ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



№ 3 (75) март **2011**

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного

редактора д-р физ.-мат. наук В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д-р техн. наук В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН д-р техн. наук А.В. КИРИЧЕК д-р техн. наук О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ А.П. БАБИЧЕВ В.П. БАЛКОВ В.М. БАШКОВ А.И. БЕЛИКОВ С.Н. ГРИГОРЬЕВ B.A. 3EMCKOB С.А. КЛИМЕНКО В.А. ЛАШКО В.А. ЛЕБЕДЕВ В.В. ЛЮБИМОВ Φ.И. ΠΑΗΤΕЛΕΕΗΚΟ 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**, "Преса 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,

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Гончаров С.В., Иванов В.А. Получение градиентных полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения на основе МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА Агамиров Л.В., Лисин А.Н., Мозалев В.В. Прогнозирование сопротивления усталости барабанов авиационных колес, подверженных поверхностному пластическому деформированию 8 Гущин А.Ю. Влияние угла подлета микрошарика на параметры Каргин В.А., Тихомирова Л.Б., Абрамов А.Д., Галай М.С. Повышение Шоев А.Н. Повышение качества и износостойкости поверхностного слоя ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА Пугачева Н.Б., Замараев Л.М., Трушина Е.Б., Гурченко Т.М., Замятин А.Н. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой Кочарян Е.В. Влияние химико-термической обработки на пластичность ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ Григорьев С.Н., Красновский А.Н. Энергосиловые параметры процесса формования порошковой проволоки для напыления наноструктурных покрытий ... 34 ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ Букатый С.А. К вопросу о влиянии толщины и свойств нанопокрытий Михлюк А.И. Основы создания и эксплуатации индукторов ТВЧ для термической обработки в машиностроении 40 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ Губанов В.Ф. Вибродиагностика упрочнения поверхности выглаживаемой 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



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

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

Editorial Assistants Dr of Phys. Math. Sci. V.Yu. FOMINSKY

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

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

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

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

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Goncharov S.V., Ivanov V.A. Receiving of epoxy pitch based gradient polymeric composite materials of antifriction usage by centrifugal formation method. 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Agamirov L.V., Lisin A.N., Mozalev V.V. Prognostication resistance power fatigue drum aviation wheel, prone surface plastic warping 8
Guschin A.Yu. Influence of approach of angle of the shot on surface layers' parameters
Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galay M.S. Increasing of the effectiveness of mechanical processing of the rails welded joints
Shoev A.N. Improvement of quality and wear resistanses of blanket of details electromechanical pulse processing
CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING
Pugacheva N.B., Zamaraev L.M., Trushina E.B., Gurchenko T.M., Zamjatin A.N.

The features of destruction by the diffusion boride coating on the carbon constructional steel in thermo-cycling under loading conditions	24
Kocharyan E.V. The influence of himiko-thermal processing on the plasticity	31

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Grigoriev S.M., Krasnovskiy A.N. Energy-power parameters of process of pressing of a powder wire for spraying nanostructural coverings 34

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Bukaty S.A. of the nano-co	To the question on influence of the thickness and properties batings on frequency characteristics of plates	37
Mikhlyk A.I.	Bases of creation and exploitation of inductors of currents	
of high freque	ncv for heat treatment in machine-building	40

QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

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

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



УДК 621.74.042

С.В. Гончаров, В.А. Иванов (Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск) E-mail: ya-84@list.ru

Получение градиентных полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения на основе эпоксидных смол методом центробежного формирования

Получен материал при центробежном формировании изделий из многокомпонентных компаундов, свойства которого во многом зависят от составляющих смеси, а также от их распределения в объеме изделия. Установлено, что необходимо выдерживать строгое соотношение между компонентами смеси. Приведены технологические аспекты получения градиентных полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения на основе эпоксидных смол методом центробежного формирования.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, центробежное формирование, градиентный материал, антифрикционный материал.

At centrifugal formation of products from multicomponent compounds polymeric composite material is received. Their property depends to a large from mixing components and from its allocation on product's volume. Necessary to keep a strict ratio of mixing components. Development of centrifugal formation method technological aspects are presepted. **Keywords:** polymeric composite materials, centrifugal formation, gradient material, antifriction material.

Введение

Антифрикционный материал, работающий в тяжелонагруженных узлах трения, должен иметь высокие износостойкость и характеристики прочности. Для повышения этих параметров вводят армирующий наполнитель, а также антифрикционные добавки [1].

Но в большинстве случаев влияние армирующего материала на антифрикционные характеристики полимерного материала является негативным, кроме того, в случае с высокомодульными волокнистыми армирующими наполнителями (например угле- и стеклоткани) при интенсивной работе узла трения изнашивается не только втулка подшипника скольжения, но и вал самого узла трения (рис. 1, см. с. 2 обложки), что приводит к дорогостоящему ремонту всего узла. Также следует учесть, что износ поверхности втулки подшипника скольжения происходит на небольшую глубину. К тому же увеличение толщины антифрикционного (неармированного) слоя приведет к уменьшению несущей способности материала. Поэтому толщина антифрикционного покрытия должна быть небольшой.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод, что создание материала с высокой несущей

способностью и при этом высокой износостойкостью при низком коэффициенте трения является актуальной задачей исследований [2]. К тому же анализ рынка современных аналогичных материалов показывает крайний дефицит последних отечественного производства, что также подтверждает актуальность поставленной задачи исследований.

Цель данной работы — создание новых самосмазывающихся армированных полимерных материалов антифрикционного назначения для производства деталей узлов трения машин и механизмов с улучшенными прочностными и антифрикционными параметрами, исследование их физических свойств, а также разработка технологического процесса их получения.

Структура материала

Несущая способность полимерного материала, полученного центробежным способом, во многом определяется качеством пропитки армирующего наполнителя на что влияют такие факторы, как температура, частота вращения формы и время формования, совокупность которых определяет технологию получения того или иного требуемого материала, исходя из будущих условий его работы [3].



Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие для полимерного материала на основе эпоксидной смолы YD-128, армированного различными тканями, от степени армирования: *1* – стеклоткань ЛЭСБ (ГОСТ 5937–81); *2* – РУСАР[®] (ТУ 2272-001-51605600–00); *3* – тик матрасный (С38-БЮ); *4* – бязь суровая (ГОСТ 10183–93)

Качество пропитки армирующего наполнителя определяется предельной эффективной степенью армирования полимерного материала — соотношением связующего и армирующего компонентов полимерного материала, при котором он проявляет максимальные физические свойства (например, прочность на сжатие) (рис. 2).

Степень армирования полимерного материала представлена объемным содержанием армирующего наполнителя ω_v , который показывает, какой объем занимает армирующий наполнитель в объеме полученного изделия. Соответственно, остальной объем приходится на полимерное связующее. Анализируя представленную зависимость, можно выделить общую тенденцию для всех армирующих материалов, согласно которой прочность материала возрастает по мере насыщения полимерной матрицы армирующим наполнителем.

Эта тенденция продолжается до тех пор, пока полимерного связующего достаточно для того, чтобы связывать волокна армирующего наполнителя, а также заполнять промежутки между слоями армирующего материала. После того как возникает дефицит связующего, прочность материала падает и возникает перегиб на кривой для материала с соответствующим армирующим наполнителем.

Именно этот перегиб кривой, а точнее ω_v — наивысшая точка кривой, и есть предельная степень армирования материала. Физический смысл данного понятия — показать, какое количество армирующего материала необходимо ввести в полимерный компаунд, чтобы получить структуру материала с максимальными прочностными характеристиками.



Рис. 3. Модель структуры армированного полимерного материала антифрикционного назначения:

1 – армирующий слой; 2 – антифрикционный слой

Предлагаемая модель структуры антифрикционного полимерного материала учитывает предыдущий опыт изготовления аналогичных материалов и имеет несколько допущений, основные из которых:

• поперечное сечение материала условно разбито на слои, между которыми благодаря послойному формованию не возникает четких границ;

• армирующий материал должен обладать достаточной жесткостью.

Разделение структуры антифрикционного материала по слоям позволяет тем или иным наполнителям (в зависимости от назначения слоя) выполнять только те задачи, для которых они вводятся, тем самым оптимизируется структура материала в целом.

На рис. 3 приведена модель структуры антифрикционного полимерного композиционного материала. Из рисунка видно, что основными слоями материала являются: армирующий — для противостояния нагрузкам и антифрикционный — рабочий слой подшипника скольжения.

Таким образом, предпочтительной структурой антифрикционного материала является структура с предельной эффективной степенью армирования несущего слоя и оптимальным содержанием наполнителей антифрикционного слоя. Частицы матрицы антифрикционного слоя, воспринимая действующую на него нагрузку, передают ее частицам матрицы армирующего слоя, которые в свою очередь равномерно распределяя нагрузку, передают ее на волокна армирующего материала, заставляя работать весь армирующий материал.

Частицы твердых смазок (ДМИ-7 и ГС-1) при износе антифрикционного слоя материала в процессе приработки переносятся на вал узла трения, обеспечивая эффект самосмазывания. Благодаря вышеперечисленным особенностям разработанная структура антифрикционного материала обеспечит оптимальное соотношение между высокими прочностными характеристиками и низким коэффициентом трения материала в целом (см. рис. 3).

Расчет параметров армирующего слоя

Исходные данные к расчету:

 $-N_{\rm o}, N_{\rm y}$ – число нитей армирующего материала соответственно по основе и утку, шт., определяются для лоскута армирующего материала площадью 1 см²;

- *d*_н - диаметр нити армирующего материала, мм;

- *d*_п - внешний диаметр подшипника, мм;

– *b*_п – ширина подшипника, мм.

При раскрое армирующего материала по краям лоскута нити основы перестают удерживаться и выпадают, поэтому возникает ворсистость, которая должна учитываться шириной полосы ворса армирующего материала *b*_{ворса}, мм.

Армирующий наполнитель обладает жесткостью, которая измеряется в миллиметрах и определяет применимость той или иной ткани в технологии центробежного литья. Жесткость определяют следующим образом (рис. 4): по горизонтальной поверхности в сторону наклонной надвигается лоскут ткани, до тех пор пока он не коснется наклонной поверхности. После этого замеряется расстояние наклонной от горизонтальной плоскости до точки касания ткани (*l*), что и является жесткостью армирующего материала. Для данной технологии подходят ткани с жесткостью не менее 20...25 мм.

Так как контроль за соотношением наполнителей осуществляют по отношению объемов, занимаемых ими в изделии, определяют объем армирующего наполнителя. Для этого по нижеперечисленным формулам (1)-(4), (9)-(11) вычисляют необходимые параметры:

— объем одной нити длиной 10 мм — V_{10} , мм³,

$$V_{10} = \frac{10\pi d_{\rm H}^2}{4};\tag{1}$$

- объем нитей по основе в 1 см³ ткани – V_0 , мм³,

$$V_{\rm o} = N_{\rm o} V_{10};$$
 (2)

- объем нитей по утку в 1 см³ ткани – V_y , мм³,

$$V_{\rm y} = N_{\rm y} V_{10};$$
 (3)

— объем лоскута армирующего материала площадью 1 см² без натяжения — $V_{1 \text{cm}}$, мм³,

$$V_{\rm 1cm} = V_{\rm o} + V_{\rm y}. \tag{4}$$

Определим внешний диаметр слоя ткани – $D_{\text{вл}}$, мм:

- для первого слоя

$$D_{\rm B1} = d_{\rm II} k_{\rm V}, \tag{5}$$



Рис. 4. Определение жесткости армирующего материала

где k_y – коэффициент усадки материала; – для остальных слоев

$$D_{\rm BR} = d_{\rm fr} - 2d_{\rm H} - {\rm Y}, \tag{6}$$

где У – общая усадка материала армирующего слоя.

Зная диаметры каждого слоя армирующего материала, определим длины армирующего материала по каждому слою L_c , мм,

$$L_{\rm c} = \pi D_{\rm Bn} \,. \tag{7}$$

Просуммировав эти значения, получим требуемую длину полосы армирующего материала.

Определим:

— площадь полосы армирующего материала без ворса S_1 , мм²,

$$S_1 = d_{\rm H} (b_{\rm II} - 2b_{\rm BODCa});$$
 (8)

— объем слоя ткани без ворса V_1 , мм³,

$$V_1 = \frac{S_1 V_{1\rm cm}}{100}; \tag{9}$$

- объем ворса армирующего материала $V_{\text{ворса}}$, мм³,

$$V_{\rm Bopca} = \frac{(2b_{\rm Bopca} L_{\rm c} V_{\rm o}) + (2b_{\rm \pi} b_{\rm Bopca} V_{\rm y})}{100}.$$
 (10)

Соответственно, общий объем армирующего наполнителя $V_{\rm тк}$, мм³, равен

$$V_{\rm TK} = V_1 + V_{\rm Bopca} \,. \tag{11}$$

Объем связующего для внешнего (адгезионного) слоя ($V_{\rm ac}$, мм³) толщиной 0,2 мм (данное значение получено на основе многочисленных экспериментов) определяем по формуле

$$V_{\rm ac} = 0.25 b_{\rm fr} \pi ((D_{1n} + 0.2)^2 - D_{1n}^2), \qquad (12)$$

где D_{1n} – внутренний диаметр армирующего слоя.

Объем связующего для слоя между армирующим материалом $V_{\rm nc}$, мм³,

$$V_{\rm nc} = (0,25b_{\rm n} \pi (D_{\rm Bn}^2 - (D_{\rm Bn} - 0,2)^2).$$
(13)

5

Общий объем смолы армирующего слоя (V_{or} , см³) складывается из объемов связующего для промежуточных слоев V_{ac} и V_{nc} и связующего, необходимого для пропитки волокон армирующего материала, который равен объему армирующего наполнителя:

$$V_{or} = \frac{V_{\rm TK} + V_{\rm ac} + V_{\rm nc}}{1000}.$$
 (14)

По формуле Архимеда определим массу связующего армирующего слоя M_{or} , г,

$$M_{or} = V_{or}\rho, \tag{15}$$

где ρ – плотность связующего, г/см³.

Полимеризация эпоксидного связующего происходит в присутствии аминного отвердителя в пропорции 1:10, поэтому массу отвердителя ($M_{\text{отв1}}$, г) в данном случае вычисляем следующим образом:

$$M_{\rm oTB1} = 0.1 M_{or} \,, \tag{16}$$

а толщину армирующего слоя h_r, мм

$$h_r = \left(\sum_{i=1}^{N} (d_{\rm H} + 0,2)\right) k_{\rm y}, \qquad (17)$$

где *N* – число слоев армирующего материала.

Расчет параметров армирующего слоя

Общий объем антифрикционного слоя (V_{oa} , см³) определяем по формуле

$$V_{\text{oa}} = \frac{0.25b_{\Pi}\pi((D_{\text{B}n} - 0.2)^2 - (D_{\text{B}n} - 0.8)^2)}{1000}.$$
 (18)

Расчетную массу связующего антифрикционного слоя (M_{oa}^{p}, r) найдем по формуле

$$M_{\rm oa}^{\rm p} = V_{\rm oa} \rho, \tag{19}$$

а массу наполнителей антифрикционного слоя $M_{\rm H}^{i}$, г,

$$M_{\rm H}^i = M_{\rm oa}^{\rm p} {\rm C}_i \,, \tag{20}$$

где C_i – концентрация *i*-го наполнителя в антифрикционном слое, %.

Уточненную массу связующего антифрикционного слоя (M_{oa} , г) определяют разностью между расчетной массой связующего антифрикционного слоя и массами соответствующих наполнителей:

$$M_{\rm oa} = M_{\rm oa}^{\rm p} - \Sigma M_{\rm H}^{i}. \tag{21}$$

По аналогии с армирующим слоем вычисляют необходимую массу отвердителя для антифрикционного слоя $M_{\text{отв2}}$, г,

$$M_{\rm otb2} = 0.1 M_{\rm oa} \,.$$
 (22)

Толщину антифрикционного слоя определяли экспериментально (0,4 мм). Соответственно, толщина получаемого изделия складывается из толщины армирующего и антифрикционного слоев

$$H = h_r + 0.4.$$
 (23)

Получение материалов

Формование материала происходит на станке СЦФ [4, 5] согласно технологии послойного формования методом частичного отверждения связующего. В форму укладывают армирующий материал, заливают эпоксидное связующее, далее форму приводят во вращение при постоянном обогреве. После того как связующее в форме станет гелеобразным, в нее загружают компаунд антифрикционного слоя и повторяют формование до полного отверждения последнего.

На основе исследований влияния технологических факторов на структуру получаемого материала определена оптимальная температура полимеризации — 55 °C. Время гелеобразования связующего при данной температуре составляет 20...25 мин.

Технологический цикл получения материалов представлен на рис. 5. $T_1...T_3$ – время этапов соответственно подготовительного, формования и заключительного; T – общее время формования материала.

Во время подготовительной операции происходит загрузка и равномерное распределение связующего по армирующему материалу, а также нагрев формы и связующего в ней. Эта операция характеризуется низкой частотой вращения — для равномерного распределения связующего и повышенной температурой обогрева формы — для того, чтобы подаваемое тепло, преодолев тепловой градиент стенки формы, дошло до связующего. Несоблюдение технологических параметров данной операции влияет на качество пропитки армирующего наполнителя при последующих этапах, а следовательно, на структуру и свойства производимого материала.

Следующая операция — формование — характеризуется высокой частотой вращения и температурой, соответствующей оптимальной температуре отверждения связующего. На данном этапе происходит основное формирование структуры полимерного материала.

Частота вращения определяется по формуле (24) [4, 5] таким образом, чтобы обеспечить достаточную центробежную силу на среднем диаметре армирующего слоя, проталкивающую связующее через армирующий материал, одновременно пропитывая его:

$$C = \frac{mv^2}{r} = mw^2 r = \frac{m\pi^2 n^2 r}{900} = \frac{m\pi^2 n^2}{1800} D.$$
 (24)



Рис. 5. Технологический режим получения материалов: *а* – скоростной; *б* – температурный

По окончании данного этапа связующее частично отверждается и становится способным самостоятельно удерживать форму, благодаря чему возможна остановка формы и загрузка компаунда антифрикционного слоя.

Следующая операция получения материала является заключительной. Она характеризуется частотой вращения, достаточной для равномерного обогрева формы, и температурой, достаточной для поддержания реакции полимеризации связующего. Так как полимеризация связующего является экзотермическим процессом, то при обогреве формы на заключительном этапе следует это учитывать (чрезмерный нагрев материала отрицательно сказывается на конечной структуре материала).

По окончании формования материал проходит термообработку при температуре (120±5) °С в течение 3 ч, во время которой происходит окончательная полимеризация связующего, и нормализуются внутренние напряжения армирующего материала, вызванные действием центробежной силы. После термообработки материал усаживается и в зависимости от жесткости армирующего материала усадка составляет от 0,2 до 0,9 %.

Таким образом, разработана технология производства антифрикционных полимерных материалов методом центробежного литья, подобраны режимы формования и термообработки материала, выявлены критерии, по которым ведется подбор армирующего наполнителя, а также установлены зависимости, позволяющие оптимизировать расход наполнителей при данной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Иванов В.А., Вашковец В.В.** Композиционные антифрикционные материалы и покрытия: учеб. пособие. Хабар. политехн. ин-т, 1981. 104 с.

2. Берлин А.А., Вольфсон С.А. и др. Принципы создания композиционных материалов. М.: Химия, 1990. 150 с.

3. Гончаров С.В. Методика исследования антифрикционных полимерных композитов, изготавливаемых методом центробежного формирования // Наука — Хабаровскому краю: матер. XII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (секция технических наук), Хабаровск, 19 января 2010 г. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. С. 12–20.

4. Захарычев С.П., Иванов В.А. и др. Создание станка для разработки технологии центробежного литья изделий из полимерных композиционных материалов // Известия вузов. "Вестник ТОГУ". 2007. № 1(4). С. 36–41.

5. Гончаров С.В., Иванов В.А., Захарычев С.П. Оборудование для исследования процессов центробежного формирования изделий из полимерных композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 44–48.





МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

УДК 621.787.6

Л.В. Агамиров (Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (МАТИ)), А.Н. Лисин (Электростальский политехнический институт (филиал), Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"), В.В. Мозалев (ОАО Авиационная корпорация "Рубин") E-mail: hello atnp@mail.ru

Прогнозирование сопротивления усталости барабанов авиационных колес, подверженных поверхностному пластическому деформированию

Предложена схема прогнозирования долговечности упрочненных поверхностно-пластическим деформированием изделий, учитывающая геометрию образцов и изделий, эпюры номинальных и остаточных напряжений, а также чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений. Показано, что поверхностно-пластическое деформирование эффективно для зон элементов конструкций с градиентами номинальных напряжений. При этом всегда будут иметь место переходные слои, где эпюра остаточных напряжений изменяет знак, в которых чаще будет зарождаться усталостная трещина.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, градиент напряжений, коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла напряжений, диаграмма предельных амплитуд, долговечность, образец, барабан авиационного колеса, остаточные напряжения, номинальные напряжения.

The scheme prognostication resistance power fatigue produce prone surface plastic warping factor, into formwork pattern and produce, distribution diagram nominal and residual stress, a also sensitivity material to asymmetry cycle stress was suggested. Surface plastic deformation effective for the domain produce with gradient nominal stressis shown. In so doing syn be there transitional strata, where diagram, residual stress vary gesture, there more frequent visit arise, be born fatigue crack.

Keywords: surface plastic deformation, gradient stress, coefficient sensitivity material for nonbalanced load stress, diagram limit strength, durability, pattern metall, drum aviation wheel, resting stress, nominal stress.

Как известно, усталостное разрушение чаще начинается с поверхности изделия. Поэтому состоянию поверхностного слоя в исследованиях усталости металлов уделяется большое внимание. Вопросам оценки эффективности упрочнения путем *поверхностного пластического деформирования* (ППД) элементов конструкций посвящено множество работ [1–7]. Основная их доля имеет полуэмпирический характер и направлена на накопление информации о влиянии методов ППД на сопротивление усталости элементов конструкций.

Исследования влияния ППД на сопротивление усталости барабанов авиационных колес представлены в работах [8, 9]. Однако эти исследования относятся к барабанам, изготовленным из сплавов МЛ5, МЛ12, МА14, которые уступают по характеристикам сопротивления усталости деформируемым алюминиевым сплавам, например сплаву АК6, используемому для изготовления современных авиационных колес. В работе [8] был предложен один из методов суммирования эпюр номинальных и остаточных напряжений по рассматриваемому сечению (толщине) изделия. При прогнозировании сопротивления усталости детали предлагалось учитывать также послойное изменение коэффициента асимметрии цикла напряжений с использованием диаграммы предельных амплитуд напряжений.

Ниже приведен анализ влияния ППД на сопротивление усталости барабанов авиационных колес, а также стандартных образцов, изготовленных из деформируемого алюминиевого сплава (в данном случае) АК6. При этом для первоначального упрощения анализа предполагается следующее:

1. Сопротивление усталости определяется величиной первого главного напряжения.

2. После упрочнения ППД сопротивление усталости упрочненного (поверхностного) слоя не изменилось. Структурные изменения упрочненного слоя,



Рис. 1. Стандартный образец (*a*) для испытаний на усталость при изгибе с вращением, эпюры номинальных (*б*) и остаточных (*в*) напряжений в рабочем сечении образца

связанные с ППД, на его сопротивление усталости не повлияли.

3. Сопротивление усталости упрочненного слоя может быть оценено по результатам усталостных испытаний неупрочненных стандартных образцов.

4. Эпюра остаточных напряжений кусочно-линейная.

На рис. 1, *а* показан стандартный образец диаметром в корсетной части 8 мм для усталостных испытаний при изгибе с вращением. На рис. 1, *б* схематично изображена эпюра номинальных напряжений $\sigma_a = 180$ МПа, растягивающие напряжения (для определенности) отложены вправо. На рис. 1, *в* изображена эпюра остаточных напряжений со сжимающими напряжениями $\sigma_{OCT}^{CK} = -100$ МПа (сжимающие напряжения отложены влево).

На рис. 2 приведены разрезы эпюр номинальных и остаточных напряжений (см. рис. 1, δ , e), которые в завершении построения совмещены на рис. 3.

Из условия равновесия напряжений по опасному сечению корсетной части образца

$$\sigma_{\text{OCT}}^{\text{CK}} \frac{r_3 - r_4}{2} 2 \pi [r_4 + (2/3)(r_3 - r_4)] =$$

= $\sigma_{\text{OCT}}^{\text{P}} \frac{r_4 - r_5}{2} 2 \pi [r_5 + (2/3)(r_4 - r_5)] + \sigma_{\text{OCT}}^{\text{P}} \pi r_5^2,$ (6)

определим остаточные уравновешивающие растягивающие напряжения

$$\sigma_{\rm OCT}^{\rm P} = \frac{\sigma_{\rm OCT}^{\rm CK} (r_3 - r_4) [r_4 + 2(r_3 - r_4)/3]}{(r_4 - r_5) [r_5 + 2(r_4 - r_5)/3] + r_5^2},$$

где $r_3 - r_5$ — расстояния (радиусы) от оси вращения образца до характерных точек 3, 4, 5 изменения эпюр (рис. 4) (вправо отложены растягивающие напряжения), где приведен увеличен-



Рис. 2. Разрезы эпюр номинальных (*a*) и остаточных (*б*) напряжений



Рис. 3. Совмещение разрезов эпюр номинальных и остаточных напряжений, изображенных на рис. 2

ный и повернутый во фронтальной проекции фрагмент рис. 3. В частности, точка 5 (см. рис. 4) находится на растягивающей части эпюры остаточных напряжений.



Рис. 4. Характерные точки изменения эпюр номинальных и остаточных напряжений в рабочем сечении образца



Рис. 5. Разрез эпюры суммарных напряжений в рабочем сечении образца

Суммируя алгебраически эпюры номинальных и остаточных напряжений, получим эпюру суммарных напряжений в виде твердотельной модели, разрез которой приведен на рис. 5. Из последних рисунков видно, что суммарная пространственная эпюра напряжений имеет сложный вид: во внутренних концентрических слоях корсетного сечения образца (в зоне оси образца) действуют различные переменные напряжения, имеющие различные параметры асимметрии цикла напряжений.

В табл. 1 даны напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений в переходных слоях (точках) (см. рис. 4) образца вдоль его радиуса.

Из приведенных данных следует, что в разных слоях образца действуют различные циклы напряжений, имеющие разные коэффициенты асимметрии цикла напряжений. Поэтому для расчета сопротивления усталости образца, подверженного ППД, необхо-



Рис. 6. Точки диаграмм предельных амплитуд напряжений

димо располагать диаграммой предельных амплитуд напряжений.

На рис. 6 показаны точки диаграмм предельных амплитуд напряжений, соответствующие циклам изменения напряжений в слоях образца, показанных на рис. 4 при $\sigma_a = 180$ МПа. Обозначения точек соответствуют обозначениям, приведенным в табл. 1. Линия I аппроксимирует экспериментальные результаты, полученные при испытаниях на растяжение—сжатие неупрочненных цилиндрических образцов диаметром 20 мм (база испытаний 10⁶ циклов). Образцы вырезаны из прутка сплава АК6, используемого при изготовлении барабанов авиационных колес.

На рис. 6 показана одна из возможных ситуаций сочетания номинальных и остаточных напряжений, а также коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Таблица 1

	Исходная	и эпюра	Суммарная эпюра				
Точка	Напряжен	ие, МПа	Коэффициент		Напряжение, МП	a	
	номинальное	остаточное	асимметрии, R	амплитуда	среднее	максимальное	
		σ	$s_a = 180 \text{ M}\Pi a$				
3	180	-200	19	180	-200	-20	
4	158	0	-1	158	0	158	
5	154	31	0,7	31	154	185	
2 (без упрочнения)	180	0	-1	180	0	180	
		σ	$a_a = 260 \text{ M}\Pi a$				
3	260	-200	-7,7	260	-200	60	
4	228	0	-1	228	0	228	
5	222	31	0,8	31	222	253	
2 (без упрочнения)	260	0	-1	260	0	260	
Примечание. Характерные слои (точки) изменения эпюр в образце см. рис. 4.							

Напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений для образца

Анализ диаграммы предельных амплитуд напряжений показал, что в координатах среднее напряжение—амплитуда напряжений (" $\sigma_m - \sigma_a$ ") большей долговечности соответствует нижерасположенный график диаграммы [10]. При этом угол наклона графика с увеличением долговечности будет уменьшаться. Последнее означает, что долговечности сечений (слоев) образца, подвергнутого ППД, которым на рис. 6 соответствуют точки 3, 4, 5, больше долговечности неупрочненного ППД образца.

Анализ соотношений геометрических размеров образцов и исходных эпюр номинальных и остаточных напряжений показал, что если суммарные напряжения меньше предела текучести сплава АК6, то ППД образца всегда увеличивает его долговечность. При этом возможны оптимальные соотношения, обеспечивающие максимальную долговечность образца.

Строго говоря, в зависимости от поведения материала в области сжимающих напряжений и соотношения его пределов текучести при растяжении и сжатии, на поверхности образца, где суммарные напряжения превысят или предел текучести для растяжения, или предел текучести для сжатия, разрушение упрочненного ППД образца может начаться раньше, чем неупрочненного.

Если образец испытывать при номинальном напряжении $\sigma_a = 260$ МПа, то сжимающее напряжение достигает $\sigma_{max}^{CW} = 260 + 200 = 460$ МПа при пределе текучести сплава АК6 на растяжение $\sigma_{\rm B} = 400...450$ МПа и сжатие $\sigma_{\rm B}^{CW} = 450...500$ МПа, т.е. $\sigma_{max}^{CW} \approx \sigma_{\rm B}^{CW}$. Последнее означает, что суммарные напряжения находятся на уровне пределов текучести сплава АК6, а долговечность подверженного ППД образца может оказаться меньше долговечности неупрочненного образца (в данной работе это не проверялось).

Иная ситуация, с точки зрения прогнозирования сопротивления усталости, складывается у упрочненных ППД барабанов авиационных колес, геометрия меридионального (кольцевого) сечения которых вдоль образующей непрерывно изменяется. На рис. 7 (см. с. 2 обложки) приведен разрез, а на рис. 8 (см. с. 2 обложки) — меридиональное сечение одного из барабанов авиационных колес.

На рис. 9 схематично показан фрагмент левого (см. рис. 8, с. 2 обложки) разреза ободно-бортовой части колеса с эпюрами номинальных напряжений для случая ближайшего положения обода колеса к земле при качении колеса по земле (рис. 9, *a*) и остаточных напряжений (рис. 9, *б*). Линиями θ отмечено положение нулевой линии, где напряжения равны нулю, растягивающие напряжения отложены влево



Рис. 9. Фрагменты ободно-бортовой зоны барабана колеса с эпюрами номинальных (*a*) и остаточных (*б*) напряжений для случая ближайшего положения обода барабана к земле при качении колеса по земле

от линий θ , сжимающие — вправо. Как видно из рис. 9, δ , упрочнены и наружная, и внутренняя поверхности обода барабана.

На рис. 10 схематично приведен фрагмент левой (см. рис. 7 с. 2 обложки) ободно-бортовой части колеса с совмещенными разрезами эпюр номинальных и остаточных напряжений для случая наиболее удаленного положения обода колеса от поверхности земли при качении колеса по земле. Последнее означает, что при качении колеса по земле эпюра номинальных напряжений изменяется от вида на рис. 9 у земли до вида рис. 10 на самом удаленном расстоянии от земли.



Рис. 10. Фронтальный вид фрагмента выреза ободно-бортовой зоны барабана с совмещенными вырезами эпюр номинальных и остаточных напряжений для случая наиболее удаленного положения обода барабана от земли при качении колеса по земле

Таблица 2

	Исходная эпюра напряжения, МПа			Суммарная эпюра			
Точка	НОМИ	нальное		IZ 1.1	H	[апряжение, МІ	Та
T O IKu	нижнее положение	верхнее положение	остаточное	Коэффициент асимметрии, <i>R</i>	амплитуда	среднее	максимальное
1	260	70	-200	-2,2	95	-35	60
2	256,1	68,73	0	0,27	93,7	162	256
3	255,6	68,57		0,33	93,5	188	281
4	221,4	57,27	25,4		82	165	247
5	187,1	45,98		0,34	70,5	142	212
6	186,6	45,82	0	0,25	70,4	116	187
7	150	30	-200	3,4	60	-110	-50
8 (без упрочнения)	260	70	0	0,27	95	165	260

Напряжения и коэффициенты асимметрии цикла для зоны обод-борт барабана колеса

В табл. 2 приведены напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений в слоях ободно-бортовой зоны (толщиной 10 мм) барабана авиационного колеса, показанные на рис. 11, где совмещены эпюры номинальных и остаточных напряжений (рис. 9), т.е. за один полуоборот колеса эпюра номинальных напряжений изменяется от вида на рис. 10 (верхнее положение обода) до вида на рис. 11 (нижнее положение обода).

Уравновешивающие растягивающие напряжения в ободе барабана авиационного колеса определяли из условия равновесия, аналогичного формулам (1), (2). Как видно из табл. 2, при сложении эпюр номинальных и остаточных напряжений в различных слоях ободно-бортовой части барабана действуют циклы напряжений с различными коэффициентами асимметрии. Следует отметить, что уровень напряжений в этой зоне всегда высок в сравнении с другими зонами барабана.

На рис. 12 приведены точки диаграммы предельных амплитуд напряжений (см. табл. 2). Наклонной линией показана линия *1* на рис. 6.

Через точку 8 пунктирной линией проведена соответствующая диаграмма предельных амплитуд. Как



Рис. 11. Фронтальный вид фрагмента выреза ободно-бортовой зоны барабана с совмещенными вырезами эпюр номинальных и остаточных напряжений

Номинальные напряжения



200

250

Рис. 12. Точки диаграмм предельных амплитуд напряжений (см. рис. 10, 11)

	Исходная эпюра напряжения, МПа			Суммарная эпюра			
Точка	номинальное			W 11	Напряжение, МПа		
1011	нижнее положение	верхнее положение	остаточное	остаточное Коэффициент асимметрии, <i>R</i>		среднее	максимальное
1	260	70	-20	0,21	95	145	240
2	250,3	66,82	0	0,27	91,8	159	250
3	240,7	63,64			88,5	172	261
4	221,4	57,27	20	0,32	82	159	241
5	202	50,91			75,6	146	222
6	192.4	47.73	0	0.25	72.3	120	192

0,08

0.27

-20

0

Напряжения и коэффициенты асимметрии цикла для зоны обод-борт барабана колеса

видно из рис. 12, все точки 2–7, за исключением точки 3, соответствующие напряжениям в упрочненном барабане с остаточными сжимающими напряжениями $\sigma_{OCT}^{CK} = -200$ МПа, группируются ниже графика диаграммы предельных амплитуд, проходящего через точку 8 (точка 2, расположенная ниже точки 8, почти совпала с точкой 8). Следовательно, слои, соответствующие этим точкам (2–7), имеют большую долговечность в сравнении с поверхностным слоем неупрочненного ППД барабана, которому на рис. 12 и в табл. 2 соответствуют точка 8. Исключение составляет точка 3, слой, соответствующий ей, имеет меньшую или равную долговечность, чем на поверхности неупрочненного ППД барабана.

150

260

30

70

7

8 (без упрочнения)

Это означает, что для данного примера ППД наружной и внутренней поверхностей не привело к увеличению долговечности барабана в целом, так как циклу напряжений в слое *3* барабана (см. рис. 11 и табл. 2) соответствует приблизительно та же долговечность, что и циклу, действующему на наружной поверхности неупрочненного ППД барабана (см. табл. 2).

Это также означает, что оптимальный режим ППД (с точки зрения повышения сопротивления усталости) для образца необязательно должен быть оптимальным для барабана.

Выполненный анализ показал, что упрочнение только наружной поверхности барабана также не увеличивает его долговечность в целом при прочих равных условиях.

Дальнейшие исследования показали, что ППД увеличивает долговечность барабана в целом, если

остаточные сжимающие напряжения существенно уменьшить, например до $\sigma_{OCT}^{CM} = -20...-30$ МПа, но увеличить толщину их слоя. При этом необходимо изменить геометрию обода так, чтобы увеличился градиент напряжений.

70

165

130

260

60

95

Для иллюстрации сказанного в табл. 3 приведены данные, аналогичные данным табл. 2, но для уменьшенных остаточных напряжений $\sigma_{OCT}^{CK} = -20$ МПа (было $\sigma_{OCT}^{CK} = -200$ МПа), толщины их слоя 0,75...1,0 мм (было 0,5 мм) и толщины обода 8 мм (было 10 мм). Предполагается, что изменение геометрии соседних (менее нагруженных) зон позволило оставить без изменения номинальные напряжения на наружной и внутренней поверхностях в рассматриваемой зоне барабана (см. рис. 11, точки 1, 7).

Из рис. 13, на котором представлены данные табл. 3, следует, что все точки 2–7 расположены ниже пунктирного графика диаграммы предельных амплитуд, проходящего через точку 8, т.е. мысленно проведенные через точки 2–7 на рис. 13 графики диаграмм предельных амплитуд будут группироваться ниже графика диаграммы предельных амплитуд, проходящего через точку 8. Следовательно, слои на рис. 11, соответствующие точкам 2–7, имеют большую долговечность в сравнении с поверхностным слоем неупрочненного ППД барабана, которому на рис. 13 и в табл. 3 соответствует точка 8.

Анализ приведенных данных показал, что существенными факторами увеличения долговечности от упрочнения обода барабана с использованием ППД являются чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений, величина и градиент номиналь-



Рис. 13. Точки диаграмм предельных амплитуд напряжений

ных, а также относительная величина остаточных напряжений. Для оптимизации эпюр остаточных напряжений, наводимых в ободе колеса, необходимо учитывать изменения эпюр номинальных напряжений вдоль образующей обода барабана, зависящие от толщины меридионального сечения в рассматриваемой зоне.

Следует добавить, что сопротивление усталости образца и барабана определяется сопротивлением усталости не только поверхностных, но и глубинных слоев изделия. В частном случае (см. табл. 1) долговечность образца определяется сопротивлением усталости глубинного слоя точки 4 (см. рис. 4), а не поверхностного слоя в точке 3. В случае, представленном в табл. 2, долговечность барабана определяется сопротивлением усталости глубинного слоя точки 3 (см. рис. 12), а не поверхностных слоев в точках 1 или 7. А в случае, представленном в табл. 3, долговечность барабана определяется сопротивлением усталости нескольких точек 1, 2 и 3 (см. рис. 12), которые практически расположились на одной диаграмме предельных амплитуд напряжений.

При справедливости такого утверждения открывается возможность прогнозирования сопротивления усталости изделий, подвергнутых ППД, по диаграммам предельных амплитуд напряжений с учетом эпюр номинальных и остаточных напряжений. Для примера, на рис. 14 линией *1* представлена кривая усталости стандартных неупрочненных образцов диаметром 7,5 мм из сплава AK6, испытанных при изгибе с вращением, описываемая двухпараметрическим уравнением

$$\sigma_{-1} = B(\lg N)^{-\beta} = 3458(\lg N)^{-1,63}, \qquad (3)$$

где σ_{-1} — предел выносливости стандартных образцов; N — долговечность стандартных образцов; *В* и β – параметры кривой усталости.

По данным табл. 1 в глубинном слое 4 образца действуют амплитуды напряжений 158 и 228 МПа, соответствующие номинальным напряжениям 180 и 260 МПа. Если предположить, что разрушение произойдет в слое 4 от напряжений 158 и 228 МПа, то по кривой усталости (3) можно вычислить соответствующие логарифмы долговечностей

$$lg N_{(180)} = \left(\frac{3458}{158}\right)^{0,61} = 6,653;$$

$$lg N_{(260)} = \left(\frac{3458}{228}\right)^{0,61} = 5,310.$$
(4)

На рис. 14 линией 2 отмечена рассчитанная по формулам (4) кривая усталости образцов, подверженных ППД. Как видно из рис. 14, имеет место удовлетворительное совпадение результатов расчета (кривая 2) и эксперимента (точки).

Следовательно, прирост долговечности вследствие упрочнения можно оценить по кривой усталости неупрочненных образцов, вычислив по предложенной выше схеме соответствующие суммарные напряжения в глубинных слоях предполагаемого разрушения упрочненного ППД образца.

Сравнительный анализ изломов разрушенных образцов показал следующее. У образцов без ППД усталостная трещина плоская и развивается в корсетной части (см. рис. 1) перпендикулярно оси образца, на изломе видна очевидная зона зарождения усталостной трещины, участок статического долома, хорошо виден фронт критической трещины (при которой произошло разделение образца на две части).

Изломы образцов, подверженных ППД, имеют ступенчато-ярусный характер с многоочаговыми зо-



Рис. 14. Экспериментальная (1) для неупрочненных и рассчитанная (2) для упрочненных кривые усталости в сопоставлении с экспериментальными данными (точки) упрочненных образцов

нами зарождения усталостных трещин, расположенными на некотором расстоянии (0,5...1,5 мм) от поверхности образца. Не всегда удается идентифицировать участок статического долома упрочненного ППД образца.

Аналогичный характер зон разрушения имеет место и в ободно-бортовой зоне барабанов авиационных колес. При этом долговечность барабанов, подверженных ППД, больше (в 1,5–2 раза) долговечности барабанов без ППД. Это связано как со сравнительно небольшими остаточными напряжениями, так и с относительно лучшим качеством поверхности, обеспеченным ППД, в сравнении с тонким точением барабанов без ППД.

Анализ имеющихся данных показал, что ППД эффективно для тех зон элементов конструкций, в которых имеют место градиенты номинальных напряжений, например в дисковой части барабанов авиационных колес. При этом всегда будут иметь место переходные слои, где эпюра остаточных напряжений изменяет знак, в которых чаще будет зарождаться усталостная трещина.

Таким образом, в данной работе показана схема прогнозирования сопротивления усталости, упрочненных ППД изделий, учитывающая геометрические размеры образцов и изделий, параметры эпюр номинальных и остаточных напряжений, а также ранее не учитывавшуюся чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пудков С.И. Повышение надежности лопаток компрессора ГТД с помощью упрочняющей обработки микрошариками // Авиационная промышленность. 1980. № 7. С. 21.

2. Щеглова Н.И., Масюк А.М., Брондз Л.Д. Поверхностное упрочнение элементов конструкций из алюминиевых сплавов // Авиационная промышленность. 1980. № 1. С. 8.

3. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 230 с.

4. Вильнер М.Н., Струпина Н.А. Поверхностное упрочнение барабанов крупногабаритных колес на полуавтомате CO-0.6-1200 // Авиационная промышленность. 1981. № 7. С. 53.

5. Малашенко И.С. Дробеструйная обработка микрошариками поверхности конденсированных покрытий на лопатках газовых турбин // Авиационная промышленность. 1980. № 4. С. 30.

6. **Кравченко Г.Н.** Повышение долговечности деталей силовых элементов шасси методами ППД с применением повторных упрочнений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 1983. 16 с.

7. Наконечны А. Оценка и повышение эффективности методов поверхностного упрочнения деталей машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М: ИМАШ им. А.А. Благонравова, 1991. 39 с.

8. **Мозалев В.В.** Исследование сопротивления усталостному разрушению авиаколес и разработка методов повышения ресурса и надежности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М: МАТИ, 1974. 19 с.

9. Хазанов И.И., Сакач Р.В., Пейко Я.Н. и др. Эксплуатационная надежность авиационных колес. М: Транспорт, 1974. 224 с.

10. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. Новосибирск: Наука, 2005. 342 с.

УДК 621.787.6

А.Ю. Гущин (Филиал НТЦ им. А. Люльки ОАО "НПО "Сатурн", г. Москва) E-mail: guschin.ayu@gmail.com

Влияние угла подлета микрошарика на параметры поверхностного слоя

Изложены расчетные зависимости параметров поверхностного слоя от угла падения микрошарика на обрабатываемую поверхность.

Ключевые слова: микрошарик, угол падения, глубина пластической деформации, глубина лунки.

There are some aspects of the parameters of shot peening process describes in this issue. **Keywords:** shot peening, approach angle, depth of the plastic strain, height.

В современном авиационном производстве для повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя используют упрочнение деталей методами *поверхностного пластического деформирования* (ППД). Из методов ППД наиболее широко применяется уп-

рочнение микрошариками вследствие широкой номенклатуры упрочняемых деталей.

Исследования показали, что при упрочнении микрошариками оптимальный угол падения микрошарика на обрабатываемую поверхность должен состав-



Рис. 2. Взаимодействие микрошарика с плитой

лять 90° [1]. Однако не всегда возможна обработка поверхности с таким углом подлета микрошариков к обрабатываемой поверхности.

В данной статье приводится расчетное исследование изменения характеристик поверхностного слоя, таких как глубина пластически деформированного слоя, глубина остаточной лунки в зависимости от угла падения микрошарика на обрабатываемую поверхность. Расчеты производили с помощью программного комплекса LS-Dyna.

Конечно-элементная модель микрошарика и обрабатываемой поверхности представлена на рис. 1 (см. с. 3 обложки).

Геометрическая модель – микрошарик диаметром 0,3 мм и фрагмент плиты размером 2×2 мм и глубиной 0,5 мм.

Конечно-элементная модель содержит 80 000 элементов. Элементы, использованные в расчете, — трехмерные восьмиузловые с тремя поступательными степенями свободы. В качестве граничных условий использовали следующее:

– начальная скорость микрошарика – 1 м/с;

- закрепление по поверхности *A* (см. рис. 1, с. 3 обложки) фрагмента плиты по всем трем осям.





Начальные скорости выбирали при условии, чтобы пластическая деформация не распространялась по всей глубине плиты, а геометрические размеры плиты — из условия минимального числа элементов при достаточно подробной конечно-элементной сетке в зоне соударения и приемлемого времени решения данной задачи.

Материал микрошарика — сталь ХН62БМКТЮ (ЭП742), материал плиты — титановый сплав ВТ6, широко используемый при производстве деталей компрессоров газотурбинных двигателей. Использовали кусочно-линейную аппроксимацию кривых деформирования данных материалов.

На рис. 2 представлена схема взаимодействия микрошарика с плитой.

Были проведены расчеты при подлете микрошарика к обрабатываемой поверхности под углами 10, 30, 45, 60 и 90°. На рис. 3 (см. с. 3 обложки) представлены картины распределения пластических деформаций при соударении микрошарика с плитой при различных углах падения. Из рисунка видно, что с увеличением угла падения от 10 до 90° возрастает пластическая деформация, а следовательно, растет и глубина остаточной лунки в плите.

На рис. 4 представлена зависимость относительной глубины остаточной лунки в плите от угла падения микрошарика. Относительная глубина лунки отношение глубины лунки при данном угле падения к глубине лунки при угле падения 90°.

На рис. 5 приведены абсолютные величины глубины лунки после соударения шарика с плитой под различными углами.

На рис. 6 представлена зависимость относительной глубины пластически деформированного слоя в плите от угла падения микрошарика.







Рис. 6. Зависимость относительной глубины пластически деформированного слоя от угла падения микрошарика



Рис. 7. Зависимость глубины пластически деформированного слоя от угла падения микрошарика

На рис. 7 показаны абсолютные значения глубины пластически деформированного слоя в зависимости от угла падения микрошарика.



Рис. 8. Зависимость остаточного пластического отпечатка от угла падения микрошарика

Кроме того, на рис. 8 приведены значения размера остаточного пластического отпечатка микрошарика в зависимости от угла падения.

Вывод

Расчетным путем установлено, что при изменении угла падения микрошарика на обрабатываемую поверхность с 60 до 90° изменение глубины остаточной лунки и глубины пластически деформированного слоя изменяется менее чем на 20 %, что позволяет в определенных местах уменьшить угол падения микрошариков без существенной потери показателей качества поверхностного слоя после упрочнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2-х т. Т. 2. М.: Машиностроение, 1995. 688 с.



УДК 621.7.092

В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск) E-mail: galayms@stu.ru

Повышение эффективности механической обработки сварных соединений рельсов

Рассмотрено формирование упрочненного слоя на поверхности сварного шва головки рельса методом пластического деформирования с помощью электромагнитной машины ударного действия. Приведено описание методики и результатов исследования влияния ударного упрочнения на физико-механические свойства сварных соединений рельсов.

Ключевые слова: сварной шов, поверхностное пластическое упрочнение, машина ударного действия, микротвердость, глубина упрочнения, контактно-усталостная прочность.

The shaping of the reinforced layer on the surface of the weld of the head of rail is examined by the method of plastic deformation with the aid of the electromagnetic machine of percussion. The description of procedure and results of a study of the influence of impact strengthening on the mechanical properties of the welded joints of rails was given. **Keywords:** weld joint, surface plastic hardening, machine of percussion, microhardness, depth of strengthening, contact-fatigue strength.

Введение

Сварные соединения рельсов являются наиболее повреждаемыми местами в процессе эксплуатации бесстыкового пути. Это связано с характерными особенностями сварных швов рельсов. В сварном шве и околошовной зоне после сварки изменяются механические свойства, образуются остаточные растягивающие напряжения, облегчающие образование трещин, а сам сварной шов, кроме того, является концентратором напряжений [1, 2].

Проведенные исследования показали, что твердость сварного шва головки рельса после алюминотермитной сварки в некоторых случаях гораздо ниже, чем твердость основной рельсовой стали (рис. 1). Средний уровень твердости на поверхности катания сварного шва головки рельса составлял 220...245 НВ. Согласно требованиям [3], минимальная допустимая твердость в сварном шве и околошовной зоне должна быть не менее 290 НВ.

Пониженная твердость в сварном шве головки рельса в сравнении с твердостью объемно-закаленного рельса приводит к неравномерному износу в процессе эксплуатации и увеличивает вероятность контактных повреждений сварных стыков. Кроме того, для формирования поверхности катания технология механической обработки сварных соединений предусматривает шлифование рельсового стыка, при кото-



Рис. 1. Схема (a) и результаты (б) измерения твердости (0 – середина шва, ширина шва $70 \cdot 10^{-3}$ м)

ром увеличиваются растягивающие напряжения, что приводит к снижению контактно-усталостной прочности сварного соединения. Поэтому возникает необходимость совершенствования технологических процессов финишной обработки сварных соединений рельсов для достижения их физико-механических показателей, сопоставимых с показателями объемно-закаленных рельсов.

Одним из возможных направлений решения данной проблемы является включение в технологический процесс операции *поверхностного пластического деформирования* (ППД) на стадии механической обработки сварных соединений. Анализ исследований, проведенных Л.Г. Одинцовым, Д.Д. Папшевым, Б.П. Рыковским, В.М. Смелянским, Д.Л. Юдиным, позволил сделать вывод о том, что в сравнении со статическими методами ППД динамические методы обеспечивают наибольшую глубину упрочненного поверхностного слоя, причем упрочненный слой обладает высокой твердостью и большими значениями остаточных сжимающих напряжений [4, 5].

Однако большинство динамических методов ППД являются часто нерациональными ввиду громоздкости оборудования, поэтому их применение для упрочнения сварных швов при создании бесстыкового пути на железных дорогах затруднено.

Среди известных динамических методов ППД ударное пластическое деформирование является одним из простых и эффективных способов упрочнения, которое может выполняться непосредственно на месте производства основных работ. По показателям производительности, универсальности, эффективности упрочнения деталей сложной формы, затрат на оборудование ударное упрочнение превосходит большинство других способов.

Методика проведения исследований

Для реализации ударного пластического деформирования сварных швов рельсов была создана электромагнитная машина ударного действия (рис. 2), состоящая из двух основных узлов: силовой части и ударной системы. Силовая часть представляет собой корпус с закрепленными в нем катушками прямого и обратного хода. Внутри катушек перемещается стальной сердечник — боек. Ударная система состоит из индентора (шарик из стали ШХ15 диаметром 10 мм, с термообработкой до твердости 61 НRC и параметром шероховатости Ra = 0,1 мкм) и направляющего фланца.

Рабочий цикл машины включает в себя разгон бойка катушкой прямого хода до соударения его с индентором, возврат бойка в исходное положение катушкой обратного хода и отскок бойка от амортизатора. Ударное воздействие через индентор передается на упрочняемую поверхность детали и обеспечивает деформацию обрабатываемого материала [6].

Особенности метода ударного пластического деформирования таковы, что микротвердость и глубина упрочненного слоя во многом зависят от энергии удара. Поэтому согласно вышеописанной методике темплеты, вырезанные из головки сварных соединений рельсов, обработали машиной ударного действия при варьировании энергии удара от 5 до 30 Дж, чем и было обусловлено формирование упрочненных слоев с различными характеристиками: глубиной упрочнения и микротвердостью.



Рис. 2. Машина ударного действия с электромагнитным приводом: *1* – индентор; *2* – катушка прямого хода; *3* – катушка обратного хода; *4* – амортизатор; *5* – фланец; *6* – боек

Результаты исследований

После проведения испытаний исследовали микротвердость в зоне приложения ударной нагрузки. Оценку микротвердости проводили в соответствии с ГОСТ 9450—76 на приборе УИПМТ-3 (×487). Нагрузка на индентор составила 1,96 Н, время выдержки под нагрузкой — 10 с. Микротвердость измеряли на поверхности катания сварного шва головки рельса, а также вглубь от нее.

Анализ результатов измерения микротвердости поверхностного слоя (рис. 3) при различных энергиях удара показал, что с увеличением энергии удара микротвердость обработанной поверхности возрастает, причем значительный прирост микротвердости и глубины упрочнения наблюдается при ударном нагружении энергиями 15...30 Дж. При повышении энергии удара глубина упрочненного слоя увеличивается от 1,2 мм при E = 5 Дж до 3,8 мм при E = 30 Дж.

Для исследования влияния пластического деформирования сварных соединений рельсов на уровень



Рис. 3. Влияние энергии удара E на микротвердость H(1) и глубину упрочнения $h_{\text{vnp}}(2)$



контактно-усталостной прочности проводили испытания на установке, позволяющей определить момент образования и динамику развития питтингов. Результаты испытаний показали, что применение ударного пластического деформирования способствует повышению уровня контактно-усталостной прочности сварного шва на 20...23 % в сравнении с неупрочненным сварным швом (рис. 4).

Выводы

Методом ударного пластического деформирования сварных швов при помощи электромагнитной машины ударного действия можно сформировать упрочненный слой, микротвердость которого значительно выше, чем микротвердость необработанных сварных соединений рельсов. Испытания на контактно-усталостную прочность поверхности сварного шва головки рельса показали, что уровень контактной выносливости сварных соединений рельсов, обработанных методом виброударного упрочнения, увеличился на 20 % в сравнении с необработанными сварными соединениями рельсов.

Полученные результаты подтверждают возможность применения метода ударного пластического деформирования для повышения эксплуатационной стойкости сварных соединений рельсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моисеенко В.П. Материалы и их поведение при сварке. Черные металлы и сплавы. Ростов-на-Дону, 1997. 163 с.

2. Бесстыковой путь / В.Г. Альбрехт, Н.П. Виноградов, Н.Б. Зверев и др.; под ред. В.Г. Альбрехта, А.Я. Когана. М.: Транспорт, 2000. 408 с.

3. **ТУ 0921-127-01124323–2005.** Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. 16 с.

4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

5. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидунович, Н.В. Спиридонов. Минск, 2005. 299 с.

6. Низкочастотные электромагнитные машины ударного действия для решения технологических задач транспортного машиностроения и строительства / В.А. Каргин, А.Д. Абрамов и др. // Проблема и перспективы развития горных наук: матер. Междунар. конф.: Новосибирск, 2004. С. 124–137. А.Н. Шоев (Филиал технологического университета Таджикистана, г. Куляб) E-mail: Shoev_@mail.ru

Повышение качества и износостойкости поверхностного слоя деталей электромеханической импульсной обработкой

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров качества и износостойкости поверхностного слоя образцов из стали 40Х при электромеханической импульсной обработке. **Ключевые слова:** качество поверхности, износостойкость, электромеханическая обработка.

Results of experimental researches of parameters of quality and wear resistance of a blanket of samples from a steel 40X at electromechanical pulse processing are resulted. Keywords: quality of a surface, wear resistance, electromechanical processing.

Одним из перспективных методов, обеспечивающих повышение качества и износостойкости поверхностных слоев деталей машин, определяющих их долговечность, является электромеханическая импульсная обработка [1].

Экспериментальные исследования по электромеханической импульсной обработке проводили на образцах из стали 40Х по плану двухфакторного эксперимента. Первый фактор — сила тока *I* варьировалась на четырех уровнях; второй фактор — длительность импульса тока τ_E — на двух уровнях; остальные менее значимые факторы (подача *S*, длительность пауз между импульсами тока τ_I) оставались неизменными.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

	Параметры шероховатости, мкм							
Сила тока <i>I</i> , А	Ra	Rp	<i>R</i> max	$tm^* \cdot 10^{-2}, \%$	ν	<i>Sm</i> , мм	ρ	
			$\tau_E =$	0,16 c				
	0,834	3,929	4,388	0,490	2,743	0,052	32,13	
	0,771	3,834	3,682	0,486	2,704	0,046	29,84	
450	0,921	3,323	6,514	0,516	3,015	0,059	37,23	
	1,089	3,746	8,643	0,552	3,549	0,066	39,06	
	1,061	3,486	7,306	0,511	2,740	0,063	34,83	
	1,295	4,083	8,681	0,538	3,040	0,093	40,43	
	1,244	5,292	8,447	0,431	2,655	0,067	47,01	
550	0,914	3,377	6,510	0,484	2,563	0,062	31,42	
	1,114	3,697	7,535	0,547	2,949	0,083	41,12	
	1,377	5,379	9,824	0,548	3,206	0,077	47,07	
	0,629	2,105	4,500	0,503	2,531	0,045	61,01	
	0,793	2,207	4,928	0,491	2,047	0,067	3,13	
700	1,353	4,055	7,262	0,425	2,132	0,101	37,54	
	1,589	4,600	8,998	0,481	2,405	0,128	49,06	
	1,374	4,501	8,760	0,491	2,129	0,108	92,67	

Средние значения параметров шероховатости образцов из стали 40Х

Окончание табл. 1

	Параметры шероховатости, мкм						
Сила тока <i>I</i> , А	Ra	Rp	<i>R</i> max	$tm^* \cdot 10^{-2}, \%$	ν	<i>Sm</i> , мм	ρ
	1,728	8,135	10,453	0,476	1,395	0,076	36,32
	0,567	3,590	6,183	0,476	1,924	0,057	26,53
850	1,524	7,349	9,971	0,449	2,238	0,079	16,29
	1,226	6,228	9,537	0,413	1,650	0,064	34,00
	1,313	4,447	7,455	0,422	2,716	0,086	19,53
		1	$\tau_E = 1$	0,32 c	1	1	
	1,120	4,001	8,810	0,521	2,140	0,051	127,44
	1,229	2,993	9,720	0,612	2,019	0,064	179,47
450	1,013	3,821	7,555	0,526	3,015	0,051	109,56
	0,978	2,727	7,755	0,550	2,156	0,051	102,85
	1,180	3,560	9,344	0,576	2,718	0,059	117,20
	0,866	2,747	6,384	0,545	2,578	0,042	69,96
	0,997	4,254	9,588	0,519	2,965	0,048	57,76
550	0,853	3,550	6,504	0,473	2,443	0,049	56,91
	1,349	7,083	10,843	0,473	1,742	0,054	51,86
	1,553	6,352	10,520	0,487	1,748	0,110	122,01
	1,081	3,557	9,834	0,550	2,857	0,049	40,54
	1,479	5,163	9,834	0,466	1,865	0,060	23,49
700	1,467	5,635	10,605	0,527	2,392	0,066	21,54
	1,403	4,502	9,486	0,510	2,230	0,067	55,21
	1,536	6,074	11,169	0,522	2,584	0,077	44,15
	1,237	6,664	10,047	0,516	1,742	0,037	123,56
	0,979	5,959	9,900	0,481	2,106	0,042	75,97
850	0,870	2,901	6,269	0,497	2,562	0,047	81,44
	0,883	3,990	7,401	0,481	2,467	0,040	97,44
	1,170	4,557	8,110	0,450	2,454	0,059	69,19

Обозначения. Ra — среднее арифметическое отклонение профиля; Rp — высота наибольшего выступа профиля; Rmax — наибольшая высота неровностей профиля; tm — относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии; v — параметр опорной линии профиля шероховатости; Sm — средний шаг неровностей профиля; ρ — радиус выступов профиля и вроховатости.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить следующие эмпирические зависимости:

$$tm = 0,55 - 0,15 \cdot 10^{-2} I + 0,185\tau_E;$$
(1)

$$v = 3,317 - 0,124 \cdot 10^{-2} I + 0,58 \cdot 10^{-3} I\tau_E;$$
⁽²⁾

$$Sm = 58,36 + 0,054I - 0,183I\tau_E;$$

 $\rho = 36,68 - 0,063I + 267,7I\tau_E; \tag{4}$

$$HV = 185,2 + 1,33I + 3073\tau_E - 5,82I\tau_E;$$
(5)

$$h = -0.27 + 0.008I + 0.69\tau_E - 0.0006\tau_E;$$
(6)

$$\varepsilon = -0.412 + 0.004I + 9.58\tau_E - 0.018\tau_E.$$
⁽⁷⁾

На высотные параметры шероховатости поверхности данные факторы оказывают незначительное влияние.

(3)

Таблица 2

Фактор		Параметр		Фактор	Параметр		
Сила тока <i>I</i> , А	Микротвер- дость на глубине 0,06 мм, HV	Глубина упрочнения <i>h</i> , мм	Степень упрочнения є	Сила тока <i>I</i> , А	Микротвер- дость на глубине 0,06 мм, HV	Глубина упрочнения <i>h</i> , мм	Степень упрочнения є
	$\tau_E = 0$	0,16 c	•		$\tau_E =$	0,32 c	
	867,8	0,14	1,71		934,5	0,16	1,92
450	934,5	0,18	1,92	450	934,5	0,50	1,92
	1104,4	0,20	2,45		1104,4	0,44	2,45
	607,4	0,20	0,90		639,4	0,18	1,00
550	809,9	0,30	1,53	550	809,9	0,24	1,53
	809,9	0,30	1,53		867,8	0,16	1,71
	809,9	0,44	1,53		1104,4	0,30	2,45
700	1104,4	0,24	2,45	700	639,4	0,22	1,00
	1012,4	0,26	2,16		809,9	0,18	1,53
	934,5	0,40	1,92		674,9	0,70	1,11
850	1104,4	0,52	2,45	850	714,0	0,70	1,23
	1104,4	0,54	2,45		674,9	0,62	1,11

Факторы и параметры, характеризующие упрочнение поверхностного слоя образцов из стали 40Х

Таблица З

Износ образца U, мкм, в зависимости от времени изнашивания

	Время изнашивания, мин						
метод упрочняющей отделочной обработки образцов	30	60	120	180	240	300	
ЭМО ($\tau_E = 0,32$; $\tau_I = 0,16$) + обработка бесконечной лентой ($Ra = 1,251,37$ мкм; $Sm = 9094$ мкм)	0,13	0,29	0,61	0,77	0,98	1,29	
ЭМО ($\tau_E = 0,32$; $\tau_I = 0,16$) + шлифование ($Ra = 1,661,81$ мкм; $Sm = 6676$ мкм)	0,29	0,57	1,32	1,68	2,02	2,32	
ЭМО ($\tau_E = 0,32$; $\tau_l = 0,16$) + обработка бесконечной лентой ($Ra = 1,25$ мкм; $Sm = 106$ мкм)	0,11	0,27	0,60	0,74	0,93	1,04	

Результаты экспериментальных исследований по изнашиванию образцов, обработанных ЭМО с последующим шлифованием кругами и бесконечными лентами, приведены в табл. 3.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что электромеханическая импульсная обработка с последующим шлифованием бесконечной эластичной лентой позволяет повысить износостой-кость поверхности трения в 3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Под. общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

УДК 621.793.6:621.762

Н.Б. Пугачева, Л.М. Замараев, Е.Б. Трушина, Т.М. Гурченко, А.Н. Замятин (Институт машиноведения Уро РАН, г. Екатеринбург) E-mail: nat@imach.uran.ru

Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой^{*}

Исследован характер изменения структуры диффузионного боридного покрытия, нанесенного в порошковой смеси на основе карбида бора на углеродистую конструкционную сталь, при термоциклировании под нагрузкой в атмосферах азота, водорода и на воздухе. Уточнены концентрации бора в боридах FeB и Fe₂B в покрытии, а также значения их микротвердости. Установлен механизм разрушения боридных покрытий при использовании различных атмосфер, заключающийся в проникновении кислорода сквозь покрытие на границу с основой, окисление стали под покрытием с образованием оксидов, которые выталкивают бориды, разворачивая иглы вдоль поверхности образцов и разрывая связи между ними и основой. Показано, что в восстановительной атмосфере бориды прочно связаны между собой и со сталью-основой и способны выдерживать значительные пластические деформации при кратковременных нагревах до температур 1200 °C.

Ключевые слова: покрытия, бориды железа, оксиды железа, термоциклирование, окислительная и восстановительная атмосферы, микротвердость, разрушение, диффузия.

The character of structure changes in the diffusion boride coating on the low-carbon constructional steel is investigated at thermo-cycling under loading in atmospheres of nitrogen, hydrogen and on air. Concentration of a pine forest in borides FeB and Fe₂B in a covering and also values of their microhardness are specified. Use of various atmospheres at tests has allowed to establish the destruction mechanism of boride coating, consisting in oxygen penetration through a covering on the border with a basis, steel oxidation under the coating with the formation of oxides which push out borides, developing needles along a surface of samples and breaking links between them and the basis. It is shown that in regenerative atmosphere borides are strongly connected among themselves and with the steel-basis and are capable to maintain considerable plastic deformations at short-term heating by 1200 °C.

Keywords: coating, borides gland, oxides gland, thermo-cycling, oxidising and regenerative atmospheres, microhardness, destruction, diffusion.

В настоящее время накоплен большой опыт по нанесению и эксплуатации диффузионных боридных покрытий, которые весьма эффективны для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента, работающих в условиях трения без смазки или в коррозионных средах, а также при абразивном изнашивании [1, 2]. Для некоторых деталей технологического цикла, например штампов горячего деформирования, пресс-форм литья под давлением или кристаллизаторов непрерывного литья, температура на поверхности может достигать 1000...1300 °C.

В таких экстремальных условиях борированный поверхностный слой претерпевает существенные из-

менения, что влияет на его эксплуатационные свойства. Различные газовые атмосферы также оказывают влияние на процессы деградации боридных покрытий. Такие газы, как азот и водород, хорошо растворяются в сталях и могут существенно влиять на свойства поверхностных слоев, а кислород является активным окислителем и вызывает бурное образование оксидов.

Вопросу влияния атмосферы на изменение строения и свойств различных, в том числе боридных покрытий, до сих пор уделялось мало внимания. В связи с этим интерес представляют исследования изменения структуры, химического состава и характера разрушения диффузионных боридных покрытий в условиях резкого изменения температур в окислительных и восстановительных атмосферах.

Известно [1, 3, 4], что бориды железа характеризуются высокой стойкостью к окислению при высоких

^{*} Работа выполнена при частичной поддержке программы № 13 ОЭММПУ РАН "Трибологические и прочностные свойства структурированных материалов и поверхностных слоев".

температурах в окислительных средах. Основным недостатком боридных покрытий является их игольчатое строение, причем границы между зернами-иглами прямолинейные и расположены перпендикулярно поверхности детали.

В условиях изменения температурного режима из-за различий теплофизических свойств боридов железа и стали в покрытии возникают микротрещины, которые при механических нагрузках легко распространяются по межзеренным границам на всю толщину покрытия и в основу [1, 2, 5].

Игольчатое строение боридных покрытий может существенно снизить и показатели жаро- и коррозионной стойкости, поскольку кислород и химически активные реагенты легко проникают вдоль линейных границ зерен боридов к основе. Атмосферы азота и особенно водорода могут повлиять на характер повреждения борированного слоя при термоциклировании под нагрузкой за счет подавления образования оксидов железа, укрепления связей между иглами боридов, а также между покрытием и основой.

Цель исследования — проанализировать характер изменения структуры диффузионных боридных покрытий на углеродистой конструкционной стали марки Ст3 при термоциклировании под нагрузкой в атмосфере азота, водорода и на воздухе.

Материалы и методы исследований

В работе исследовано диффузионное боридное покрытие, нанесенное в порошковой смеси на основе карбида бора. Порошковую насыщающую смесь вместе с образцами загружали в контейнер из коррозионно-стойкой стали с плавким затвором [2].

Углеродистая конструкционная сталь марки Ct3 выбрана в качестве основы для получения в покрытии двух типов боридов: FeB на поверхности и Fe₂B вблизи к основе. Химический состав стали, % мас.: 0,12C; 0,3Mn; 0,25Si; 0,3Cr; 0,3Ni; 0,3Cu; 0,04S; 0,03P.

Микроструктуру покрытия исследовали с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21 при увеличениях от 200 до 500. Рельеф поверхности образцов после испытаний на термоциклирование изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU, оборудованного персональным компьютером и программным обеспечением VEGA TC, а также с помощью оптического интерферометра Veeco, программное обеспечение которого позволило определить профиль поверхности, параметр шероховатости Ra и вертикальное расстояние между самой высокой и самой низкой точками поверхности Rt.

Локальный химический состав покрытий оценивали с помощью системы рентгеновского *волнодис*-



Рис. 1. Схема испытательного стенда для проведения термоциклирования образцов под нагрузкой:

1 — образец; 2 — устройство для подвески образца; 3 — наборный груз; 4 — оптический пирометр Луч-С; 5 — датчик измерения удлинения образца; 6 — двухкоординатный самописец Н307; 7 — защитный колпак (используется при испытаниях в защитной атмосфере); 8 — кварцевые окна

персионного (ВДС) микроанализа INCA WAVE 700, а характер распределения элементов по поверхности шлифов – энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD-детектором, оснащенных персональным компьютером и программным обеспечением INCA.

Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu в K_{α} -излучении хрома. Микротвердость измеряли на приборе LEICA с программным обеспечением Materials Workstation при нагрузке 0,098 H.

Термоциклирование образцов под нагрузкой проводили на специализированном стенде (рис. 1), позволяющем осуществлять циклический нагрев образцов до заданной температуры в условиях постоянно действующих растягивающих напряжений.

Стандартный циклический образец для испытаний на растяжение с диаметром рабочей части 5 мм устанавливали в устройстве для подвески образцов. К нижнему его концу подвешивается наборный груз (193 Н). Образец нагревали за счет пропускания через него переменного электрического тока силой до 250 А. Длительность цикла составляла 2 мин (1 мин – нагрев, 1 мин – охлаждение). Отключение тока проводили по достижении температур 1000, 1100 и 1200 °С, определяемым оптическим пирометром Луч-С. Стенд позволяет определить удлинение образца в процессе термоциклирования, которое фиксируется во времени на двухкоординатном самописце H307. В процессе термоциклирования проводили видеои фотосъемку образцов в конце каждого цикла нагрева и охлаждения. Поверхность образцов после испытаний исследовали на сканирующем электронном микроскопе и интерферометре. На отдельных образцах изучали микроструктуру сохранившегося покрытия и измеряли его микротвердость на поперечных шлифах.

Обсуждение результатов исследований

Диффузионное боридное покрытие на углеродистой стали состоит из послойно расположенных боридов FeB и Fe₂B. Основу покрытия составляет борид Fe₂B, который имеет тетрагональную кристаллическую решетку (*C16*), вытянутые (игольчатые) зерна светлой окраски (рис. 2). Микротвердость исследованного покрытия составила 15...18 ГПа, содержание бора в нем — около 10 % мас., что несколько выше справочных значений (8,48 % мас. [1]).

Вблизи поверхности в процессе диффузионного насыщения формируются также вытянутые зерна борида FeB, на металлографическом шлифе после травления они имеют более темную окраску (см. рис. 2). Микротвердость этого борида в полученном покрытии составила около 25 ГПа, а содержание бора – около 18 % мас., что также несколько превышает справочные данные (16,25 % мас. [1]).

Бориды FeB имеют ромбическую кристаллическую решетку (B27), температура плавления около 1550 °C [4]. При сравнении полученных результатов с имеющимися в справочной литературе данными по боридам и покрытиям на их основе следует учитывать тот факт, что все известные ранее данные о химическом составе и микротвердости получены на оборудовании, не позволяющем с достаточной точностью проводить замеры.

Современные приборы ВДС-микроанализа, к которым относится использованный в работе микроскоп TESCAN с приставкой OXFORD, а также современные микротвердомеры, позволяющие проводить точные измерения диагоналей малых отпечатков, полученных в результате внедрения индентора с нагрузками менее 0,098 H, обеспечивают исключение влияния межфазных границ, отдельных фаз друг на друга и тем самым существенно повышают точность измерений свойств боридов *in situ*.

На границе покрытия с основой образуется переходная диффузионная зона толщиной около 25 мкм, представляющая собой твердый раствор бора в феррите, где концентрация бора плавно уменьшается от 4 до 0,5 % мас. в стали-основе (табл. 1). В литературе отмечается прочная связь как между иглами боридов, так и зерен боридов со сталью-основой [4].



Рис. 2. Микроструктура диффузионного боридного покрытия на стали Ст3

При термоциклировании образцов с покрытием первоначально происходят локальные повреждения. В окислительной атмосфере (воздух, азот) это выражается в точечном "вспучивании" покрытия, на по-

Таблица 1

Локальный химический ВДС-анализ
боридного покрытия на СтЗ

	Расстояние	Концент	трация элементов, % мас				
№ п/п	от поверхности, мкм	В	Si	Mn	Fe		
1	5	22,4			77,6		
2	10	18,2	0,0	0,0	81,8		
3	15	16,8	0,5	0,3	82,4		
4	20	19,0		0,4	80,6		
5	25	11,7		0,3	88,0		
6	30	11,3	0,0	0,0	88,7		
7	35	12,8		0,4	86,8		
8	40	8,3	0,3		91,4		
9	45	8,2	1,3	0,0	90,5		
10	50	7,5	2,4		90,1		
11	55	()	1,0	0,4	92,3		
12	60	6,2	0,5	0,3	93,0		
13	65	4,9	0,2	0,5	95,4		
14	70	2,8	1,2		96,0		
15	75	2,2	1,0	0,0	96,8		

Таблица 2

Число циклов до локального N_1 и массивного N_2 повреждения боридного покрытия и до разрыва образца N_3 при термоциклировании

№ п/п	Максимальная температура цикла, °С	Атмосфера N ₁		<i>N</i> ₂	<i>N</i> ₃
1		Воздух		10	56
2	1000	Азот	2	20	*
3		Водород	**	**	105
4		Воздух	1	2	11
5	1100	Азот	2	10	_
6		Водород	5	**	50
7		Воздух		2	9
8	1200	Азот	1	5	_
9		Водород	2	**	2
*Образец до разрушения не испытывали. **Поверхность образца сохранялась гладкой без массив- ного повреждения покрытия.					

верхности появляются "пузыри", размеры которых увеличиваются с ростом максимальной температуры цикла и числом циклов.

Известно [3, 4], что бориды обладают достаточно высокой стойкостью к окислению. Однако проникновение кислорода на границу с основой может происходить достаточно быстро по линейным межзеренным границам боридных игл, расположенным перпендикулярно поверхности. Здесь кислород активно окисляет сталь-основу, происходит образование оксидов железа FeO и Fe₂O₃, которые выталкивают наружный борированный слой.

При проведении испытаний в воздушной атмосфере происходит интенсивное окисление стали под покрытием, вызывающее повреждение борированного слоя по всему периметру поверхности, уже после 10 циклов (табл. 2). В момент разрушения образца довольно толстый слой оксидов вместе с покрытием отшелушивается от поверхности, за счет чего диаметр образца в месте разрыва уменьшается на 1...1,5 мм.

При термоциклировании в атмосфере азота окислительные процессы происходят более медленно. С помощью растрового электронного микроскопа на ровных участках поверхности (вблизи головок образца) хорошо видны границы поперечных сечений боридов (рис. 3, *a*) и иглы боридов, развернутые вдоль поверхности образца. На участках с "пузырями" ближе к центру образца (участок разрыва) иглы не только разворачиваются на 90°, но и увеличиваются в длине (рис. 3, δ).

По результатам ЭДС-микроанализа под иглами боридов железа зафиксирован оксид Fe₂O₃. Кисло-



Рис. 3. Поверхности борированных образцов углеродистой стали Ст3 после термоциклирования в азоте:

 а – максимальная температура цикла 1100 °С, участок на расстоянии 100 мм от головки образца; б – максимальная температура цикла 1000 °С, участок вблизи поверхности разрушения образца (посередине рабочей длины) род, очевидно, в виде тонкой оксидной пленки вюстита присутствовал на поверхности покрытия до испытания и участвовал в окислительных реакциях.

В восстановительной атмосфере водорода исключено образование оксидов железа, поэтому "вспучивания" покрытия не обнаружено при всех выбранных температурах испытаний. Первые локальные повреждения покрытия выражаются в растрескивании слоя боридов.

При максимальной температуре цикла 1000 °С в водороде образец разрушился после 50 циклов (см. табл. 2), при этом его диаметр в области разрушения уменьшился от 5 до 0,65 мм (рис. 4, a), т.е. относительное сужение составило около 98 %. Пластическая деформация образца произошла за счет стали-основы на участках растрескивания покрытия: на поверхности наблюдаются сохранившиеся "островки" покрытия с полосами деформации стали-основы между ними (рис. 4, δ).

При приближении к области разрушения (при увеличении степени пластической деформации образца и действующих растягивающих напряжений) увеличивается площадь поверхности, занятая деформированной сталью без покрытия, и уменьшается доля поверхности, занятая сохранившимся покрытием (рис. 4, δ – ϵ). Характер распределения элементов по поверхности образца на участке вблизи обрыва подтверждает наличие "островков" сохранившегося покрытия (рис. 5, a, δ) и участков стали-основы между этими островками (рис. 5, a, ϵ , ϵ).

Поверхность "островков" покрытия вблизи области разрушения образца имеет грубозернистый рельеф (рис. 6, см. с. 2 обложки): максимальное расстояние между выступами и впадинами составляет Rt = 0,035 мм, а параметр шероховатости Ra = 0,01 мм, в то время как на участках вблизи головок, где деформация образцов не произошла и покрытие сохранилось, эти параметры составили Rt = 0,008 мм и Ra = 0,006 мм. При термоциклировании до температуры 1100 °C характер деформации образца не изменился, разрыв произошел после 49 циклов с образованием шейки (см. табл. 2).

Увеличение максимальной температуры цикла до 1200 °С при испытаниях в водороде привело к оплавлению покрытия в центральной части образца, поверхность гладкая, зеркальная, образец разрушился после 2 циклов (см. табл. 2). Известно, что температура плавления борида Fe₂B стехиометрического состава составляет 1410 °С [3], однако в соответствии с диаграммой "Fe–B" при концентрации бора менее



Рис. 4. Поверхность покрытия на СтЗ после термоциклирования при 1100 °С в водороде (*a*) (δ , ε , ε – детализация поверхности при большом увеличении)

10 % мас. оплавление может происходить при более низких температурах, вплоть до 1177 °C с образованием эвтектики " γ -Fe-Fe₂B" [1]. Очевидно, этим объясняется способность боридных покрытий к остеклованию, отмечаемая в литературе [4].

На отдельных участках поверхности образцов после испытаний до 1200 °С наблюдается характерный для дендритного строения рельеф (рис. 7, *a*). На шлифе, изготовленном вдоль образца, хорошо видно глубокое проникновение эвтектики в основу на участках, удаленных от поверхности до 15 мм (рис. 7, *б*).

По данным локального микрорентгеноспектрального ВДС-анализа содержание бора в эвтектике составляет около 2 % мас. Вероятно, произошла трансформация борида Fe_2B в борид Fe_3B , имеющий кристаллическую структуру цементита, что соответствует данным, приведенным в работах [1, 4].

Вблизи головок покрытие сохранилось, поверхность аналогична показанной на рис. 3, *a*, однако



Рис. 5. Распределение элементов на поверхности образца с боридным покрытием после термоциклирования до температуры 1100 °C (участок вблизи разрыва образца):

a – изображение во вторичных электронах; δ , e, e – в характеристическом излучении соответственно железа, бора, марганца

строение его претерпело существенные изменения. Вместо вытянутых перпендикулярно поверхности игл бориды имеют равноосную, раздробленную форму (см. рис. 7, *в*). Отмечается значительная диффузия бора в основу на глубину около 0,2 мм.

Результаты локального химического ВДС-анализа покрытия приведены в табл. 3. По химическому составу, а также по результатам фазового рентгеноструктурного анализа покрытие состоит из боридов Fe_2B .

Таким образом, при испытаниях в восстановительной атмосфере практически мгновенная выдержка при температуре 1200 °С вызвала диффузионное "рассасывание" покрытия внутрь стали-основы. Содержание бора при этом во внешней зоне покрытия уменьшилось до 12 % мас. В отдельных частицах боридов, сформировавшихся в основе на глубине 0,2 мм от поверхности и расположенных на расстоянии 10...15 мкм друг от друга, содержание бора составило около 10 % мас.

Полученные результаты показали, что диффузионное боридное покрытие на углеродистой стали выдерживает нагревы до температур ниже 1200 °С. В окислительных атмосферах при термоциклировании







Рис. 7. Поверхности образца с боридным покрытием после термоциклирования в водороде до 1200 °C:

a — вблизи зоны разрушения; δ — проникновение продуктов эвтектической реакции в глубь образца вблизи участка разрушения; e — боридного покрытия вблизи головок образца

с постоянно действующей растягивающей нагрузкой происходит локальное повреждение покрытия, проникновение кислорода на границу с основой, окислеТаблица З

Локальный химический ВСД-анализ боридного покрытия после термоциклирования в водороде до температуры 1200 °С

	Расстояние	Концентрация элементов, % мас			в, % мас.
№ п/п	от поверхности, мкм	В	Si	Mn	Fe
1	10	11,6			88,4
2	20	11,2		0,0	88,8
3	30	9,4	0,0		90,6
4	35	0,8			99,2
5	40	10,8			89,2
6	45	2,6	0,4		87,0
7	50	12,5	0,2		87,3
8	55	10,7			89,3
9	60	10,1	0,0		89,9
10	65	8,4	0,4		91,2
11	70	11,1			88,9
12	75	9,8	0,0	0,8	89,4
13	80	0,9	0,4	0,5	98,2
14	85	7,1	0,0	0,0	92,9
15	90	10,7		0.4	88,9
16	100	0,8	0,3	0,4	98,5
П р и м е ч а н и е. Два цикла, вблизи головок, участок анализа показан на рис. 7, <i>в</i> .					

ние основы под покрытием, "выталкивание" боридов образовавшимися оксидами и постепенное отслоение покрытия. В восстановительных атмосферах покрытие сохраняется вплоть до температур образования легкоплавкой эвтектики. При этом разрушение образца происходит только при проникновении эвтектики на всю его толщину.

Для повышения долговечности боридных покрытий следует рассматривать способы, препятствующие проникновению кислорода на границу с основой, чтобы избежать окисления стали под покрытием. Этого можно достичь путем измельчения структуры покрытий или легированием как всего покрытия в целом, так и тонкого поверхностного слоя такими элементами, как алюминий, кремний, хром [2], препятствуя тем самым образованию оксида Fe₂O₃.

Выводы

1. Уточнены концентрации бора в боридах FeB и Fe₂B, образующихся при диффузионном насыщении углеродистой стали Cт3, а также значения их микротвердости. Борид FeB содержит около 18 % мас. бора и имеет микротвердость HV 0,01 25 ГПа, борид Fe₂B – 10 % мас. бора и HV 0,01 15 ГПа.

2. Использование различных атмосфер при испытаниях на термоциклирование позволило установить механизм разрушения боридных покрытий, заключающийся в проникновении кислорода сквозь покрытие на границу с основой, окисление стали под покрытием с образованием оксидов, которые "выталкивают" бориды, разворачивая иглы вдоль поверхности образцов и разрывая связи между ними и основой.

3. Результаты испытаний в восстановительной атмосфере показали, что в отсутствие окислителя бориды прочно связаны между собой и со сталью-основой и способны выдерживать значительные пластические деформации при кратковременных нагревах до температур 1200 °C.

4. Основным направлением повышения долговечности боридных покрытий следует рассматривать способы, препятствующие проникновению кислорода на границу с основой, чтобы избежать окисления стали под покрытием. Этого можно достичь путем измельчения структуры покрытий или легированием как всего покрытия в целом, так и тонкого поверхностного слоя элементами, препятствующими образованию оксида Fe₂O₃.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чернов Я.Б., Анфиногенов А.И., Шуров Н.И.** Борирование сталей в ионных растворах. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 224 с.

2. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 244 с.

3. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник / Под ред. Т.Я. Косолаповой. М.: Металлургия, 1986. 928 с.

4. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.

5. Лабунец В.Ф., Ворошнин Л.Г., Киндрачук М.В. Износостойкие боридные покрытия. Киев: Техника, 1989. 253 с.



Е.В. Кочарян (Чаренцаванское ОАО "Центролит", Армения) *E-mail: dd1dd@mail.ru*

Влияние химико-термической обработки на пластичность электролитических осталенных покрытий

Исследовано влияние химико-термической обработки на пластичность электролитических осталенных покрытий в разных газовых средах при температурах 520, 570, 620 °C с изотермической выдержкой 1...3 ч. Показано, что химико-термическая обработка во всех газовых средах повышает пластичность покрытий в сравнении с пластичностью исходных покрытий.

Ключевые слова: электролитическое осталенное покрытие, насыщение, аммиак, пропан, пластичность.

Influence of himiko-thermal processing on plasticity electrolyticly steeled coverings in different gas environments is investigated at temperatures 520, 570, 620 °C with isothermal endurance 1...3 h. It is shown that himiko-thermal processing in all gas environments raises plasticity of coverings in comparison with plasticity of initial coverings. **Keywords:** electrolyticly steeled covering, nitrides, ammonium, propane, plasticity.

Испытание поверхностной пластичности до и после *химико-термической обработки* (XTO) электролитических осталенных покрытий проводили на приборе УПМ-1 конструкции ИМАШ. Достоинством прибора является непрерывная регистрация движения индентора в испытываемом материале под действием приложенной нагрузки.

Прибор позволяет проводить исследования микротвердости в диапазоне малых и сверхмалых нагрузок с автоматической регистрацией двух параметров процесса нагрузки и глубины внедрения индентора; изучать особенности микродеформации материалов по кинетике внедрения индентора; регистрировать микроползучесть материалов при выдержке под нагрузкой путем записи изменения глубины отпечатка в функции времени; регистрировать скорость движения индентора в процессе внедрения; проводить оценку упругих свойств материалов и способность их к релаксации энергии, накопленной в процессе пластической деформации по упругому восстановлению глубины отпечатка; проводить оценку деформационной и релаксационной способностей материалов по площади диаграммы внедрения в координатах нагрузка-глубина внедрения.

При испытаниях скорость нагружения изменялась плавно в диапазоне 0,050...10 мкм/с. На рис. 1 показана диаграмма внедрения, полученная на приборе УПМ-1. Расшифровка диаграммы позволяет дать количественную информацию о механических характеристиках поверхностного слоя материала.

Участок нагружения диаграммы представляет функциональную зависимость величины нагрузки *P*₁, необходимой для вдавливания индентора, от глубины *h*. По этому участку определяют микротвердость под нагрузкой по формуле

 $H = C\frac{P}{h^2},$

где C — коэффициент, зависящий от формы индентора (для стандартного четырехгранного индентора с углом при вершине 136° C = 37,8; для трехгранной пирамиды Берковича C = 38,1; для ромбической пирамиды Кнуппа C = 15,3);

P – нагрузка.

Анализ кинетики движения индентора на участке нагружения позволяет выявлять закономерности микропластической деформации материалов в условиях сосредоточенного приложения нагрузки. Увеличение глубины отпечатка при выдержке под нагрузкой характеризует микроползучесть материалов. Уча-



Рис. 1. Диаграмма вдавливания алмазной пирамиды на приборе УПМ-1

сток разгружения дает информацию, связанную с упругими свойствами испытываемого материала.

Изменение глубины отпечатка при снятии нагрузки (упругое восстанавливание) вызывается релаксацией энергии, накопленной в материале в процессе деформации при вдавливании индентора. Кривая разгружения имеет два характерных участка: начальный 1, близкий к линейному, где снимается 70...90 % нагрузки, и заключительный 2, со сложной зависимостью.

Участок 1 связан преимущественно с упругой релаксацией энергии. Релаксация на участке 2 протекает главным образом за счет необратимой деформации (пластическая деформация, хрупкое разрушение). В отдельных случаях граница между этими участками может быть размытой или нечетко выраженной (участок 2 может отсутствовать).

Анализ площадей диаграммы вдавливания позволяет оценить деформационные и релаксационные способности материалов. Критерием релаксационных способностей служит отношение площади, ограниченной участками нагружения и разгужения, пропорциональной работе остаточного формоизменения $A_{0,\Phi}$ к общей площади под кривой нагружения, пропорциональной полной работе, затраченной на вдавливание A, которая складывается из работы остаточ-



Рис. 2. Относительная пластичность электролитических осталенных покрытий до (1, 2, 3) и после XTO в аммиаке при 520 °C (4, 5, 6, 7); в смеси 80 % диссоц. NH₃ + 20 % свежий NH₃ при 520 °C (8, 9, 10); в смеси 50 % NH₃ + 50 % C₃H₈ при 520 °C (11, 12, 13, 14), при 570 °C (15, 17) и при 620 °C (16, 18). Исходные твердости покрытий, МПа: 1, 4, 11, 15, 16 - 2700; 2, 5, 12, 17, 18 – 3700; 3, 6, 8, 13 – 4700; 9, 7 – 5300; 10, 14 – 6450

ного формоизменения $A_{\mathrm{o}, \mathrm{\varphi}}$ и работы сил последствия A_{pen} :

$$A = A_{\mathrm{o.}\phi} + A_{\mathrm{pen}} \,.$$

Пластичность поверхностного тонкого слоя определяется по формуле

$$\varphi = \frac{A_{\text{o}.\phi}}{A} 100\%$$

Исследования процесса электролитического осталивания и свойства покрытия показали, что с повышением жесткости режима осталивания твердость и хрупкость слоя повышаются, а пластичность понижается.

Покрытия, полученные на мягких режимах осталивания, имеют повышенную пластичность. ХТО электролитических осталенных покрытий в среде аммиака или в смеси аммиака с пропаном приводит к формированию на поверхности нитридного (карбонитридного) слоя и диффузионного подслоя — азотистого α-твердого раствора.

Большое значение имеет оценка свойств тонких поверхностных слоев, пластические характеристики, которые определяются режимами XTO. Пластичность поверхностных слоев электролитических осталенных покрытий до и после XTO анализировали по диаграмме нагружения, записываемой при испыта-

> нии микровдавливанием алмазной пирамиды в испытываемую поверхность в координатах нагрузка-глубина вдавливания индентора на приборе УПМ-1.

> Исследование показало, что наиболее высокой пластичностью из всех испытанных исходных покрытий обладают покрытия с минимальной твердостью (2700 МПа). Относительный показатель пластичности тонкого поверхностного слоя для этого покрытия составляет 85 % (рис. 2). Повышение твердости покрытия до 3700 МПа приводит к понижению пластичности до 79 %. При твердости 4700 МПа пластичность поверхностного слоя составляет 74 %.

> Установлено, что ХТО покрытия с исходной твердостью 2700 МПа в аммиаке при температуре 520 °C с изотермической выдержкой 2 ч не изменяет пластичность тонкого поверхностного слоя. С повышением исходной

твердости покрытия тенденция понижения пластичности после XTO в аммиаке остается та же, однако уровень пластичности в этом случае больше в сравнении с пластичностью исходных покрытий. Повышение пластичности азотированных покрытий, вероятно, объясняется уменьшением внутренних напряжений.

Добавление к азотирующему газу продуктов его предварительной диссоциации приводит к некоторому повышению пластических свойств. При пониженном содержании продуктов предварительной диссоциации аммиака в смеси со свежим аммиаком в поверхностном слое образуется высокоазотистая нитридная фаза, которая несколько повышает хрупкость в сравнении со слоем без поверхностной нитридной зоны.

Обработка в газовой среде, состоящей из 80 % диссоциированного аммиака и 20 % свежего аммиака, обеспечивает получение азотированного слоя без поверхностной нитридной зоны, что и обеспечивает высокую пластичность азотированного слоя в сравнении с пластичностью исходных покрытий. Так, например, на покрытии с исходной твердостью 4700 МПа она повышается до 86 % (исходная пластичность – 74 %). С повышением исходной твердости покрытия после обработки в вышеуказанной среде пластичность понижается незначительно.

При исходной твердости покрытия 5300 МПа после азотирования пластичность составляет 81 %, а при

13–15 апреля 2011 г.

твердости 6450 МПа – 80 % (см. рис. 2). Добавление к азотирующему газу углеродосодержащего компонента, например пропана, обеспечивает достаточно высокий уровень пластичности в сравнении с исходной пластичностью или пластичностью после насыщения в чисто аммичной среде. В этом случае поверхностный слой пластифицируется вследствие понижения азотного потенциала атмосферы.

Пластичность покрытий с исходными твердостями 3700, 4700, 5300, 6450 МПа после насыщения в смеси 50 % NH₃ + 50 % C₃H₈ при 520 °C с изотермической выдержкой 2 ч остается на том же уровне, что и после насыщения в смеси аммиака с продуктом его предварительной диссоциации (в соотношении 20:80) (см. рис. 2). Повышение температуры насыщения до 570 °C не приводит к снижению пластичности карбонитридного слоя.

При исходной твердости 3700 МПа после насыщения при 570 °С в течение 2 ч в среде 50 % NH_3 + + 50 % C_3H_8 пластичность повышается до 84 % (исходная пластичность — 78 %). Повышение температуры XTO до 620 °С не изменяет пластичности карбонитридного слоя на "мягких" покрытиях.

Увеличение продолжительности насыщения как в чисто аммиачной, так и в смеси аммиака с пропаном, обеспечивающей формирование на поверхности слоя с развитой нитридной (карбонитридной) зоной с высоким содержанием азота, приводит к снижению пластичности покрытия.

Уважаемые коллеги!

ОАО "АВТОВАЗ" совместно с Московским автомобильно-дорожным государственным техническим университетом (МАДИ), ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина", Институтом металлургии и материаловедения российской академии наук им. А.А. Байкова, Тольяттинским государственным университетом (ТГУ), Самарским государственным аэрокосмическим уни верситетом (СГАУ), Тольяттинским отделением российской инженерной академии

проводят научно-техническую конференцию

"НОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ИХ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА"

г. Тольятти

Тематика конференции

- + Теоретические и технологические аспекты обработки автолистовых сталей
- + Теоретические и технологические аспекты обработки конструкционных сталей
- + Теоретические и технологические аспекты обработки инструментальных сталей
- + Термическая и термомеханическая обработка сталей и изделий из них
- + Химико-термическая обработка изделий из сталей

 Способы поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками энергии и ТВЧ изделий из сталей.

Контакты по организационным вопросам и отправке тезисов: Чумиков Андрей Борисович, *тел./ф. (8482) 738713,* e-mail: <u>A.Chumikov@vaz.ru</u> Лазутов Петр Николаевич, *тел. (8482) 534382,* e-mail: <u>P.N. Lazutov@vaz.ru</u>



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 621.762:621.9

С.Н. Григорьев, А.Н. Красновский (ГОУ ВПО МГТУ "Станкин") E-mail: rector@stankin.ru

Энергосиловые параметры процесса формования порошковой проволоки для напыления наноструктурных покрытий

Приведены основные результаты теоретического исследования процесса непрерывного формования порошковой проволоки для напыления наноструктурных покрытий из композиционных нанопорошковых материалов. Установлены закономерности, связывающие энергосиловые параметры процесса, свойства материала и геометрические параметры инструмента. Выведены соотношения, позволяющие определять энергосиловые параметры процесса непрерывного формования композиционных нанопорошковых материалов.

Ключевые слова: нанопокрытие, порошок, проволока, формование, напряжение, инструмент.

The basic results of theoretical research of process of continuous pressing of a powder wire for spraying nanostructural coverings from composite nanopowder materials are resulted. The laws connecting power parameters of process, property of a material and geometrical parameters of the tool are established. The ratio are deduced, allowing to define power parameters of process of continuous pressing composite nanopowder materials.

Keywords: nanotechnology surface sealing, powder, wire, pressing, pressure, tool.

Интенсивное развитие индустрии наносистем и материалов обусловлено потребностями современных отраслей промышленности в качественно новых материалах и веществах. Среди них большое значение имеет инженерия поверхности изделий применительно к созданию функциональных наноструктурных покрытий [1, 2].

Высокая объемная доля границ раздела с прочной энергией связи, отсутствие дислокаций внутри нанокристаллов, возможность получения покрытий с контролируемым соотношением объемных долей кристаллической и аморфной фаз — эти факторы проявляются в высоких значениях твердости, прочности, термической стабильности, жаро- и коррозионной стойкости.

Важным преимуществом наноструктурных покрытий является то, что можно получать сверхтвердые материалы с одинаковой твердостью, но различными значениями модуля упругости для машиностроения, электроники, атомной и авиакосмической техники. В связи с этим весьма актуальной является проблема разработки конкурентоспособных технологий при изготовлении порошковой проволоки для напыления наноструктурных покрытий на поверхность изделий.

Порошки нанометровых размеров выделяют в отдельный класс материалов из-за уникальности их строения и свойств. Уникальность структуры ультрадисперсных порошков обусловлена тем, что при размере частиц менее 10 нм высокая доля атомов поверхности приводит к большому влиянию на структуру сил поверхностного натяжения. Поэтому их кристаллическая структура характеризуется более высокой плотностью упаковки атомов.

При компактировании нанопорошков необходимо учитывать их специфические свойства: значительную удельную поверхность; агломерирование и высокую сорбционную активность; большое межчастичное и внешнее трение; более низкую насыпную плотность в сравнении с обычными порошками [3]. Поэтому традиционные методы прессования ультрадисперсных порошков не обеспечивают равномерную плотность в объеме прессовок, приводят к локальным градиентам плотности, высоким внутренним напряжениям, большому упругому последействию, а в результате — к растрескиванию или разрушению прессовок.

При разработке методов создания компактных наноматериалов большую актуальность приобрела проблема компактирования нанопорошков, особенно непластичных, труднопрессуемых керамических составов. В связи с указанными особенностями нанопорошков потребовалась разработка специальных методов их компактирования.



Рис. 1. Схема непрерывного формования композиционных порошковых материалов (v_к – скорость перемещения корпуса; v – скорость перемещения изделия):

1 – корпус; 2 – оправка; 3 – матрица; 4 – изделие; 5 – порошковая композиция

Способ непрерывного формования (рис. 1) имеет предпосылки для получения порошковой проволоки из труднопрессуемых композиционных нанопорошковых материалов [4].

На элемент материала длиной dz в канале прессования действуют силы трения со стороны корпуса $F_{\rm k}$ и инструмента (оправки) $F_{\rm u}$, а также сила сопротивления выдавливанию $P_{\rm m}$ со стороны матрицы, создающая на длине dz канала градиент напряжений $d\sigma_z$ (рис. 2).

Силы сопротивления выдавливанию \overline{P}_{M} и трения материала по инструменту \overline{F}_{μ} направлены в сторону, противоположную перемещению материала параллельно оси канала. Направление действия силы трения материала по корпусу \overline{F}_{κ} определяется вектором скорости корпуса относительно материала $\overline{v}_{\kappa M}$ и зависит не только от относительного перемещения материала и корпуса (угол φ), но и от их относительных скоростей (угол α).

Угол α увеличивается с ростом скорости перемещения материала и может быть определен из плана скоростей (рис. 3)



Рис. 2. Силы, действующие на элемент материала в канале прессования



Рис. 3. План скоростей системы оправка-материал-корпус

где v - скорость перемещения материала;

v_к – скорость перемещения корпуса;

 η – коэффициент окружного проскальзывания материала.

Составим уравнение равновесия сил, действующих на элемент материала в проекции на ось канала, направленную от выхода канала прессования ко входу

$$-F_{\rm K}\cos(\alpha+\varphi)+F_{\rm M}+P_{\rm M}=0.$$
 (2)

Силы трения материала по поверхности корпуса и оправки соответственно равны

$$F_{\rm K} = \xi f_{\rm K} \sigma_z b dz; \tag{3}$$

$$F_{\rm H} = \xi f_{\rm H} \sigma_z (2h+b) dz, \tag{4}$$

где *ξ* – коэффициент бокового давления;

 f_{κ} – коэффициент трения материала по корпусу;

 σ_z — напряжение на площадке, перпендикулярной оси канала;

b — ширина канала;

 $f_{\rm u}$ — коэффициент трения материала по инструменту;

h — глубина канала.

Приращение силы $P_{\rm M}$ на длине dz равно

$$P_{\rm M} = bh d\sigma_z. \tag{5}$$

После подстановки уравнений (1), (3)–(5) в уравнение (2) и его преобразования получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma_{z}}{\sigma_{z}} = \frac{\xi}{hb} \left\{ f_{\kappa} b \cos \left[\arctan\left(\frac{tg\phi(1-\eta)}{\eta}\right) + \phi \right] - -f_{\mu}(2h+b) \right\} dz.$$
(6)

Введем обозначение

$$A = \frac{\xi}{hb} \left\{ f_{\kappa} b \cos \left[\arctan\left(\frac{\mathrm{tg}\varphi(1-\eta)}{\eta}\right) + \varphi \right] - f_{\mu} (2h+b) \right\}. (7)$$

Поскольку A не зависит от z, после интегрирования уравнения (6) получим

$$\ln \sigma_z = -Az + C. \tag{8}$$

Постоянную интегрирования *C* определим из граничного условия: при z = 0, $\sigma_z = p_0 (p_0 - давление на выходе из канала).$

Учитывая, что на выходе из канала прессования материал попадает в зону деформации матрицы, при определении p_0 воспользуемся следующим выражением:

$$p_0 = \sigma_s \left[\left(\frac{f_{\rm M}}{\sin\gamma} + \frac{2}{1 + \cos\gamma} \right) \ln \frac{R^2}{r^2} + \frac{2f_{\rm M}l_2}{r} \right], \qquad (9)$$

где σ_s – напряжение текучести материала;

 $f_{\rm M}$ — коэффициент трения материала по поверхности матрицы;

 γ – угол наклона образующей конической поверхности матрицы;

R – радиус наружной поверхности оправки;

r – радиус выходного отверстия матрицы;

l₂ – длина калибрующей части матрицы.

Данное выражение получено для прессования компактных материалов. Однако в рамках гипотезы о сходстве напряженного состояния сжимаемых и несжимаемых материалов в канале прессования его использование для анализа процесса формования несжимаемых материалов представляется вполне оправданным. Кроме того, в силовых условиях при прессовании компактных металлов и металлических порошковых материалов существенных различий не наблюдается.

Подставив в выражение (8) граничное условие, получим

$$C = \ln p_0. \tag{10}$$

Дальнейшая подстановка *С* в уравнение (8) и его потенцирование даст уравнение распределения напряжений по длине канала прессования

$$\sigma_z = p_0 e^{-Az}. \tag{11}$$

Крутящий момент на корпусе

$$M = \frac{1}{A} \xi f_{\kappa} b R p_0 \cos \alpha (1 - e^{-Al}), \qquad (12)$$

где *l* – длина канала прессования.

Осевая сила, действующая на корпус, равна

$$P = \frac{1}{A} \xi f_{\kappa} b p_0 \cos \alpha (1 - e^{-Al}) + \pi R^2 p_0.$$
(13)

Мощность, затрачиваемая на прессование,

$$N = M\omega_{\rm K} = M \frac{{\rm v}_{\rm K}}{R},\tag{14}$$

где ω_{κ} – угловая скорость корпуса.

Производительность установки для непрерывного формования композиционных порошковых материалов

$$Q = vhb\sin\varphi = (1-\eta)\omega_{\rm K}Rhb{\rm tg}\varphi.$$
(15)

Полученные выражения позволяют определять энергосиловые параметры процесса непрерывного формования порошковой проволоки для напыления наноструктурных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев С.Н., Андреев А.А., Шулаев В.М. Наноструктурные износостойкие покрытия, полученные методами физического осаждения вещества в вакууме // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 4–8.

2. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокрытий для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6. С. 37–42.

3. Григорьев С.Н., Грибков А.А., Алешин С.В. Технологии нанообработки. Старый Оскол: ТНТ, 2008. 320 с.

4. **Красновский А.Н.** Разработка технологии непрерывного формования изделий из порошковых материалов и композиций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 16 с.





ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

УДК 621.438:621.822

С.А. Букатый (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва) E-mail: bukaty_sa@mail.ru

К вопросу о влиянии толщины и свойств нанопокрытий на частотные характеристики пластин

Рассмотрено влияние толщины и свойств материала нанопокрытий на частотные характеристики пластин с целью отстройки от резонансных колебаний. Показано, что независимо от свойств материала наноразмеры покрытий не приводят к сколько-нибудь значимому изменению собственных частот. **Ключевые слова:** колебания, собственные частоты, наноматериалы, нанопокрытия.

The influence of the thickness and properties of the nano-coating material upon the frequency characteristic of plates with the purpose of tune-out of the resonance vibrations was examined. It is shown that nano-size of the coatings is not to be sufficient avail concerning to changes of the self-resonant frequency irrespective of the material properties of coating. **Keywords:** vibration, self-resonant frequency, nano-material, nano-coating.

Введение

Вопросы повышения прочности и долговечности деталей ГТД, подверженных вибрационным нагрузкам, становятся особенно актуальными в связи с появлением новых наноматериалов с существенно отличающимися от основного материала свойствами. Решение этой проблемы может идти как по пути повышения эксплуатационных свойств детали за счет свойств покрытия, так и путем отстройки от резонансных частот, что часто является решающим фактором для таких деталей, как лопатки компрессора ГТД.

В работе [1] рассмотрено второе направление и с привлечением конечно-элементного анализа исследовано влияние толщины и свойств материала нанопокрытия на частотные характеристики пластин с прямоугольным сечением. Однако результаты экспериментальной работы [2] существенно отличаются от теоретических положений и выводов работы [1], что послужило причиной проведения дополнительных исследований.

Из условия совместности деформаций в теории изгиба балок известно следующее выражение для относительных деформаций є материала на расстоянии *у* от нейтральной оси:

3

$$=\frac{y}{R},$$

где R — радиус кривизны оси балки (в данном случае достаточно длинную пластинку можно рассматривать как балку с прямоугольным поперечным сечением).

Следовательно, при рассмотрении взаимодействия покрытия с основным материалом на границе между пластиной и слоем покрытия вместо принятого в [1] условия равенства напряжений $\sigma_o = \sigma_n$ должно быть условие равенства деформаций $\varepsilon_o = \varepsilon_n$. Нарушение условия совместности деформаций привело к выводу, что на границе из-за разности модулей упругости материалов покрытия и основы появляется разность деформаций и диссипация энергии, которая приводит на высших формах колебаний к многократному уменьшению частоты.

Данный вывод подкреплен также расчетами на основе КЭ-модели пластины с прямоугольным сечением. Допущенные при этом ошибки дали основание полагать, что чем тоньше покрытие, тем оно больше уменьшает частоту колебаний по высшим формам и частота становится постоянной (рис. 1 [1, рис. 3])¹.

К сожалению, в статье [1] не указаны размеры пластины, модули упругости основного материала и покрытия или их соотношения, формы каких колеба-

(1)

¹ Необходимо отметить, что зависимость частоты от формы собственных колебаний является дискретной и изображение ее сплошной линией некорректно.



Рис. 1. Результаты КЭ-расчетов [1]: 1 – без покрытия; $2 - h_{\pi} = 0,025$ мм; $3 - h_{\pi} = 0,010$ мм

ний (изгибных или продольных) рассматривали. Поэтому невозможно проверить КЭ-расчеты даже для пластины без покрытия.

Косвенно по выражению для напряжений можно сделать вывод, что рассматриваются изгибные колебания пластины, жестко закрепленной на одном конце. Тогда в соответствии с [2] собственные частоты консольно закрепленного стержня (или достаточно длинной пластинки) с постоянным сечением определяются следующим выражением:

$$p_k = \frac{\lambda_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}},\tag{2}$$

где *l* – длина стержня;

E, ρ – соответственно модуль упругости и плотность материала стержня;

I, *F* – соответственно момент инерции и площадь поперечного сечения стержня;

 λ_k — корни уравнения частот:

$$λ_1 = 1,875; λ_2 = 4,694; λ_3 = 7,855;$$

 $λ_4 = 10,996; λ_k = 0,5π(2k-1)$ при $k > 4.$
(3)

Из выражения (2) следует, что независимо от соотношения толщин и свойств материалов основного и покрытия частоты пластинки в зависимости от номера формы колебаний должны изменяться пропорционально числам λ_k^2 .

Результаты исследования

Применение для покрытий наноматериалов с существенно отличающимися от основного материала физико-механическими и повышенными диссипативными свойствами представляет существенный интерес. Поэтому рассмотрим влияние диссипации энергии (или влияние сил сопротивления) на изменение собственных частот. Несложные расчеты показывают, что, например, при декременте $\delta = \ln A_1/A_2 = \ln 2 = 0,693$ (т.е. $\delta = 69,3$ %) собственная частота равна $p_1 \approx 0,994p_0$ (A_1, A_2 – две соседние амплитуды затухающих колебаний; p_0 – собственная частота при отсутствии сил сопротивления).

Таким образом, даже при интенсивном затухании колебаний изменение частоты от действия сил сопротивления составляет всего ~ 0,6 %. В работе [3] показано, что наибольшие декременты, наблюдаемые у образцов с покрытием из иттрия толщиной до 130 мкм, не превышают 1 %. Изменение частоты при таких декрементах будет порядка $10^{-3}...10^{-4}$ % и, следовательно, влиянием демпфирующих способностей тонких покрытий на собственные частоты деталей можно пренебречь.

Из выражения (2) следует, что собственные частоты стержней зависят от *EI* и ρF . Чтобы выяснить, какие соотношения физико-механических свойств и толщин основного материала и покрытия приведут к существенному изменению собственных частот, обозначим в (2) выражение под корнем через *C* и выразим *EI* и ρF через E_1I_1 , ρ_1F_1 и E_2I_2 , ρ_2F_2 , соответствующие основному материалу и слою покрытия:

$$C = \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} = \sqrt{\frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{\rho_1 F_1 + \rho_2 F_2}} = \sqrt{\frac{E_1 I_1 (1 + \alpha_E \alpha_I)}{\rho_1 F_1 (1 + \alpha_\rho \alpha_F)}} =$$

$$= C_0 \sqrt{\frac{1 + \alpha_E \alpha_I}{1 + \alpha_\rho \alpha_F}},$$
(4)

где

$$C_{0} = \sqrt{\frac{E_{1}I_{1}}{\rho_{1}F_{1}}}; \ \alpha_{E} = \frac{E_{2}}{E_{1}}; \ \alpha_{I} = \frac{I_{2}}{I_{1}};$$

$$\alpha_{\rho} = \frac{\rho_{2}}{\rho_{1}}; \ \alpha_{F} = \frac{F_{2}}{F_{1}}.$$
(5)

Коэффициенты α_E , α_ρ и α_F известны по условию. Для оценки коэффициента α_I воспользуемся схемой пластины с постоянной шириной *b* (рис. 2), используемой в [1]. Положение нейтральной оси поперечного сечения в этом случае определяется выражением



Рис. 2. Схема пластины с прямоугольным сечением

$\alpha_F = h_2/h_1$	0,2	0,1	0,05	0,01	0,001	0,0001	0,00001
α_I	0,961	0,375	0,167	0,031	0,003	0,0003	0,00003
η, %	40,75	18,63	8,94	1,74	0,174	0,0174	0,00174
Свойства материалов	материалов $E_1 = 1,15 \cdot 10^5 \text{ M}\Pi a; E_2 = 2,00 \cdot 10^5 \text{ M}\Pi a; \alpha_E = 1,739; \alpha_\rho = 1,743; \rho_1 = 4,51 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \rho_2 = 7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$						

Влияние относительной толщины покрытия на изменение собственной частоты колебаний пластины

где $y_1 = h_2 + 0.5h_1$; $y_2 = 0.5h_2$ – координаты центров тяжести поперечных сечений пластины и покрытия.

Чтобы упростить выражение (6), учтем, что $\alpha_F = bh_2/bh_1 = h_2/h_1$, а также введем параметр $\beta = E_2h_2/E_1h_1 = \alpha_E\alpha_F$. Тогда

$$h_{\rm H.o} = \frac{y_1 + \beta y_2}{1 + \beta}.$$
 (7)

Расстояния от нейтральной оси до центров тяжести сечений пластины и покрытия e₁ и e₂ будут определяться следующими соотношениями:

$$\mathbf{e}_1 = h_2 + 0.5h_1 - h_{\text{H.O}}; \ \mathbf{e}_2 = h_{\text{H.O}} - 0.5h_2,$$

а выражения для моментов инерции поперечных сечений будут иметь вид

$$I_1 = \frac{bh_1^3}{12} + bh_1e_1^2; \ I_2 = \frac{bh_2^3}{12} + bh_2e_2^2$$

Тогда выражение для α_I можно представить в следующем виде:

$$\alpha_{I} = \frac{h_{2}^{3} + 12h_{2}e_{2}^{2}}{h_{1}^{3} + 12h_{1}e_{1}^{2}} = \frac{\alpha_{F}[\alpha_{F}^{2}(1+\beta)^{2} + 3(1+\alpha_{F})^{2}]}{(1+\beta)^{2} + 3\beta^{2}(1+\alpha_{F})^{2}}.$$
 (8)

Анализ выражения (8) показывает, что при достаточно малых α_F , соответствующих нано- или микропокрытиям, будет выполняться соотношение

$$\alpha_I \approx 3\alpha_F.$$

Следовательно, задавая свойства материалов E и ρ пластины и покрытия в зависимости от соотношения толщин h_2 и h_1 , можно сделать оценку изменения частоты пластины через относительный параметр η :

$$\eta = \left(\sqrt{\frac{1+\alpha_E \alpha_I}{1+\alpha_\rho \alpha_F}} - 1\right) 100.$$
(9)

Результаты расчетов в системе Mathcad, приведенные в таблице, показывают, что для пластины из титанового сплава покрытие, обладающее свойствами стали, уже при $\alpha_F \leq 0,01$ не оказывает существенного влияния на собственные частоты, которые зависят от жесткости пластины. В свою очередь, жесткость зависит от модуля упругости материала и момента инерции поперечного сечения. Поскольку соотношение модулей упругости и плотностей основного материала и какого-либо наноматериала не может превышать одного порядка, то, учитывая соотношение моментов инерции сечений пластины и покрытия α_I (см. таблицу), действительные нано- и даже микропокрытия не могут привести к какому-либо значимому изменению собственных частот, так как из-за малости толщины практически не оказывают влияния на жесткость деталей.

Данное положение, несомненно, справедливо для любых деталей, так как результаты, полученные для пластин с прямоугольным сечением, в соответствии с выражениями (5) несложно распространить на детали с произвольным сложным сечением.

Вывод

Полученные результаты показывают, что для изменения собственных частот колебаний, например для отстройки от резонанса, необходимы покрытия достаточной толщины, которую следует подбирать с учетом физико-механических свойств обоих материалов. Именно с этой целью, например, используется покрытие в работе [2], где снижение вибраций дизель-генераторов и судовых конструкций достигалось путем демпфирования и изменения частот колебаний за счет присоединенной массы мастичных покрытий, толщина которых в силу малости модуля упругости составляла "...от 0,5 до 2 толщин основания, на которое оно наносилось".

Полученные выражения (4)–(9) могут быть использованы как для оценки возможного изменения собственных частот, так и при разработке мероприятий для отстройки от резонансных частот деталей компрессора и турбины ГТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов А.Л., Скирта С.М. и др. Исследование влияния толщины и свойств нанопокрытия пластины на ее частотные характеристики // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 11. С. 24–26.

2. Минасян М.А., Медведев В.В. Снижение вибрации дизель-генераторов и судовых конструкций за счет демпфирования мастичными покрытиями // Судостроение. 2006. № 3. С. 36–38.

3. Вибращии в технике: Справочник. В 6-ти т. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1999. 504 с. А.И. Михлюк (ОАО "Минский автомобильный завод", Беларусь) E-mail: ulir1@tut.by

Основы создания и эксплуатации индукторов ТВЧ для термической обработки в машиностроении

Представлены опыт и практические наработки в области проектирования, изготовления и эксплуатации индукторов ТВЧ для выполнения различных технологических операций. Показаны основные закономерности при протекании электромагнитного поля как по индуктору, так и по нагреваемой поверхности. Ключевые слова: индуктор, электромагнитное поле, индукционный нагрев, закалка.

Experience and practical works in area of planning, producing and exploitation of inductors of high frequency for implementation different technological operations are presented. Basic conformities to law at flowing of the electromagnetic field on an inductor and on the heated surface are shown. **Keywords:** inductor, electromagnetic field, induction heating, hardening.

Индукционная термообработка в настоящее время широко применяется при упрочнении различных деталей и материалов в машиностроении. В структуре индукционного оборудования индуктор является одним из основных элементов, формирующих рабочее электромагнитное поле в детали (заготовке) и во многом определяющих качество термообработки. Поэтому в большинстве случаев достоинства и недостатки индукционной термообработки могут быть поставлены в прямую зависимость с особенностями конструкции индуктора для осуществления данной конкретной технологической операции (закалка, отпуск, плавка и др.).

Существует огромное разноообразие типов и конструкций индукторов, применяемых в машиностроении, но при этом все они имеют определенные узлы или системы [1]. Каждый специалист, работающий в области промышленного использования индукционной термообработки, должен достаточно хорошо разбираться в основных принципах расчета, конструирования, изготовления и эксплуатации индукторов. В данной статье обобщен многолетний опыт работы автора на ОАО "МАЗ" по созданию и эксплуатации индукторов ТВЧ.

На рис. 1 представлен индуктор для закалки профиля детали кулак разжимной грузового автомобиля. Индуктор состоит из:

1. Контактных колодок (колодки) *1*, представляющих собой медные прямоугольные пластины с отверстиями для надежного крепления индуктора к вторичной обмотке понижающего закалочного трансформатора и передачи энергии от трансформатора на шины.



Рис. 1. Индуктор для закалки ТВЧ (а) и сечение индукционного витка (б)

2. Токопередающих шин (шины) 2 – медные пластины, предназначенные для передачи энергии от контактных колодок к индукционному витку.

3. Индукционного витка *3*, представляющего собой замкнутый медный провод полого сечения, охватывающего нагреваемую поверхность с определенным зазором. Индукционный виток является главной деталью индуктора и предназначен для нагрева конкретной поверхности или детали.

4. Системы охлаждения 4, состоящей из медных трубок прямоугольного сечения, припаянных к шинам, с подающими и сливными штуцерами (патрубками). Система необходима для постоянного охлаждения индуктора при передаче энергии к нагреваемой детали.

5. Системы закалки (спрейер) 5, представляющей собой закрытую полость на индукционном витке с подводящими штуцерами и мелкими отверстиями в индукционном витке (см. рис. 1, δ) и предназначенной для закалки нагреваемой поверхности и периодического охлаждения индукционного витка.

6. Системы изоляции, состоящей из изоляционных пластин *6*, расположенных между токопередающими шинами и изолирующими втулками *7*. Система необходима для изоляции токопередающих шин друг от друга.

7. Крепежных изделий 8, предназначенных для крепления различных деталей и узлов индуктора и изготовленных, как правило, из немагнитных материалов (латунь, медь, бронза).

8. Дополнительных устройств 9 для выполнения вспомогательных операций. Для данного индуктора это текстолитовое кольцо 13, крепящееся к нижней части индукционного витка и предназначенное для



Рис. 2. Индуктор для непрерывно-последовательной закалки деталей типа вал

создания необходимого расхода охлаждающей воды во время закалки (см. рис. 1, δ) (10 -кожух; 11 -штуцер; 12 -спрейерное отверстие; 14 -кронштейн для крепления текстолитового кольца; 15 -крепежные изделия).

В зависимости от назначения индуктора у него могут отсутствовать отдельные узлы и системы или в одном узле совмещаться функциональные возможности нескольких. Так, на рис. 2 представлен индуктор для непрерывно-последовательной закалки деталей автомобиля MA3, состоящий из шин 1, индукционного витка 2, системы закалки 3 и изоляции 4, деталей крепежа 5.

В конструкции данного индуктора в отличие от предыдущей роль контактных колодок выполняют шины, имеющие фигурную конфигурацию, а система охлаждения совмещена со спрейером (системой закалки).

На рис. 3 представлен индуктор для напайки твердосплавных пластин на резцах при производстве инструмента, состоящий из шин-колодок *1*, индукционного витка *2*, штуцера *3* и системы изоляции витка *4*.

Индукционный виток представляет собой круглую медную трубку, изогнутую по размерам нагреваемых резцов, которая одновременно является и системой охлаждения индуктора. В данном индукторе отсутствуют: шины (их роль выполняет система охлаждения, совмещенная с индукционным витком), спрейер (данный индуктор не предназначен для операции



Рис. 3. Индуктор для напайки резцов

закалки), крепежные детали и дополнительные устройства.

Система изоляции предназначена только для изоляции индукционного витка от контакта с нагреваемой деталью и представляет собой асбестовый шнур, пропитанный жидким стеклом и намотанный на индукционный виток.

При разработке конструкции индуктора существуют определенные *правила*, которые необходимо учитывать. Соблюдение их позволит избежать ошибок при проектировании и создать высокоэффективные конструкции.

Правило первое. Токи одинакового направления отталкиваются, токи противоположного направления притягиваются. Это правило работает при параллельном расположении шин индуктора на минимальном расстоянии друг от друга, когда вся передаваемая энергия концентрируется по внутренней стороне каждой шины и передается на индукционный виток с наименьшими потерями.

Правило второе. На внутренней стороне проводника ток имеет наибольшую плотность, на внешней стороне ток практически отсутствует (так называемый кольцевой эффект). На рис. 4 показано влияние кольцевого эффекта в замкнутом проводнике прямоугольного сечения. Это правило всегда учитывается при взаимном расположении индукционного витка и нагреваемой детали. Подавляющее большинство индукторов конструируют по принципу охвата индукционным витком нагреваемой детали, что обеспечивает наилучшую эффективность нагрева.

Правило третье. Ток в своем движении всегда выбирает самый короткий и легкий путь. На рис. 5 показано распределение зоны закалки ТВЧ на шейках детали кулак разжимной грузового автомобиля при симметрично (*a*) и несимметрично (*б*) расположенных витках.

При симметричном расположении витков (см. рис. 5, *a*) путь тока одинаков как по верхнему, так и по нижнему витку, соответственно одинаковым будет и качество закалки (твердость, глубина, распределение зоны). Для несимметричного расположения витков (см. рис. 5, δ) основной ток будет двигаться по верхнему витку, так как этот путь короче и, как следствие, качество закалки будет неодинаковым для верхней и нижней закаливаемых зон.

Правило четвертое. Интенсивность нагрева при прочих равных условиях будет наибольшая в местах максимального приближения индукционного витка к нагреваемой детали. На рис. 6 показано распределение зоны нагрева стального цилиндра в одновитковом индукторе прямоугольного сечения. Это правило учитывается при расчете зазоров между индукционным витком и нагреваемой деталью. Из-за изменения



Рис. 4. Распределение тока по сечению кольцевого проводника прямоугольного сечения



Рис. 5. Схема одновременного нагрева шеек детали разжимной кулак автомобиля MA3:

1 – контактные колодки; *2* – шина; *3* – деталь; *4* – индукционный виток

формы индукционного витка изменены зазоры между витком и нагреваемой деталью. Благодаря этому происходит перераспределение плотности проходящего по витку тока и, соответственно, изменяется картина нагреваемой зоны ТВЧ.





a — прямоугольное сечение индукционного витка; δ — прямоугольное сечение с буртиками по краям индукционного витка



Рис. 7. Распределение зоны нагрева ТВЧ при нагреве: *a* – средней части; *б* – края цилиндра

Правило пятое. Нагреваются в первую очередь поверхности с наихудшими условиями теплоотвода. Это правило учитывается при конструировании индукторов для нагрева деталей, имеющих в зоне нагрева различные концентраторы (отверстия, острые кромки, резкие переходы диаметров и т.д.). На рис. 7 показано распределение зоны нагрева цилиндра в одновитковом индукторе.

За счет равномерного теплоотвода (из металла в металл) при нагреве средней части зона располагается равномерно по длине. При нагреве края цилиндра за счет плохого теплообмена (из металла в воздух) зона нагрева получается искаженной, при этом происходит перегрев острой кромки по краю цилиндра.

Наряду с общими требованиями к конструкции индукторов, к отдельным узлам и системам индуктора также предъявляются свои требования [2].

Контактные колодки. Конструкция колодок индуктора должна обеспечивать надежный контакт и необходимый теплоотвод. При наличии нескольких установок ТВЧ на предприятии и широкой номенклатуре термообрабатываемых деталей размеры колодок и крепежных отверстий в них должны быть унифицированы.

Шины. Конструкция шин должна обеспечивать необходимый теплоотвод, требуемую жесткость индуктора, оптимальное размещение системы охлаждения.

Индукционный виток. К конструкции индукционного витка предъявляют два основных требования: размеры и конфигурация витка должны обеспечивать два основных условия — выполнение операции индукционной термообработки с высоким качеством и долговечность в работе. Например, при закалке ТВЧ высокое качество термообработки достигается, когда индукционный виток совмещает две функции: передает мощность, необходимую для нагрева, и служит спрейером для подачи на деталь охлаждающей среды для закалки. Специальный или дополнительный спрейер может быть также выполнен отдельно и закреплен на индуктирующем проводе. По опыту работы на ОАО "МАЗ" для спрейера оптимальными параметрами являются отверстия Ø1,8...2,0 мм, просверленные с шагом 4 мм для одного ряда отверстий и 6 мм – для многорядных спрейеров, при расстоянии между рядами 3 мм и сверлении отверстий в шахматном порядке.

При этом для индукционных витков с толщиной стенки более 3 мм спрейерные отверстия делают ступенчатыми: сначала сверлом Ø2,8...3,3 мм сверлится большая часть толщины витка, а оставшаяся толщина (около 1 мм) — сверлом Ø1,8...2,0 мм. Спрейерное охлаждение обеспечивает высокую и равномерную твердость поверхности, обладает высокой производительностью.

Долговечность в работе достигается увеличением толщины индукционного витка; применением дополнительного охлаждения индукционного витка; уменьшением количества сварных соединений (точеный виток или из гнутой трубки).

Система охлаждения. Конструкция системы охлаждения должна обеспечивать достаточное охлаждение узлов индуктора при передаче энергии. Для этого следует обеспечить:

 плотный контакт охлаждающих трубок с шинами и другими охлаждающими элементами индуктора;

 отсутствие резких поворотов и перегибов по пути движения охлаждающей воды;

 – размеры и конструкция штуцеров должны обеспечивать надежность и легкость крепления подводящих шлангов.

Спрейер (система закалки). Так как основное назначение спрейера — выполнение закалки детали непосредственно в индукторе, то к конструкции спрейера предъявляются следующие требования:

 площадь поперечного сечения водоподводящих шлангов, патрубков, полостей по которым охлаждающая жидкость поступает к камере со спрейерным отверстием, должна быть не менее чем в 2 раза больше суммарной площади этих отверстий;

 в конструкции системы не должно быть полостей, в которых жидкость может оставаться после окончания охлаждения.

Система изоляции. Основное требование к данной системе – обеспечение изоляции между токопередающими деталями индуктора при температурах до 100...150 °C и периодическом попадании на изолирующие материалы охлаждающей жидкости.

Крепежные изделия. Должны изготавливаться из немагнитных материалов, меди, латуни, бронзы, жароупорных марок сталей, диэлектриков (текстолит, асбестоцемент и т.д.) и по резьбовому соединению не



Рис. 8. Сечение по крепежным деталям индуктора: 1 — шина; 2 — изоляционная пластина; 3 — изоляционная втулка; 4 — болт; 5 — гайка; 6 — шайба

должен проходить ток, который вызывает быстрый нагрев и расплавление резьбовых поверхностей.

На рис. 8 представлен разрез по месту крепления изоляционных пластин между шинами с изоляционными втулками и соединительными крепежными деталями, характеризующий конструкцию двух последних систем индуктора. Данный тип крепления изоляции применяется для большинства типов индукторов и является достаточно надежным.

Рассмотрим выполнение вышеперечисленных требований на примере, характеризующем жесткость конструкции. Как известно, индуктор изготавливают из меди, которая является довольно пластичным материалом. В процессе работы при многократной передаче значительных объемов энергии, постоянном термическом воздействии происходит многократное силовое воздействие на детали индуктора, в первую очередь, на индукционный виток, который подвержен значительным деформациям. Поэтому индуктор должен обладать необходимой жесткостью. Это достигается прежде всего выбором определенной толщины колодок, шин и индукционного витка или установкой на индукционный виток дополнительного устройства, являющегося элементом жесткости.

На рис. 9 представлен индукционный виток для непрерывно-последовательной закалки трубы гидроцилиндра подъема платформы самосвала MA3-5551 с закрепленным на нем кольцом жесткости. В процессе закалки трубы из-за большой передаваемой мощности, интенсивной работы, теплового воздействия происходит деформация витка 1 (эллипсность) с наваренной на него трубкой охлаждения.

Повышение жесткости витка за счет увеличения его толщины приводит к увеличению его габаритов и, как следствие, к увеличению глубины нагрева и уве-



Рис. 9. Индукционный виток индуктора для закалки трубы гидроцилиндра подъема платформы самосвала MA3-5551 с закрепленным на нем кольцом жесткости

личению коробления закаливаемой детали 5. Поэтому для обеспечения жесткости индукционного витка на него устанавливают текстолитовое кольцо 4, которое крепится с помощью четырех шпилек 6, приваренных к трубке охлаждения 2, и поддерживает необходимую форму витка (3 – шина).

При применении индукционной термообработки на предприятии целесообразно выполнить унификацию их конструкции по определенным элементам в зависимости от технологии применения. В табл. 1 представлены рекомендации по унификации конструкции индукторов для различных операций.

Например, на ОАО "МАЗ" все применяемые индукторы для закалки (каталог спроектированных, используемых и использовавшихся индукторов — более трех тысяч наименований) по способу крепления унифицированы следующим образом:

• крепление к закалочному трансформатору через переходник с резьбовым соединением по одному типоразмеру (рис. 10, *a*). Размеры *h*, *H* и *L* практически для всех индукторов (за исключением специальных индукторов) унифицированы;

• крепление к закалочному трансформатору через переходник с пневматическим соединением по длине и высоте шины (рис. 10, *δ*). Размеры *A* – расстояние между шинами; *Б* – длина и высота шины (на рисунке не показан) унифицированы.

Эксплуатация и ремонт индукторов. В процессе эксплуатации индукторы подвергаются воздействию нескольких неблагоприятных факторов, приводящих к потере работоспособности. Основная причина выхода индуктора из строя — неисправности системы охлаждения.

Опыт эксплуатации индукторов позволил выделить ряд характерных для индукторов неисправностей (табл. 2). Большинство неисправностей связано с индукционным витком, так как в процессе работы он подвергается максимальному воздействию неблагоприятных факторов.

Таблица 1

Технологическая операция	Унифицируемый элемент	Преимущества	
Закалка, нагрев под горячее выдавливание, изготовле-	1. Размеры и конструкция крепления индуктора к закалочному трансформатору.	1. Использование одного индуктора на нескольких установках.	
ние инструмента (напайка, отпайка)	2. Диаметр и конструкция штуцеров системы охлаждения и закалки.	2. Быстрота и легкость замены.	
	3. Размеры прямоугольного сечения (высота и ширина), получаемые при профилировании круглой медной трубки, исполь-	3. Ремонтопригодность.	
	зуемой для изготовления индукционных витков и элементов системы охлаждения.		
	4. Размеры спрейерных отверстий.	4. Технологичность в изготовле- нии	
	5. Расстояние от плоскости крепления индуктора до оси вращения (расположения) детали в индукторе		
Нагрев под ковку	1. Длина индуктора.	1. Удобство в настройке режимов нагрева.	
	2. Диаметр штуцеров и конструкция системы охлаждения.	2. Использование одного индуктора на нескольких установках.	
	3. Размеры спрофилированного сечения медной трубки.	3. Быстрота и легкость замены.	
	4. Способ и конструкция изоляции (размеры керамики).	4. Ремонтопригодность.	
	5. Размеры и способ крепления водоохлаждаемых направляю-	5. Технологичность в изготовле- нии	
	6. Размеры и расположение контактных колодок индуктора		

Рекомендуемая унификация индукторов для индукционной термообработки

Следует отметить, что при правильном конструировании и изготовлении индуктора конструкция его вполне ремонтопригодна. Как правило, при эксплуатации индуктора первым выходит из строя индукционный виток, поэтому в конструкции индуктора должна предусматриваться его замена.

Большинство индукторов непрерывно-последовательной закалки (до 90 %), все индуктора для нагрева



Рис. 10. Схема унификации индукторов по способу крепления:

a – зажим механический (*1* – закалочный трансформатор; *2* – индуктор; *3* – переходник со шпильками крепления индуктора; *4* – деталь); *б* – зажим пневматический (*1* – переходник; *2* – индуктор)

Таблица 2

Характерные неисправности индукторов ТВЧ

Неисправность	Причина	Способ устранения	
 Прогорание индукционного витка 	Длительная и неправильная эксплуатация: отсутст- вие охлаждения, механическое повреждение (сдав- ливание медной трубки), загрязнение системы ох- лаждения, износ витка за счет касания детали при вращении	Заменить индукционный виток. Проверить точность механизмов при- способления для вращения детали и при необходимости выполнить ремонт	
2. Плохое охлаждение водой витка или элементов системы охлажде- ния	Загрязнение в результате длительной эксплуатации (накипь на внутренних стенках системы охлажде- ния). Механическое повреждение (сдавливание медной трубки). Попадание грязи в систему охлаждения	Отжечь индуктор в печи или протравить в химическом растворе, продуть сжатым воздухом. Заменить неисправный элемент или вос- становить проход в трубках системы ох- лаждения	
3. Потеря геометрии индукцион- ного витка или элементов индук- тора	Длительная эксплуатация. Механическое воздействие. Работа без охлаждения или при недостаточном ох- лаждении	Отрихтовать и восстановить геометриче- ские размеры. Заменить неисправный элемент. Проверить и отремонтировать систему охлаждения	
 Неравномерное или недостаточ- ное охлаждение через спрейерные отверстия индукционного витка 	Длительная эксплуатация (накипь на внутренних стенках системы охлаждения). Износ ("зализывание") спрейерных отверстий на индукционном витке от касания детали при враще- нии. Повреждение (сдавливание) в подводящих каналах или штуцерах	Выполнить ремонт по п. 2	
5. Выгорание металла на контакт- ных поверхностях шин или коло- док	Слабый контакт при установке. Недостаточное охлаждение контактных поверхно- стей. Большая потребляемая мощность. Загрязнение, деформация, окисление контактных поверхностей	Проверить надежность крепления, рабо- ту системы охлаждения, соответствие мощности конструкции индуктора. Очистить и рихтовать контактные по- верхности	
6. Точечное прогорание индукци- онного витка	Попадание окалины или стружки на виток из-за нарушения изоляции	Запаять индукционный виток, отремон- тировать изоляцию индуктора	
7. Потеря контакта трубок систе- мы охлаждения (отпайка) к ши- нам индуктора	Загрязнение в результате длительной эксплуатации (накипь на внутренних стенках системы охлажде- ния). Механическое повреждение (сдавливание) в подво- дящих каналах или штуцерах. Неправильная эксплуатация (работа без воды)	Выполнить ремонт по п. 2	

под пластическую деформацию, специальные индуктора и часть (до 40 %) индукторов одновременной закалки вполне пригодны для дальнейшей эксплуатации после замены индукционного витка. Неисправности, связанные с другими элементами индуктора (шины, колодки, система охлаждения), плохо подвергаются ремонту. В этом случае требуется изготовление нового индуктора. При правильной эксплуатации срок службы индуктора исчисляется годами [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гордиенко А.И., Гурченко П.С.** и др. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. Минск: Изд-во Беларуская навука, 2009.

2. Гурченко П.С., Михлюк А.И. Типовые индукторы для закалки деталей автомобилей // Грузовик. 2003. № 10. С. 31–35.

3. **Гурченко П.С., Демин М.И., Михлюк А.И.** Оборудование индукционного нагрева в кузнечном производстве // Грузовик. 2001. № 9. С. 31–36.



Контроль качества Упрочняющей обработки

УДК 621.787:681.51

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

Вибродиагностика упрочнения поверхности выглаживаемой детали

Обоснована возможность вибродиагностики упрочнения поверхности детали при выглаживании. Представлены результаты экспериментальных исследований, доказывающие наличие связи между средней мощностью вибросигнала из зоны обработки и микротвердостью поверхностного слоя выглаженной детали, при различных режимах выглаживания. Предложено корректировку процесса выглаживания для устранения возможности появления несоответствующей продукции осуществлять на основе спектрального анализа вибросигналов.

Ключевые слова: вибродиагностика, выглаживание, мощность вибросигнала, микротвердость, режимы обработки.

Vibrodiagnostics possibility of surface detail hardening at burnishing is proved. The results of the experimental researches, proving presence of connection between average vibrosignal capacity from a zone of processing and microhardness of a blanket of the burnishing detail at various burnishing modes are presented. It is offered the upgrading of burnishing process for elimination of possibility of emergence of inappropriate production to carry out on the basis of the spectral vibrosignal analysis.

Keywords: vibrodiagnostics, burnishing, vibrosignal capacity, microhardness, processing modes.

Методы контроля и диагностики находят все большее применение при изготовлении изделий в машиностроении [1]. В процессах отделочно-упрочняющей обработки, к которым относится выглаживание, применение методов диагностики состояния поверхностного слоя детали при ее изготовлении представляется целесообразным с позиции устранения возможности появления несоответствующей продукции, поскольку указанные процессы обычно применяются для финишной обработки дорогостоящих ответственных деталей.

Среди современных методов диагностики особо можно выделить вибродиагностику как неразрушающий метод, применение которого позволит создать автоматизированную систему управления процессом, так как вибросигнал из зоны выглаживания несет в себе всю информацию о явлениях, происходящих во время обработки [2].

Для обоснования возможности вибродиагностики упрочнения поверхности детали при выглаживании была проведена серия экспериментов. Выглаживали цилиндрические поверхности деталей Ø 40 мм (сталь 45ХНМФА) специализированным инструментом при условиях обработки, описанных в работе [3]. В ходе процесса отделочно-упрочняющей обработки фиксировали вибросигналы, поступающие из зоны выглаживания, при помощи специализированного программно-математического обеспечения персонального компьютера [4].

При спектральном анализе вибросигналов, поступающих из зоны обработки, использовали окно Хеннинга, обеспечивающее подавление боковых "паразитных" составляющих до уровня -32 дБ и имеющее эквивалентную ширину главного лепестка функции окна 1,5. Указанное окно обладает незначительным максимальным искажением уровня из-за "просачивания" мощности в боковые лепестки и высокой асимптотической скоростью спада боковых лепестков [5]. В результате спектрального анализа рассчитывали среднюю мощность вибросигнала R(0), которая является усредненной оценкой односторонней спектральной плотности мощности.

На первом этапе экспериментальных исследований оценивали связь между средней мощностью вибросигнала и микротвердостью поверхностного слоя H_{μ} выглаженной детали при изменении натяга h_3 от 25 до 100 мкм (рис. 1).

Экстремум функции соответствует значению натяга, при котором происходит переход от сглаживающего режима к сглаживающе-упрочняющему режиму выглаживания. Очевидно, что зависимость средней мощности вибросигнала от микротвердости поверхностного слоя описывается полиномом второй степени. Следовательно, можно утверждать, что при изменении натяга по параметру вибросигнала R(0) можно определить фактическое значение получаемой при выглаживании микротвердости поверхностного слоя детали.

На втором этапе экспериментальных исследований оценивали связь между средней мощностью вибросигнала и микротвердостью поверхностного слоя выглаженной детали при изменении подачи S_0 от 0,07 до 0,14 мм/об (рис. 2).

При увеличении подачи средняя мощность вибросигнала возрастает. Характер полученной кривой позволяет утвер-







Рис. 2. Зависимость средней мощности вибросигнала от микротвердости поверхностного слоя при изменении подачи



Рис. 3. Зависимость средней мощности вибросигнала от микротвердости поверхностного слоя при изменении скорости выглаживания

ждать, что при изменении подачи по параметру вибросигнала R(0) можно определить фактическое значение получаемой при выглаживании микротвердости поверхностного слоя детали.

На третьем этапе экспериментальных исследований оценивали связь между средней мощностью вибросигнала и микротвердостью поверхностного слоя выглаженной детали при изменении скорости выглаживания v от 20,1 до 62,8 м/мин (рис. 3).

При увеличении скорости выглаживания средняя мощность вибросигнала возрастает, эта зависимость является линейной, следовательно, при изменении скорости выглаживания по параметру вибросигнала R(0) можно определить фактическое значение получаемой при выглаживании микротвердости поверхностного слоя детали.

На четвертом этапе экспериментальных исследований оценивали связь между средней мощностью вибросигнала и микротвердостью поверхностного слоя выглаженной детали при изменении исходного среднего арифметического отклонения профиля шероховатости выглаживаемой поверхности Ra_{μ} от 0,2 до 1 мкм (рис. 4).

При увеличении *Ra*_и средняя мощность вибросигнала уменьшается. Характер полученной кривой позволяет утвер-



Рис. 4. Зависимость средней мощности вибросигнала от микротвердости поверхностного слоя при изменении Ra_и

ждать, что при изменении исходного среднего арифметического отклонения профиля шероховатости выглаживаемой поверхности по параметру вибросигнала R(0) можно определить фактическое значение получаемой при выглаживании микротвердости поверхностного слоя детали.

Назначая режимы выглаживания с целью обеспечения требуемого значения микротвердости и профиля шероховатости поверхности детали [3], по рис. 1–4 определяем среднюю мощность вибросигнала, которая должна быть в ходе процесса выглаживания. Если фактическое значение вибросигнала R(0) соответствует этому значению, следовательно, микротвердость поверхностного слоя детали соответствует требуемой микротвердости.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность вибродиагностики упрочнения поверхности детали при выглаживании по средней мощности вибросигнала, поступающего из зоны обработки. По параметру вибросигнала R(0) можно диагностировать получаемое значение микротвердости поверхностного слоя детали в режиме реального времени и при необходимости осуществлять корректировку процесса для устранения возможности появления несоответствующей продукции. При этом среднюю мощность вибросигнала можно использовать в контрольных картах [6] для статистического управления процессом алмазного выглаживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Клюев В.В.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.

2. Герасимов В.Я., Губанов В.Ф. Применение неразрушающих методов контроля качества механической обработки цилиндрических поверхностей деталей // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 11. С. 58–62.

3. Губанов В.Ф. Комплексное обеспечение профиля шероховатости и микротвердости поверхности при алмазном выглаживании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 49–52.

4. **Губанов В.Ф.** Программа для анализа вибросигналов / Государственный координационный центр информационных технологий. М.: № гос. рег. 50200500370, дата рег. 30.03.2005 г.

5. Бендат Д., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1982. 362 с.

6. **Губанов В.Ф.** Статистическое управление процессом алмазного выглаживания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 17–19.

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Стромынский 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 23.12.10 г. Подписано в печать 09.03.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,44. Заказ 129. 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