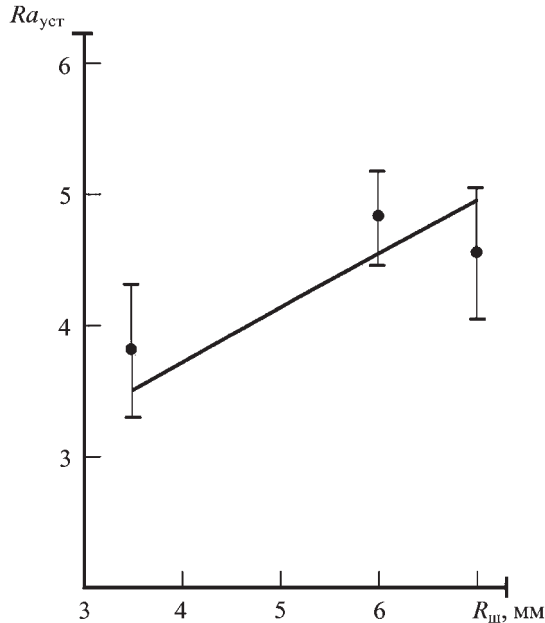


Рис. 3. Зависимость установившейся шероховатости поверхности от радиуса шариков в упрочнителе:

— — теоретическая зависимость; • — экспериментальные значения

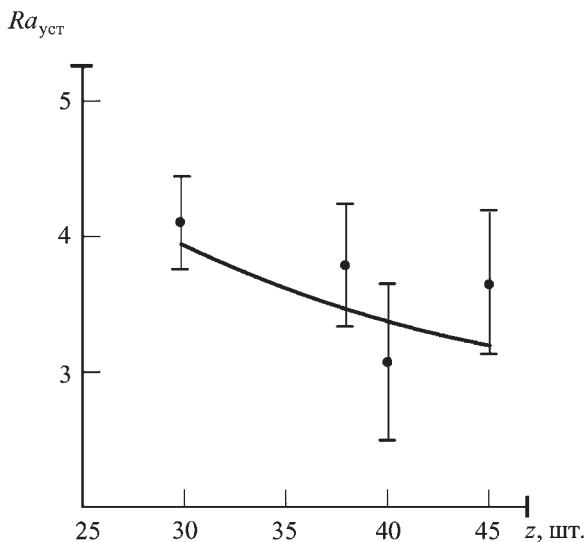


Рис. 4. Зависимость установившейся шероховатости поверхности от числа шариков в ряду упрочнителя:

— — теоретическая зависимость; • — экспериментальные значения

Сравнительные результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований представлены на рис. 3–7.

Анализируя теоретические зависимости и результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что погрешность теоретических расчетов не превышает 20 %, следовательно, представленные выше теоретические модели являются адекватными и могут быть использованы для прогнозирования результатов ЦО.

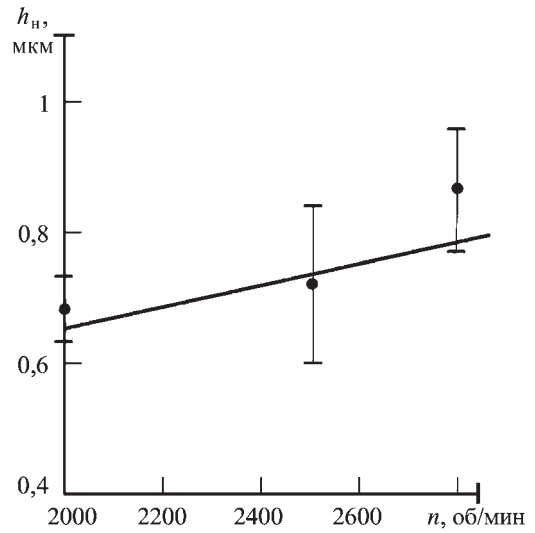


Рис. 5. Зависимость глубины упрочненного слоя от скорости вращения упрочнителя:

— — теоретическая зависимость; • — экспериментальные значения

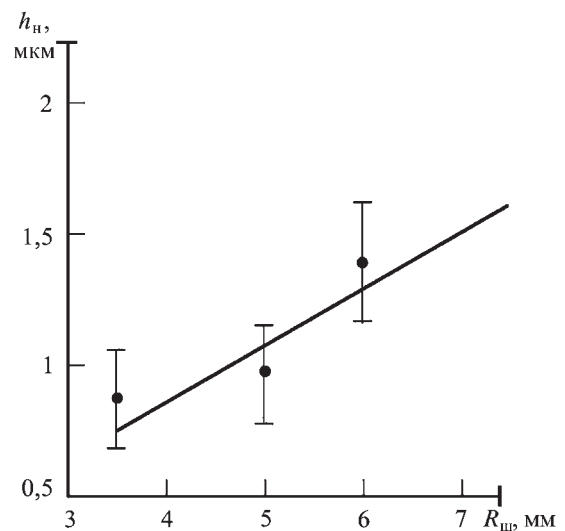


Рис. 6. Зависимость глубины упрочненного слоя от радиуса шариков в упрочнителе:

— — теоретическая зависимость; • — экспериментальные значения

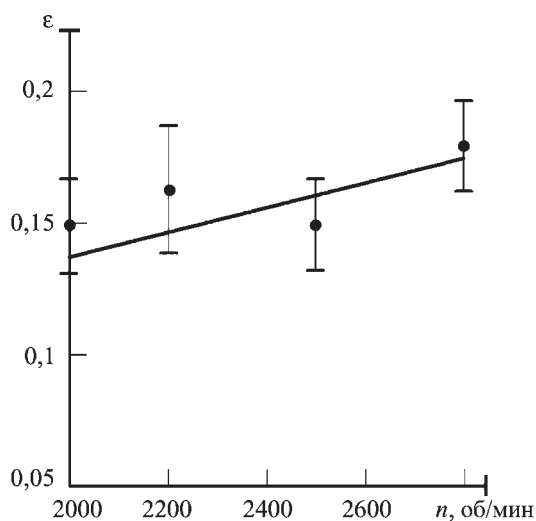


Рис. 7. Зависимость степени упрочнения от скорости вращения упрочнителя:

— — теоретическая зависимость; • — экспериментальные значения

На основании этого разработана методика проектирования технологических процессов ЦО.

Разработка технологического процесса обработки деталей начинается с выбора размера шариков. Для мягких и средних по твердости материалов рекомендуется меньший диаметр шариков (7...12 мм), для закаленных сталей — больший диаметр шариков (14...20 мм).

Затем осуществляется выбор диаметра и количества рядов шариков инструмента-упрочнителя. Для обработки участков детали, где перепад размера большой, используют двухрядные инструменты-упрочнители. Для более гладких участков количество рядов шариков можно увеличить до пяти, что позволяет увеличить число взаимодействия шариков с поверхностью обрабатываемой детали за один проход упрочнителя.

Диаметр инструмента-упрочнителя для стали рекомендуется брать ≈ 200 мм, что позволяет обеспечить достаточную энергию соударения и соответственно степень упрочнения. Число шариков в одном ряду инструмента-упрочнителя рекомендуется брать 35...45. Для более мягких материалов можно уменьшить диаметр инструмента-упрочнителя до 150 мм, а число шариков в ряду также уменьшится исходя из конструктивных соображений.

Затем производят расчет среднего арифметического отклонения шероховатости поверхности (4), степени наклепа (7) и глубины наклепанного слоя (6). При расчетах варьируют значения окружной скорости и диаметра инструмента-упрочнителя, числа и диаметра шариков в инструменте-упрочнителе, при фиксированной продольной подаче и частоте вращения детали либо поперечной подачи на ход.

Особенно интенсивно микронеровности деформируются при малых натягах — до $i = 0,15...0,25$ мм.

При больших натягах интенсивность выравнивания микропрофиля с увеличением натяга уменьшается [2]. Рекомендуемый натяг $i = 0,2...0,25$.

По результатам расчетов производят корректировку выбранных режимов обработки. Затем вновь рассчитывают параметры качества обработанной поверхности и так до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в необходимых пределах.

Известно [2], что время и режим ЦО в значительной мере определяются числом ударов по определенной площади обрабатываемой поверхности, которое зависит от окружной скорости инструмента-упрочнителя и заготовки, от числа шариков в обойме и от подачи инструмента-упрочнителя. Число ударов шариков, приходящееся на 1 мм^2 обрабатываемой поверхности, определяют по формуле:

$$C_y = \frac{zn_c}{\pi dn_d S_0}, \quad (8)$$

где z — число шариков в упрочнителе;

d — диаметр обрабатываемой детали;

S_0 — продольная подача на один оборот обрабатываемой заготовки.

Для достижения равномерности обработки и стабильных результатов упрочнения это число должно быть ≈ 100 ударов.

Зная частоту вращения инструмента-упрочнителя и детали, а также размеры детали, можно подобрать S_0 , число рядов шариков в сепараторе и число проходов инструмента-упрочнителя по поверхности детали.

Затем по значению продольной подачи и длине детали рассчитывается время обработки:

$$t = \frac{l_d k_{p.x}}{S_0 n_d}, \quad (9)$$

где l_d — длина детали, мм;

$k_{p.x}$ — число рабочих ходов.

Число проходов инструмента-упрочнителя берется в пределах 2...4.

Представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы для предложений по корректировке технологического процесса ЦО на ОАО "РОСТВЕРТОЛ".

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получен комплекс моделей, адекватно отражающих процессы формирования шероховатости обработанной поверхности и упрочнения поверхностного слоя. На основании полученных моделей разработана методика выбора рациональных технологических параметров ЦО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев И.В. и др. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 237 с.
2. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 2002. 206 с.
3. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки: в 2-х т. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989.

Н.Г. Щеголев (Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета)
E-mail: shng41@avtokran.ru

Исследование сил деформирования, создаваемых инерционным рычажным раскатывающим устройством

Рассмотрено инерционное рычажное раскатывающее устройство для обработки отверстий тел вращения методом пластического деформирования. Проведены кинематические и силовые расчеты, подтверждающие принципиальную работоспособность и стабильность процесса пластического деформирования при обработке материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами и обеспечивающих качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: инерционное раскатывающее устройство, тело вращения, пластическое деформирование, стабильное качество поверхностного слоя, центробежная сила.

The inertial lever unrolling device for processing of bodies of rotation by a method of plastic deformation is considered. The kinematic and power calculations confirming basic working capacity of stable process of plastic deformation at processing of materials are carried out, possessing with various physical and mechanical properties and provides quality of the processed surface.

Keywords: inertia rolling device, body of rotation, plastic deformation, stable quality of superficial layer, centrifugal force.

Одним из современных и наиболее прогрессивных инструментов для ППД при раскатывании поверхностей глубоких отверстий является инерционное рычажное раскатывающее устройство [1], работающее с использованием деформирующих элементов — цилиндрических роликов.

Конструктивная схема инерционного рычажного раскатывающего устройства показана на рис. 1.

В корпусе 1 инерционного рычажного раскатывающего устройства на осях 7 и в направляющих пазах 15 и 16 установлены рычаги 4. На рычагах 4 размещены инерционные грузы 5 и опорные катки 2. Опорные катки установлены на подшипниках 3. Каждый из деформирующих элементов 12, которыми осуществляется раскатывание отверстия, опирается на два смежных опорных катка 2 (см. рис. 1, б) и удерживается от выпадения шпильками 13. Кроме того, устройство снабжено центрирующей обоймой 10, имеющей ребра 8 и установленной на наружном кольце подшипника 10.

В процессе обработки устройство приводится во вращение с необходимой частотой, в результате чего рычаги, а вместе с ними деформирующие элементы — ролики 12, катки 2, а также инерционные грузы 5, из-за возникающих центробежных сил поворачиваются относительно осей 7 в радиальном направлении на определенный угол ε . Под воздействием центробежных сил, обеспечиваемых массами инерционных грузов, опорных катков, деформирующих роликов и собственными массами рычагов, деформирующие

ролики 12 внедряются в обрабатываемую поверхность детали 6 и при обеспечении подачи происходит процесс ППД.

Для подтверждения эффективности работы предлагаемого инерционного рычажного раскатывающего устройства и выявления диапазона создаваемых им сил деформирования разработана расчетная схема, показанная на рис. 2.

При работе инструмента центробежные силы, развиваемые отдельно опорными катками и деформирующими роликами, будут равны

$$P_{кк} = 0,034 L_k \rho_k n^2 r_k^2 (R_o - r_k - \delta), \quad (1)$$

$$P_{рс} = 0,034 L_p \rho_p n^2 r_p^2 (R_o - r_p), \quad (2)$$

где $P_{кк}$, $P_{рс}$ — центробежные силы, развиваемые соответственно массами катка и деформирующего ролика;

L_k , L_p — длина катка и деформирующего ролика соответственно;

ρ_k , ρ_p — удельные массы материалов катка и ролика;

n — частота вращения инструмента;

r_k , r_p — радиусы опорного катка и ролика;

R_o — радиус обрабатываемого отверстия;

δ — зазор между поверхностью обрабатываемого отверстия и опорным катком.

Между радиусами опорных катков и деформирующих роликов существует определенная взаимосвязь.

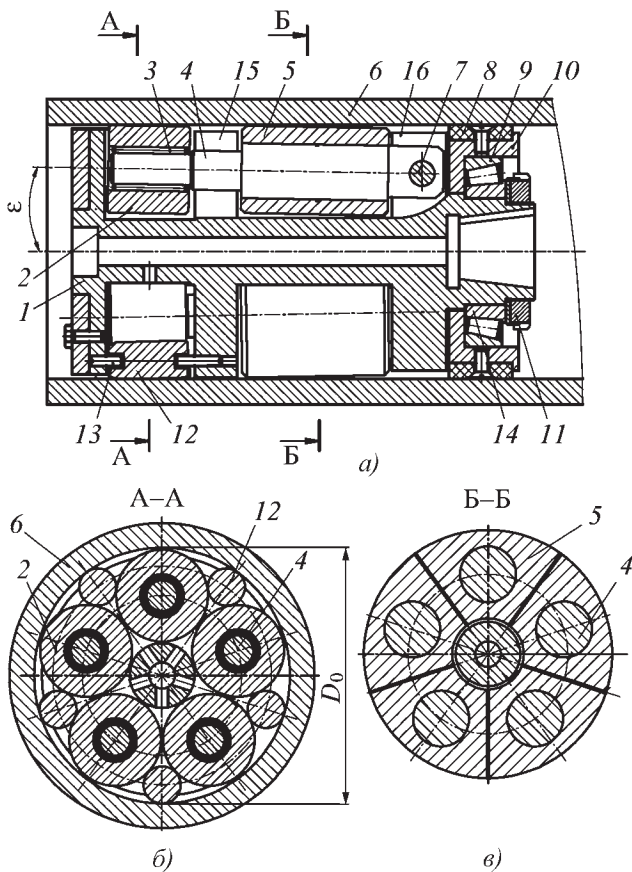


Рис. 1. Инерционное рычажное раскатывающее устройство (а), сечения А-А (б) и Б-Б (в):

1 – корпус; 2 – опорный каток; 3 – подшипник; 4 – рычаг; 5 – инерционный груз; 6 – деталь; 7 – шарнир; 8 – ребра; 9 – наружное кольцо подшипника; 10 – обойма; 11 – гайка; 12 – деформирующий элемент; 13 – шпилька; 14 – внутреннее кольцо подшипника; 15, 16 – пазы в корпусе

Исходя из компоновки раскатывающего устройства, радиусы опорного катка r_k и ролика r_p могут быть определены из зависимостей

$$r_k = \frac{(R_0 - \delta) \sin \psi - a}{1 + \sin \psi}; \quad (3)$$

$$r_p = \frac{R_0^2 + R_{ок}^2 - 2R_0 R_{ок} \cos \psi - r_k^2}{2[R_0 + r_k - R_{ок} \cos \psi]}, \quad (4)$$

где ψ – половина угла между смежными деформирующими элементами (опорными катками);

a – половина зазора между опорными катками;

$R_{ок}$ – радиус окружности описываемой осями опорных катков.

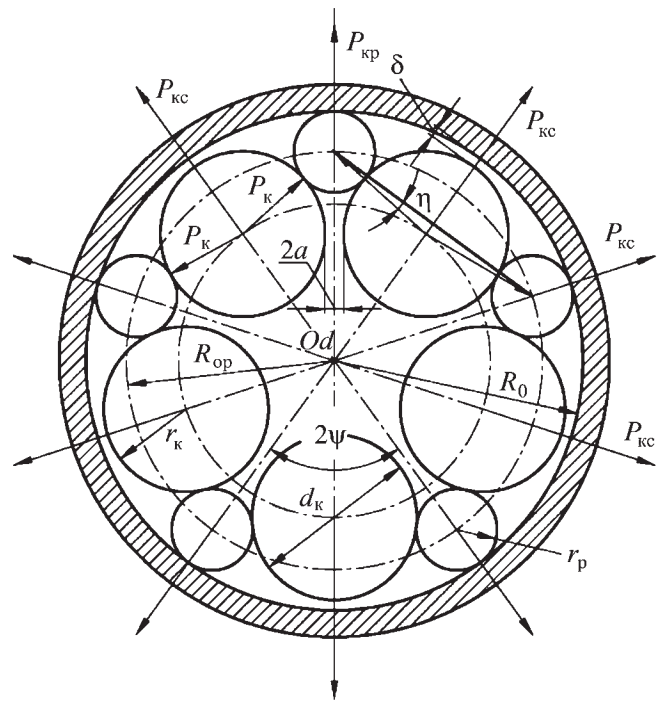


Рис. 2. Расчетная схема для определения сил деформирования инерционного рычажного раскатывающего устройства (d_k – диаметр опорного катка)

Центробежная сила $P_{кк}$, действующая на каток, равна суммарному действию центробежных сил, создаваемых конструктивными элементами рычага, катка и инерционного груза. Схема для определения этих сил представлена на рис. 3.

Последовательно определяем возникающие центробежные силы.

Центробежная сила, развиваемая массой участка рычага между опорным катком и инерционным грузом (см. рис. 3, а) будет равна

$$P_{пр} = 0,034 \cdot 0,25 d_1^2 L_{пр} \rho R_{ок} n^2, \quad (5)$$

где d_1 , $L_{пр}$ – диаметр и длина этого участка рычага; ρ – удельная масса материала рычага.

Инерционный груз представляет собой в поперечном сечении круговой сектор (см. рис. 3, б) с длиной в продольном направлении равной $L_{гр}$.

Следовательно, центробежная сила $P_{гр}$, развиваемая массой инерционного груза, вычисляется по формуле

$$P_{гр} = 0,034 F_{гр} L_{гр} \rho r_c h^2, \quad (6)$$

где $F_{гр}$ – площадь поперечного сечения инерционного груза;

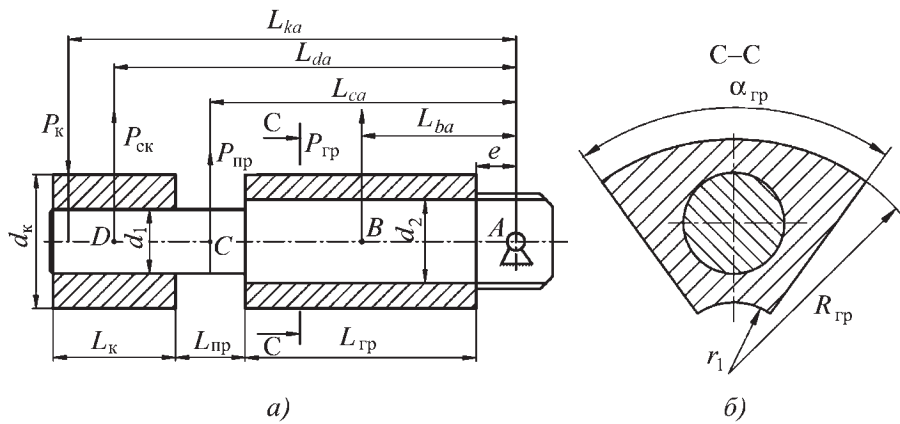


Рис. 3. Расчетная схема определения сил деформирования, создаваемых массами опорного катка, инерционного груза и рычага соответственно:
 а – рычаг; б – поперечное сечение С–С инерционного груза (круговой сектор)

L_{rp} – длина инерционного груза;
 ρ – удельная масса материала инерционного груза;
 r_c – центр тяжести сечения кругового сектора, расположенного на расстоянии от оси раскатывающего устройства, которое можно определить из формулы

$$r_c = 0,75 \left[\frac{(R_{rp}^3 - r_{rp}^3) \sin \alpha_{rp}}{(R_{rp}^2 - r_{rp}^2) \alpha_{rp}} \right], \quad (7)$$

где R_{rp} , r_{rp} – наружный и внутренний радиусы кругового сектора;

α_{rp} – угол кругового сектора.

Площадь поперечного сечения инерционного груза F_{rp} рассчитывается как

$$F_{rp} = \frac{\alpha_{rp} \pi}{360} (R_{rp}^2 - r_{rp}^2). \quad (8)$$

Составив уравнение равновесия моментов всех составляющих центробежных сил, обеспечиваемых массами катков, инерционных грузов и массой элементов рычага относительно точки А, найдем из его решения силу P_{kc} , действующую на деформирующий ролик

$$P_k = \frac{P_{kc} L_{da} + P_{np} L_{ca} + P_{rp} L_{ba}}{2 L_{ka} \sin \eta}, \quad (9)$$

где L_{da} , L_{ca} , L_{ba} , L_{ka} – расстояния от точки А до точек приложения центробежных сил соответствующих конструктивных элементов;

η – угол между направлением действия силы P_k , между катком и деформирующим роликом и отрез-

ком прямой, соединяющим центры смежного катка и ролика. Этот угол определяется по формуле

$$\eta = \arccos \left[\frac{R_{op} \sin \psi}{r_p + r_k} \right],$$

где R_{op} – радиус окружности, описываемой осями деформирующих элементов.

Сила деформирования складывается из суммы всех сил, действующих на ролик. Из схемы, представленной на рис. 2, можно получить формулу для определения силы деформирования при раскатывании отверстий инерционным рычажным раскатывающим устройством

$$P_p = \frac{0,5 P_k}{\cos(90 - \psi - \eta)} + P_{pc}. \quad (10)$$

Примем количество деформирующих роликов равное пяти. Для конкретных расчетов при обработке отверстий диаметрами 100, 120, 150, 200 мм примем следующие параметры конструктивных элементов раскатывающего устройства: диаметры деформирующих роликов и опорных катков рассчитываются по формулам (1) и (2); длина роликов и опорных катков $L_p = L_k = 50$ мм; диаметр рычага $d_1 = 20$ мм; длины плеч от центров тяжести деформирующего элемента, опорного катка, перемычки между грузом и опорным

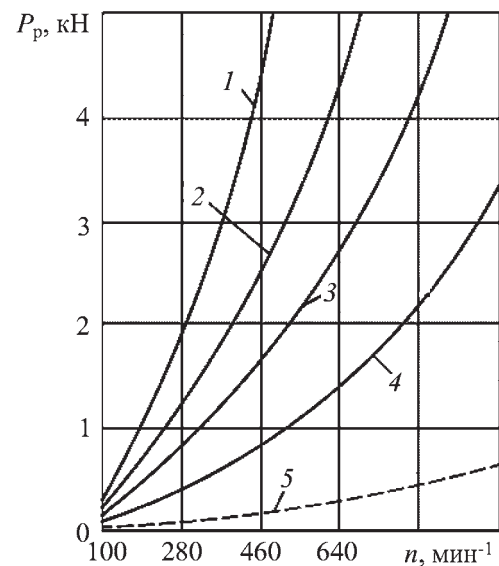


Рис. 4. Зависимость создаваемой силы деформирования от скорости вращения инерционного рычажного раскатывающего устройства

катком и инерционного груза до оси шарнира крепления рычага к корпусу инструмента принимаем соответственно: $L_{ka} = 164$ мм, $L_{da} = 146$ мм, $L_{ca} = 113$ мм и $L_{ba} = 56$ мм. Подставив выбранные значения параметров в формулы рассмотренной методики, построим графические зависимости (рис. 4).

Как видно из графических зависимостей, создаваемые силы деформирования при обработке отверстий деталей с диаметрами от 100 до 200 мм достаточны для широкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих качество обработанной поверхности, в том числе и глубину упрочненного слоя материала.

Необходимая частота вращения инструмента определяется координатой пересечения кривой силы деформирования от частоты вращения инструмента с горизонтальной прямой линией, соответствующей силе, при которой обеспечивается заданная глубина упрочнения. Так, для обработки детали диаметром 100 мм и ориентировочным обеспечением глубины упрочненного слоя материала 1,5 мм необходимая сила деформирования составляет 3,8 кН (горизонтальная прямая). Необходимая частота вращения ин-

струмента составляет 725 мин^{-1} , а для обработки деталей диаметрами 200, 150 и 120 мм необходимая частота вращения будет соответственно 530, 370 и 180 мин^{-1} (см. рис. 4).

Таким образом, рассматриваемое инерционное рычажное раскатывающее устройство создает условия для стабильного процесса пластического деформирования при обработке материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами и микрогеометрическими параметрами, что расширяет технологические возможности инструмента и обеспечивает качество обработанной поверхности, в том числе и требуемую глубину упрочненного слоя материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смольников Н.Я., Отений Я.Н. и др. Разработка инерционного роликового раскатника // *Фундаментальные и прикладные исследования – производству: сб. тез. докл. Междунар. техн. конф. Барнаул, 2001. С. 35–36.*

2. Пат. 2219041 РФ, кл. 7 В 24 В 39/02. Инструмент для обработки тел вращения методом пластического деформирования / Н.Я. Смольников, Я.Н. Отений, Н.В. Олыштынский, С.Н. Олыштынский.



ВЫШЕЛ В СВЕТ СПРАВОЧНИК "КОВКА И ШТАМПОВКА"

В четырех томах

Председатель редакционного совета Е.И. Семенов,
засл. деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф.

Издание 2-е, исправленное и дополненное. 2010. 2521 с. ISBN 978-5-217-03459-8

Цена 10 000 р.






**Том 1.
МАТЕРИАЛЫ И НАГРЕВ. ОБОРУДОВАНИЕ. КОВКА**

**Том 2.
ГОРЯЧАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА**

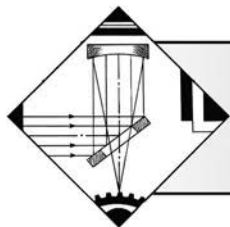
**Том 3.
ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА.
ШТАМПОВКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

**Том 4.
ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА**

107076, г. Москва, Стрёмьинский пер., 4; факс: (499) 269-48-97; e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98
и на сайте WWW.MASHIN.RU

Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 11

17



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.793.7:519.6

Ж.Г. Ковалевская, В.А. Клименов, В.Г. Бутов (Томский политехнический университет),
А.П. Жуков (Научно-исследовательский институт прикладной механики
и математики Томского государственного университета),
К.В. Зайцев (Юргинский технологический институт Томского
политехнического университета)
E-mail: kovalevskaya@ispms.tsc.ru

Численное описание процесса кристаллизации газотермически напыленного материала на основу с разным микрорельефом

Рассмотрен процесс затвердевания газотермически напыленного материала на подложке из стали. Учтено изменение морфологии поверхности, создаваемое шлифованием, ультразвуковой и струйно-абразивной обработкой. Получены зависимости термического цикла температуры и скорости охлаждения от времени. Показано, что условия охлаждения напыляемого материала зависят от геометрии поверхности, высоты и частоты расположения микронеровностей.

Ключевые слова: газотермическое напыление, морфология поверхности, метод конечных элементов, термические циклы.

The hardening process of gas-thermal material sprayed on a steel substrate is considered. Change of a surface morphology, obtained due to grinding, ultrasonic treatment and shot blast treatment is taken into account. Dependences of a temperature thermal cycle and cooling rate on time are obtained. It is shown that cooling conditions of a sprayed material depend on a surface geometry, height and distribution of microroughnesses.

Keywords: gas-thermal spraying, surface morphology, method of final elements, thermal cycle.

Введение

Современные технологии газотермического напыления могут создавать на поверхности изделий уникальные градиентные слои, обеспечивающие повышение теплозащитных свойств деталей компонент газовых турбин и дизельных двигателей, коррозионной стойкости деталей, работающих в агрессивных средах, и решая многие другие задачи, включая производство медицинских имплантатов [1–4].

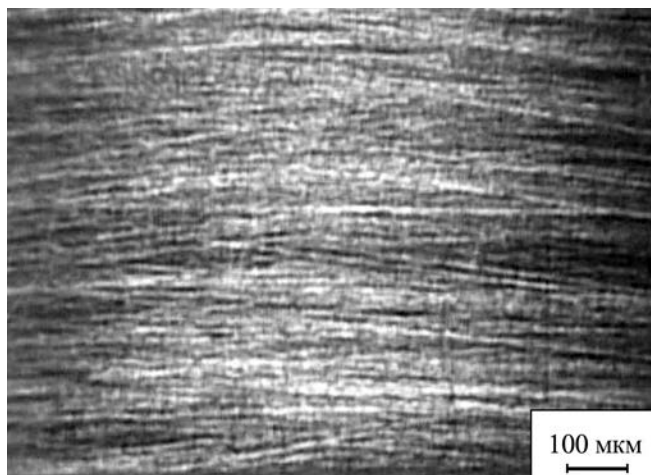
Широкий диапазон скоростей и температур напыления предъявляет различные требования к подготовке основы перед напылением – ее морфологии, температуре, степени активации и т.д. При плазменном, высокоскоростном газопламенном и детонационном напылении увеличение скорости напыляемых частиц до 500 м/с и выше обеспечивает такое импульсное и напорное давление осаждаемых частиц, которое создает соединение напыленного материала с основой на поверхностях с минимальной шероховатостью. В этом случае более важными становятся иные характеристики поверхности, например ее микрорельеф [5–6].

Современные методы анализа морфологии поверхности дают возможность быстро и качественно оценить все основные характеристики микрорельефа поверхности основы, что упрощает задачу оценки вклада данных характеристик в формирование границы раздела покрытие–основа [7].

Цель работы – оценить вклад микрорельефа поверхности основы, полученной различными способами, в условиях кристаллизации и охлаждения напыленного материала. Известно, что условия охлаждения первых слоев покрытия влияют на адгезию и градиент свойств в приграничной зоне композиции покрытие–основа [8]. Для достижения поставленной цели применяют численные методы, а именно метод конечных элементов. Численно моделируют процесс затвердевания слоя газотермически напыленного материала на основу из стали с различным микрорельефом.

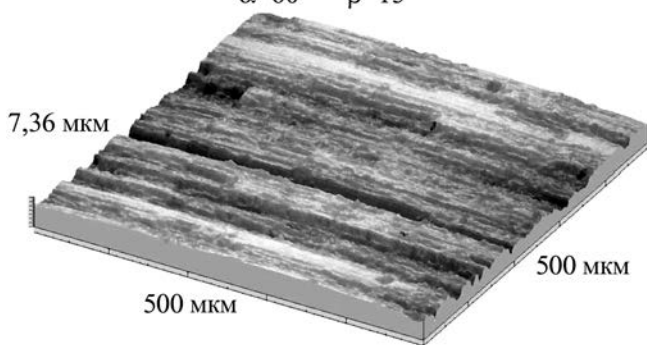
Выбор расчетных схем поверхности основы

Для создания расчетных схем поверхности основы использовали экспериментальные данные, получен-



а)

$\alpha=60^\circ$ $\beta=15^\circ$

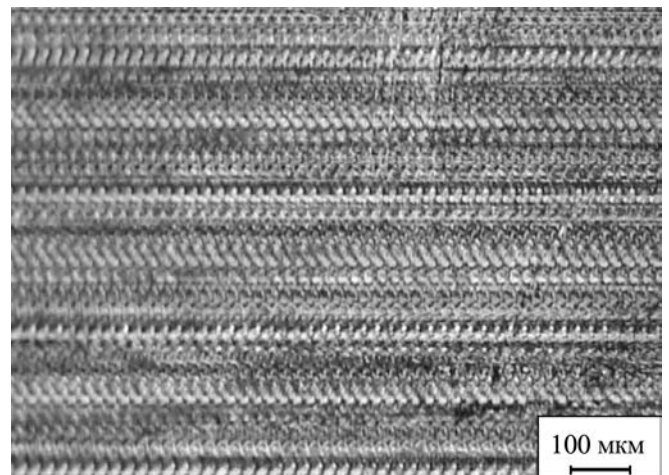


б)

Рис. 1. Оптическое (а) и трехмерное профилометрическое (б) изображения морфологии поверхности основы после шлифования

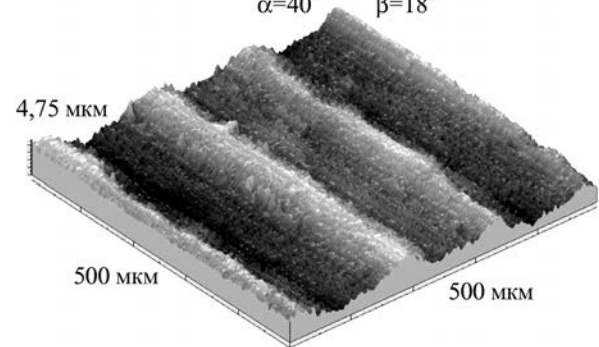
ные авторами в работах, посвященных исследованию влияния состояния поверхности основы на адгезию покрытий, полученных высокоскоростными методами газотермического напыления [9–11]. Были выбраны следующие способы подготовки поверхности: шлифование, *ультразвуковая финишная обработка (УФО)* и *струйно-абразивная обработка (САО)*. Поверхность основы исследовали на профилометрическом комплексе MICRO MEASURE 3D station.

Как известно, при шлифовании микрорельеф поверхности формируется за счет микрорезания поверхности детали единичными абразивными зернами шлифовального инструмента (рис. 1, а). Вследствие взаимодействия вершин абразивных частиц и поверхности образуется полосчатый рельеф поверхности, состоящий из прерывистых царапин (рис. 1, б). Поверхность при этом имеет следующие параметры шероховатости: высота неровностей $Rz = 5,6$ мкм; среднее арифметическое отклонение профиля $Ra = 0,84$ мкм; расстояние между выступами имеет раз-



а)

$\alpha=40^\circ$ $\beta=18^\circ$



б)

Рис. 2. Оптическое (а) и трехмерное профилометрическое (б) изображения морфологии поверхности основы после УФО

брос со средним шагом неровностей по вершинам $S = 43,6$ мкм.

После УФО на поверхности формируется периодический микрорельеф (рис. 2, а). Рабочий инструмент, нормально колеблющийся с ультразвуковой частотой, формирует в направлении подачи профиль поверхности, образованный плавно переходящими друг в друга впадинами округлой формы и выступами без острых кромок и трещин. Микрорельеф в направлении движения инструмента задается отдельными ударами инструмента, накладываемыми друг на друга с микронным смещением (рис. 2, б).

Таким образом, поверхность приобретает периодическую морфологию в двух направлениях. В направлении подачи инструмента поверхность имеет следующие параметры шероховатости: $Rz = 4,1$ мкм; $Ra = 0,7$ мкм; средний шаг неровностей по вершинам S определяется скоростью подачи инструмента и составляет 200 мкм. В направлении движения инструмента субшероховатость задается частотой ударов ин-

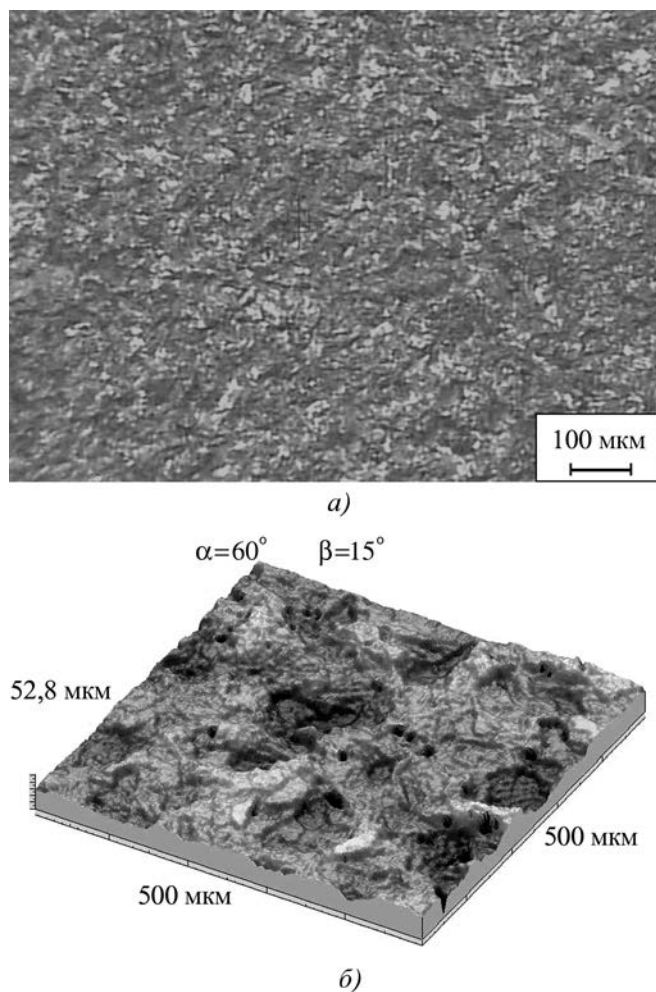


Рис. 3. Оптическое (а) и трехмерное профилометрическое (б) изображения морфологии поверхности основы после САО

струмента и скоростью вращения заготовки и имеет значения: $Rz = 0,15$ мкм; $Ra = 0,03$ мкм; $S = 10,2$ мкм.

При САО формируется микрорельеф поверхности за счет множественных ударов абразивных частиц о поверхность основы (рис. 3, а). Кратеры, оставляемые частицами корунда, накладываются друг на друга и образуют морфологию поверхности, состоящую из конусообразных выступов шероховатости окруженных впадинами в виде лунок (рис. 3, б). По расчетам параметров шероховатости $Rz = 34,2$ мкм; $Ra = 4,38$ мкм; а расстояние между выступами изменяется от 20 до 150 мкм, что задает средний шаг неровностей по вершинам $S = 60,2$ мкм.

Для проведения численных расчетов и сравнительного анализа полученных результатов были приняты упрощенные расчетные схемы формы поверхности основы.

Как видно из анализа морфологии поверхности основы, после шлифования и УФО поверхность основы покрыта выступами и впадинами в виде кана-

вок, регулярность которых задается параметрами Ra и S . При УФО формируется субшероховатость, однако параметры ее так малы ($Ra = 30$ нм), что в данной задаче ими пренебрегли.

В численном расчете форма канавок аппроксимирована так, как показано на рис. 4 (L – расстояние между пиками; H – глубина канавки). В этом случае задача о термическом состоянии основы и напыленного материала решается в двумерной постановке. Рассчитываются условия охлаждения напыляемого материала для точек, которые находятся вблизи границы покрытие–основа, на расстоянии $2,83 \cdot 10^{-5}$ мм. Первая точка находится над пиком (точка 1), а вторая – над впадиной (точка 2). Вследствие симметрии задачи рассматривается область, ограниченная линиями, проходящими через точки 1 и 2 (см. рис. 4).

При САО формируется поверхность со случайным расположением пиков и впадин, высота и глубина которых также меняется случайным образом. Тем не менее, для моделирования термического процесса поверхность основы можно представить в виде регулярной структуры. Для этого используется трехмерная модель поверхности с учетом известных параметров шероховатости – Ra и S .

Расположение элементов шероховатости упорядочено. Плюсами обозначены выступы, минусами – впадины. На штриховых линиях отклонение от срединной поверхности равно нулю (рис. 5, а). При такой структуре поверхности температурное поле обладает периодичностью при перемещении в вертикальном и горизонтальном направлениях. Поэтому при моделировании термического процесса достаточно рассмотреть область, выделенную заштрихованным

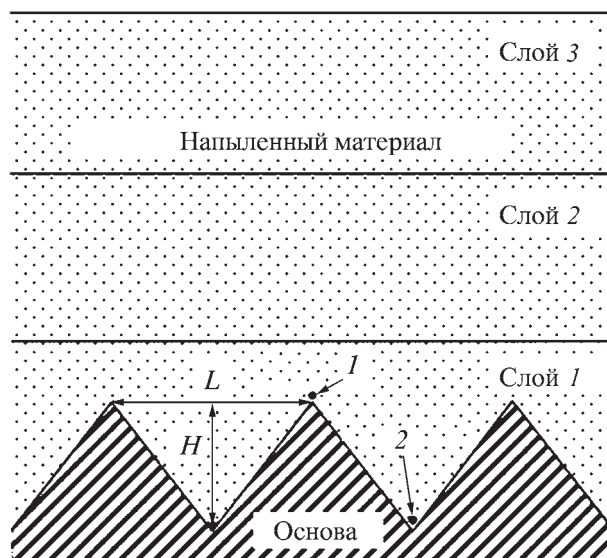


Рис. 4. Расчетная двумерная схема поверхности основы, полученная шлифованием и УФО

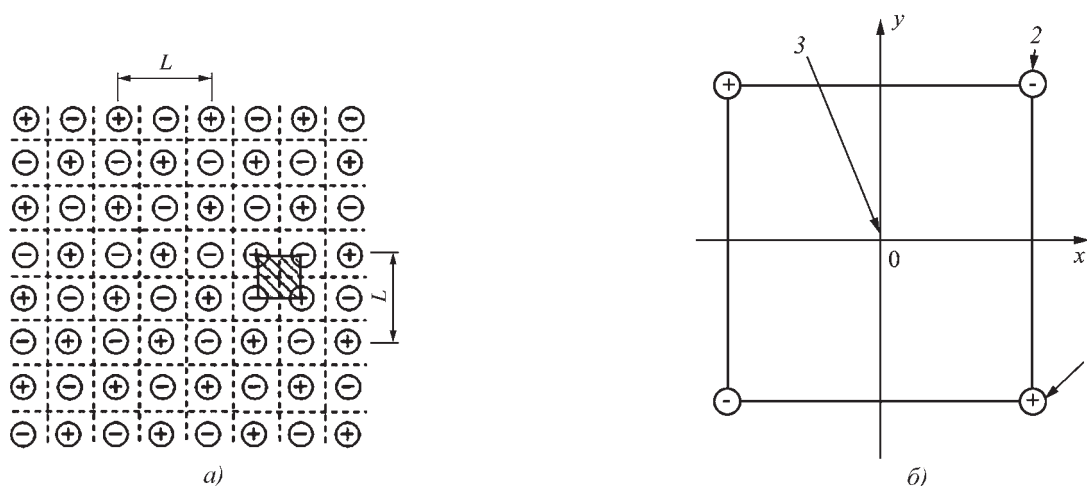


Рис. 5. Расчетная трехмерная схема поверхности основы, полученная САО: а – общий вид сверху; б – расчетная область

квадратом (рис. 5, б). Поверхность основы в этой области аппроксимируется формулой

$$h = -Raxy,$$

где h – отклонение от срединной поверхности;

x, y – локальные координаты, определенные в выделенном квадрате, $-L/2 \leq x, y \leq l/2$ (см. рис. 5, б).

Рассчитываются условия охлаждения напыляемого материала над пиком выступа (точка 1), над впадиной (точка 2) и над седловиной (точка 3).

В обеих моделях, как двумерной, так и трехмерной, в расчетах расстояние между пиками L берется как значение среднего шага неровностей по вершинам S . Для шлифования и САО оно принимается за 50 мкм, а для УФО – 200 мкм. Высота выступа и впадины на трехмерной модели равны между собой и считаются соизмеримыми со значением Ra . Это значит, что совокупная высота микронеровности H составляет два значения Ra .

На двумерной модели принимается то же условие выбора высоты микронеровности. Зная значения Ra

для всех способов обработки поверхности основы, задаем H для шлифования и УФО равным 1,4 мкм, а для САО – 8,8 мкм. Все экспериментальные и расчетные параметры рельефа поверхности основы приведены в табл. 1.

Таким образом, в расчетных моделях для упрощения сравнительного анализа на поверхности, полученной САО и шлифованием, расстояние между выступами задано одинаковым и составляет 50 мкм, а на поверхности, обработанной ультразвуковым инструментом, – в четыре раза больше. Для шлифования и УФО одинаковой задана высота микронеровностей, а для САО она больше в шесть раз.

Моделирование процесса охлаждения напыляемого материала

Для численного описания процесса кристаллизации и охлаждения напыляемого материала на основе использовали решение нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода расплав–твердый материал с применением метода конечных элементов [12].

Материал основы – сталь, напыляемый материал – сплав на основе никеля (NiCrB). В табл. 2 приведены теплофизические характеристики материалов.

Как говорилось выше, задача о термическом состоянии подложки и напыленного материала при УФО и шлифовании решается в двумерной постановке и вследствие симметрии задачи рассматривается область, ограниченная линиями, проходящими через точки 1 и 2 (см. рис. 4).

Рассматривали четыре слоя: основа и три слоя напыленного материала. Толщина основы 10 мм. Слой

Таблица 1

Экспериментальные и принятые для расчета параметры рельефа поверхности основы

Способ подготовки основы	Экспериментальные значения, мкм		Значения, принятые для расчета, мкм	
	S	$2Ra$	L	H
САО	60,2	8,76	50	8,8
УФО	200	1,4	200	1,4
Шлифование	43,6	1,68	50	

Таблица 2

Теплофизические характеристики исследуемых материалов

Характеристики	Сталь	NiCrB	
	твердая фаза	твердая фаза	жидкая фаза
Плотность, кг/м ³	7800	7900	8700
Удельная теплоемкость, Дж/К·м ³	481	600	443
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	45,38	58	80
Удельная теплота плавления, Дж/кг	–	2,85·10 ⁵	
Температура плавления, К	–	1400	

напыленного материала имеет эквивалентную толщину (толщина слоя материала, напыленного на гладкую поверхность при одинаковом режиме напыления) 10 мкм. Принимаем, что слой формируется мгновенно, а следующий слой появляется через временной промежуток $\Delta t = 8,92 \cdot 10^{-3}$ с. В пределах отдельного слоя изменение температуры во времени описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где k , ρ и c – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала.

Термодинамические характеристики материала не зависят от температуры в рамках существования определенного фазового состояния. Они изменяются при переходе материала в другое фазовое состояние. Ось x лежит в горизонтальной плоскости и направлена перпендикулярно движению обрабатываемого инструмента. Ось y направлена по нормали к поверхности основы.

На границе раздела двух слоев выполняются условия непрерывности температуры и теплового потока

$$T_I = T_{II}, \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_I = k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{II}, \quad (3)$$

где n – вектор нормали к границе раздела слоев.

Предполагается, что теплообмен на свободной границе пренебрежимо мал. В результате имеем следующие граничные условия. На свободной границе и

боковых границах расчетной области ставится условие

$$\frac{\partial T}{\partial n_b} = 0, \quad (4)$$

где n_b – вектор нормали к границе расчетной области.

На нижней границе основы (толщина основы 10 мм) задана температура

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5)$$

В качестве начальных условий для основы задается температура T_o . Остальной материал имеет начальную температуру, равную температуре плавления 1127 °С.

Для учета эффекта кристаллизации напыленного материала строится функция энтальпии с учетом скрытой энергии фазового перехода

$$H = \int \rho c(T) dT. \quad (6)$$

Значение ρc при температуре T определяется дифференцированием выражения (6) по T . Причем скачок H в точке фазового перехода размазывается на несколько градусов.

Задача решается численно методом конечных элементов. Процедура напыления новых слоев реализуется следующим образом. В начале строится конечно-элементная сетка для подложки и всех трех слоев напыленного материала. Но для двух верхних слоев задается очень маленький коэффициент теплопроводности (10^{-6} Вт/м·К). В результате на верхней поверхности первого слоя реализуется граничное условие (4). В момент образования второго слоя ему задается реальное значение k . То же самое делается и для третьего слоя.

Подобная задача решается и для материала после САО. Расчетная область показана на рис. 5, а. Отличие от предыдущего случая состоит в том, что задача является трехмерной. Это сказывается на уравнении (1), которое принимает следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (7)$$

Оси x и y взаимно перпендикулярны и лежат в горизонтальной плоскости. Ось z направлена по нормали к поверхности основы. В остальном методика получения решения остается такой же.

Обсуждение результатов расчета

С помощью описанной численной модели построены зависимости изменения температуры от времени в исследуемых точках первого слоя напыленного мате-

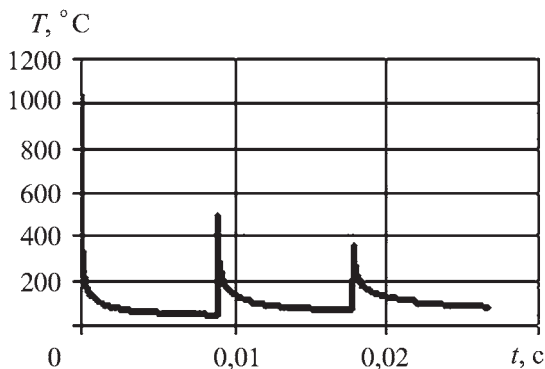


Рис. 6. Зависимость изменения температуры от времени в точке 1 первого слоя напыляемого материала для основы с УФО

риала. Обнаружено, что для всех расчетных точек поверхностей, полученных САО, шлифованием и УФО, характер временных зависимостей качественно не меняется.

На рис. 6 показан общий вид расчетной зависимости в точке 1 для основы с УФО. В начальный момент времени температура быстро падает, переходя затем к плавному затуханию. При образовании нового слоя температура снова резко повышается, и затем процесс остывания повторяется.

Однако при формировании второго и третьего слоев напыляемого материала, температура в точке 1 повышается значительно меньше. Так, температура нагрева в точке 1 в момент осаждения второго слоя для УФО составляет 470 °С, для шлифования – 469 °С, а для САО несколько выше – 533 °С. Во впадинах (точка 2) нагрев происходит примерно до тех же значений. При осаждении третьего слоя температура не поднимается для поверхности с УФО и шлифованием выше 445 °С, а для САО – выше 390 °С.

Рассмотрим этап охлаждения расплава и начала кристаллизации первого слоя во временном интервале до $5 \cdot 10^{-8}$ с и этап кристаллизации и охлаждения кристаллизованного напыленного материала за время $4 \cdot 10^{-5}$ с.

На начальном этапе остывания первого слоя кратковременное охлаждение жидкой фазы переходит в стадию начала кристаллизации (рис. 7). Надо отметить, что графики начинаются с момента времени $8,92 \cdot 10^{-10}$ с, а начальная температура напыляемого материала равна 1127 °С. Скорость охлаждения расплава составляет около 10^{10} °С/с, что соответствует сверхвысоким скоростям охлаждения [13]. Как видно из графиков на рис. 7, в, г, максимальная скорость охлаждения достигается во впадинах всех типов поверхности, так как в этих местах напыляемый материал со всех сторон окружен теплопроводящей основой.

Во всех расчетных точках процесс охлаждения расплава заканчивается быстрее, чем за 10^{-8} с, и переходит в процесс кристаллизации, когда температура изменяется медленно либо вообще не меняется (см. рис. 7, а, б). Это связано с тем, что в слое напыленного материала в процессе затвердевания жидкой фазы выделяется тепло, стабилизирующее температуру в расчетных точках и понижающее скорость охлаждения до нуля. Неравновесные условия охлаждения приводят к тому, что в расчетных точках исследуемых поверхностей устанавливаются разные значения температуры напыленного материала в интервале 825...887 °С.

Процесс начала кристаллизации для расчетной двумерной схемы поверхности, полученной шлифованием и УФО, на пиках и во впадинах идентичен. Вид кривых охлаждения одинаков – температура в расчетных точках устанавливается в интервале значений 835...850 °С и на пиках шероховатости в расчетном промежутке времени не меняется, а во впадинах несколько снижается за счет теплоотвода. Температура несколько выше на пиках, однако для поверхности с УФО, где больше шаг микронеровности и, следовательно, больше угол заострения пиков, разница температур в точках 1 и 2 совсем незначительна и составляет всего 15 °С.

Особенность расчетной трехмерной схемы, моделирующей форму поверхности основы после САО, приводит к большому градиенту температур в начале кристаллизации напыленного материала на пиках и во впадинах поверхности основы. Как видно из графиков (см. рис. 7, а, б), на пиках поверхности с САО в условиях самого худшего теплоотвода изначально высокая температура 887 °С возрастает до 934 °С. Во впадине осажденный материал обеспечен максимальным теплоотводом, что приводит к снижению начальной температуры, равной 825 °С, до значения 710 °С.

На графиках зависимости скорости охлаждения от времени данный процесс отражен для пика в виде области с отрицательным знаком (нагрев), для впадины с положительным знаком (охлаждение). Таким образом, градиент температур напыленного материала на пике (точка 1) и во впадине (точка 2) поверхности с САО составляет более 200 °С. В седловине поверхности, полученной САО, условия охлаждения напыленного материала подобны условиям охлаждения на поверхности, полученной УФО и шлифованием (см. рис. 7, б).

На основе представленных расчетов можно заключить, что при формировании первого слоя напыленного материала уже на стадии охлаждения расплава и начала его кристаллизации рельеф основы и особен-

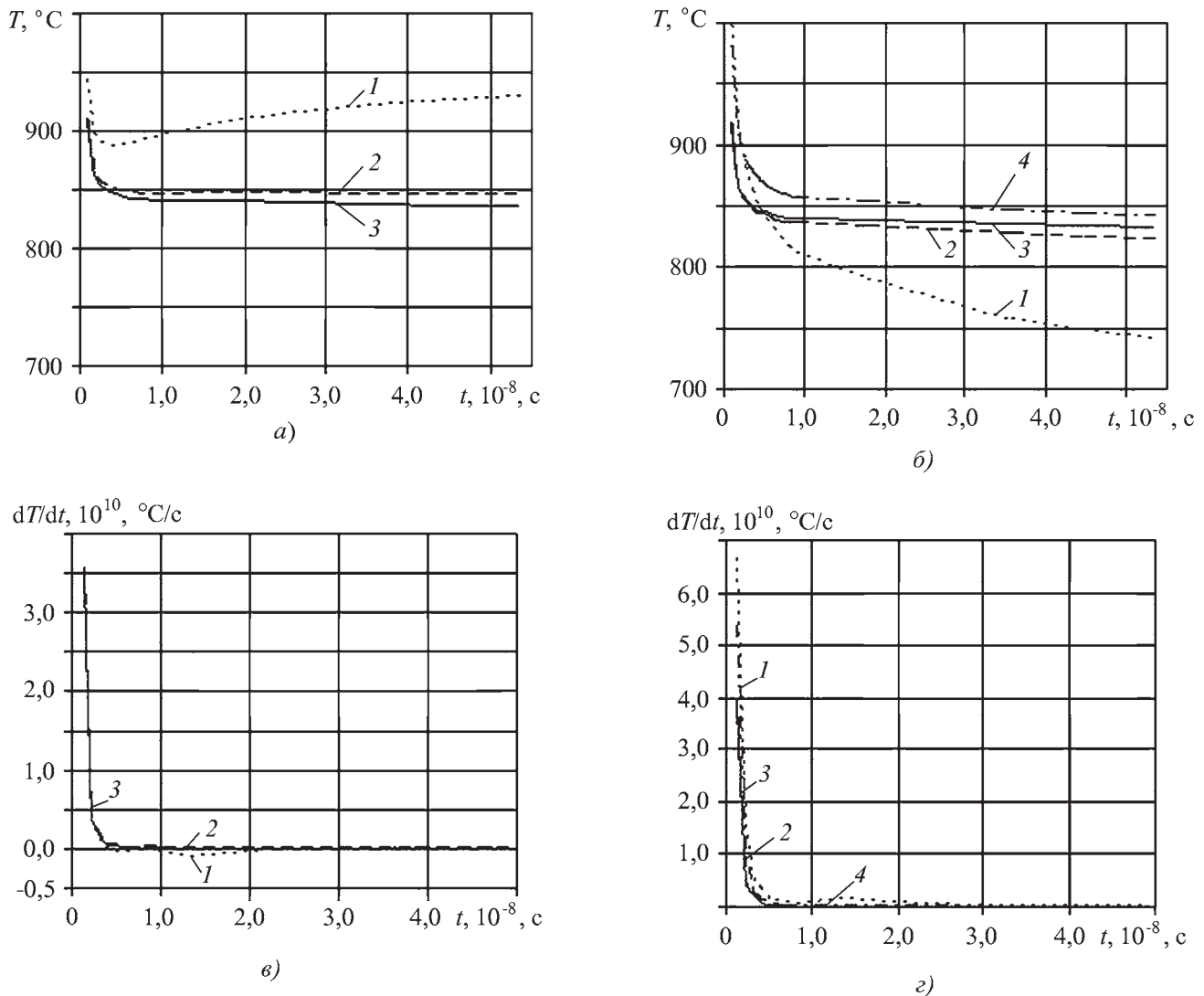


Рис. 7. Зависимости изменения температуры (а, б) и скорости охлаждения (в, г) от времени на начальном этапе остывания напыленного материала:

а, в – в точке 1; б, г – в точках 2 и 3; 1 – САО; 2 – шлифование; 3 – УФО

ности его микрогеометрии задают температурные режимы охлаждения.

На рис. 8 представлены расчетные зависимости процесса дальнейшего охлаждения напыленного материала, который характерен тем, что жидкая фаза перестает влиять на температуру в рассматриваемых точках. На графиках (см. рис. 8, а, б) видно, что период времени с относительно стабильной температурой в точках наблюдения завершается и происходит переход ($t_{\text{пер}}$ – время перехода) к интенсивному остыванию материала. Графики начинаются с момента времени $5 \cdot 10^{-8}$ с, т.е. являются продолжением выше описанных зависимостей. Основные расчетные значения приведены в табл. 3.

Из результатов представленных расчетов следует, что при всех способах подготовки основы время $t_{\text{пер}}$

лежит в промежутке $(3,57...9,15) \cdot 10^{-6}$ с. Момент перехода фиксируется на графиках изменения скорости охлаждения (см. рис. 8, в, г) всплеском значений. Вначале скорость охлаждения уменьшается до минимума, затем увеличивается, достигая локального максимума, и опять уменьшается.

Такое изменение скорости охлаждения обусловлено спецификой подвода выделившейся скрытой теплоты кристаллизации к расчетной точке напыленного слоя. В момент кристаллизации подвод выделившейся скрытой теплоты приводит к тому, что температура в слое напыленного материала, лежащего в непосредственной близости от границы раздела с подложкой, стабилизируется.

По мере того как нарастает слой закристаллизованного материала, скорость охлаждения начинает уве-

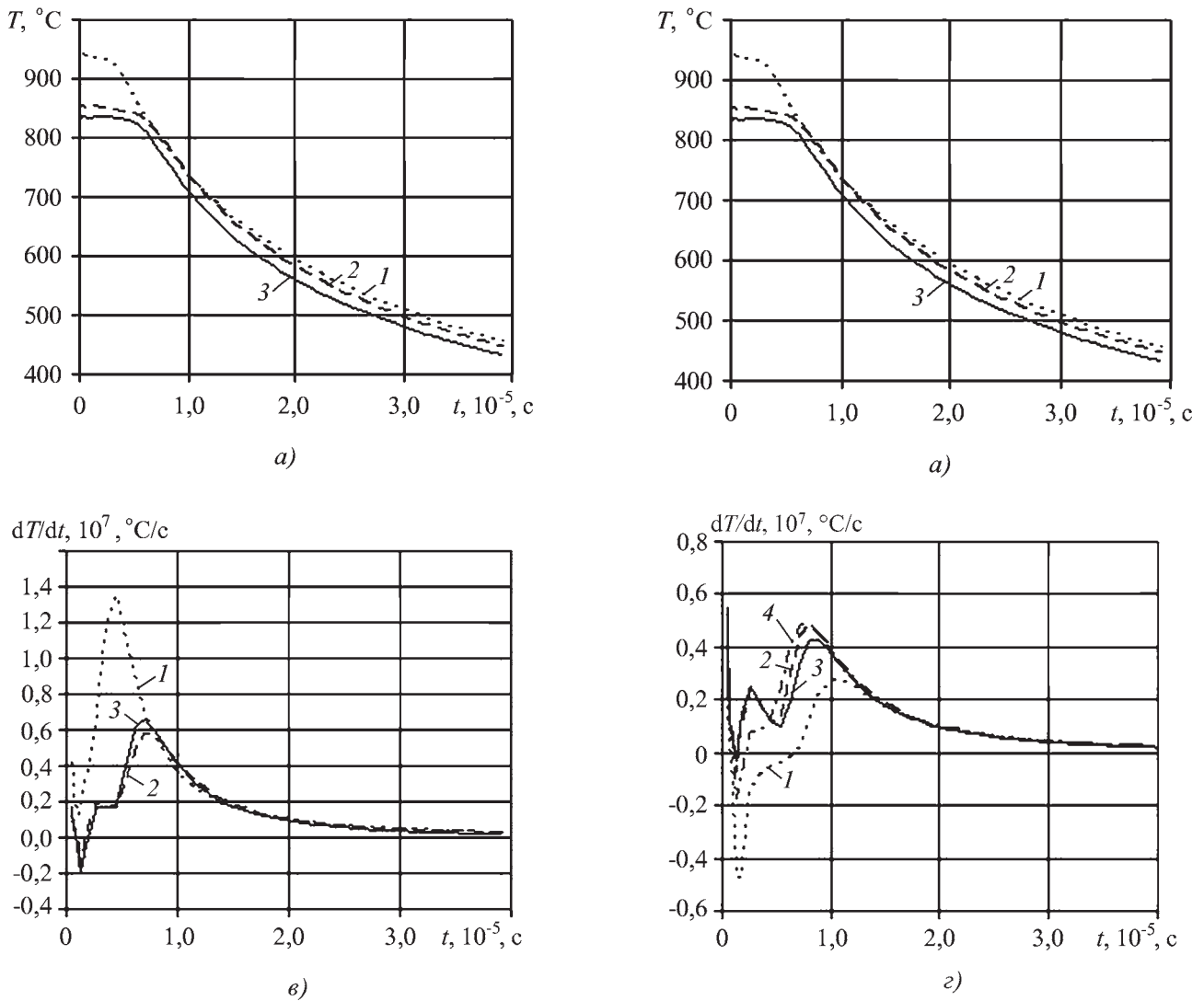


Рис. 8. Зависимости изменения температуры (а, б) и скорости охлаждения напыляемого материала (в, г) от времени на этапе дальнейшего охлаждения напыленного материала:

а, в – в точке 1; б, г – в точках 2 и 3; 1 – CAO (точка 2); 2 – шлифование; 3 – УФО; 4 – CAO (точка 3)

личиваться, так как закристаллизовавшийся слой является своеобразным теплоизолятором, препятствующим притоку тепла из области, где процесс кристал-

лизации еще не завершился. В этот момент скорость охлаждения достигает локального максимума, положение которого соответствует точке перегиба $t_{пер}$ на гра-

Таблица 3

Расчетная температура и время перехода

Параметр	УФО		Шлифование		CAO		
	Точка 1	Точка 2	Точка 1	Точка 2	Точка 1	Точка 2	Точка 3
$T, ^\circ\text{C}$	835	820	850	810	934	710	834
$t_{пер}, 10^{-6}, \text{c}$	5,35	7,14	6,24	6,69	3,57	9,15	7,14

фике зависимости температуры от времени (см. рис. 8, а, б). После того как процесс кристаллизации закончился скорость охлаждения уменьшается обычным образом, обусловленным приближением системы к термическому равновесию.

Из рис. 8, в, г видно, что в некоторых случаях зависимость скорости охлаждения от времени становится отрицательной – материал испытывает нагрев. Для объяснения этого факта следует учесть, что напыленный материал имеет более высокую теплопроводность, чем материал подложки.

В начальный момент времени на границе раздела материалов формируется большой градиент температуры. В результате этого поток тепла от напыленного материала в подложку весьма высок, что приводит к быстрому охлаждению ближайших к границе раздела слоев напыленного материала. По мере того как градиент температуры уменьшается, уменьшается и скорость отвода тепла в подложку. В то же время продолжающийся процесс кристаллизации в удаленных от подложки слоях напыленного материала обеспечивает дополнительный подвод тепла к остывшему материалу, что обуславливает его повторный нагрев.

Кристаллизация напыленного материала первого слоя происходит значительно быстрее осаждения последующего слоя. Несмотря на это, необходимо учитывать, что сформированная при сверхвысоких скоростях охлаждения неравновесная структура напыленного материала при последующем нагреве вновь осаждаемым вторым слоем (см. рис. б) может изменить свое строение в сторону более равновесного состояния.

В период времени от начала кристаллизации до $t_{пер}$ для поверхностей, полученных УФО и шлифованием, температура напыленного материала в пиках и во впадинах меняется незначительно, сохраняя первоначальные значения (см. табл. 3), $t_{пер}$ меньше для пика шероховатости.

В аналогичном периоде времени для поверхности с САО температура поверхности как на пике, так и во впадине несколько меняется, сохраняя градиент около 200 °С. Причем на пике температура сначала возрастает (см. рис. 7, а) и затем снижается (см. рис. 8, а), а во впадине сначала снижается (см. рис. 7, б) и затем возрастает (см. рис. 8, б). В седловине поверхности температурный режим напыленного материала стабильный (см. рис. 8, б). Для поверхности с САО также характерен самый большой градиент величины $t_{пер}$ (см. табл. 3) и скорости охлаждения в момент времени $t_{пер}$ (см. рис. 8, в, г). Это обусловлено спецификой морфологии поверхности, сформированной острыми, изолированными друг от друга выступами шероховатости.

Выводы

1. Для численного описания процесса кристаллизации и охлаждения напыляемого материала с помощью результатов профилометрического анализа выбраны расчетные схемы поверхности основы, полученной шлифованием, УФО и САО. Для шлифования и УФО предложена двумерная схема поверхности с заданными параметрами шероховатости. Для САО выбрана трехмерная схема поверхности с регулярной структурой.

2. Получены зависимости изменения температуры и скорости охлаждения от времени на этапе охлаждения расплава, кристаллизации и остывания напыленного материала. Показано, что условия охлаждения напыляемого материала зависят от микрорельефа поверхности – высоты и частоты расположения микронеровностей, их геометрии.

3. На всех исследуемых поверхностях процесс кристаллизации напыленного материала первого слоя заканчивается до осаждения последующего слоя. При образовании нового слоя температура в первом слое вновь повышается до значительно меньших значений, что необходимо учитывать при описании процесса структурообразования покрытия.

4. Определено, что поверхность с САО, сформированная острыми, изолированными друг от друга выступами шероховатости, создает максимальный градиент температуры и скорости охлаждения напыленного материала. Шлифованные поверхности и поверхности с УФО, имеющие полосчатое строение с минимальной высотой микровыступов, создают условия для формирования напыляемого материала в близких температурных и скоростных режимах.

5. С помощью представленной численной модели можно подбирать оптимальный микрорельеф поверхности основы, исходя из особенностей метода напыления и требуемых от покрытия структуры и свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балдаев Л.Х., Калита В.И. Современные тенденции получения газотермических покрытий // Технология металлов. 2003. № 2. С. 17–20.
2. Хромов В.Н., Верцов В.Г., Коровин А.Я. и др. От дозвукового к сверхзвуковому газопламенному напылению покрытий при восстановлении и упрочнении деталей машин // Сварочное производство. 2001. № 2. С. 39–48.
3. Фролов В.А., Рябенко Б.В., Викторенко Д.В. Технологические особенности применения плазменного напыления в производстве авиационных двигателей // Сварочное производство. 2004. № 3. С. 43–47.
4. Калита В.И. Формирование композиционных пористых покрытий на поверхности имплантатов низкотемпературной плазмой // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 3. С. 39–47.

5. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка. 2001. № 6. С. 19–25.

6. Ревун С.А., Балакирев В.Ф. Особенности образования адгезионной связи при газотермическом напылении покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 2. С. 55–62.

7. Калита В.И., Балдаев Л.Х. и др. Методы оценки подготовки поверхности деталей под газотермическое напыление // Технология машиностроения. 2005. № 4. С. 31–33.

8. Солоненко О.П., Смирнов А.В., Клименов В.А. и др. Роль границ раздела при формировании сплэтов и структуры покрытий // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1–2. С. 123–140.

9. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г. и др. Ультразвуковое модифицирование – метод подготовки поверхности перед газотермическим напылением // Матер. 8-й Междунар.

практ. конф. "Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки". СПб., 2006. Ч. 1. С. 150–158.

10. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г. и др. Влияние ультразвуковой обработки основы на формирование покрытия при детонационном напылении // Технология машиностроения. 2008. № 7. С. 22–26.

11. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г. и др. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 3. С. 57–61.

12. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

13. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов / под. ред. Г. Германа. М.: Металлургия, 1986. 286 с.

УДК 620.178.3

М.Н. Рощин (ЗАО НПК "Атомтехнопром"),
В.В. Алисин, А.А. Владиславлев, И.М. Петрова (ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: IMPetr@mail.ru

Оценка сопротивления усталости стали 30ХГСА после лазерной наплавки металлокерамического покрытия с ультратонкой упрочняющей фазой

Приведены результаты сравнительных испытаний на усталость образцов исходного материала, после лазерной наплавки износостойкого покрытия из порошка ПГ-10Н-01, с электролитическим хромовым покрытием. Дана оценка влияния рассмотренных покрытий на характеристики сопротивления усталости.

Ключевые слова: лазерная наплавка, электролитическое хромовое покрытие, испытания, сопротивление усталости, износостойкость.

The results of comparative fatigue tests of base steel specimens, specimens with laser coating by wear resistant powder ПГ-10Н-01 and specimens plated by electrolytic chromium are presented. The estimation of the analyzed coatings effect on the fatigue strength is made.

Keywords: laser cermet coating, electrolytic chromium, tests, fatigue, wear resistance.

Введение

В узлах трения авиакосмической техники, например гидравлических устройствах, широкое применение находят упрочняющие износостойкие покрытия, получаемые электролитическим хромированием. Возможности улучшения трибологических свойств этих покрытий практически исчерпаны. Перспективным методом повышения износостойкости, задиристости и антифрикционных свойств является лазерная наплавка порошковых покрытий на основе Ni–Cr с ультратонкой керамической упрочняющей фазой Al_2O_3 [1].

В ряде устройств (валы, замковые соединения и др.) детали узлов трения подвержены воздействию

циклических нагрузок и их ресурс ограничивается достижением предельного состояния одновременно по критериям износа и усталости. Возрастающие требования к надежности современных сложных технических изделий обуславливают острую потребность в новых материалах [2], сочетающих высокую износостойкость и прочность в широком интервале условий эксплуатации, в том числе при динамическом нагружении.

Решение этой актуальной проблемы приводит к необходимости разработки и производства сложных композиционных материалов, сочетающих широкий набор требуемых свойств. Перспективным является нанесение на обычные конструкционные материалы

покрытий, в состав которых входят износостойкие, жаростойкие, коррозионно-стойкие и другие компоненты, используемые в зависимости от эксплуатационных требований [3]. Детали машин, на которые наносят различные покрытия, требуют проведения дополнительных исследований, подтверждающих их работоспособность в заданных условиях эксплуатации.

Методика проведения исследований

Известно, что предел выносливости деталей с покрытиями, полученными традиционными методами наплавки, снижается на 20...70 % в сравнении с их исходным состоянием [4]. В этом случае весьма актуально оценить влияние лазерной и плазменных наплавки на эксплуатационные характеристики деталей, так как можно получить характеристики сопротивления усталости на уровне исходного материала при значительном улучшении их трибологических характеристик [4, 5].

Технология получения износостойких металлокерамических покрытий включает плазменное газотермическое напыление порошкового материала с последующим лазерным оплавлением покрытия с учетом зависимости теплофизических параметров от температуры. Для предварительного нанесения порошковых композиций использовали оптимизированный процесс плазменного напыления.

Покрытия наносили на рабочие поверхности сверхзвуковым генератором плазмы, разработанным в ИМАШ РАН. Инжекция порошкового материала осуществлялась в дозвуковую область течения плазмы. В качестве пластичной матрицы использовали сплавы системы Ni–Cr–B–Si [3], в качестве упрочняющей фазы – порошки Al_2O_3 фракции 5...20 мкм. Концентрацию упрочняющей фазы изменяли в пределах 20...40 % вес.

В процессе нанесения поверхность частиц порошкового материала подвергали диффузионному насыщению углеродом за счет применения C_2H_2 для транспортировки порошкового материала. Для увеличения прочностных характеристик металлокерамических покрытий образцы предварительно нагревали до $T = 400$ °С.

Оплавление покрытий проводили на лазерном (CO_2) технологическом комплексе ЛТК-01 при мощности непрерывного излучения 2,5...4,5 кВт; скорости обработки $(2,5...8,0) \cdot 10^{-3}$ м/с и частоте сканирования лазерного луча 200 Гц.

Покрытия наносили на образцы прямоугольного профиля размером 6×8×80 мм, изготовленные из стали 30ХГСА, прошедшие термообработку. Предел

прочности образцов после термообработки – $\sigma_b \geq 1000$ МПа.

Сравнительным испытаниям на усталость подвергали два вида образцов: первый – образцы с покрытием, полученным лазерной наплавкой толщиной 700 мкм; второй – образцы с покрытием из твердого электролитического хрома толщиной 20...30 мкм. Поверхность образцов тщательно полировали, так как качество обработки поверхности оказывает сильное влияние на накопление усталостных повреждений и при наличии различных дефектов поверхности зарождение усталостной трещины начинается с поверхности.

Испытания проводили на резонансной испытательной машине с электромагнитным возбуждением колебаний.

Для каждой группы образцов определяли предел выносливости методом лестницы и наклонную ветвь кривой усталости в соответствии с ГОСТ 25.502–79 "Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость". Обработку результатов испытаний проводили по методике, изложенной в [6]. Использование метода лестницы позволяет оценить значение предела выносливости и его рассеяние на заданной базе.

Для определения параметров наклонной ветви кривой усталости результаты испытаний образцов были обработаны методом регрессионного анализа по методике, изложенной в [6], основанной на предположении логарифмически нормального распределения характеристик выносливости.

Кривую усталости записывали в виде

$$\sigma^m N = \sigma_{-1G}^m N_G = C, \quad (1)$$

где σ – текущее напряжение;

m – показатель наклона кривой усталости;

N – число циклов при текущем напряжении;

G_{-1G} – предел выносливости материала;

N_G – точка перелома кривой усталости;

C – постоянная,

или в логарифмической форме

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C.$$

Ограниченный предел выносливости, соответствующий заданному числу циклов N , определяли по формуле

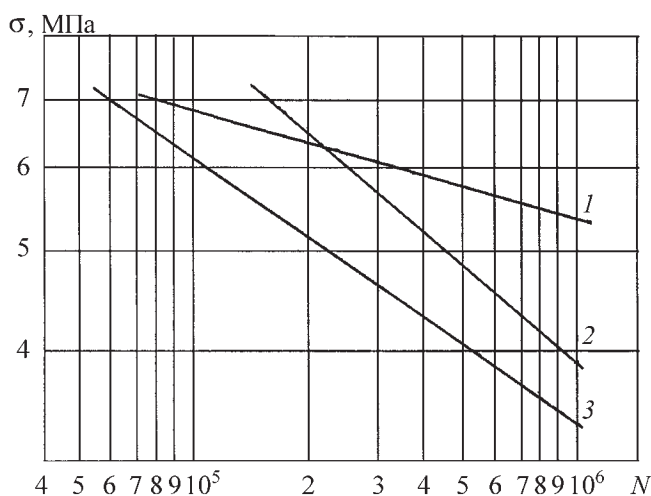
$$\sigma_{-1N} = \sigma_{-1G} \sqrt[m]{\frac{N_G}{N}}.$$

Результаты исследований

Исходные значения характеристик сопротивления усталости были определены путем усталостных испы-

Параметры кривой усталости

Кривая усталости	<i>m</i>	σ_{-1G} , МПа	N_G
Исходная (рисунок, кривая 1)	10,8	540	10 ⁶
Электрохимического покрытия (рисунок, кривая 2)	3,95	327	
Лазерной наплавки (рисунок, кривая 3)	2,986	390	



Кривые усталости:

1 – исходная; 2 – электролитическое хромовое покрытие; 3 – лазерная наплавка ПГ-10Н-01

таний круглых гладких образцов при плоском изгибе, проведенных в статистическом аспекте. Образцы испытывали на пяти уровнях напряжений.

Уравнения кривых усталости, полученные в результате испытаний, имеют вид:

– для исходных образцов

$$10,8 \lg \sigma + \lg N = 35,67;$$

– для образцов после лазерной наплавки

$$3,951 \lg \sigma + \lg N = 15,94;$$

– для образцов с электролитическим хромовым покрытием

$$2,99 \lg \sigma + \lg N = 13,74.$$

Параметры кривых усталости приведены в таблице.

Обсуждение результатов

Параметры кривых усталости образцов, прошедших электролитическое хромирование и лазерную

наплавку, сравнивали с характеристиками сопротивления усталости исходных образцов из стали 30ХГСА.

Проведенные усталостные испытания на образцах прямоугольного профиля показывают снижение сопротивления усталости образцов после электролитического хромирования на 30 % и после лазерной наплавки на 40 %.

Необходимо отметить, что условия лазерной обработки образцов прямоугольного профиля резко отличаются от обработки цилиндрических деталей. При наплавке цилиндрических поверхностей лазерный луч сканирует параллельно оси тела вращения и перемещается по винтовой линии поверхности, а при обработке прямоугольных образцов сканирование реализуется перпендикулярно оси образца и движение производится вдоль оси образца. Так, например, в прямоугольном образце возникают наибольшие сжимающие напряжения вдоль всего образца по дорожке сканирования, а в цилиндрическом образце наибольшими напряжениями являются нормальные напряжения.

На малоразмерных образцах, в которых имеет место худшее условие отвода тепла в глубь материала, реализуется большее по величине остаточное напряжение в сравнении с более массивными деталями, т.е. распределение тепловых полей в них совершенно различное. Следовательно, реальные характеристики сопротивления усталости натуральных деталей должны быть значительно выше.

В то же время отмечено значительное повышение износостойкости наплавленного покрытия, которое было получено в результате испытаний натуральных деталей – осей шарниров, проведенных на стенде СТ-01-А, по штатной программе при долговечности 0,72·10⁵ циклов и нагрузке 40 МПа. После испытаний дефектов в деталях не обнаружено, что подтверждает предположение о высоких эксплуатационных характеристиках деталей после лазерной наплавки покрытий из порошка ПГ-10Н-01.

Выводы

1. Определены характеристики сопротивления усталости образцов из стали 30ХГСА с наплавленным лазером износостойким дисперсно-упрочненным порошковым покрытием на основе системы Ni–Cr–B–Si и образцов, подвергнутых твердому электролитическому хромированию.

2. По совокупности эксплуатационных свойств износостойкость, задиростойкость и антифрикционные свойства, разработанное покрытие и технология его нанесения значительно эффективнее твердого электролитического хромирования, а по экономическим показателям в условиях серийного производства и по экологии процесса существенно лучше и имеют

перспективы применения для повышения ресурса работы и надежности исполнительных механизмов гидросистем различного назначения.

3. Положительный эффект применения этого покрытия подтвержден испытаниями натуральных деталей – осей шарниров. После испытаний дефектов в деталях не обнаружено, что подтверждает эффективность лазерной наплавки покрытий из порошка ПГ-10Н-01.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алисин В.В., Рошин М.Н., Владиславлев А.А. Технология получения износостойких металлокерамических покрытий с ультрадисперсной упрочняющей фазой // Перспективные материалы и технологии: НАНОКОМПЗИТЫ. Космический вызов 21 века: сб. науч. тр. М.: Торус Пресс, 2006. С. 59–68.

2. Новые материалы / под ред. Ю.Х. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.

3. Tribology-Lubrication, Friction and Wear / Edited by I.V. Kragelsky and V.V. Alisin. Professional Engineering Publishing Limited. UK: London and Bury St Edmunds, 2001. 948 p.

4. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии // Под ред. А.П. Гусенкова. М.: Наука, 1992. 404 с.

5. Архипов В.Е., Биргер Е.М., Поляков А.Л. Влияние лазерной наплавки на сопротивление усталости и износостойкость стали 45 // МитОМ. 1988. № 1. С. 55–58.

6. Степнов М.Н., Агамиров Л.В. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Планирование и статистическая обработка результатов испытаний на усталость. Методические указания. РД 50-705–91. М.: Изд-во стандартов, 1991. 167 с.

УДК 534.222.2:621.793

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

Применение детонационного напыления для формирования градиентных покрытий керамика–металл*

Производили напыление градиентных покрытий на основе Ti и Al₂O₃ с применением компьютеризированного детонационного комплекса "Дракон", оснащенного двумя дозаторами. Установлено, что, чередуя выстрелы с тем или иным компонентом при послойном напылении, можно в широких пределах изменять структуру покрытия от "грубой" до "тонкой". В покрытиях с грубой структурой значения микротвердости, измеренные в различных слоях, существенно различаются и соответствуют этим параметрам для керамической и металлической компонент. В покрытиях с тонкой структурой колебания микротвердости в объеме, где керамика и металл сильно перемешаны, практически отсутствуют. Проведены испытания покрытий на сдвиг по специально разработанной методике.

Ключевые слова: детонационный комплекс, послойное напыление, градиентное покрытие, керамическая компонента, металлическая компонента.

The spraying of Ti and Al₂O₃ gradient coatings with the use of computer controlled detonation system "Dragon" equipped with two powder feeders was performed. The coating structure can be changed from "coarse" and "fine" by changing of shots with different powder components at layer-by-layer deposition. Hardness in "coarse" coatings is different substantially in different layers and corresponds to ceramic and metal components. Hardness in "fine" coatings varies weakly in volumes where ceramic and metal components are mixed strongly. Shear strength tests of coatings were made using the specially developed procedure.

Keywords: detonation system, layer-by-layer deposition, gradient coating, ceramic component, metal component.

Введение

Нанесение керамических покрытий на металлы приобретает все более актуальное значение в технике. Так, например, термобарьерные и коррозионно-стой-

кие покрытия предназначены для повышения срока службы деталей промышленных газовых турбин, авиационных, бензиновых и дизельных двигателей. Серьезно рассчитывать на прогресс в области газотурбостроения можно только при широком использовании жаропрочных сплавов в сочетании с конструктивными керамическими материалами и композитами [1].

Работы по созданию керамических покрытий на деталях газовых турбин ведутся с прошлого века, ин-

* Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 11 (проект 11.17), интеграционных проектов СО РАН № 82 и 108, гранта РФФИ № 09-01-00433-а и научной школы НШ-1886.2008.1.

тенсивные исследования продолжают и в настоящее время [2]. Внедрение керамических покрытий в автомобильную промышленность происходит значительно быстрее в сравнении с монокристаллической керамикой и керамическими композитами.

Теплозащитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы *двигателей внутреннего сгорания* (ДВС) позволяют снизить перенос тепла в охлаждающую жидкость не менее чем на 10...15 %. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить объем радиаторов более чем на 10 % и повысить экономичность двигателя более чем на 4 % со снижением расхода топлива не менее чем на 3...4 %. Повышается общий моторесурс двигателя на 20 % за счет снижения температуры поршня в зоне первого поршневого кольца на 30 %, исключается заклинивание двигателя и уменьшается износ кольца. Снижается количество выхлопных газов, что улучшает экологичность ДВС [3, 4]. Тем не менее, создание композиций с керамическими слоями на металле сталкивается с серьезными технологическими трудностями.

Многие исследователи используют плазменное напыление для создания термобарьерных покрытий [5, 6]. Однако очень часто покрытия, наносимые этим и другими газотермическими способами, не выдерживают длительных сроков эксплуатации в условиях термциклирования из-за существенной разницы в

коэффициентах термического расширения материалов подложки (металл) и покрытия (керамика).

В данной работе рассмотрено нанесение градиентных покрытий последовательным напылением слоев с различным содержанием керамики и металла. Покрытия на основе Ti и Al₂O₃ наносили на *компьютеризованном детонационном комплексе "Дракон"* (КДК "Дракон"), описанном в [7, 8].

Комплекс позволяет работать одновременно с двумя импульсными порошковыми дозаторами запатентованной конструкции [9] и непрерывно в процессе напыления по заданной программе менять состав напыляемого слоя. Во время напыления автоматически могут меняться параметры напыления (состав, количество горючей смеси и т.д.).

Нанесение покрытий

Перед нанесением градиентных покрытий отдельно определяли оптимальные режимы напыления порошков титана и оксида алюминия (производитель TLS Technik GmbH, частицы 40...60 мкм). Затем каждый порошок засыпали в отдельный дозатор, на компьютере задавали циклограмму процесса и производили напыление на плоские подложки из титана BT1-0 размером 2×20×70 мм. Циклограмма процесса определяла времена открытия и закрытия клапанов, через которые в ствол подавали компоненты горючей

Таблица 1

Сочетание выстрелов с напылением материалов в слоях покрытий

Материал	Число выстрелов для слоя																									
	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
<i>Вариант 1</i>																										
Ti	16	12	8	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	4	8	12	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Вариант 2</i>																										
Ti	9	8	7	6	5	4	3	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Вариант 3</i>																										
Ti	9	4	4	3	4	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	1	1	1	1	2	2	2	3	2	3	3	4	3	4	4	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Вариант 4</i>																										
Ti	9	4	4	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Al ₂ O ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	4	4	9	

*1...25 – номер слоя покрытия.

газовой смеси и продувочный газ, время инъекции порции порошка в ствол и время зажигания смеси.

Титан напыляли с использованием газовой смеси (кислород/ацетилен) с молярным соотношением кислорода к ацетилену 1,05/1. Продукты детонации этой смеси отличаются восстановительным составом (H_2 , CO), что исключает окисление титановых частиц. При оптимальном режиме напыления ствол заполняли взрывчатой смесью на 30 %.

Для напыления оксида алюминия выбрана смесь кислород/ацетилен (молярное соотношение кислорода к ацетилену 2,5/1) окислительного состава, на которой в оптимальном режиме ствол заполняли на 60 %. Дистанция напыления – 200 мм. Покрытия наносили не только на плоские, но и на осесимметричные образцы для проведения прочностных испытаний.

На данном этапе исследований было выбрано 4 варианта покрытий. Толщина покрытий была постоянной (≈ 500 мкм), число слоев изменялось так, что структура покрытия менялась от "грубой" в варианте 1 к "тонкой" в варианте 4. В каждом слое сохраняется постоянным соотношение выстрелов порошком титана и порошком оксида алюминия. Если считать от титановой подложки, то данная пропорция меняется в сторону увеличения доли оксида алюминия, так что наружный слой фактически представляет собой чистый Al_2O_3 .

Число слоев составляет 4, 9, 16 и 25 для вариантов 1, 2, 3 и 4 соответственно. Сочетания выстрелов с напылением титана и оксида алюминия приведены в табл. 1. Например, в варианте 1 в первом слое делали 16 выстрелов титаном и 4 выстрела оксидом алюминия, во втором слое на 12 выстрелов титаном приходилось 8 выстрелов оксидом алюминия и т.д.

Микроструктура и микротвердость покрытий

Микроструктура покрытий показана на рис. 1–4, значения микротвердости представлены в табл. 2. В исследованиях использовали сканирующий электронный микроскоп LEO 420 и микротвердомер ПМТ-3 (измерения с нагрузкой 0,49 Н).

Данные табл. 2 показывают, что в покрытиях с "грубой" структурой микротвердости металлической и керамической компонент существенно отличаются.

Микротвердость покрытия с "тонкой" структурой (вариант 4) близка к микротвердости титана. Это связано с интенсивным перемешиванием компонент. Для сравнения укажем, что микротвердость HV_{300} покрытия из Al_2O_3 обычно составляет 1200...1350 HV, а микротвердость титанового покрытия – 250...300 HV.

Интерпретация данных по микротвердости должна проводиться с учетом толщины слоя в градиентном

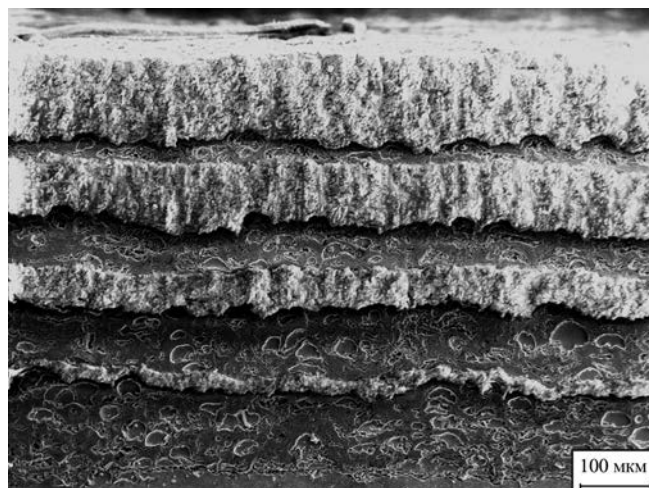


Рис. 1. Микроструктура покрытия (вариант 1, участки: светлые – Al_2O_3 , темные – Ti)

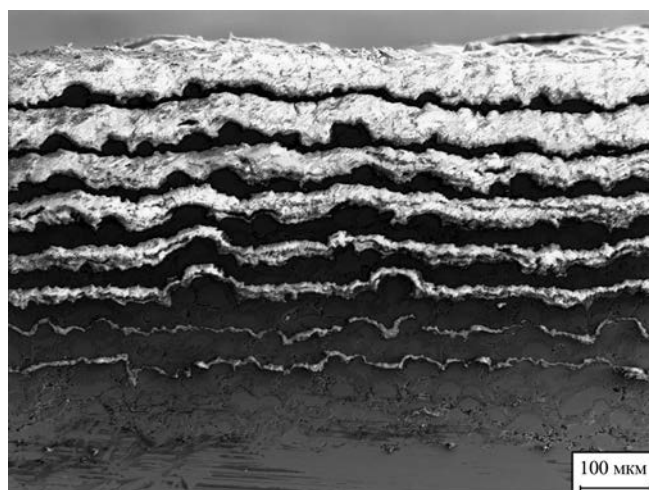


Рис. 2. Микроструктура покрытия (вариант 2, участки: светлые – Al_2O_3 , темные – Ti)

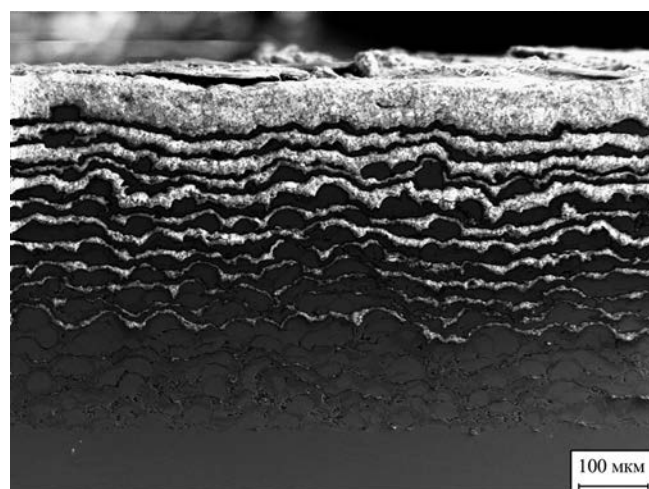


Рис. 3. Микроструктура покрытия (вариант 3, участки: светлые – Al_2O_3 , темные – Ti)

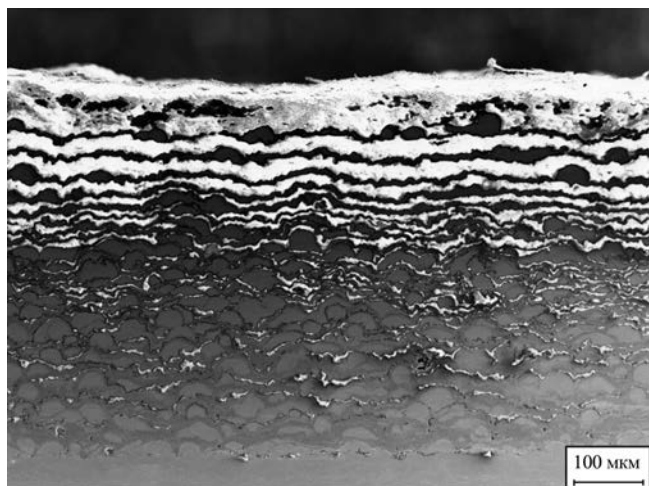


Рис. 4. Микроструктура покрытия (вариант 4, участки: светлые – Al_2O_3 , темные – Ti)

Таблица 2

Микротвердость градиентных покрытий

Покрытие	Измеренные значения HV_{50}	Среднее значение HV_{50}
<i>Вариант 1</i>		
Подложка	362, 377	370
Al_2O_3	1555, 851, 1110, 1110, 1622, 1622, 1495, 765	1266
Титан	221, 289, 310, 362, 268, 214, 340, 277	285
<i>Вариант 2</i>		
Подложка	362, 377	370
Al_2O_3	925, 972, 1110, 1495, 1622	1225
Титан	362, 253, 185, 268, 253, 333, 253, 268, 424, 208, 240, 240, 253, 362, 377	268
<i>Вариант 3</i>		
Подложка	310, 310	310
Al_2O_3	1110	1110
Титан	407, 377, 268, 236, 260, 236, 289, 300, 277, 424, 588	333
<i>Вариант 4</i>		
Подложка	377, 377	377
Титан + Al_2O_3	362, 333, 340, 377, 253, 231, 289, 253, 300, 392, 362, 260, 231, 236	301

покрытии и размера отпечатка индентора. В варианте 1 покрытие состоит из 4 слоев и толщина слоя составляет около 125 мкм, в то время как размер отпечатка индентора 23...29 мкм для компоненты Al_2O_3 и 50...60 мкм для титановой компоненты. Поэтому, когда индентор попадает на включение Al_2O_3 , то получаются высокие значения микротвердости, если индентор попадает в область, заполненную титаном, то значения твердости соответствуют этой компоненте.

В вариантах покрытий 2–4 размер отпечатка сравним с толщиной слоя и измеренные значения микротвердости должны интерпретироваться как усредненные. Число попаданий индентора на чистый Al_2O_3 снижается по мере перехода от варианта 1 к варианту 4, поэтому снижается и количество измерений с высоким значением микротвердости. В варианте 4 компоненты уже настолько перемешаны, что индентор "не чувствует" отдельных компонент, и микротвердость становится усредненной. Поэтому для варианта 4 значения микротвердости для Al_2O_3 и титана отдельными строками не выделены.

Прочность покрытий

Для измерения прочности покрытий на сдвиг была разработана специальная методика. Покрытия наносили на пояски осесимметричных образцов из стали и алюминия (рис. 5), после чего проводили испытания по схеме, представленной на рис. 6.

Образец с напыленным на поясок А диаметром 17,8 мм покрытием помещали на стол испытательной машины TC-FR/00TL A4K (Zwick/Roell), на него устанавливали втулку диаметром 18 мм, выполненную из закаленной стали, так что одним торцом она опиралась на покрытие, а на второй торец подавали нагрузку Р. Методика позволяет путем варьирования диаметра пояска (при постоянном внутреннем диаметре втулки и сопряженном с ним диаметром цилиндрической части образца) подавать усилие среза



Рис. 5. Образец (А – поясок, на который напыляли покрытие)

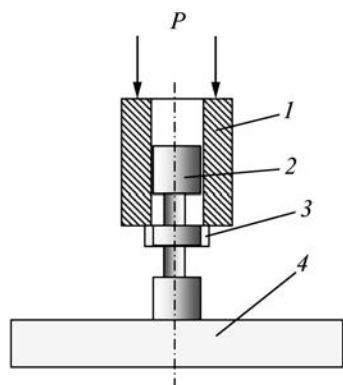


Рис. 6. Схема испытания покрытия на срез:
 1 – втулка; 2 – образец;
 3 – покрытие на образце;
 4 – стол испытательной машины

на различном расстоянии от подложки и, тем самым, измерять послойную прочность покрытия.

Например, при уменьшении диаметра пояска расстояние между краем втулки и поверхностью контакта покрытие–подложка будет увеличиваться и срезающее усилие будет прикладываться все дальше от поверхности контакта. Такие эксперименты с изготовлением образцов с различными диаметрами поясков предполагается проводить в дальнейших исследованиях.

Диаметр цилиндрической поверхности образца, сопряженной с внутренней поверхностью втулки, выполняется по скользящей посадке. Для отладки методики напыляли покрытия из Ti, Al₂O₃, Ti с подслоем Al₂O₃ и Al₂O₃ с подслоем Ti, после чего проводили тесты с градиентными покрытиями.

Результаты испытаний приведены в табл. 3, на рис. 7 показаны некоторые образцы после испытаний. Из табл. 3 (строки 5 и 7) видно, что можно добиться прочности выше 150 МПа (достаточно высокое значение для детонационных покрытий).



Рис. 7. Образцы после испытаний

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность получения детонационным способом прочных градиентных покрытий Al₂O₃ + Ti путем попеременного напыления керамической и металлической компонент с применением двух дозаторов. Меняя при послойном напылении в каждом слое соотношение между количеством выстрелов с нанесением керамики и металла, можно получать различные структуры покрытий от "грубой" до "тонкой".

В покрытиях с "грубой" структурой значения микротвердости в различных местах существенно различаются и соответствуют значениям для керамической и металлической компонент.

В покрытиях с "тонкой" структурой, где керамика и металл сильно перемешаны, колебания микротвердости по объему практически отсутствуют.

Разработана методика испытаний градиентных покрытий на сдвиг. Методика отлажена на образцах с покрытием из Ti, Al₂O₃, Al₂O₃ с подслоем Ti и Ti с подслоем из Al₂O₃.

Таблица 3

Результаты испытаний на срез

№ образца	Покрытие	Ширина пояска <i>h</i> , мм	Площадь пояска <i>S</i> , мм ²	Усилие среза <i>P</i> , Н	Прочность на срез σ , МПа
1	Ti на подложке из алюминия	1,9	106,2	893	8,4
2	Ti на подложке из алюминия	1,8	100,7	5983	59,4
3	Ti на подложке из алюминия	1,9	106,2	4652	43,8
4	Ti на подложке из стали	1,7	95,1	3397	35,7
5	Al ₂ O ₃ на подложке из алюминия	2,0	111,8	18244	163,2
6	Ti на подложке из алюминия с подслоем Al ₂ O ₃	2,0	111,8	5030	45,0
7	Al ₂ O ₃ на подложке из алюминия с подслоем Ti	2,0	111,8	17054	152,5

Примечания. Диаметр пояска под покрытием $d = 17,8$ мм, $S = \pi dh$, $\sigma = P/S$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сударев А.В. Перспективы создания для стационарной энергетики экологичных керамических газотурбинных двигателей // Известия РАН. Энергетика. 1992. № 1. С. 49–59.
2. Markocsan N., Nysten P. et al. Effect of thermal aging on microstructure and functional properties of zirconia-base thermal barrier coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2009. V. 18 (2). P. 201–208.
3. Гаркунов Д.Н., Балабанов В.И. Восстановление двигателей внутреннего сгорания без их разборки // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 18–22.
4. Андреев А.А., Картамазов Г.Н., Кунченко В.В. Покрытия для поршневых колец // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 9.
5. Tricoire A., Kjelman B., Wigren J. et al. Insulated piston fire face for diesel engines // Proceed. Intern. Thermal Spray Conf. 2008 (ITSC–2008) – Thermal Spray Crossing Borders, Maastricht, the Netherlands, June 2–4, 2008, DVC. Duesseldorf. 2008. P. 13–17.

6. Lima R.S., Marple B.B. Towards highly sintering-resistant nanostructured $ZrO_2 - 7wt\% Y_2O_3$ coatings for TBS application by employing differential sintering // Proceed. Intern. Thermal Spray Conf. 2008 (ITSC–2008) – Thermal Spray Crossing Borders, Maastricht, the Netherlands, June 2–4, 2008. DVC – Verlag GmbH, Duesseldorf. 2008. P. 352–357.
7. 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.
8. 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.
9. Импульсный порошковый питатель для установки детонационного напыления: пат. 2342201 РФ / В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин, А.Л. Кирякин. Опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36.

ŌÂÎ ĐÎ ÑÒÓŌÈÍ Ěââ Äëâēñââè÷

30.05.1926 г.



19.09.2010 г.

19 ñâí òÿàðŷ 2010 â í à 85-ì ã äó óø äë èç æëçí è ââ - òàððàí Ì ÀŌË – âí èòí ð òàðí è-âññèò í àóé, çàññéòæâí í ù é äâÿðäëü í àóèè è òàðí èèè ĐŌ, çàññéòæâí í ù é í ðí ò àññí ð Ì ÀŌË, ï ðí ò àññí ð èàò àâðŷ "Ōâðí í èí æÿŷ ï ðí èçâí àñò-ââ àâèæâðäëé èâðàðäëüí ù ò àí ï àðàðí â" Ěââ Äëâēñââè÷-âè÷ Ōâí ðí ñòóðèí .

Đí âí í à-âëüí èè è àáññí âí í ù é ðóéí âí àèðäëü í àó-í í é ø èí èü "Í àáñí â-âí èâ í àââæí í ñòè è ðàññòñâ àâèàòèí í - í ù ò àâèæâðäëé è àæñâæðí â èâðàðäëüí ù ò àí ï àðàðí â òàò - í í èí æ-âññè è ì àðí àâí è" ñâí ð ððòâí àðð äâÿðäëüí í ñòŷ í à-âé à 1949 â à Ěðéòññèí ï ï èèðàðí è-âññè ï èí ñòèòòà, æâ à 1954 â çàù èðèè èâí àèâàðñéð àèññâððàòèð .

47 èàò ððòâí àâÿ äâÿðäëüí í ñòŷ Ěüââ Äëâēñââè÷-à áùèâ ñâÿçâí à ñ Ì ÀŌË èí . Ě.Ÿ. Ōèí èèí àññè ã . Àí òâí ò èàò àâðŷ ŌĬ ÄĚÀ ñ ŷí àâðŷ 1963 â à 1974 â çàù èðèè âí èòí ðñéð àèññâððàòèð . Ě.À. Ōâí ðí ñòóðèí 25 èàò âí ç-æââèÿè èàò àâðŷ "Ōâðí í èí æÿŷ í àðâí è-âññè è í àðââí ò-èè è ì àðàèí ðâæòŷ èâ ñòâí èè" è "Ōâðí í èí æÿŷ ï ðí èçâí à-ñòââ àâèæâðäëé èâðàðäëüí ù ò àí ï àðí â", âí èââ 20-òè èàò ÷âèÿèñŷ àâèâí ï àâèâí àðâí è-âññè ã ò àéòèüðàðà .

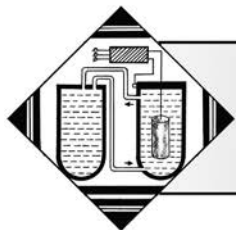
Ě.À. Ōâí ðí ñòóðèí – àââòŷ èè ò-âí ù é â í àèâàðè òàð-í í èí æè ï ðí èçâí àñòââ àâèàòèí í í ù ò àâèæâðäëé. Ě ï

ï ï óâèèè ââí í âí èââ 300 í àó-í ù ò ððòâí â, ñðââè èí ðí - ðŷ ò ï í í ï æðàò èè "Àèí àçí í â áù æâææââí èâ í àðàèí - ï ï èðŷ òèè", "Í í áùð âí èâ í àññŷ àé ñí ï ñí âí í ñòè àâðäëé ì àø èí ï ï àâððí í ñòí ù ï òí ðí -âí èâí ", "Ō ðí -âí âí èâ ï ï àâððí í ñòâè àâðäëé èí í àèí èðí ââí í ù ï è ñí ï - ñí ââí è", àâñŷòèè ò-ââí ù ò ï ï ñí àéé .

À -èñâ ò-âí èèí à Ě.À. Ōâí ðí ñòóðèí à – âí èââ 30 èâí - àèâàðí â è âí èòí ðí â í àóé, çàù èðèèè èð ï í â æâ í àó-í ù ï ðóéí âí àñòâí ï àèññâððàòèè . Ñí òí è æâ áù ï òñèí èèí â çà-í èí àð ò àââòŷ àâ ï ï èí æâí èâ í à ï ðââí ðèÿðèÿð áÿðí èí ñ-í è-âññè è ï ðí ï ò èâí í ï ñòè è â í àó-í ù ðí ðæâí èçàòèÿð .

Àí èí í òâ æëçí è Ěââ Äëâēñââè÷-í ðèí èí àè àèèè-í í â ò-âñòèâ â ñí àâðð âí ñòâí ââí èè ï àðâçí àâðäëüí í â ï ðí òâññâ ï ï àâ òí àèè èí æâí âðí ù ò è í àó-í ù ò èââðí â àâèâââèæâðäëéâñòðí âí èÿ, ï í ï ñèè è àðâí âí è í òâââè âí ñí èòàðäëüí í é ðââí òâ ñí ñòââí òâí è, í àó-í í é ðââí - òâ ñ àñí èðâí òâí è . Çàññéòæ Ěüââ Äëâēñââè÷-à Ōâí ðí - ñòóðèí à ï òâí âí ï ï ðââèðäëüñòââí í ù ï è í àæâââí è .

Í àí ÷òŷ ï Ōâí ðí ñòóðèí â Ěüââ Äëâēñââè÷-â – ï ñ-í í àâðäëé í àó-í í é ø èí èü – àóâò æèòŷ â ñâðâòâò àâ ò-âí èèí â, èí èèââ è ñí ððòâí èèí â .



УДК 669.131.2

Ю.Г. Гуревич, В.А. Фролов, В.В. Марфицын
(Курганский государственный университет)
E-mail: ygg@rambler.ru

Поверхностное упрочнение ферритно-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом хрома

Обоснована и экспериментально доказана возможность простого способа хромирования и последующей поверхностной закалки деталей из ферритно-перлитного серого чугуна для повышения их износостойкости. Способ обеспечивает твердость поверхностного слоя детали, соизмеримую с лазерной закалкой, а ее износостойкость — соизмеримую с хромистым чугуном.

Ключевые слова: серый чугун, поверхностное упрочнение, технология, температура, время, структура, свойства.

It is proved and experimentally tested the possibility of a simple way of chromium plating and subsequent surface hardening of details from hypopearlitic gray cast iron for the purpose of their wearing quality increase. The way provides the hardness of detail outer zone commensurable with laser hardening and its wearing quality commensurable with chromic cast iron.

Keywords: gray cast iron, hardfacing, technology, temperature, time, structure, properties.

Введение

Известно, что для поверхностного упрочнения ферритно-перлитного серого чугуна применяют только электролитическое хромирование и лазерную закалку [1, 2]. Эти технологии сложные и дорогие. Более дешевое диффузионное хромирование не применяют, поскольку оно обеспечивает толщину диффузионного слоя не более 10...20 мкм [3].

Целью данной работы является разработка простой, надежной и дешевой технологии поверхностного упрочнения деталей из ферритно-перлитного серого чугуна, состоящей в окислении поверхности детали оксидом хрома с последующей поверхностной закалкой.

Материалы и методы исследования

В качестве образцов использовали цилиндрические детали с внешним диаметром 50 мм, внутренним диаметром 30 мм, поперечным сечением 15×10 мм из ферритно-перлитного серого чугуна СЧ20 состава, % мас.: 3,4С; 2,2Si; 0,8Mn; ≤0,2 P; ≤0,15S. Твердость чугуна — 131 НВ. Исходная структура ферритно (90 %)–перлитная (10 %), основа с равномерно рас-

пределенным пластинчатым графитом завихренной формы. Площадь, занятая графитом, составляла 8...12 % (рис. 1).

В качестве окислителя использовали оксид хрома (Cr₂O₃). Порошок оксида хрома получали разложением дихромата аммония (NH₄)₂Cr₂O₇ при температурах 473...573 К [4]



Рис. 1. Микроструктура чугуна СЧ20 на нетравленном шлифе (×400)

Детали нагревали в открытом контейнере в контакте с оксидом хрома до температур 1173, 1273, 1373 К, выдерживали в течение 2, 4 и 8 ч. Нагрев под поверхностную закалку производили до 1223 К, охлаждение образцов в воде. После закалки детали подвергали низкому отпуску с температурами 423...473 К, выдерживали при этих температурах 1 ч на каждые 25 мм стенки [5].

Структуру поверхностного упрочненного слоя образцов исследовали на микроскопе Neophot-21, микротвердость структурных составляющих – на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,49 Н. Травление образцов производили 3%-ным раствором HCl в спирте.

Результаты оценивали следующим образом:

– измеряли и фотографировали ширину неупрочненных и упрочненных после обработки зон с одинаковой микроструктурой;

– на нетравленных шлифах в зонах образца с разными микроструктурами исследовали форму, размер, распределение и количество графита;

– определяли твердость детали после упрочнения (HRC) и микротвердость (HV_{50}^0) упрочненного слоя до и после закалки;

– производили пять замеров микротвердости (HV_{50}^0) в окисленной зоне по слоям от поверхности через каждые 0,1 мм до и после закалки.

Результаты исследований и их обсуждение

В печь сопротивления с селитовыми нагревателями помещали образец, внутренняя поверхность которого контактировала с окисью хрома, а внешняя – с воздушной атмосферой (рис. 2). Толщина окисленного слоя при 1373 К и выдержке 8 ч равна 1,02 мм, кислородом воздуха – 1,26 мм.

Окисленная оксидом хрома зона достаточно однородна, без дефектов, граница между структурой чугуна и окисленного слоя четкая. Зона термического влияния не образуется (рис. 3). В окисленной зоне до

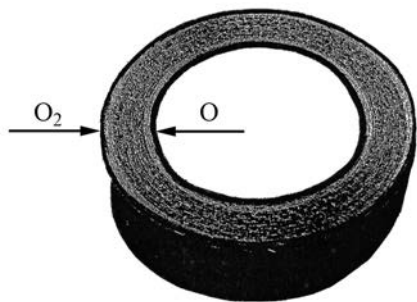


Рис. 2. Схема окисления детали из серого чугуна (O_2 – кислородом воздуха; O – оксидом хрома)



Рис. 3. Микроструктура границы окисленного слоя с основой чугуна на травленном шлифе ($\times 400$)

и после закалки наблюдали шаровидные включения графита.

В табл. 1 показано распределение графита и описание микроструктур после взаимодействия детали из ферритно-перлитного серого чугуна с оксидом хрома и кислородом воздуха до и после закалки (рис. 4).

Механизм процесса взаимодействия оксида хрома с основой чугуна при окислении и последующей закалки состоит из следующих стадий:

- окисление элементов основы и растворение хрома в ферритной основе чугуна;
- превращение феррита основы чугуна в перлит высокой дисперсности;
- зарождение аустенита;
- диффузия кислорода и хрома в аустенит;
- растворение графита в аустените;
- превращение аустенита в мартенсит.

Таким образом, микроструктура основы чугуна после взаимодействия с оксидом хрома становилась перлитной, а после закалки – мартенситной, в то время как микроструктура основы чугуна после взаимодействия с кислородом воздуха оставалась ферритно-перлитной, а после закалки – перлитной.

В табл. 2 указана толщина окисленных слоев в зависимости от температуры и продолжительности обработки.

Необходимо подчеркнуть, что только в результате диссоциации оксида хрома на поверхности основы чугуна, последующей диффузии кислорода вглубь и диффузии углерода в противоположном направлении, возможна диффузия хрома на глубину до одного миллиметра.

Таблица 1

Распределение графита и микроструктура чугуна и окисленных слоев после взаимодействия с оксидом хрома и кислородом воздуха до и после закалки

Материал	Шаровидные включения графита	Пластинчатый графит завихренной формы	Площадь, занятая графитом, %	Перлит, %	Феррит, %	Мартенсит*, %	Сорбит, %	Троостосорбит, %
СЧ20	+	-	$\approx \frac{2}{2}$	$\frac{100}{-}$	-	-	-	-
СЧ20 + Cr ₂ O ₃	-	+	$\approx \frac{8...12}{8...12}$	$\frac{10}{-}$	$\frac{90}{-}$	-	$\frac{-}{100}$	-
СЧ20 + O ₂	-	+	$\approx \frac{8}{8}$	$\frac{80...70}{-}$	$\frac{20...30}{-}$	-	-	$\frac{-}{100}$

* Мартенсит мелкоигльчатый.

Примечание. Температура 1373 К; выдержка 8 ч. В числителе приведены показания до закалки, в знаменателе – после.

Растворимость хрома в основном металле достаточно высокая, но его диффузионная подвижность соизмерима с подвижностью атомов растворителя. Однако при диффузионном хромировании чугуна традиционными методами в поверхностном слое образуется слой карбидов, являющийся препятствием для дальнейшей диффузии хрома. Диффузия кислорода происходит быстрее, чем хрома, поэтому кислород, окисляя углерод, обеспечивает диффузию хрома на большую глубину.

Твердость окисленного слоя до закалки – 30...40 HRC, после закалки и отпуска – 58...65 HRC. После поверхностной закалки ТВЧ твердость ферритно-перлитного чугуна с шаровидным графитом – 56...62 HRC [6].

На рис. 5 показано распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя до и после закалки в сравнении с лазерной закалкой. Установлено, что предлагаемая сравнительно простая технология хромирования и поверхностной закалки ферритно-перлитного серого чугуна обеспечивает твердость поверхностного слоя, соизмеримую с лазерной обработкой [7], но распределение твердости по толщине диффузионного слоя более равномерно и может обес-

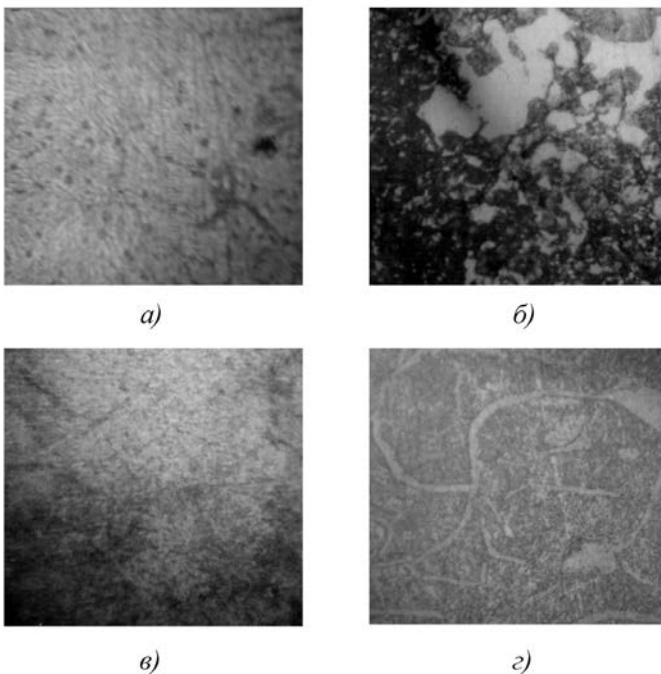


Рис. 4. Микроструктуры на травленных шлифах (×400) после окисления: а – оксидом хрома; б – воздухом; в – оксидом хрома и закалки; г – воздухом и закалки

Таблица 2

Толщина окисленных слоев в зависимости от температуры и продолжительности обработки

Температура T, К	Время выдержки τ, ч	Толщина слоя h, мм
1173	2	0,11
	4	0,20
	8	0,49
1273	2	0,33
	4	0,42
	8	0,72
1373	2	0,62
	4	0,74
	6	0,90
	8	1,02

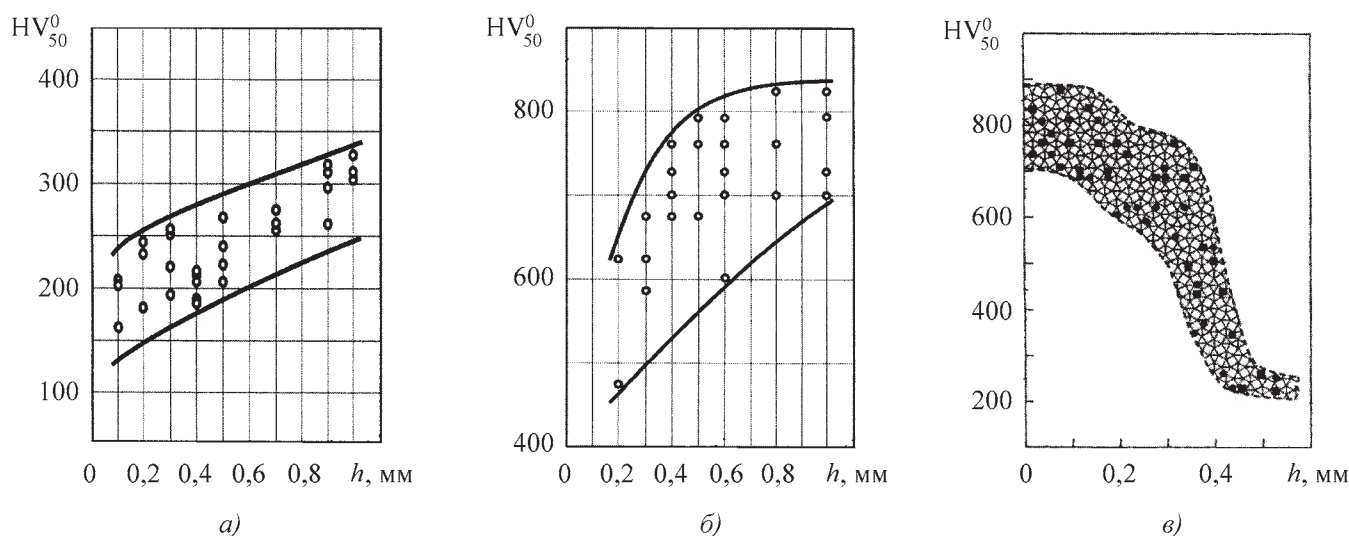


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине окисленного слоя:

а, б – после окисления оксидом хрома и оксидом хрома и закалики соответственно; в – после обработки лазером

печивать глубину закаленного слоя почти в два раза большую, чем при обработке лазером. В отличие от лазерной обработки твердость упрочненного слоя по мере увеличения его толщины возрастает. Закалка лазером обеспечивает только закаленные дорожки на поверхности детали, в то время как предлагаемая химико-термическая обработка упрочняет всю поверхность детали.

Одной из самых объективных характеристик материала является удельная работа его износа

$$a = A/\Delta m,$$

где A – общая работа трения, Дж;

Δm – убыль массы образца, мг.

В табл. 3 приведены результаты испытаний на абразивный износ образца из ферритно-перлитного серого чугуна СЧ20 после взаимодействия с оксидом хрома и закалики.

На основании полученных данных были рассчитаны удельные работы упрочненного слоя серого чугуна после взаимодействия с оксидом хрома и закалики $a = (0,15 \pm 0,06)$ Дж/мг и упрочненного слоя серого чугуна после взаимодействия с оксидом хрома и закалики $a = (5,57 \pm 0,19)$ Дж/мг в сравнении с удельной работой хромистого чугуна, содержавшего 2,8 % С и 14,7 % Cr $a = (6,83 \pm 0,27)$ Дж/мг [7].

Удельная работа абразивного износа поверхности ферритно-перлитного серого чугуна после взаимодействия с оксидом хрома и закалики соизмерима с удель-

Таблица 3

Абразивный износ образца чугуна СЧ20 до и после окисления и закалики

Образец	№ опыта	m_1 , г	L , мм	F , Н	m_2 , г	Δm , г	a , Дж/мг	a_{cp} , Дж/мг
СЧ20	1	20,6824	90,0	16,441	20,6726	0,00980	150 989	145 944
	2	20,6916		16,470	20,6824	0,00920	161 119	
	3	20,6726	100,2	16,186	20,6597	0,01290	125 724	
Окисленный Cr_2O_3 слой	1	12,0074	90,0	16,530	12,0068	0,00060	2 479 500	5 568 975
	2	12,0119		16,446	12,0116	0,00030	4 933 800	
	3	12,0068		16,522	12,0067	0,00016	9 293 625	

Примечание. m_1 – масса образца до испытаний; L – смещение пера самопишущего прибора; m_2 – масса образца после испытаний; F – прилагаемая сила.

ной работой абразивного износа высокохромистого чугуна.

Присутствие включений графита в структуре диффузионного слоя повышает износостойкость изделий, работающих в условиях износа, способствует адсорбции масла, что обеспечивает хорошую смазку при трении [8].

Выводы

1. Показана возможность окисления основы ферритно-перлитного серого чугуна при температурах 1173, 1273, 1373 К оксидом хрома.

2. Установлено, что после взаимодействия оксида хрома с элементами ферритно-перлитного серого чугуна дефектов в окисленном слое не наблюдается.

3. Окисление кремния и легирование основы чугуна хромом способствует устранению в окисленном слое феррита и образованию 100%-ной перлитной структуры, что увеличивает закаляемость и прокаливаемость окисленного слоя.

4. Установлена зависимость толщины окисленного слоя от температуры и продолжительности процесса.

5. Твердость окисленного слоя после закалки сопоставима с твердостью после лазерной обработки и отличается тем, что распределение твердости по тол-

щине слоя более равномерное, по мере его увеличения твердость возрастает, а также тем, что закалка лазером обеспечивает только закаленные дорожки на поверхности детали в то время, как предлагаемый процесс обработки серого чугуна упрочняет весь поверхностный слой детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шерман А.Д., Жуков А.А., Абдуллаев И.О. и др. Чугун (справочник). М.: Металлургия, 1991. 575 с.

2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка. М.: Металлургия, 1993. 449 с.

3. Дубинин Г.Н., Аврамов Ю.С. Авиационное материаловедение. М.: Машиностроение, 1988. 320 с.

4. Стёпин Б.Д., Цветков А.А. Неорганическая химия. М.: Высшая школа, 1994. 607 с.

5. Мозберг Р.К. Материаловедение. Таллин: "Валгус", 1988. 588 с.

6. Попов П.И., Сизов И.Г. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства чугуна с вермикулярным графитом // МиТОМ. 2006. № 6. С. 41–43.

7. Майоров В.С., Майоров С.В. Закалка чугуновых деталей излучением твердотелого лазера // МиТОМ. 2009. № 3. С. 6–8.

8. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.И., Савиных Л.М. и др. Износостойкие композиционные материалы. Екатеринбург: ИМ УО РАН, 2005. 216 с.



ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА: учебное пособие

А.Н. Болдин, А.И. Яковлев, С.Д. Тепляков и др.

Под общ. ред. А.Н. Болдина

352 с. : ил. ISBN 978-5-94275-523-2

Цена 1000 р.

Приведены основные методики исследований и расчета вредных выделений в литейном производстве, рассмотрены различные технологии литейного производства, применяемые в машиностроительном комплексе России и за рубежом с точки зрения экологии. Даны сведения, необходимые для проектирования литейных цехов, реконструкции уже существующих литейных цехов и оценки их влияния на окружающую среду.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности "Машины и технология литейного производства", а также может быть полезно специалистам-литейщикам.

107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; факс: (499) 269-48-97; e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98
и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 621.793.74:621.791.927.55

А.М. Кадырметов (Воронежская государственная лесотехническая академия)
E-mail: anvar@vmail.ru

Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров

Рассмотрены схемы установки для плазменного нанесения покрытий с модуляторами тока дуги плазматрона прямой и обратной полярности. Представлены технические характеристики модуляторов и рекомендации по режимам нанесения покрытий, перспективная схема двухполярной импульсной модуляции тока косвенной и прямой (выносной) дуги плазматрона для процессов напыления и гибридного процесса напыления–наплавки. Разработано оборудование для высокоэффективных ресурсосберегающих технологий плазменного нанесения и упрочнения покрытий на различные детали машин.

Ключевые слова: установка для плазменного нанесения покрытий, плазменное напыление, плазматрон, дуга прямая (выносная), дуга косвенная, плазменная струя, модуляция параметров, упрочнение, деталь, поверхность, охлаждение, водно-капельная струя, ресурсосбережение.

In this article there are the schemes of plasma coating set using the modulators of a plasmatron arch current with direct and reversed polarity. The technical characteristics of modulators and recommendations on modes of plasma-spraying coatings are given. The perspective scheme of bipolar impulse current modulation of indirect and direct plasmatron arch is performed, which is used for the spraying process and for the plasma transferred arch process. The equipment is worked out for the resource-saving technologies of plasma-spraying and coat-strengthening processes on different machine details.

Keywords: plasma-coating set, plasma-spraying, plasmatron, direct arch, indirect arch, plasma jet, parameter modulation, strengthening, detail surface, cooling, water-drop jet, resource-saving.

Введение

Плазменное нанесение и упрочнение покрытий относится к прогрессивным технологиям. Повышение эффективности данных технологий возможно за счет совершенствования как самой операции нанесения покрытия, так и ее совмещения с упрочнением наносимого покрытия, а также за счет развития и универсализации этой технологии [1] в использовании не только для наружных цилиндрических поверхностей (валы распределительные, коленчатые и др.), но и для поверхностей деталей различной формы, в том числе и для малогабаритных внутренних поверхностей (например гильз цилиндров).

Одним из направлений совершенствования операций нанесения и упрочнения покрытий является использование модуляции электрических параметров плазматрона [1, 2]. Она заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средний ток дуги и позволяет просто и эффективно регулировать электрические и энергетические характеристики плазматрона.

Модуляция косвенной дуги плазматрона, горящей между катодом и анодом плазматрона, позволяет: генерировать в плазменной струе ударные волны слабой интенсивности и интенсивные акустические волны; увеличить коэффициенты лобового сопротивления и теплоотдачи напыляемых частиц до двух и более раз и этим повысить энергетические параметры плазменной струи и напыляемых частиц (повысить скорость и температуру струи и скорость напыляемых частиц на 30...50 %) [1, 2].

Модуляция прямой (выносной) дуги плазматрона, горящей между одним из его электродов и деталью, позволяет получать покрытия с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами [2]: увеличивать прочность сцепления покрытия с основой в 1,15–1,25 раза; микротвердость – в 1,1–1,2 раза; сопротивление усталости образцов – до 1,2 раз; износостойкость покрытий – в 1,25–1,35 раза; понижать пористость покрытий в 1,2–1,3 раза. Повышение основных физико-механических свойств покрытий позволяет использовать разрабатываемую техно-

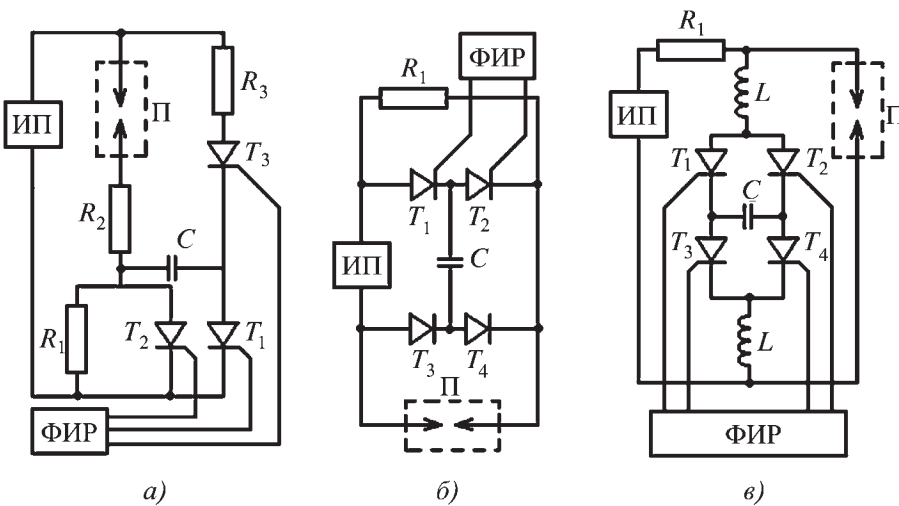


Рис. 1. Электрические блок-схемы плазменной установки с импульсными модуляторами тока дуги прямой (а), (б) и обратной (в) полярности:
 ИП – источник питания постоянного тока; П – плазматрон; ФИР – фазоимпульсный регулятор; $T_1...T_4$ – тиристоры; $R_1...R_3$ – балластные сопротивления; C – конденсатор; L – дроссель

логию для деталей, работающих при знакопеременных и циклических ударных нагрузках.

Для осуществления модуляции электрических параметров в процессах нанесения и упрочнения покрытий используются модуляторы. Известные способы модуляции параметров плазматрона подразделяются на способы: акустического воздействия на дугу и плазменную струю с помощью внешних источников и модуляции электрических параметров дуги с помощью ее источника питания.

Известные модуляторы тока дуги представляют собой устройства инверторного типа с емкостными накопителями заряда, содержащие тиристорные вентили, балластные сопротивления, дроссели и блоки управления (рис. 1).

Формирование каждого импульса осуществляется открытием тиристоров одной из линий модулятора, после чего заряд, накопленный в емкостях от источника питания постоянного тока, разряжается либо на дугу (импульс прямой полярности (см. рис. 1, а, б)), либо на параллельную дуге линию (импульс обратной полярности (см. рис. 1, в)).

Модуляторы тока дуги плазматрона имеют преимущества перед внешними источниками акустического поля в относительной простоте реализации, в отсутствие необходимости конструктивного усложнения плазматрона и в более высоком КПД волнового воздействия. В качестве источника питания модулятор может иметь как источник питания дуги, так и внешний источник питания, например, в виде батареи химических элементов.

Состав установки

Для реализации режимов плазменного напыления покрытий была разработана лабораторная установка, включающая электрическую (силовую и управляющую), пневматическую, гидравлическую части, порошковый питатель и камеру с вытяжной вентиляцией. Принципиальным отличием разработанной схемы установки плазменного напыления покрытий от известных является наличие в ней модулятора, имеющего общий с дугой источник питания и позволяющего импульсно модулировать ток дуги плазматрона однополярными (с прямой и обратной полярностью) и двухполярными импульсами (рис. 2) [3, 4].

В установке предусмотрено две схемы подключения модулятора к источнику питания. В первой схеме

(см. рис. 2, а) модулятор подключается между дросселем и балластным сопротивлением, во второй (см. рис. 2, б) – непосредственно к аноду плазматрона. В качестве источника питания данный модулятор использует источник питания косвенной дуги.

На рис. 3 представлена электрическая блок-схема экспериментальной установки для первого варианта подключения модулятора. Исследования показали, что более выгодным является второй вариант присоединения модулятора (см. рис. 2, б), так как он обеспечивает более высокие значения амплитуд импульсов при их минимальных длительностях, меньшую инерционность и более устойчивую работу дуги в режиме модуляции, а также более благоприятные условия ра-

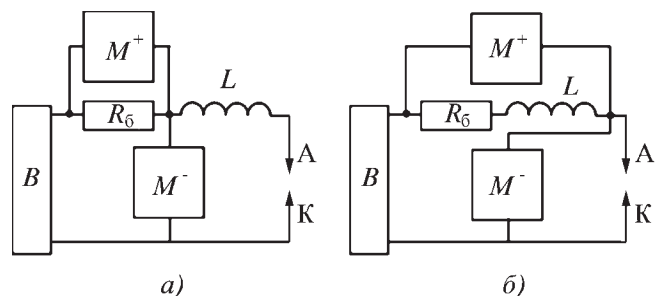


Рис. 2. Варианты соединения модуляторов прямой M^+ и обратной M^- полярности с источником питания дуги:
 а – через дроссель; б – непосредственно к дуге (аноду); R_5 – балластное сопротивление; L – дроссель; В – выпрямитель; А – анод; К – катод;

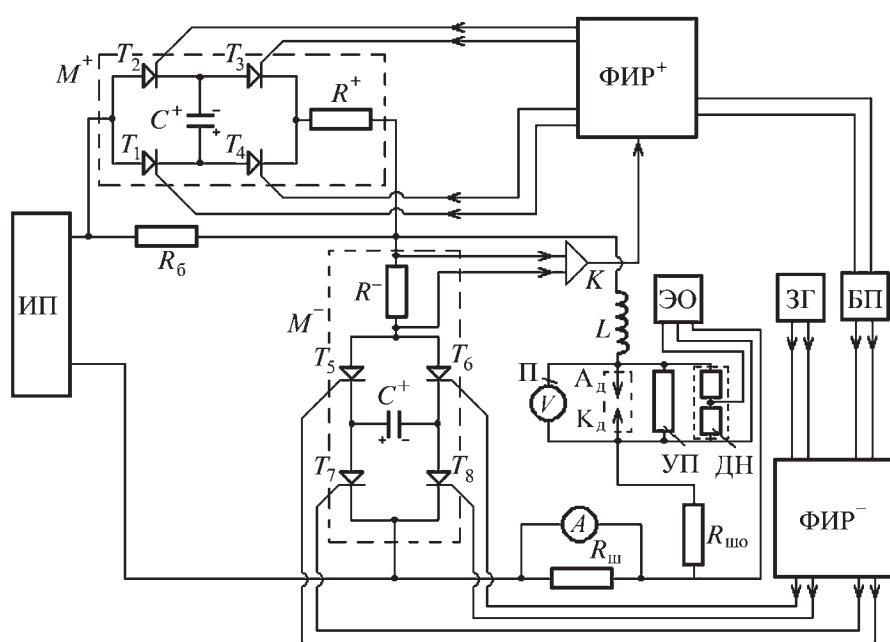


Рис. 3. Электрическая блок-схема экспериментальной установки:

П – плазматрон; A_d , K_d – анод и катод плазматрона; ЗГ – задающий частотный генератор; К – компаратор; БП – блок питания; А – амперметр; V – вольтметр; ЭО – осциллограф; ДН – делитель напряжения; $R_{ш}$, $R_{шю}$ – шунт

боты тиристоров (при первом варианте они иногда выходили из строя).

Силовая электрическая часть установки включает в себя источник питания ИП, балластный реостат R_6 с сопротивлением до 6 Ом, дроссель L с индуктивностью 0,72 мГн, модуляторы импульсов прямой M^+ и обратной M^- полярности и электродуговой воздушный плазматрон с самоустанавливающейся длиной дуги мощностью до 50 кВт (длина и диаметр сопла 100 и 6 мм соответственно).

Модуляторы M^+ и M^- включают в себя тиристорные мосты $T_1...T_4$ и $T_5...T_8$ на быстродействующих тиристорах типа ТБ, емкости C^+ (6...80 мкФ) и C^- (4...28 мкФ), сопротивления R^+ (0,05...1,4 Ом) и R^- (0,25...2,3 Ом). Источник питания содержит силовой разделительный трансформатор ТСЗ-160/0,66 и выпрямитель, выполненный в виде моста Ларионова (с диодами ВЛ200).

Управляющая электрическая часть установки содержит устройство поджига дуги УП; блок управления модулятора с генератором, задающим частоту модуляции, которые расположены в шкафу управления. УП представляет собой осциллятор на основе высоковольтного трансформатора ТГ 1020К-У2 с мощностью 120 Вт, входным и выходным напряжениями 220 и 10^3 соответственно. Блок управления модулятора состоит из фазоимпульсных регуляторов прямой

ФИР⁺ и обратной ФИР⁻ полярности, сопротивлений R^+ , R^- и компаратора К для согласования временных интервалов между импульсами прямой и обратной полярности.

Пневматическая часть установки включает в себя воздушную и пропановую магистрали, пропановый баллон, воздушный компрессор, ресивер с осушителем, ротаметры и манометры. Гидравлическая часть представляет собой водоохлаждающую установку и водяные магистрали для охлаждения плазматрона.

Принцип работы модулятора

Двухполярная модуляция тока дуги плазматрона осуществляется следующим образом. С помощью регулятора ФИР⁻ открывают тиристоры $T_5...T_8$. Емкость C^- заряжается с полярностью, обозначенной на рис. 3. После заряда емкости C^- протекание тока через модулятор M^- прекращается, тиристоры T_5 и T_8 закрываются, компаратор К вырабатывает импульс, соответствующий моменту окончания протекания тока.

ФИР⁺, получив управляющий импульс от компаратора К, открывает тиристоры T_1, T_3 . Емкость C^+ заряжается с полярностью, обозначенной на рис. 3. После заряда емкости C^+ протекание тока через модулятор M^+ прекращается и тиристоры T_1, T_3 закрываются.

Далее процесс повторяется, но в модуляторе M^- открываются тиристоры T_6, T_7 , а в модуляторе M^+ – тиристоры T_2, T_4 . Емкости C^-, C^+ перезаряжаются с обратной полярностью. Частота повторения этого процесса регулируется задающим генератором ЗГ. Ток, протекающий через M^+ , складывается с током дуги, а ток, протекающий через M^- , вычитается из тока дуги.

В итоге вырабатываются импульсы, каждый из которых включает в себя участок вычитания, формируемого модулятором M^- , и участок сложения, формируемый модулятором M^+ . Непосредственный переход импульса "вычитания" в импульс "сложения" обеспечивается соединением модуляторов M^- и M^+ с помощью компаратора К и ФИР⁺.

Для однополярной импульсной модуляции силовые линии одного из модуляторов отключаются от питающей линии плазматрона.

**Электрические характеристики модулятора
плазматрона**

Исследования плазматрона в режиме модуляции путем осциллографирования электрических параметров для случая подключения согласно рис. 2, б показали следующие результаты. Влияние дросселя минимально, после каждого импульса происходит быстро затухающий аperiодический переходный процесс. Модулятор работает устойчиво, тиристоры не выходят из строя. Данный вариант подключения позволяет получать импульсы тока прямой полярности (сложения тока) с максимально возможной амплитудой для данного источника питания, равной по силе тока ~1,2 кА и по напряжению ~0,5 кВ.

Таким образом, максимально возможная мощность импульсов достигает 600 кВ·А при их длительностях 200...300 мкс, что соответствует энергии импульсов 100...150 Дж. Это не удовлетворяет условию получения сильных ударных волн с числом Маха $M > 1,6$, но позволяет получать в системе "косвенная дуга – плазменная струя – частицы" ударные волны слабой интенсивности и интенсивные акустические волны (свыше 150 дБ) на частотах до и более 5 кГц.

Интенсивные акустические волны приводят к увеличению коэффициентов лобового сопротивления и теплоотдачи к напыляемым частицам в два и более раз и повышению скоростей и температур плазменной струи и напыляемых частиц. Такое повышение энергетических параметров напыляемых частиц улучшает физико-механические и триботехнические свойства покрытий [1]. Для получения ударных волн высокой интенсивности и высоких скоростей напыляемых частиц необходимо использовать внешний (дополнительный) источник питания модулятора.

Параметры импульсов определяют значениями расхода плазмообразующего газа, емкостей и балластных сопротивлений модулятора. Зависимости параметров импульсов от расхода воздуха представлены на рис. 4, а. Из этого рисунка видно, что параметры импульсов прямой полярности имеют экстремальный характер зависимости от расхода воздуха. При расходе воздуха 70 л/мин амплитуда силы тока ΔI^+ имеет максимум, а амплитуда напряжения ΔU^+ – минимум.

На рис. 4, б и в представлены характеристики импульсов прямой полярности в зависимости от параметров модулятора прямой полярности M^+ . Из рисунка видно, что в интервале значений емкости C^+ от 5,71 до 80 мкФ при сопротивлении $R^+ = 0,1$ Ом амплитуды ΔI^+ и ΔU^+ имеют по одному максимуму (722 А и 212 В соответственно) и минимуму (333 А и 148 В соответственно), а длительность τ^+ постоянно возрастает с 93 до 338 мкс. При значении емкости $C^+ = 5,71$ мкФ увеличение сопротивления R^+ от 0,1 до 1,4 Ом приводит к уменьшению амплитуды ΔI^+ с 403 до 105 А, амплитуды ΔU^+ – с 200 до 23 В, и вызывает увеличение длительности τ^+ с 93 до 125 мкс.

Таким образом, влияние параметров модулятора прямой полярности и расхода воздуха на параметры импульсов прямой полярности характеризуется существенной нелинейностью.

При подключении модулятора к источнику питания согласно рис. 2, б обеспечивают импульсы обратной полярности с амплитудой силы тока, составляющей 80...100 % от среднего тока дуги плазматрона $I_{ср}$, и размахом напряжения до 120 В при длительностях импульсов тока τ^- в диапазоне 50...70 мкс. Увеличение расхода воздуха в 2,2 раза приводит к росту амплитуд импульсов силы тока обратной полярности

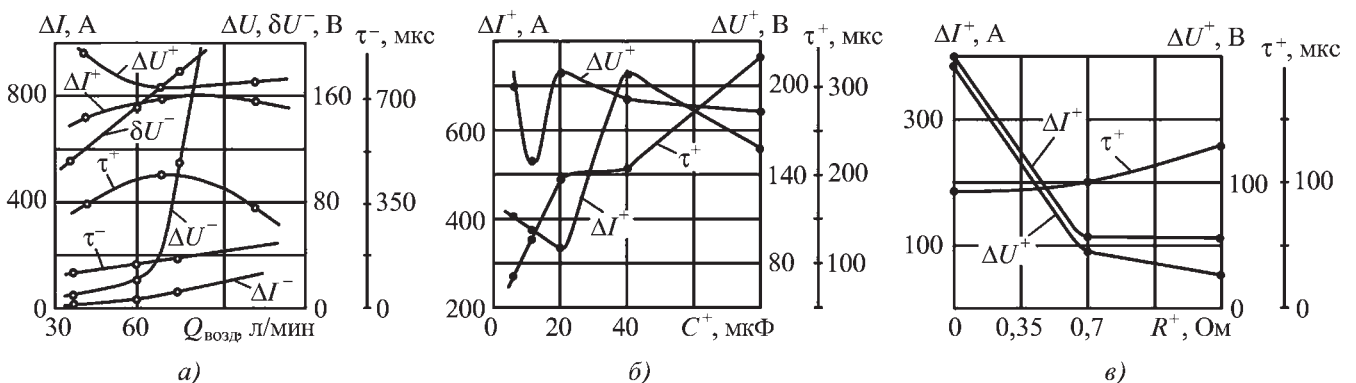


Рис. 4. Зависимости параметров импульсов ($\Delta I, \Delta U$ – амплитуда импульсов силы тока и напряжения соответственно; δU – размах пульсаций напряжения; τ – длительность импульсов; "–" и "+" – обратная и прямая полярность соответственно) от расхода воздуха $Q_{возд}$ ($C^+ = 40$ мкФ; $R^+ = 0,05$ Ом; $C^- = 4$ мкФ; $R^- = 1,308$ Ом) (а); значений емкости C^+ модулятора ($R^+ = 0,05$ Ом) (б); сопротивления R^+ модулятора ($C^+ = 5,7$ мкФ) (в)

ΔI^- в 2,8 раза и к росту размаха пульсаций напряжения δU^- в 1,6 раза (рис. 4, а).

В диапазоне частот модуляции ν_m 300...5000 Гц амплитуда ΔI^- плавно меняется в пределах 25 %. Резких изменений амплитуды ΔI^- на узких участках частоты модуляции ν_m не наблюдалось. Это говорит о том, что резонансные явления в условиях эксперимента не были обнаружены. Вследствие среднеинтегрального вычитания силы тока за счет импульсов обратной полярности возрастание частоты модуляции ν_m приводит к убыванию средней силы тока I_{cp} и возрастанию среднего напряжения U_{cp} до 25 %.

Зависимости характеристик импульсов обратной полярности от параметров модулятора представлены на рис. 5 (схема соединения модулятора согласно рис. 2, б). Из рисунка видно, что увеличение емкости C^- и уменьшение сопротивления R^- модулятора обратной полярности ведет к увеличению амплитуды импульса силы тока обратной полярности ΔI^- . Также видно, что длительность импульса обратной полярности τ^- возрастает при увеличении сопротивления R^- и емкости C^- модулятора обратной полярности.

Таким образом, увеличение сопротивления модулятора обратной полярности ведет к уменьшению амплитуды импульса силы тока обратной полярности ΔI^- и увеличению его длительности τ^- при постоянной емкости C^- . Увеличение же емкости C^- модулятора обратной полярности при постоянном сопротивлении R^- приводит к увеличению амплитуды ΔI^- и длительности τ^- .

Двухполярная импульсная модуляция, осуществляемая в последовательности наложения импульса прямой полярности на средний ток дуги в момент окончания импульса обратной полярности, имеет преимущества в сравнении с однополярной модуляцией. Вследствие динамических характеристик системы "источник питания – модулятор – дуга", а также за счет снижения исходного уровня силы тока и напряжения дуги в момент окончания импульса обратной полярности двухполярная модуляция позволяет увеличить энергию в импульсе прямой полярности в 1,5–2 раза в сравнении со случаем однополярной модуляции (прямой полярности).

Такое усиление энергии импульса вызывает в итоге повышение интенсивности генерируемой волны, которая интенсифицирует передачу энергии напыляемым частицам. Дополнительно для увеличения

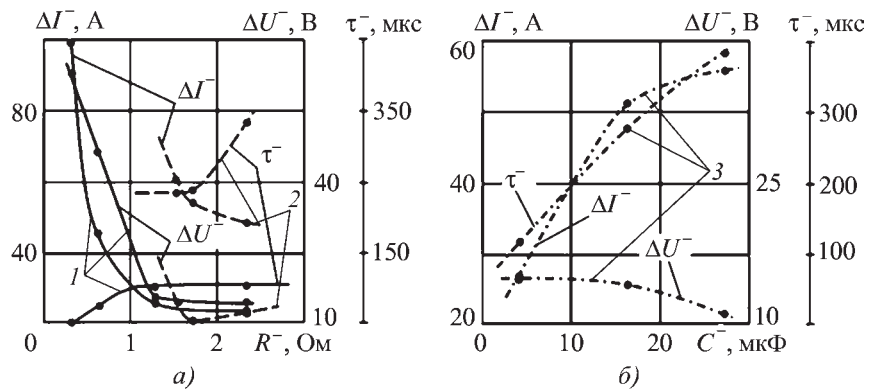


Рис. 5. Зависимости амплитуд импульсов силы тока ΔI^- , напряжения ΔU^- и длительности импульсов τ^- от сопротивления R^- (а) и емкости C^- (б) модулятора M^- ($R_0 = 3,62$ Ом; $L = 0,72$ мГн; $Q_{возд} = 35$ л/мин): 1 – $C^- = 4$ мкФ; 2 – $C^- = 28$ мкФ; 3 – $R^- = 1,66$ Ом

скорости расширения канала дуги и, следовательно, скорости и интенсивности волны необходимо увеличение скорости нарастания тока разряда в импульсе, т.е. необходимо, чтобы на участке возрастания силы тока двухполярного импульса выполнялось условие $dI^-/dt \leq dI^+/dt$ [4].

Таким образом, целесообразными параметрами модуляторов косвенной дуги с точки зрения получения максимальных амплитуд импульсов являются: $C^+ = 30...40$ мкФ; $R^+ = 0,05$ Ом; $C^- = 20...28$ мкФ; $R^- = 0,3...0,6$ Ом. Анализ зависимостей ΔI^+ и ΔU^+ от расхода воздуха приводит к целесообразному диапазону его значений $Q_{возд} = (70...120) \cdot 10^{-5}$ м³/с (50...80 л/мин). С точки зрения максимальных частот модуляции (минимальных времен импульсов) целесообразными являются полуинтервалы: $Q_{возд} \leq 80 \cdot 10^{-5}$ м³/с (50 л/мин); $C^+ \leq 10$ мкФ; $R^+ \approx 0$ Ом; $C^- \leq 5$ мкФ; $R^- \leq 1,5$ Ом. Примеры осциллограмм одно- и двухполярной модуляции представлены на рис. 6.

Модуляция тока выносной (прямой) дуги, горящей между одним из электродов плазматрона и деталью, целесообразна для обеспечения стабильности процесса напыления–наплавки, равномерности свойств покрытия и регулирования температурного поля покрытия. Она может быть осуществлена с помощью установки, схема которой представлена на рис. 7.

Отличием установки является наличие дополнительного контура выносной дуги и включенного в него модулятора б и блока управления 5 модулятора, регулирующего параметры импульсной модуляции в процессе нанесения покрытия. Модулятор выносной дуги позволяет создавать оптимальные амплитуды и длительности импульсов мощности, обеспечивающие

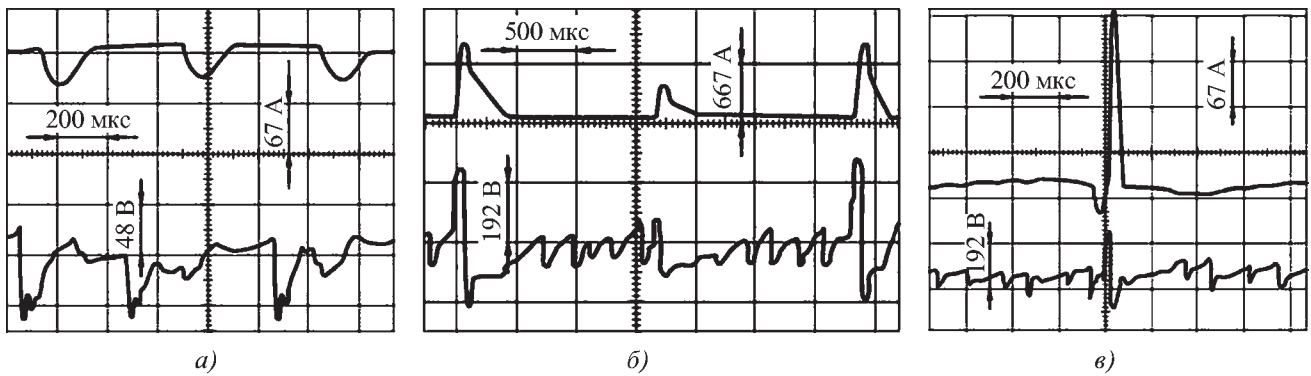


Рис. 6. Осциллограммы силы тока (верхние кривые) и напряжения (нижние кривые) дуги плазматрона ($R_6 = 3,64 \text{ A}$):
a – модуляция обратной полярности ($I_{cp} = 109 \text{ A}$; $U_{cp} = 87 \text{ В}$; $Q_{возд} = 35 \text{ л/мин}$; $R^- = 1,66 \text{ Ом}$; $C^- = 16 \text{ мкФ}$); *б* – модуляция прямой полярности ($I_{cp} = 210 \text{ A}$; $U_{cp} = 90 \text{ В}$; $Q_{возд} = 40 \text{ л/мин}$; $R^+ = 0,05 \text{ Ом}$; $C^+ = 80 \text{ мкФ}$); *в* – двухполярная модуляция ($I_{cp} = 118 \text{ A}$; $U_{cp} = 92 \text{ В}$; $Q_{возд} = 40 \text{ л/мин}$; $R^+ = 0,175 \text{ Ом}$; $R^- = 1,308 \text{ Ом}$; $C^+ = 5,71 \text{ мкФ}$; $C^- = 4 \text{ мкФ}$)

локальные участки проплавления покрытия до границы переходной зоны "покрытие–подложка" в моменты воздействия импульсов; оптимизировать концентрацию количества локальных зон проплавления и обеспечивать равномерность свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия.

Электрическая мощность прямой дуги с помощью источника ее питания обеспечивается в диапазоне 1...10 кВ·А. Параметры модуляторов прямой дуги

выбирают в диапазонах: C^+ – до 20 мкФ; R^+ – до 1,4 Ом; C^- – до 12 мкФ; R^- – до 3 Ом. Данные характеристики позволяют получить импульсы с параметрами: ΔI^+ – до 250 А; ΔU^+ – до 250 В; ΔN^+ – до 60 кВ·А; $\Delta I^- = 5...10 \text{ A}$; $\Delta U^- = 10...40 \text{ В}$; $\Delta N^- = 0,2...1,0 \text{ кВ·А}$; $\tau^+ = 25...250 \text{ мкс}$; $\tau^- = 25...125 \text{ мкс}$.

Как для косвенной, так и для выносной дуги к технологическим параметрам импульсной модуляции тока дуги плазматрона относятся частота модуляции и параметры импульсов – амплитуда, длительность, форма. Частоту модуляции регулируют задающим генератором частоты, амплитуду, длительность и крутизну импульсов – подбором емкостей и активных сопротивлений модуляторов на основе вышеприведенных зависимостей.

Внешний вид лабораторной установки и блока управления модулятора представлен на рис. 8.

Вспомогательное оборудование

Совершенствование технологии плазменного нанесения и упрочнения покрытий предполагает его использование в отношении широкой номенклатуры типов деталей, для чего были разработаны вспомогательное оборудование и приборы:

- устройства для нанесения и упрочнения покрытий на профильных поверхностях типа шатунных шеек коленчатых валов [5] (рис. 9) и на клиновидных поверхностях типа зубьев ковшей [6];
- устройства для термомеханического упрочнения покрытий на деталях типа вал [7];
- плазматрон для напыления на малогабаритные внутренние поверхности деталей машин с водно-ка-

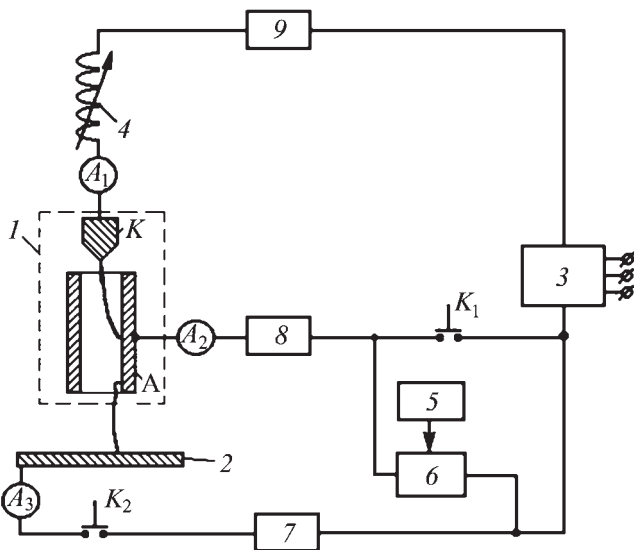


Рис 7. Принципиальная схема установки плазменного напыления–наплавки с модуляторами токов прямой и косвенной дуг:
1 – плазматрон; *2* – подложка; *3* – источник питания; *4* – катушка индуктивности; *5* – блок управления модулятора; *6* – модулятор; *7, 8, 9* – балластные сопротивления; *A₁, A₂, A₃* – амперметры; *K₁, K₂* – контакторы

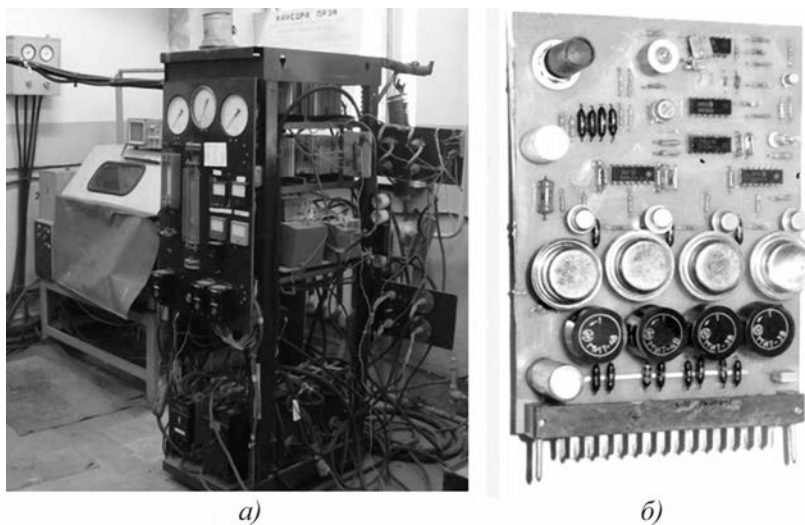


Рис. 8. Лабораторная установка:
а – шкаф управления и камера напыления; *б* – блок управления модулятора

Модуляторы тока дуги плазматрона имеют преимущества перед акустическими модуляторами в простоте реализации и в более высоком КПД волнового воздействия. Разработанный модулятор позволяет модулировать ток дуги плазматрона одно- (прямой и обратной полярности) и двухполярными импульсами. Он содержит тиристорные мосты на быстродействующих тиристорах, емкости, сопротивления и блок управления. Блок управления включает в себя фазоимпульсные регуляторы прямой и обратной полярности и компаратор для согласования временных интервалов между импульсами обратной и прямой полярности.

Исследования показали, что более выгодным является подключение модулятора непосредственно к дуге (аноду) в отличие от случая присоединения модулятора между дросселем и балластным сопротивлением,

так как в этом случае обеспечиваются более высокие значения амплитуд импульсов при их минимальных длительностях, меньшая инерционность и более устойчивая работа дуги в режиме модуляции, а также более благоприятные условия работы тириستоров.

Модулятор позволяет получать импульсы прямой полярности мощностью до 600 кВ·А при их длительностях 200...300 мкс, что соответствует энергии импульсов 100...150 Дж. Это позволяет получать в системе "косвенная дуга – плазменная струя – частицы" ударные волны слабой интенсивности и интенсивные акустические волны (свыше 150 дБ) на частотах до и более

5 кГц. Влияние параметров модуляторов (емкостей и сопротивлений) и расхода плазмообразующего воздуха на параметры импульсов имеет характер нелинейных зависимостей. На основе данных зависимостей получены оптимальные параметры модуляторов.

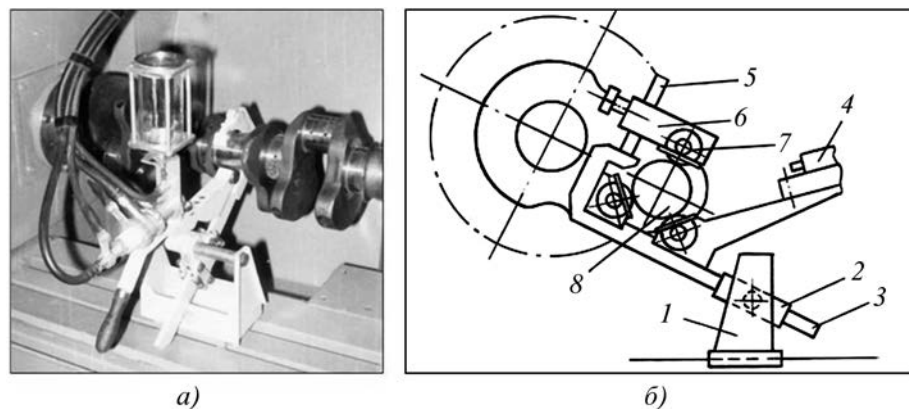


Рис. 9. Устройство для нанесения покрытий на шейки коленчатых валов:
а – внешний вид; *б* – схема; 1 – стойка; 2 – кулиса; 3 – ползун; 4 – плазматрон; 5 – направляющая; 6 – планка прижимная; 7 – ролик; 8 – шейка шатунная

пельной форсункой и отсасывающим устройством [8];

– приборы комплексного определения газодинамических параметров газовой и дисперсной фаз плазменной струи [9, 10] и другие средства и оборудование.

Выводы

Модуляция электрических параметров позволяет эффективно регулировать электрические и энергетические характеристики плазматрона и процессов нанесения покрытий, а также повышать физико-механические и триботехнические свойства покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадырметов А.М., Станчев Д.И., Сухочев Г.А. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11 (47). С. 53–56.

2. **Кадырметов А.М., Сухочев Г.А.** Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий при модуляции электрических параметров // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 4 (52). С. 25–28.

3. **Кадырметов А.М.** Воздушно-плазменное напыление деталей с импульсной модуляцией тока дуги // Совершенствование машин для лесозаготовительной промышленности и восстановление их потенциальных свойств: межвуз. сб. науч. тр. СПб., 1995. С. 99–105.

4. **Пат. 2211256 РФ**, МПК⁷ С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / Д.И. Станчев, А.М. Кадырметов, В.Н. Бухтояров, А.В. Винокуров. 2003, Бюл. № 24.

5. **Пат. 2085301 РФ**, МКИ⁽⁶⁾ В 05 В 13/04, 13/02, 15/08. Устройство для нанесения покрытий на шатунные шейки коленчатых валов / В.И. Посметьев, А.М. Кадырметов, В.В. Ливенцев, К.А. Яковлев. 1997, Бюл. № 21.

6. **Пат. 2175024 РФ**, МПК⁷ С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / С.И. Акиншин, А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев. 2002, Бюл. № 34.

7. **Сухочев Г.А., Кадырметов А.М., Яковлев К.А.** Поверхностное упрочнение защитных покрытий нагруженных деталей // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 1998. С. 80–85.

8. **Станчев Д.И., Кадырметов А.М., Иванников В.А.** Качество плазменных покрытий, напыленных на внутренние поверхности деталей // Новационные технологии и управление в технических и социальных системах: тез. докл. межвуз. науч.-практ. конф. Воронеж, 1999. Вып. 1. С. 39–40.

9. **Пат. 2029308 РФ**, МКИ⁽⁶⁾ G 01 P 5/00. Способ определения скорости потока и устройство для его осуществления / А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев, Ю.П. Земсков и др. 1995, Бюл. № 5.

10. **Пат. 2063638 РФ**, МКИ⁽⁶⁾ G 01 P 5/18. Устройство для определения скоростей двухфазного потока / А.М. Кадырметов, В.И. Посметьев, Д.И. Станчев, А.П. Лукьянчук. 1996, Бюл. № 19.



НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА МЕТАЛЛОПРОКАТА И СТАЛЬНЫХ ТРУБ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: справочник

В.Ф. Бабаев

Цена 500 р.

2010. – 160 с. ISBN: 978-5-94275-498-3

Приведена методика расчета норм расхода металлопроката (сортовой прокат, листовой прокат, рулонные материалы и др.) и стальных труб, широко применяемая в машиностроении и металлообработке, с учетом стоимости материала, типа производства, размера квартальной потребности в прокате, метода раскроя материала (на штучные или групповые заготовки, комбинированный раскрой) и т.п. Учтены передовые формы организации производства и другие достижения по экономному расходованию материалов.

Для специалистов и инженерно-технических работников предприятий, научно-исследовательских организаций, занимающихся вопросами нормирования расхода и эффективного использования материальных ресурсов; также полезен преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

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., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 15.09.10 г. Подписано в печать 17.11.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,57. Заказ 876. 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