

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

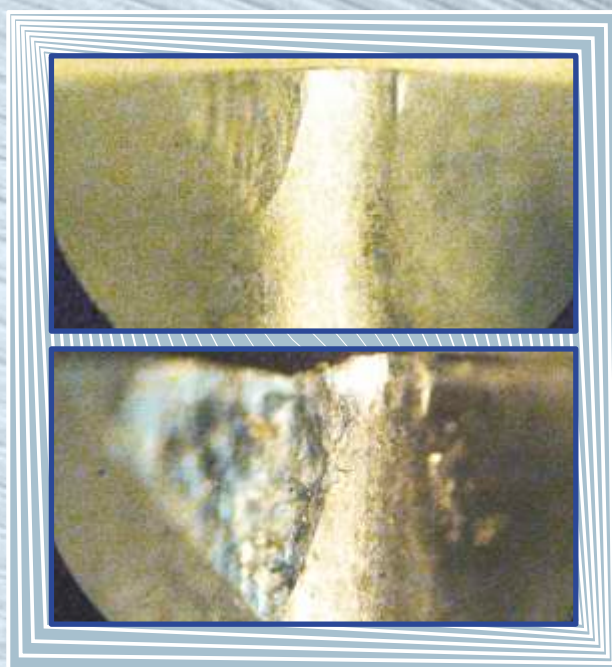
ISSN 1994-6309



№ 2(47)/2010

технология • оборудование • инструменты
научно-технический и производственный журнал

Технология Оборудование Материаловедение Информация Производственный опыт



Пластины из твёрдого сплава VK8:
вверху – после комбинированной
магнитно-импульсной обработки (МИО);
внизу – не обработанная МИО





ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

технология • оборудование • инструменты
научно-технический и производственный журнал

№2(47)/2010

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Н.В. – ректор НГТУ, профессор, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике

Члены совета

Анисименко Г.Е., директор производственно-технологической фирмы «Сигма-инструмент»; **Атапин В.Г.**, профессор, д.т.н., НГТУ; **Афанасьев В.К.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., СибГИУ; **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», к.т.н.; **Батаев А.А.**, профессор, д.т.н., НГТУ; **Буров В.Г.**, профессор, к.т.н., НГТУ; **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор»; **Кирсанов С.В.**, профессор, д.т.н., ТПУ; **Коган Б.И.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., КузГТУ; **Коротков А.Н.**, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ; **Кудряшов Е.А.**, профессор, д.т.н., Засл. деятель науки РФ, КурскГТУ; **Морозов Б.В.**, к.т.н.; **Овчаренко А.Г.**, профессор, д.т.н., БТИ АлтГТУ; **Рахимьянов Х.М.**, профессор, д.т.н., НГТУ; **Сараев Ю.Н.**, профессор, д.т.н., ИФПМ СО РАН; **Смольников Н.Я.**, профессор, д.т.н., ВолгГТУ; **Сулов А.Г.**, профессор, д.т.н., Засл. деятель науки и техники РФ, БрянГТУ

Журнал входит в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий*, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»

ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

ООО НПКФ «Машсервисприбор»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Батаев А.А.** – главный редактор, профессор, доктор технических наук
Атапин В.Г. – зам. главного редактора, профессор, доктор технических наук
Морозов Б.В. – зам. главного редактора, кандидат технических наук (технология, инструменты)
Скиба В.Ю. – зам. главного редактора, кандидат технических наук, доцент (оборудование)

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

Журнал реферирован в ВИНТИ

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Подписка по каталогу «РОСПЕЧАТЬ», индекс: **70590**

Адрес редакции:

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

E-mail: obrmet@ngs.ru

www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ТЕХНОЛОГИЯ

- Жеребцов Ю.В., Загиров Т.М., Аюпов И.Ф., Еникеев Ф.У.** Компьютерное моделирование процессов сверхпластической формовки ультрамелкозернистых листовых материалов 3
- Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.** Эксплуатационные свойства плазменных покрытий из износостойкого порошкового материала марки ПГ-С27 8
- Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О.** Повышение износостойкости пластин из твердого сплава 13

ОБОРУДОВАНИЕ

- Атапин В.Г.** Оптимизация несущих конструкций токарно-карусельного станка 16

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Гурьев А.М., Грешилов А.Д., Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Долгоров А.А.** Многокомпонентное диффузионное упрочнение поверхности деталей машин и инструмента из смесей на основе карбида бора 19
- Никулина А.А., Батаев А.А., Смирнов А.И., Буров В.Г.** Структурные исследования сварных швов, полученных методом стыковой контактной сварки заготовок из разнородных сталей 24
- Бишутин С.Г.** Особенности формирования микро- и наноструктурных состояний поверхностных слоев деталей при шлифовании 29
- Батаев И.А., Макарова Е.Б., Попелюх А.И., Журавина Т.В., Павлюкова Д.В., Руктуев А.А., Батаева З.Б.** Интенсивная пластическая деформация и упрочнение титана в процессе ротационной раскатки труб 32

**ИНФОРМАЦИЯ.
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ**

- Кутышкин А.В., Шашок А.В.** Оптимизация надежности эксплуатации штамповой оснастки для горячей объемной штамповки 36

TECHNOLOGY

- Gerebtsov Yu.V., Zagirov T.M., Ayupov I.F., Enikeev F.U.** Finite element modeling of super plastic forming of ultrafine-grained sheet materials..... 3
- Chesov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V.** Operational properties of plasma coatings from a wear proof powder PG-S27..... 8
- Ovcharenko A.G., Kozlyuk A. Yu., Kurepin M. O.** The increase of wear resistance for the hard-facing alloys plates..... 13

EQUIPMENT

- Atapin V.G.** Optimal design of a turning-merry-go-round machine carrier constructions..... 16

MATERIAL SCIENCE

- Guriev A.M., Greshilov A.D., Kosheleva E.A., Ivanov S.G., Guriev M.A., Ivanov A.G., Dolgorov A.A.** Multicomponent diffusion hardening of the surfaces of mechanisms and tools components by the mixtures on the basis of boron carbide 19
- Nikulina A.A., Bataev A.A., Smirnov A.I., Burov V.G.** The investigation of heterogeneous steels joined by the method of contact welding 24
- Bishutin S. G.** Features of formation microstructural and nanostructural conditions of superficial layers of details at grinding 29
- Bataev I.A., Makarova E.B., Popeluyh A.I., Zhuravina T.V., Pavluykova D.V., Ruktuev A.A., Bataeva Z.B.** Severe Plastic Deformation and Strengthening of Titanium in the Process of Pipes Rotational Rolling 32

**INFORMATION.
PRODUCTION EXPERIENCE**

- Kutyshkin A.V., Shashok A.V.** Optimization of reliability of maintenance stamp fitting-outs for a hot die forging 36

Корректор *Л.Н. ВЕТЧАКОВА*
Художник-дизайнер *А.В. ЛАДЫЖСКАЯ*
Компьютерная верстка *В.Н. ЗЕНИНА*

Подписано в печать 10.06.10. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 5,0. Уч.-изд. л. 9,3. Изд. № 135. Заказ 1036. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

УДК 004.94: 539.52: 621.7

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Ю.В. ЖЕРЕБЦОВ, аспирант, Т.М. ЗАГИРОВ, аспирант,
И.Ф. АЮПОВ, бакалавр,
Ф.У. ЕНИКЕЕВ, доктор техн. наук,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, г. Уфа*

Статья получена 02 марта 2010 г.

Загиров Т. М. – 450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
e-mail: bc10204@mail.ru

Предложен подход к построению компьютерных моделей технологических процессов сверхпластического формообразования ультрамелкозернистых материалов, включающий в себя учет влияния роста зерен и идентификацию сверхпластических свойств по результатам технологических экспериментов. Данный подход реализован на примере сверхпластической формовки титанового сплава ВТ6 в прямоугольную матрицу. Численные расчеты проводятся в среде программного комплекса ANSYS, результаты расчетов сопоставляются с предсказаниями инженерного подхода и экспериментальными данными, известными из литературы.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, компьютерное моделирование, технологические параметры, реологические свойства.

The finite element modeling of superplastic metal working of ultrafine-grained materials is effected in terms of the theory of creep taking into account the influence of grain growth on the mechanical response of a material to be deformed. The values of material constants are determined from the technological tests, ANSYS-code being used to fulfill the calculations. The approach suggested is applied to the modeling of the superplastic forming of a long rectangular sheet. The finite element solutions found are compared with corresponding predictions of the analytical approach as well as with corresponding experimental data on Ti-6Al-4V alloy known in the literature, a good agreement being found.

Key words: super plastic forming, finite element modeling, ANSYS, technological parameters, rheological properties.

Структурная сверхпластичность (СП), проявляемая поликристаллическими материалами при повышенных гомологических температурах и сравнительно низких скоростях деформации, начала применяться в практических технологиях обработки металлов давлением с середины 60-х годов прошлого века [1]. Математическое моделирование технологических процессов сверхпластической формовки листовых промышленных алюминиевых и титановых сплавов, как правило, проводилось в рамках безмоментной теории оболочек [1,2] на основе

принятия дополнительных упрощающих предположений, которые обосновывались путем сопоставления теоретических предсказаний с соответствующими экспериментальными данными. В результате в литературе было опубликовано большое количество работ, посвященных описанию разнообразных инженерных моделей различных технологических процессов обработки металлов давлением в состоянии СП [1,2].

Численные методы моделирования применялись сравнительно редко и считались труднодоступными в инженерной практике.

В последние годы наметился качественный прорыв, связанный с широким распространением современного сертифицированного программного обеспечения, доступного специалистам. Во многих организациях имеются пакеты прикладных программ, специально предназначенные для конечноэлементного моделирования разнообразных процессов и явлений, в том числе и технологических процессов обработки металлов давлением. В качестве примеров можно привести программы *ANSYS*, *MARC*, *ABAQUS*, *DEFORM* и т.п. Представляет интерес применение этих пакетов для анализа основных параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и сопоставление результатов численных расчетов с соответствующими предсказаниями инженерных подходов, апробированных на практике, а также более тщательный анализ полученных ранее результатов с целью уточнения области применения известных из литературы инженерных подходов. В качестве примера такого рода анализа можно привести работу [3], в которой проведено численное моделирование процесса формовки протяженной мембраны, результаты которого сопоставлены с соответствующими предсказаниями инженерного подхода, развитого ранее в работе [4].

В последнее десятилетие интерес исследователей вызывают новые уникальные материалы, имеющие субмикроструктурную (со средним размером зерен d менее 1 мкм) и нанокристаллическую (d менее 0,1 мкм) структуру. Такие материалы принято называть ультрамелкозернистыми или наноструктурными [5,6]. Они обладают уникальными свойствами, в них могут быть изменены считающиеся структурно-нечувствительными характеристики, такие как упругие модули, температуры Кюри и Дебая, намагниченность насыщения и др. По этой причине специалисты внимательно изучают перспективы применения наноструктурных материалов в авиационно-космической отрасли, пищевой и химической промышленности, медицине, спорте, электронике, оборонной промышленности [7, 8]. Известно, что измельчение зерен приводит к существенному увеличению прочностных свойств материалов. Однако при этом заметно снижается их пластичность, что сильно затрудняет обработку такого рода материалов мето-

дами обработки металлов давлением. По этой причине весьма привлекательным представляется обработка такого рода материалов методом сверхпластической деформации [1,9]. Однако, как отмечают авторы работы [7], возникает серьезная проблема, связанная с интенсивным ростом зерен в ходе обработки. Этот фактор может оказывать серьезное влияние на реологическое поведение ультрамелкозернистых материалов и должен учитываться при разработке математических моделей технологических процессов обработки давлением наноструктурных материалов.

Целью настоящей работы является разработка подхода к конечноэлементному моделированию процессов сверхпластического формообразования ультрамелкозернистых материалов на примере сверхпластической формовки протяженной прямоугольной мембраны.

Математическая модель анализируемого процесса строится в рамках предложенного в работе [2] варианта постановки краевой задачи теории ползучести. Реализовавшие отмеченный вариант авторы работы [3] использовали следующее встроеное в *ANSYS* соотношение ползучести:

$$\Delta \varepsilon_{cr} = C_7 \sigma^{C_8} e^{-C_{10}/T} \Delta t, \quad (1)$$

где $\Delta \varepsilon_{cr}$ – приращение деформации ползучести, σ – напряжение; t – время. Этот вариант в программе *ANSYS* выбирается путем задания $C_{12} = 1$. Тогда, если принять $C_7 = 1/K^{1/m}$; $C_8 = 1/m$, $C_{10} = 0$ и $C_{12} = 1$, то из (1) можно получить хорошо известное и часто используемое в СП определяющее соотношение вида

$$\sigma = K \xi^m, \quad (2)$$

где ξ – скорость деформации, K – параметр, зависящий от среднего размера зерен и других структурных характеристик материала, m – параметр скоростной чувствительности, который считается основным реологическим параметром сверхпластичности [1,2].

С целью учета возможного влияния роста зерен в определяющее соотношение (2) вводят параметр деформационного упрочнения n :

$$\sigma = K' \xi^{m'} \varepsilon^n, \quad (3)$$

где ε – величина деформации, K' , m' , n – постоянные материала. Для того чтобы выбрать определяющее соотношение (3) в программе *ANSYS*,

можно воспользоваться следующим встроенным в этот пакет соотношением:

$$\Delta \varepsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \varepsilon^{C_3} e^{-C_4/T} \Delta t. \quad (4)$$

Уравнение (4) с соотношением (3) связывают использованием следующих выражений:

$$\begin{aligned} C_1 &= (1/K')^{1/m'}; \quad C_2 = 1/m'; \quad C_3 = -n/m'; \\ C_4 &= 0; \quad C_6 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где условие $C_6 = 0$ определяет выбор модели (4).

Для того чтобы приступить к проведению численных расчетов в среде *ANSYS*, необходимо заранее знать значения материальных постоянных K' , m' , n в модели (3). С этой целью необходимо идентифицировать эту модель по результатам экспериментов. Такая идентификация обычно проводится по результатам стандартных одноосных испытаний на растяжение, однако во многих случаях более предпочтительным оказывается проведение тестовых формовок при постоянном давлении [2]. Так, например, авторами работы [10] предложена методика идентификации постоянных материала K , m , входящих в соотношение (2), по результатам тестовых формовок листового титанового сплава ВТ6 в матрицу прямоугольной формы с использованием сменных вкладок, позволяющих регулировать глубину матрицы. Аналогичная методика может быть разработана и для модели материала (3). Описание этой методики выходит за рамки настоящей работы, ниже используется только результат ее применения к набору экспериментальных данных, зафиксированных в работе [10]: установлено [10], что продолжительность формовки листового титанового сплава ВТ6 толщиной $s_0 = 1$ мм в матрицу размерами 120x30 мм и глубиной $D = 30$ мм равна 2550 и 1290 с при давлении газа 0.6 и 0.8 МПа соответственно. В то же время при давлении 0,8 МПа время формовки до глубины 10 мм составило 524 с. Значения материальных постоянных K' , m' , n , рассчитанные исходя из этих данных, равны: $K' = 510.6$ МПа·с $^{m'}$; $m' = 0,422$, $n = 0,13$. Тогда в соответствии с (5) в программу *ANSYS* вводятся следующие значения: $C_1 = 2,316 \cdot 10^{-21}$ с $^{-1}$ ·МПа $^{-n}$, $C_2 = 2,3697$, $C_3 = -0,3081$, $C_4 = 0$, $C_6 = 0$. Значения упругих модулей были приняты равными: модуль Юнга $E = 10$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,4$. Параметры за-

кона трения не задавались, поскольку в данной работе соответствующая стадия процесса сверхпластической формовки не рассматривалась.

Для сопоставления результатов численных расчетов с соответствующими аналитическими решениями, полученными в рамках инженерного подхода, развитого авторами работы [4], анализ, приведенный в [4], был расширен путем использования определяющего соотношения (3) вместо (2). В результате было получено следующее дифференциальное уравнение, описывающее процесс деформирования прямоугольной мембраны в матрицу полуширины W :

$$\begin{aligned} \sigma_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{pW}{s_0} \frac{\psi}{\sin^2 \psi} = K' \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{d\psi}{dt} \left(\frac{1}{\psi} - \text{ctg} \psi \right) \right]^{m'} \\ \times \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\psi}{\sin \psi} \right)^n, \end{aligned} \quad (6)$$

где σ_e – интенсивность напряжений, ψ – угол, проведенный из центра кривизны к линии закрепления (краю матрицы); s_0 – исходная толщина листа, p – давление газа. Для режима деформирования при постоянном давлении $p = \text{const}$ решение дифференциального уравнения (6) может быть представлено в квадратурах:

$$\begin{aligned} t \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{pW}{K' s_0} \right)^{1/m'} = \int_0^\psi \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{x} - \text{ctg} x \right) \left(\frac{\sin^2 x}{x} \right)^{1/m'} \times \\ \times \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{x}{\sin x} \right)^{n/m'} dx. \end{aligned} \quad (7)$$

Зависимость высоты купола H от времени t определяется геометрическим соотношением $H = W \text{tg}(\psi/2)$. Поэтому момент окончания формовки определяется условием $\psi_f = 2 \arctg(D/W)$, где D – глубина матрицы. Если $D = W$, то $\psi_f = \pi/2$.

Твердотельная модель показана на рис. 1. В расчетах было принято: $W = 15$ мм, $s_0 = 1$ мм, $W_c = 3$ мм. Длина матрицы $L = 120$ мм, поэтому $W/L = 15/120 = 0,125 \ll 1$. Поскольку деформирование листа происходит при жестком прижиме кромок, в расчетах было принято, что деформация вдоль оси Z равна нулю.

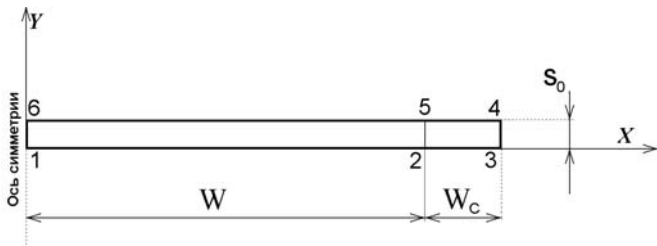


Рис. 1. Твёрдотельная модель: 2345 – зона закрепления, 1256 – деформируемая зона, давление прикладывается по линии 1–2; W – полуширина матрицы; W_c – размер зоны прижима

Для численного решения применяется учебная версия пакета *ANSYS 5.5.2ED*. Конечноэлементная модель включает в себя 264 4-узельных элемента *PLANE42* (опция *Plane Strain*). На рис. 2 показаны исходное и конечное положение сетки конечных элементов. В расчетах было принято: $W = 15$ мм; $W_c = 3$ мм; $s_0 = 1$ мм.

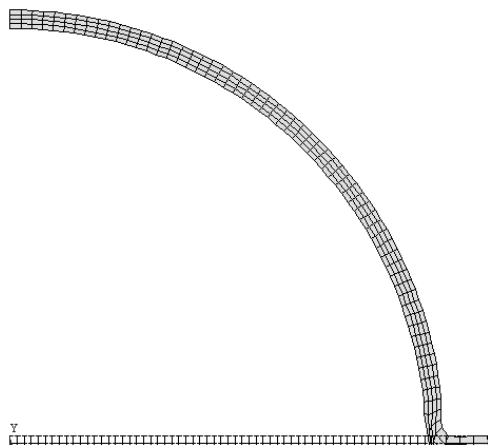


Рис. 2. Сетка конечных элементов в начальном и конечном положениях

Некоторые из результатов численных расчетов, проведенных в среде программного комплекса *ANSYS*, представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 представлены зависимости высоты купола от времени $H = W \tan(\psi/2)$, вычисленные двумя независимыми способами: в среде *ANSYS* (сплошные линии) и по формуле (7) (прерывистые линии). Получено удовлетворительное согласие между результатами расчета в среде *ANSYS* и в рамках упрощенного подхода, основанного на использовании основных уравнений безмоментной теории оболочек. Аналогичные выводы можно сделать из сопоставления результатов расчетов толщины оболочки, представленных на рис. 4. В рамках упрощенной мо-

дели (пунктирные линии на рис. 4) расчеты проводились по формуле $s = s_0 \sin \psi / \psi$. Зависимость от времени $\psi = \psi(t)$ рассчитывалась в соответствии с формулой (7).

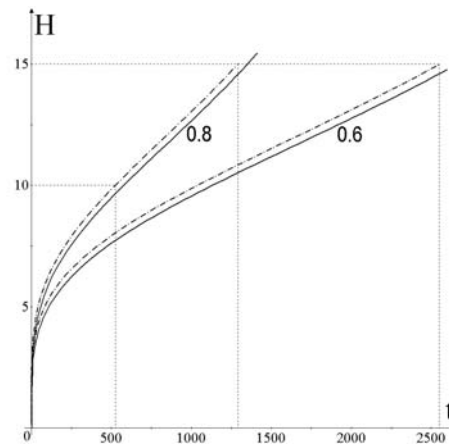


Рис. 3. Зависимости высоты купола H , мм от времени t , с, вычисленные в среде *ANSYS* (сплошные линии), по формуле (7) (прерывистые линии). Горизонтальные и вертикальные пунктирные линии соответствуют экспериментальным данным из [4]

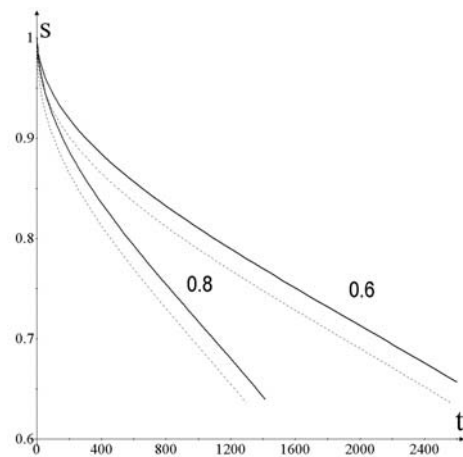


Рис. 4. Зависимости толщины оболочки s , мм от времени t , с, вычисленные в среде *ANSYS* (сплошные линии), и по упрощенной модели [4]

На рис. 5 приведены результаты расчетов зависимости интенсивности напряжений σ_e , МПа, от текущей высоты купола H , мм. Начальный участок на сплошных линиях, соответствующих результатам расчетов в *ANSYS*, отвечает первому шагу вычислений, на котором нагрузка прикладывается в режиме *Ramped* (значение давления

постепенно нарастает с течением времени). Это необходимо для того, чтобы избежать неустойчивости счета на начальном этапе вычислений. Кроме того, мгновенное приложение нагрузки нереалистично, поскольку на практике давление аргона подается не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. В данном случае в расчетах использовался промежуток времени 10 с, в течение которого нагрузка прикладывалась в режиме Ramped. После того как счет выходил на установившуюся стадию, режим счета менялся на Stepped. Учитывая, что характерные времена процесса равны примерно 1000 с, можно принять, что первые 10 с не оказывают существенного влияния на результаты расчетов. Действительно, как видно из рис. 5, решение выходит на установившуюся стадию, о чем можно судить путем сопоставления численных решений (сплошные линии) с соответствующими приближенными решениями краевой задачи (пунктирные линии на рис. 5).

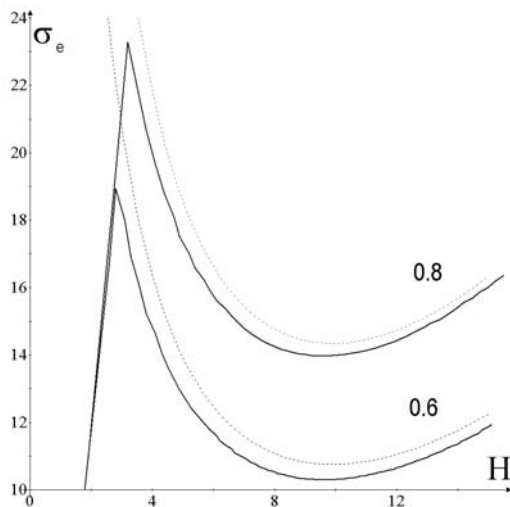


Рис. 5. Зависимости интенсивности напряжений σ_e , МПа от высоты купола H , мм, вычисленные в среде ANSYS (сплошные линии), и по формуле (6) (пунктирные линии)

Таким образом, как следует из полученных результатов, в рамках рассмотренного варианта постановки краевой задачи теории ползучести удается достичь приемлемого согласия результатов расчетов в среде программного комплекса ANSYS с экспериментальными данными и соответствующими приближенными решениями,

полученными в рамках безмоментной теории оболочек. Отсюда следует, что подход к определению основных технологических параметров процесса сверхпластической формовки протяженной мембраны, предложенный в работе [4], может быть обобщен с целью учета влияния роста зерен на реологическое поведение ультрамелкозернистых материалов в рамках определяющего соотношения (3).

Список литературы

1. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
2. Padmanabhan K.A., Vasin R.A., Enikeev F.U. Super plastic Flow: Phenomenology and Mechanics, Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg, Germany, 2001. – 363 p.
3. Vasin R.A., Enikeev F.U., Tokuda M., Safiullin R.V. Mathematical modeling of the superplastic forming of a long rectangular sheet // International Journal of Non-linear Mechanics. – 2003. – Vol. 35. – P. 799–807.
4. Сафиуллин Р.В., Еникеев Ф.У. Расчет режимов сверхпластической формовки протяженной прямоугольной мембраны // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 3. – С. 35–40.
5. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. – М.: Наука, 2007.
6. Мулюков Р.Р. Развитие принципов получения и исследования объемных наноструктурных материалов в ИПСМ РАН // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т.2. – Вып.7–8. – С. 38–53.
7. Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Перспективы применения наноструктурных титановых сплавов в машиностроении // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 1. – С. 69–72.
8. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1. – № 1–2. – С. 208–216.
9. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
10. Сафиуллин Р.В., Еникеев Ф.У., Мухаметрахимов М.М. Методика определения величины параметра скоростной чувствительности тонколистовых сверхпластичных материалов по результатам тестовых формовок при постоянном давлении // Заводская лаборатория. – 1999. – № 12. – С. 41–46.

УДК 621.793.74

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА МАРКИ ПГ-С27

Ю.С. ЧЁСОВ, канд.техн.наук, доцент,
Е.А. ЗВЕРЕВ, ассистент,
А.В. ПЛОХОВ, канд.техн.наук, доцент,
НГТУ, г. Новосибирск

Статья получена 02 апреля 2010 г.

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: egor_z@ngs.ru

Приведены результаты исследований плазменных покрытий по критериям износостойкости и контактной выносливости для различных типов структуры слоя и выявлен ее наиболее рациональный вариант.

Ключевые слова: плазма, покрытие, структура, эксплуатационные свойства.

Results of researches of plasma coatings by criteria of wear resistance and contact endurance for various types of structure of a layer were resulted and its most rational variant was revealed.

Key words: plasma, coating, structure, strength, operational properties.

В настоящее время в технологии машиностроения с целью повышения физико-механических и эксплуатационных свойств деталей машин применяются самые различные методы упрочнения их рабочих поверхностей, к которым относятся газотермические методы нанесения покрытий, в частности и метод плазменного напыления.

При нанесении износостойких покрытий используется большое многообразие порошковых материалов, рекомендуемых ГОСТ 28844. Поэтому на начальном этапе экспериментальных исследований нами были произведены сравнительные испытания покрытий (по критериям прочности сцепления с основой и износостойкости) из четырех широко распространенных в промышленности марок порошков: ПГ-С27, ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01 и ПР-ШХ15Д [1].

Исследования показали, что лучший результат по износостойкости продемонстрировали образцы с покрытием из порошка марки ПС-12НВК-01, а по прочности сцепления – образцы с покрытием из порошка марки ПГ-С27. Однако стоимость первого порошка значитель-

но выше, чем второго. Исходя из наиболее оптимального соотношения «цена-качество», за объект дальнейших исследований нами был принят порошковый материал марки ПГ-С27 (высокохромистый чугуны).

Для указанной марки порошка экспериментально установлен наиболее рациональный диапазон режимов напыления, обеспечивающих определенные типы структур покрытий с присутствием им показателями качества. При прочих равных условиях в исследованиях варьировались сила тока дуги плазмотрона, расход плазмообразующего газа (воздуха) и дистанция напыления. На этой основе были построены инженерные модели процесса, связывающие прочность сцепления покрытий с основой и их пористость [2], а также уровень остаточных напряжений в слое [3] с условиями обработки.

Результаты металлографического анализа снимков, полученных на растровом (марки *EVO 50 XVP Carl Zeiss*) и оптическом (марки *NIKON Eclipse MA100*) микроскопах, показали, что в исследуемом диапазоне режимов напыления на-

блюдаются структуры покрытий [4], которые отличаются пористостью и размерами пор, несплошностью на границе «покрытие – основной металл», степенью деформации частиц (по так называемому «форм-фактору») и количеством нерасплавившихся частиц (глобулей). По этим характеристикам можно хотя и косвенно, но достаточно корректно судить о влиянии режимов напыления на структуру покрытий.

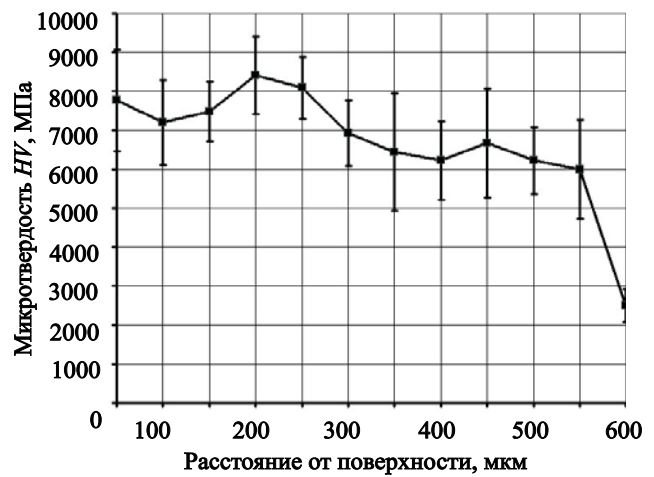
Совместный анализ перечисленных выше структурных показателей напыленных покрытий позволил выделить три варианта характерных разновидностей структур, названных нами условно структурами типа А, Б и В. Структура типа А отличается от остальных заметно лучшими характеристиками по всем позициям. Второй тип структуры имеет меньшую степень деформации частиц и повышенную пористость. Варианту структуры типа В присущ высокий уровень пористости, низкая степень деформации и большой процент нерасплавившихся частиц, а также заметная несплошность переходной границы.

Изучение структуры проводилось параллельно с определением микротвердости. Такие измерения на поперечных шлифах дают дифференцированную информацию о свойствах напыленных слоев и, кроме того, полезны в качестве дополнительной информация о толщине покрытия (резкий спад микротвердости на границе «покрытие-основа»). Микротвердость по критерию HV измеряли на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450. Результаты измерений приведены на рис. 1.

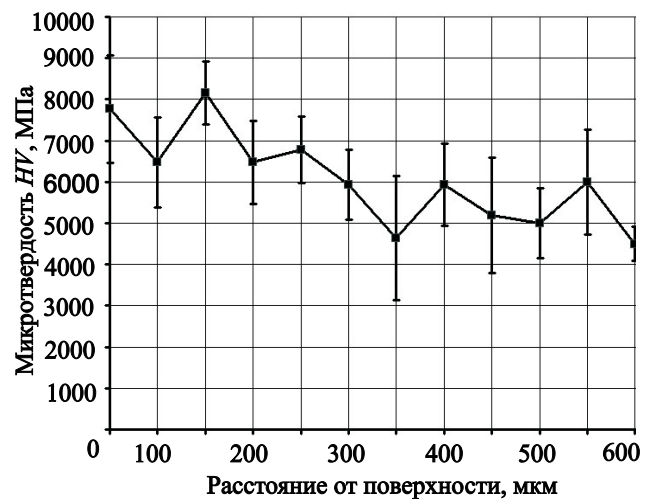
Полученные зависимости показывают, что покрытиям присуща заметная неравномерность распределения уровня микротвердости по толщине слоя. Это обусловлено как неоднородностью покрытий по составу, так и наличием пор. Наибольший же разброс значений микротвердости наблюдается у варианта структуры типа В.

Целью настоящих исследований является испытание образцов на износостойкость и контактную выносливость с покрытиями, обладающими различными вариантами структур.

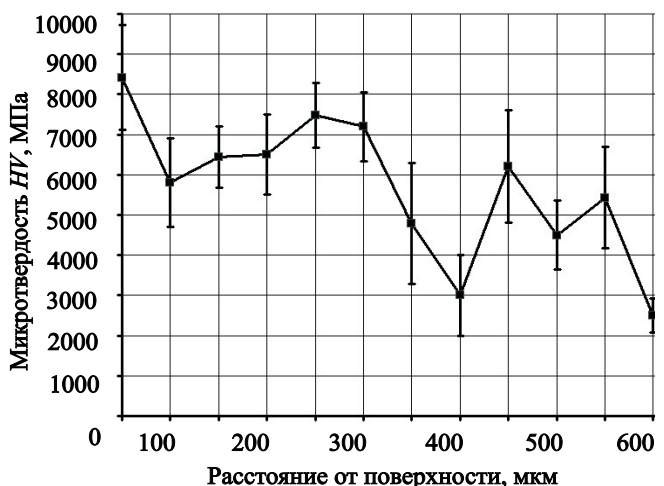
Для покрытий данного функционального назначения износостойкость является, безусловно,



а



б



в

Рис. 1. Распределение микротвердости покрытий по толщине слоя:

а – структура типа А; б – структура типа Б; в – структура типа В

самым важным эксплуатационным свойством, уровень которого напрямую отражается как на работоспособности конструкций в целом, так и на сохранении геометрических размеров отдельных деталей. При испытании покрытий на изнашивание в условиях трения скольжения использована схема «врезающегося индентора» [5]. Она позволяет создавать довольно жесткие условия нагружения. В установке пара трения состоит из вращающегося индентора (твердый сплав марки ВК8) и неподвижно закрепленного образца с покрытием. Нагрузка на пару трения составляла 20 Н. На всех образцах выполняли 5 циклов изнашивания при различном пути трения. В качестве интегральной количественной характеристики износостойкости использовали величину объемной потери образцов, которая вычислялась по геометрическим параметрам лунки износа (рис. 2).

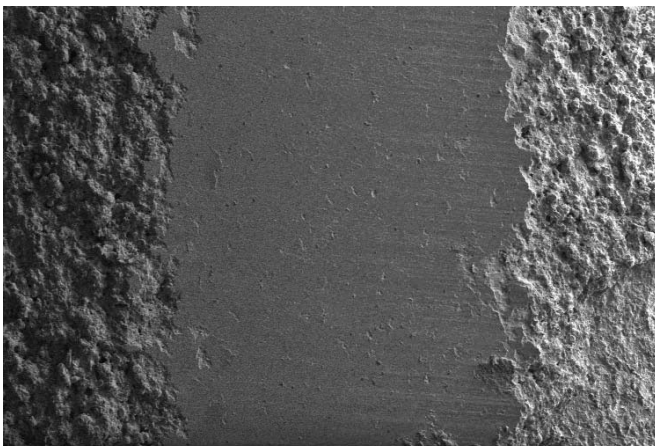


Рис. 2. Поверхность изнашивания

Результаты сравнительных испытаний покрытий на изнашивание в условиях трения скольжения показаны на рис. 3.

Отметим, что результаты испытаний хорошо коррелируют с данными по измерениям микротвердости. Как отмечалось выше, для покрытий, нанесенных по варианту В, характерны повышенные пористость и несплошность на границе «покрытие-основа». Поры уменьшают реальное сечение покрытия и одновременно являются концентраторами напряжений. Эти два фактора заметно снижают прочность и трещиностойкость поверхностных слоев и при наличии большого

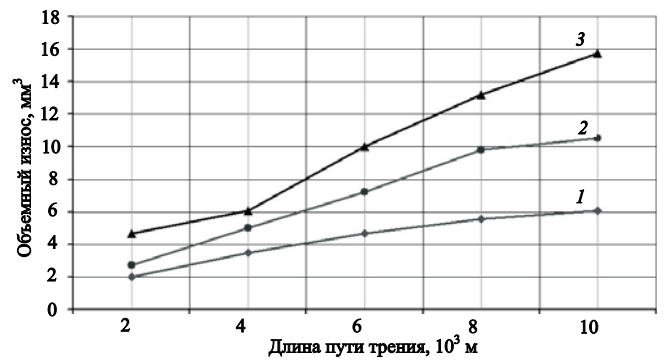


Рис. 3. Кинетика изнашивания образцов с покрытиями:

1 – структура типа А; 2 – структура типа Б;
3 – структура типа В

разброса микротвердости в условиях трения скольжения приводят к увеличению объемного износа.

Рабочие поверхности деталей машин в процессе эксплуатации, как правило, испытывают многократное воздействие циклических нагрузок, в результате чего на них образуются ямки выкрашивания (так называемые питтинги) и трещины, снижающие долговечность покрытий. Испытания на контактную выносливость проводили в соответствии с ГОСТ 25.501 по схеме нагружения «пульсирующий контакт». Контртелом (индентором) служил шарик из закаленной стали марки ШХ15 диаметром 2,5 мм.

Сравнительным испытаниям подвергались сегментные образцы с покрытиями, вырезанные из втулок, подвергнутых финишной механической обработке (шлифованию). На установке реализовано синусоидальное симметричное циклическое нагружение с частотой 24 удара в секунду и усилием, приложенным к индентору, равным 400 Н. В исследованиях измеряли пятно контакта при фиксированном количестве циклов нагружения. Площадка контакта представляла собой эллипс, размер диагоналей которого оценивался при помощи металлографического микроскопа. За критерий разрушения был принят момент интенсивного питтингообразования и появления усталостных трещин в пятне контакта. По результатам экспериментов были построены кривые зависимости среднего диаметра пятна контакта (для партии из пяти одинаковых образцов) от числа

циклов нагружения в полулогарифмических координатах.

Результаты исследования образцов с покрытиями на контактную выносливость представлены на рис. 4.

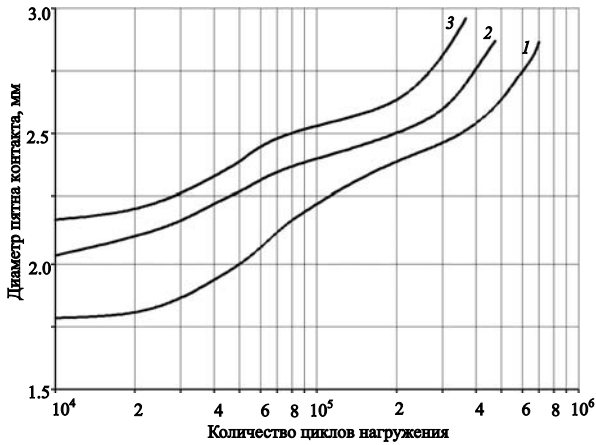


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра пятна контакта от числа циклов нагружения:
1 – структура типа А; 2 – структура типа Б;
3 – структура типа В

Эксперименты показали, что наибольшей контактной выносливостью обладают образцы со структурой типа А. Число циклов нагружения, которое выдерживают такие образцы до момента усталостного разрушения, составляет величину порядка $4 \cdot 10^5$. На рис. 5 приведена фотография усталостной трещины в пятне контакта для данного вида образцов.

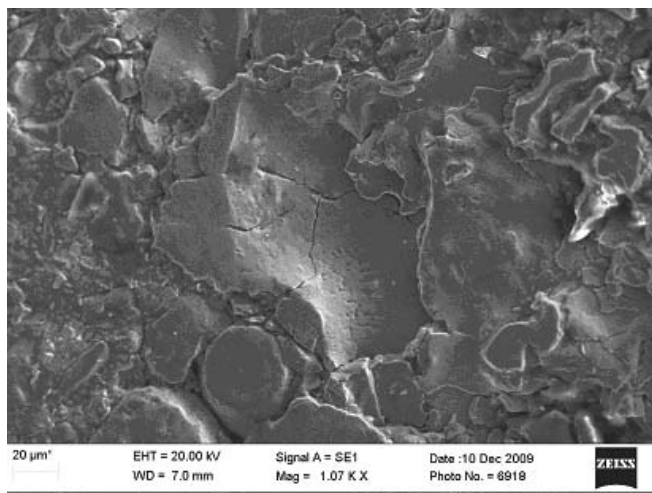


Рис. 5. Усталостная трещина в покрытии со структурой типа А

Образцы со структурой типа Б выдержали нагрузку в пределах $2,8 \cdot 10^5$ циклов нагружения, что заметно ниже, чем у образцов со

структурой типа А. Характер трещины для образцов со структурой типа Б показан на рис. 6.

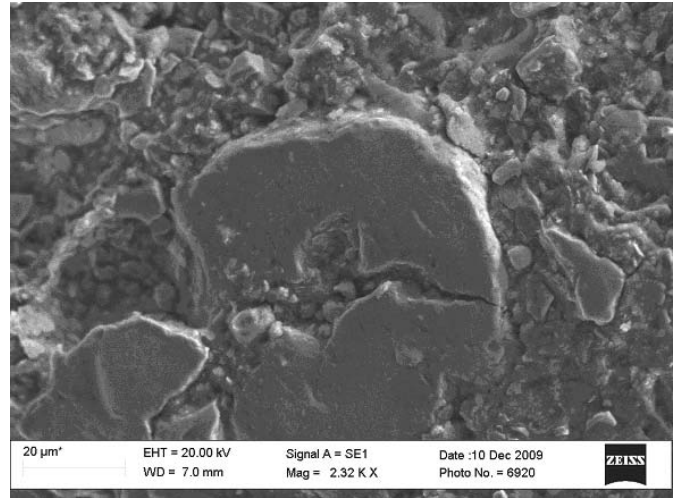


Рис. 6. Усталостная трещина в покрытии со структурой типа Б

Наихудший результат отмечен на образцах покрытия, которые обладают структурой типа В. Их стойкость к данному виду нагружения составляет не более $2 \cdot 10^5$ циклов нагружения, что на 50 % ниже, чем у образцов со структурой типа А. Усталостная трещина на образцах данного вида показана на рис. 7.

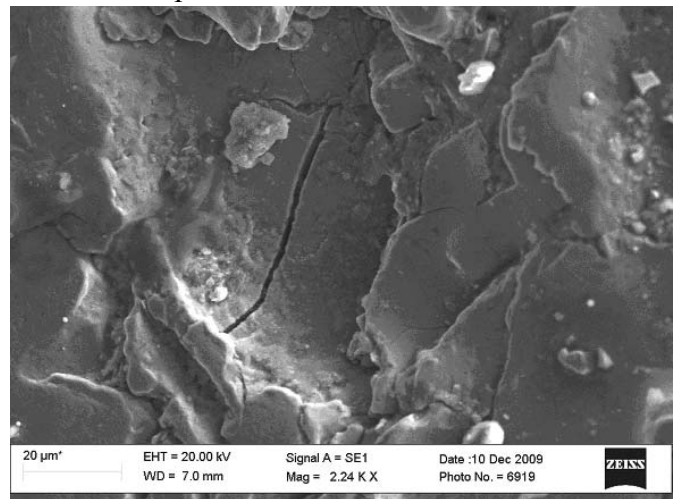


Рис. 7. Усталостная трещина в покрытии со структурой типа В

Известно, что в зоне контактирования образца и индентора возникают нормальные и касательные напряжения. В отличие от нормальных напряжений, монотонно снижающихся по мере удаления от поверхности, касательные распределены более сложно. Продольно усталостные

трещины, возникающие при контактном нагружении, обычно являются результатом действия касательных напряжений [6].

Большую роль в разрушении покрытия играют концентраторы напряжений. В нашем случае к концентраторам, наличие которых способствует трещинообразованию, можно отнести поры, границы между частицами, несплошности границы между покрытием и основой. Именно эти дефекты наиболее ярко проявляются у варианта структуры типа В. Вероятно поэтому такое покрытие выдержало меньшее количество циклов нагружения до разрушения слоя при более активном образовании трещин с выкалыванием крупных фрагментов.

Таким образом, в результате проведенных испытаний на износостойкость и контактную выносливость можно констатировать, что в исследуемом диапазоне режимов плазменного напыления наиболее высоким уровнем этих эксплуатационных свойств обладают образцы со структурой покрытий типа А, поскольку она обладает минимальными пористостью и размерами пор, количеством нерасплавившихся частиц порошка, наибольшей степенью деформации частиц и практическим отсутствием участков с несплошностью границы «покрытие – основа». Именно данный вариант структуры плазменных покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 и может быть рекомендован для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин самого различного технологического оборудования.

Список литературы

1. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ, 2008. – № 3(32). – С. 175–181.
2. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Влияние технологических факторов плазменного напыления на свойства покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2009. – № 3 (44). – С. 15–17.
3. Чёсов Ю.С. Исследование уровня остаточных напряжений в покрытиях при плазменном напылении / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 24–28.
4. Чёсов Ю.С. Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, А.В. Плохов // Обработка металлов. – 2010. – № 1 (46). – С. 14–18.
5. Чёсов Ю.С. Исследование свойств износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 при плазменном напылении / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.Л. Прокопьев, А.С. Ваганов, Н.В. Антохина, А.В. Плохов // Ресурсосберегающие технологии ремонта, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до микроуровня: Материалы 12-й Международной научно-практической конференции. В 2 ч. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2010. – Ч. 1. – С. 201–207.
6. Методы исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 384 с.

УДК 621.7.044.7

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПЛАСТИН ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА*

*А.Г. ОБЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор,
А.Ю. КОЗЛЮК, канд. техн. наук, доцент,
М.О. КУРЕПИН, аспирант,
БТИ Алт ГТУ, г. Бийск*

Статья получена 13 апреля 2010 г.

659305, Бийск, ул. Трофимова, 27, Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета,
e-mail: pbuk@bti.secna.ru

Для повышения износостойкости пластин из твердого сплава предложен метод предварительного нагрева и воздействия импульсного магнитного поля. Приведены экспериментальные результаты для твердых сплавов ВК8 и Т15К6.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, износостойкость, твердый сплав.

To increase the wear resistance of the firm alloys plates the preliminary heating and pulse magnetic field method is offered. Experimental results of firm alloys ВК8 and Т15К6 are presented.

Key words: pulsed magnetic field method, wear resistance, hard-facing alloy.

В настоящее время изучается и применяется множество методов, направленных на повышение твердости и износостойкости поверхностного слоя режущих инструментов. Наиболее перспективным направлением в этой области является разработка высокоэффективных и высокопроизводительных методов обработки поверхностей с применением концентрированных потоков энергий. Комбинированная магнитно-импульсная обработка (МИО) является одним из таких методов. Новизна и эффективность предлагаемого способа подтверждается патентом РФ на изобретение № 2339704 «Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин», зарегистрированном в Государственном реестре изобретений РФ 27.11.08.

Данный способ обработки основан на последовательном воздействии на обрабатываемую деталь индукционного нагрева до определенной температуры и направленного импульса магнит-

ного поля высокой напряженности. При импульсном воздействии возникают специфические фазовые и структурные превращения в металле. Это соответственно вызывает изменение физических и механических свойств материала. Также данный способ обработки позволяет свести к минимуму остаточную энергию в обрабатываемой детали за счет электродинамических сил, вызванных импульсом магнитного поля. Таким образом, комбинированное воздействие индукционного нагрева и импульса магнитного поля на обрабатываемую деталь дает возможность увеличить износостойкость режущего инструмента.

Метод комбинированной магнитно-импульсной обработки (МИО) характеризуется следующими по сравнению с известными преимуществами:

1. Простота технологической оснастки. В качестве инструмента для обработки используется индуктор, который прост в изготовлении и использовании.

* Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», г. Новосибирск, 24 марта 2010 г.

2. Значительно меньшая стоимость оборудования по сравнению с оборудованием, используемым для большинства современных методов поверхностного упрочнения (лазерная обработка, ионная имплантация и т.д.).

3. Возможность создания процесса упрочнения с большой технологической гибкостью. Одним и тем же индуктором можно обрабатывать детали различных размеров и конфигураций, добиваясь оптимального изменения требуемых свойств металла, плавно управляя энергетическими параметрами обработки.

4. Процесс легко поддается автоматизации и механизации, что позволит обеспечить высокую производительность.

5. Высокая культура производства и простота обслуживания оборудования МИО. Это обусловлено бесшумностью и экологической чистотой обработки, а также отсутствием агрессивных сред и отходов.

На протяжении ряда лет в Бийском технологическом институте проводились исследования по использованию данного метода обработки [1–3]. Было найдено, что оптимальная напряженность для стали Р6М5 равна 1200 кА/м, а оптимальная температура предварительного нагрева равна 500 °С. Экспериментально определено, что для инструментов из быстрорежущих сталей увеличение износостойкости обработанных инструментов относительно стойкости необработанных инструментов составило соответственно: 158 % для сверл, 202 % для резцов и 161 % для метчиков. Критерием выхода из строя инструмента при этом являлся предельный износ по задней поверхности для сверл и резцов, и образование макродефектов для метчиков.

В настоящее время для производства режущих инструментов все более широко используются твердые сплавы. В их состав входят карбиды вольфрама, титана, тантала, цементированные небольшим количеством кобальта. Карбиды вольфрама, титана и тантала обладают высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. Инструменты, оснащенные твердым сплавом, хорошо сопротивляются истиранию по сравнению с другими инструментальными материалами. Для экономии дефицитного вольфрама и повышения эксплуатационных характеристик стандартных пластин из твердых сплавов и, как следствие, снижения себестоимости деталей разрабатываются

безвольфрамовые металлокерамические твердые сплавы, а также применяется большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или на изменении состояния (модификации) поверхностного слоя.

С целью повышения износостойкости пластин из твердого сплава нами применен метод комбинированной магнитно-импульсной обработки. В данном случае использовался предварительный нагрев пластин твердого сплава ВК8 и Т15К6 до 350...400 °С и их обработка в концентраторе магнитного поля при напряженности, равной 1200 кА/м. Далее при помощи этих пластин проводилось точение заготовок из стали 30Х.

Известно, что в качестве критерия затупления пластин из твердого сплава может использоваться комбинация размеров фаски и лунки износа. Опытами по обработке коррозионно-стойкой стали твердосплавным инструментом установлено, что для условий резания, характеризуемых низкой скоростью и большой подачей, следует принимать в качестве критерия затупления величину фаски износа по задней поверхности. В нашем случае в качестве критерия затупления был взят износ по задней поверхности для твердого сплава, который при обдирке составляет в пределах 0,75...1,00 мм, при чистовой обработке 0,25...0,40 мм [4].

Экспериментальные результаты исследования пластин из твердого сплава ВК8 представлены на рис. 1, фотографии пластин после испытаний – на рис. 2. Критерием затупления для пластин из твердого сплава ВК8 принята величина, равная 0,75 мм для обдирки заготовок.

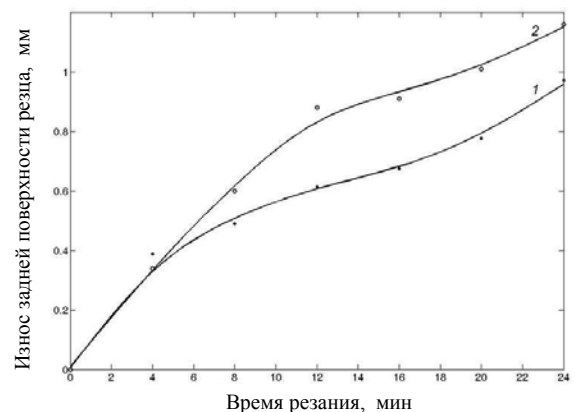


Рис. 1. Зависимости износа задней поверхности пластин из твердого сплава ВК8 от времени обдирки заготовок из стали 30Х:

1 – обработанные пластины, 2 – необработанные пластины

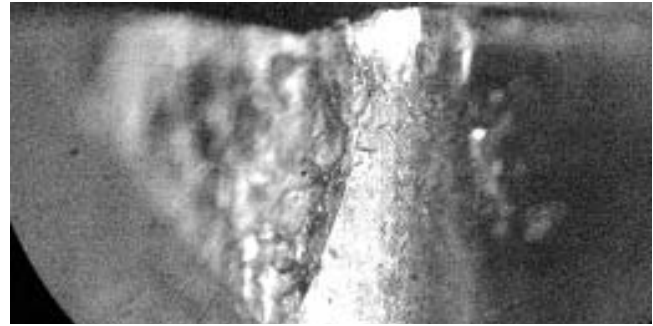
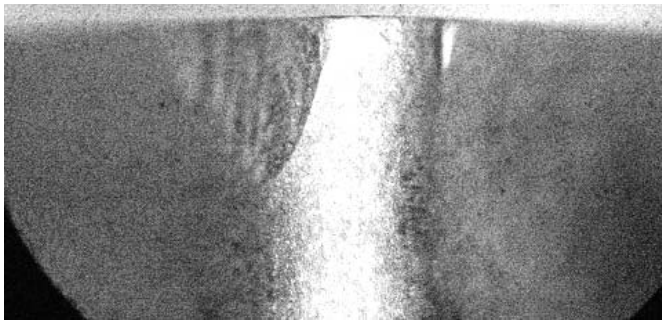


Рис. 2. Пластины из твердого сплава ВК8: слева пластина, обработанная комбинированной МИО; справа пластина, не обработанная МИО

Из графиков (рис. 1) видно, что при одинаковых условиях испытаний пластин из твердого сплава ВК8 у обработанных МИО износостойкость составляет 183 % относительно стойкости необработанных инструментов.

Экспериментальные результаты исследований пластин из твердого сплава Т15К6 представлены на рис. 3, фотографии пластин после испытаний – на рис. 4. Критерием затупления для пластин из твердого сплава Т15К6 принята величина, равная 0,25 мм для чистой обработки заготовок.

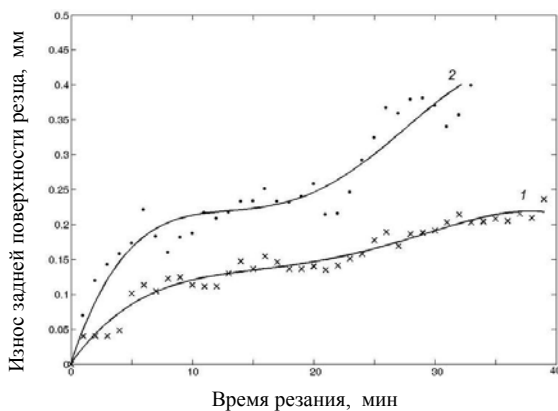


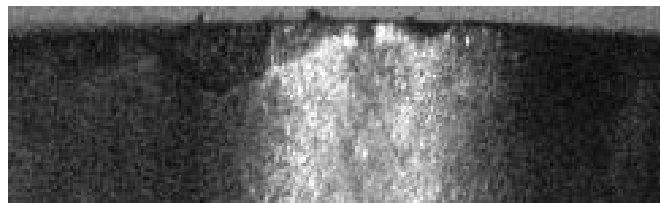
Рис. 3. Зависимости износа задней поверхности пластин из твердого сплава Т15К6 от времени чистой обработки заготовок из стали 30Х:

1 – обработанные пластины; 2 – необработанные пластины

Из графиков (рис. 3) видно, что при одинаковых условиях испытаний пластин из твердого сплава Т15К6 у обработанных МИО пластин износостойкость составляет больше, чем 200 % относительно стойкости необработанных.

Таким образом, проведенные эксперименты с режущим инструментом из твердого сплава показали перспективность использования комбинированной МИО для повышения износостойкости данного инструмента.

Следующим этапом работ планируется исследовать воздействие комбинированной МИО на пластины из твердого сплава при различных температурах нагрева и напряженностях магнитного поля для более широкой номенклатуры инструмента.



а



б

Рис. 4. Пластины из твердого сплава Т15К6: а – пластина, обработанная комбинированной МИО; б – пластина, не обработанная МИО

Список литературы

1. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Моделирование комбинированной магнитно-импульсной обработки // Обработка металлов. – 2007. – № 3. – С. 17–19.
2. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Куретин М.О. Индукторы для комбинированной магнитно-импульсной обработки инструментов различной формы // Обработка металлов. – 2008. – № 3. – С. 11–12.
3. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Эффективная магнитно-импульсная обработка режущего инструмента // Обработка металлов. – 2009. – № 1. – С.4–7.
4. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. – М.: Машиностроение, 1985.–136 с.

УДК 621.9.06:518.4

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТОКАРНО-КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор,
НГТУ, г. Новосибирск*

Статья получена 10 февраля 2010 г.

630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: obrmet@ngs.ru

Рассматривается технология проектирования оптимальных несущих конструкций одностоечного токарно-карусельного станка. Результаты расчета сопоставляются с известными в литературе результатами, полученными другими методами.

Ключевые слова: технология проектирования, оптимизация, токарно-карусельный станок, несущие конструкции.

The projection a carrier construction of a single-standard turning-merry-go-round machine is considered. The results of computation are compared to indexes obtained in literature other methods.

Key words: optimal design, a single-standard turning-merry-go-round machine, a carrier construction.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1; 2] изложена технология проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков (МС), обеспечивающая создание станков без избыточных возможностей, прогнозирование их работоспособности в условиях интенсивных механических воздействий и научное обоснование выбора проектных решений. Технология включает три основных этапа (рис. 1):

- на этапе моделирования компоновки станка формируются граничные условия (силовые и кинематические) для отдельных несущих конструкций; несущие конструкции здесь имеют упрощенную геометрию поперечного сечения (блоки 1–3);
- на этапе моделирования отдельной несущей конструкции (блоки 4–7) получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении граничных условий, полученных на первом этапе;

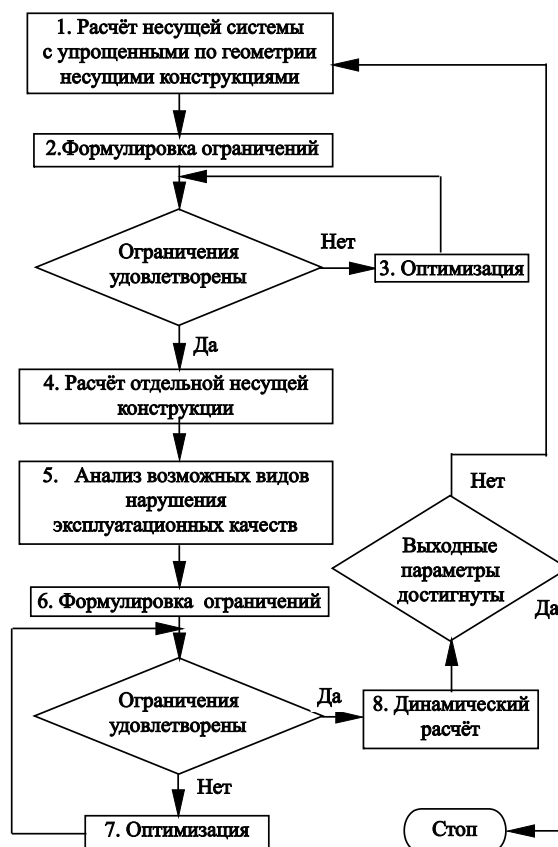


Рис. 1

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [3] на основе анализа чувствительности рассматривается оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка модели 1К540Ф1 (рис. 2). Варианты конструкций несущей системы станка оценивались по четырем показателям: масса и податливость системы в зоне обработки по координатным осям x, y, z . Используя исходные данные [3], рассмотрим проектирование несущих конструкций этого станка по предлагаемой технологии, которая использует прямые методы оптимизации [1].

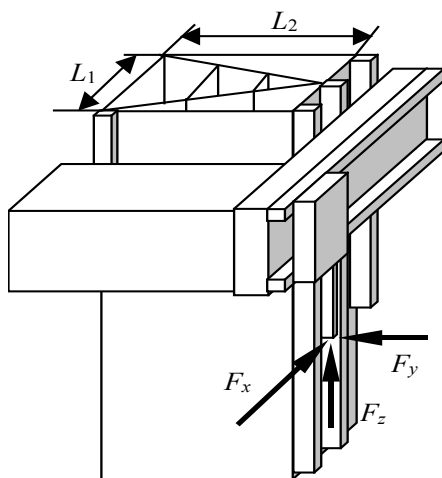


Рис. 2

На этапе расчета компоновки несущей системы представим конструкции станка в форме оболочечных коробчатых элементов (рис. 3). В соответствии с данными работы [3] принимаем: соотношение составляющих силы резания $F_x:F_y:F_z = 0,5:1,0:0,5$ при $F_y = 80$ кН, допускаемые коэффициенты податливости несущей системы $[k_x] = 1,08$ мкм/кН, $[k_y] = 5,89$ мкм/кН, $[k_z] = 1,08$ мкм/кН.

Математическая модель системы записывается в следующей форме:

минимизировать

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (1)$$

при ограничениях на податливость по осям:

$$\left. \begin{aligned} x \quad \varphi_1 &= 1 - k_x / [k_x] \geq 0, \\ y \quad \varphi_2 &= 1 - k_y / [k_y] \geq 0, \\ z \quad \varphi_3 &= 1 - k_z / [k_z] \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

За целевую функцию принимаем массу конструкций. Переменной проектирования является толщина сечения профиля. Податливость несущей системы определяется расчетом по методу конечных элементов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В табл. 1 приведен сравнительный анализ результатов расчетов несущей системы станка, полученных в настоящей работе, и базового варианта [3]. Полученные результаты показывают, что вариант 2 имеет лучшие показатели по массе и податливости k_x (лимитирует точность обработки).

Таблица 1

Результаты расчета несущей системы

Вариант	Параметр		Показатели качества			Масса т
	L_1	L_2	k_x	k_y	k_z	
	м		мкм/кН			
Базовый [3]	1,8	1,6	1,065	1,295	1,075	89,5
1	1,9	1,5	1,013	1,313	1,075	87,9
2	2,0	1,4	0,964	1,339	1,074	86,2

Далее рассматриваем расчет отдельной базовой детали – стойки, как наиболее податливого элемента станка. Выделим подконструкцию на уровне контакта консоли и стойки (рис. 3). Для этой подконструкции в табл. 2 приведено поле перемещений, полученное на первом этапе (расчет несущей системы). Поперечное сечение подконструкции соответствует базовому варианту (см. рис. 2).

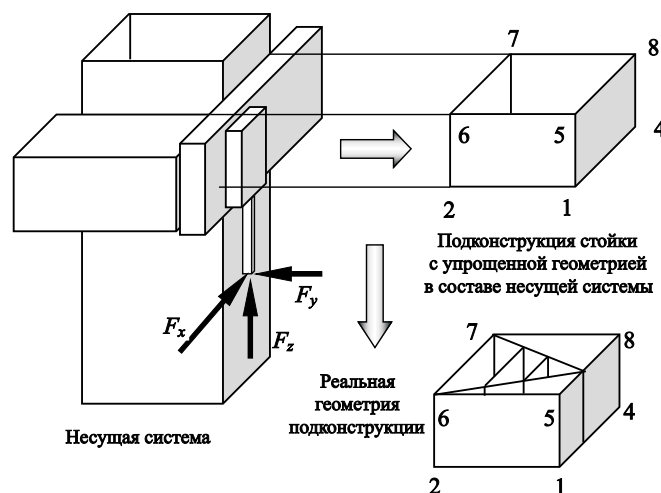


Рис. 3

Математическая модель подконструкции аналогична (1) и (2) с заменой податливости k_i на

перемещения δ_i по осям x, y, z . Переменной проектирования является толщина стенки, ребра горизонтальных пластин. Для заданных перемещений узлов подконструкции (табл. 2) получены результаты для оптимальной стойки (табл. 3). Результаты расчета качественно согласуются с результатами работы [3]. Количественные расхождения в значениях параметров вызваны неполнотой исходных данных в [3]. Так, отсутствуют данные по вылету ползуна, контактными деформациям, ряду линейных размеров. Приведенные, в частности в табл. 4 результаты расчета несущей системы станка для базового варианта стойки с разными вылетами ползуна показывают существенное влияние этого параметра на податливость станка.

Таблица 2

Поле перемещений подконструкции стойки в составе несущей системы

Узел	$\delta_x, 10^{-4}, \text{ м}$	$\delta_y, 10^{-4}, \text{ м}$	$\delta_z, 10^{-4}, \text{ м}$
1	0,1408	0,5201	0,1798
2	0,2325	0,5131	-0,0296
3	0,2175	0,3041	-0,1607
4	0,1357	0,3018	0,0405
5	0,2726	0,7821	0,1769
6	0,3867	0,7810	-0,0155
7	0,3883	0,6088	-0,1717
8	0,2711	0,6080	0,0462

Таблица 3

Параметры оптимальной стойки

Вариант	Толщина, мм			Масса, т
	стенка	ребро	пластина	
Базовый [3]	20/40	не варьировалась		32,9
Оптимальный	16,4	16,4	29,6	19,2

Таблица 4

Влияние вылета ползуна на податливость k_i несущей системы

Вылет ползуна, м	k_x	k_y	k_z
	мкМ/кН		
0,1	0,448	0,424	1,075
0,4	1,065	1,295	1,075

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность применения разработанной нами технологии проектирования оптимальных несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков к проектированию станков других типов.

Если при проектировании конструкций станка имеется возможность сформулировать целевую функцию в явном виде, то применение прямых методов оптимизации приводит к единственному оптимальному адекватному решению

Список литературы

1. Атапин В.Г. Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учётом точности, производительности, массы / В.Г. Атапин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3 – 6.
2. Атапин В.Г. Оптимизация несущей системы стола тяжелого многоцелевого станка / В.Г. Атапин // Обработка металлов. – 2006. – № 4(33). – С. 30–32.
3. Хомяков В.С. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка / В.С. Хомяков, А.И. Яцков // Станки и инструмент. – 1984. – № 5. – С. 14–16.

УДК 621.785

МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА ИЗ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА

*А.М. ГУРЬЕВ, доктор техн. наук, профессор,
А.Д. ГРЕШИЛОВ, канд. техн. наук, доцент, докторант,
Е.А. КОШЕЛЕВА, канд. техн. наук,
С.Г. ИВАНОВ, канд. техн. наук,
М.А. ГУРЬЕВ, аспирант, А.Г. ИВАНОВ, аспирант,
А.А. ДОЛГОРОВ, аспирант,
АлтГТУ, г. Барнаул*

Статья получена 31 марта 2010 г.

Гурьев А.М. – 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет,
e-mail: gurievam@mail.ru

Показано, что добавки соединений бора с титаном, бора с хромом к карбиду бора значительно увеличивают срок службы инструмента, а также повышают экономичность процесса диффузионного насыщения в сравнении с другими способами ХТО. Проведены экспериментальные исследования по боротитанированию и борохромированию при циклически изменяющихся температурах. Исследования показали, что применение термоциклирования в процессе насыщения позволило в 2 раза сократить время процесса насыщения.

Ключевые слова: сталь, химико-термическая обработка, химико-термоциклическая обработка, износостойкость, насыщение, бор, титан, хром.

It was obtained that the compounds of boron in combination with titanium, boron in combination with chromium as the admixtures to boron carbide considerably increased service life of tools. The method appeared to be more economical in comparison with other methods of chemical-thermal treatment. Experimental researches of the saturation of surfaces by boron in combination with titanium and boron in combination with chromium at cyclic-thermal treatment were made. The studies showed that the use of thermal-cyclic treatment in the saturation process allowed decreasing the duration of the process in two times.

Key words: steel, chemical-thermal treatments, cyclic-thermal treatment, wear resistance, saturation, boron, titanium, chromium.

Исследования воздействия насыщающих сред в виде обмазок при химико-термической обработке (ХТО) показали, что соединения бора с различными металлами достаточно эффективны и как поставщики бора, и как поставщики второго компонента. Использование соединений бора с титаном, бора с хромом в качестве добавки к карбиду бора значительно увеличивает срок службы инструмента, а также более экономично в сравнении с другими способами ХТО при получении покрытий с заданными свойствами [1].

Повышение работоспособности деталей узлов машин и механизмов, инструмента и технической оснастки, их надежности и долговечности обеспечивается в определенной мере оптимизацией технологии нанесения борсодержащих покрытий, а также химического состава насыщающей смеси [2–5].

Целью настоящей работы являлось установление и аналитическое описание зависимости износостойкости и толщины упрочняющего покрытия при диффузионном борохромировании и боротитанировании от соотношения

компонентов, входящих в состав насыщающей смеси.

Для описания зависимости “состав – свойство” в многокомпонентных системах более удобен метод симплексных решеток, позволяющий получать математическую модель исследуемой зависимости, ее графическую интерпретацию и не требующий большого объема экспериментов. Данный метод был применен при изучении влияния химического состава многокомпонентной насыщающей среды на толщину и износостойкость борсодержащих покрытий инструментальных сталей.

В качестве исходных компонентов насыщающей смеси (обмазки) для диффузионного борохромирования использовались феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), мелкодисперсный графит, бентонит и фторид аммония (NH_4F).

Для диффузионного боротитанирования использовались диборид титана (TiB_2), карбид бора (B_4C), мелкодисперсный графит, бентонит и фторид аммония (NH_4F).

В качестве упрочняемых деталей способом диффузионного борохромирования были использованы штамповые вставки для горячего деформирования из стали 5ХНМ. Насыщающая смесь разводилась в воде до пастообразного состояния и наносилась на упрочняемую поверхность детали слоем толщиной 4...6 мм. После сушки деталей на воздухе до получения твердой корки производили процесс насыщения в термической печи при температуре 1050 °С в течение 6 часов. Затем проводили охлаждение в масле с температуры насыщения и последующий отпуск. Износостойкость оценивали ресурсом упрочненной штамповой вставки по количеству отштампованных деталей.

Ранее проведенные исследования [1–5] показали, что зависимость свойств покрытий от состава насыщающей смеси необходимо изучать не во всей области изменения концентрации компонентов, а только на локальный участок, который ограничивается следующим содержанием веществ в смеси при диффузионном борохромировании: B_4C – 40...80 %, FeCr – 10...30 %, графита – 10...20 %, NH_4F – 5...10 %, бентонита – 2...5 %; при диффузионном боротитанировании: B_4C – 40...80 %, TiB_2 – 10...30 %, гра-

фита – 10...20 %, NH_4F – 5...10 %, бентонита – 2...5 %.

Так как изучаемая локальная область представляет собой неправильный симплекс, то для получения уравнения регрессии были составлены симплекс-решетчатые планы {5, 2} относительно псевдокомпонентов, представляющих собой полный план, и соответственно исходных компонентов насыщающей смеси. Были получены коэффициенты уравнения регрессии в координатах псевдокомпонентов, проверена адекватность реализованного плана. Для практического использования произведен перевод координат из одной аффинной системы в другую и получено уравнение регрессии в исходных координатах.

Были построены математические модели второй степени зависимости износостойкости и толщины упрочняющего покрытия от соотношения компонентов, входящих в составы насыщающих смесей. По результатам планирования экспериментов проведены контрольные опыты, которые подтвердили правильность математических моделей.

На упрочненных деталях поверхность приобрела характерную для боридных слоев текстурированность материала (рис. 1).

Проведена оптимизация химического состава и установлено оптимальное количественное содержание компонентов в насыщающей смеси при диффузионном борохромировании.

1. При содержании в насыщающей смеси в процессе борохромирования феррохрома меньше 15 % от общей массы преимущественно имеет место насыщение бором, что приводит к высокой хрупкости диффузионного слоя и, следовательно, к снижению ресурса работы. При содержании в обмазках FeCr больше 25 % преимущественно реализуется процесс хромирования, что приводит к образованию более мягких диффузионных слоев, обладающих пониженной твердостью и соответственно низким ресурсом.

2. Содержание в насыщающей смеси B_4C меньше 50 % приводит к получению диффузионных слоев с малой твердостью и снижению ресурса упрочненных деталей. При содержании карбида бора больше 60 % преимущественно

происходит насыщение бором, что приводит к высокой хрупкости получающихся слоев и выходу изделия из строя еще до начала процесса эксплуатации.

3. При содержании в обмазке мелкодисперсного графита в количестве ниже 10 % формируются упрочненные слои малой толщины. Отделение обмазки от поверхности упрочненной детали затруднено. Содержание мелкодисперсного графита больше 15 % от общей массы приводит к сползанию обмазки с упрочняемой детали и, как следствие, отсутствию упрочненного слоя.

4. При содержании в насыщающей смеси бентонита меньше 5 % возможно осыпание обмазки в процессе сушки либо сползание ее в процессе насыщения. Содержание бентонита в обмазке более 7 % дает диффузионные слои малой толщины, что способствует образованию сколов при отделении обмазки из-за ее повышенной адгезии к поверхности детали.

5. При содержании в насыщающей смеси фторида аммония в количестве меньшем 2 %, возможно получение диффузионного слоя очень малой толщины либо полное его отсутствие по причине недостаточной активности смеси. Количество фторида аммония большее 3 % повышает активность смеси и приводит к прогару обмазки, окислению поверхности детали, что снижает стойкость упрочненной детали.

Оптимальное содержание компонентов в насыщающей смеси при диффузионном боротитанировании соответствует следующим значениям:

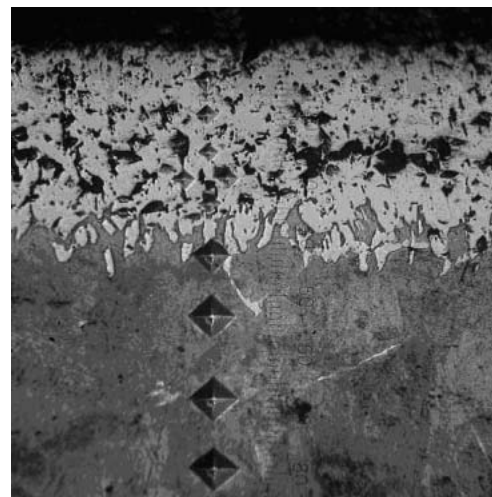
20...25 мас.% диборида титана (при данном содержании образуются упрочненные слои с наиболее высоким ресурсом);

50...60 мас.% карбида бора (при этом содержании образуются диффузионные слои с наибольшей пластичностью и износостойкостью);

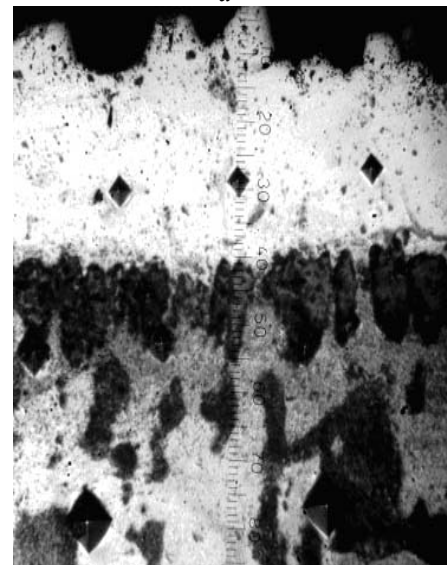
10...15 мас.% мелкодисперсного графита (обеспечивает легкое отделение обмазки и достаточную толщину диффузионных слоев);

5...7 мас.% бентонита (обеспечивает необходимую жесткость обмазке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обмазки в процессе сушки);

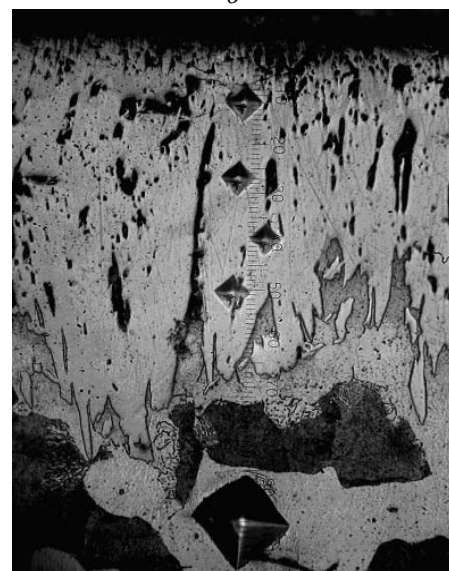
3...5 мас.% фторида аммония (обеспечивает необходимую активность насыщающей смеси, что приводит к формированию диффузионных



а



б



в

Рис. 1. Микроструктура поверхностных слоев:

а – диффузионное борохромирование стали 5XHM;

б – диффузионное боротитанирование стали 45;

в – структура борированной стали 45 (цена малого деления шкалы – 1 мкм)

слоев с оптимальными пластичностью и износостойкостью).

По результатам исследований и оптимизации химического состава разработаны новые составы насыщающих смесей и технология для комплексного поверхностного диффузионного упрочнения деталей машин и инструмента из конструкционных и инструментальных сталей [6, 7].

Испытания упрочненных по разработанной технологии штамповых вставок из стали 5ХНМ показали, что использование разработанной технологии диффузионного упрочнения позволяет повысить их стойкость от 2,5 до 4,35 раз в сравнении с ранее используемой технологией упрочнения, а также уменьшить трудоемкость процесса упрочнения в 3 раза без применения специального сложного оборудования. Сравнение результатов экспериментов, проведенных для получения аналитических зависимостей, подтверждает возможность замены в большинстве случаев стали 5ХНМ на сталь 30ХМ, упрочненную разработанным способом борхромирования.

Данное предположение обосновывается тем, что сталь 5ХНМ является штамповой сталью и чаще всего применяется для горячей штамповки. Поэтому преобладающим видом износа для данной стали является образование так называемых разгарных трещин на поверхности штампа. Боридные слои на поверхности штамповых сталей кроме высокой износостойкости обладают также свойством «залечивать» зарождающиеся разгарные трещины и таким образом значительно продлевать ресурс работы всего изделия в целом. При борировании стали 5ХНМ возможно получение диффузионного слоя толщиной до 70 мкм (слои большей толщины обладают высокой хрупкостью и поэтому неработоспособны). При борировании стали 30ХМ толщина слоя может быть увеличена до 120...150 мкм при сохранении работоспособности. В итоге значения износостойкости борированной стали 30ХМ находятся в соотношении с износостойкостью бориро-

ванной и неборированной стали 5ХНМ как $(0,95...1,3):1:(0,37...0,54)$. В качестве эталона здесь принята сталь 5ХНМ, подвергнутая за-калке и отпуску (рис. 2).

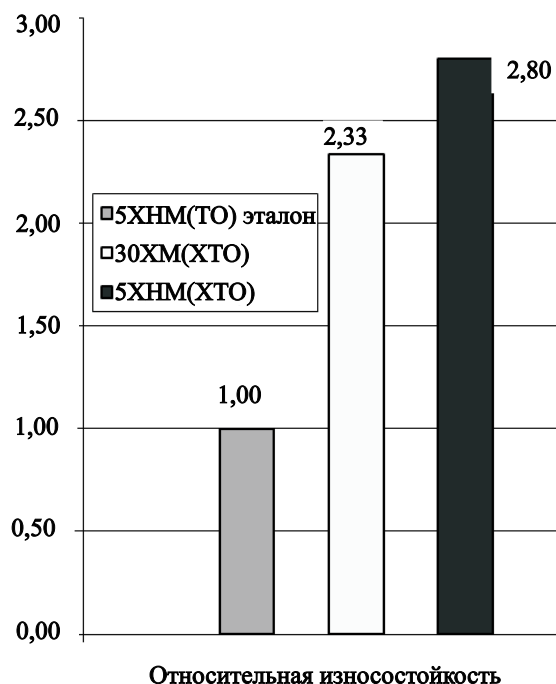


Рис. 2. Износостойкость борхромированных сталей 5ХНМ и 30ХМ относительно стали 5ХНМ, подвергнутой закалке и низкому отпуску (5ХНМ (ТО) эталон)

Себестоимость изделия из стали 30ХМ, подвергнутого борированию, равноценна себестоимости неборированного изделия из стали 5ХНМ. Борирование удорожает стоимость изделия еще на 30 %. Таким образом, в некоторых случаях возможна замена стали 5ХНМ на более дешевую сталь 30ХМ, упрочненную борированием. При этом износостойкость может быть повышена в 1,15–2,34 раза при уменьшении затрат на изготовление на 12...25 %.

Повышение износостойкости упрочненных деталей в значительной степени обусловлено снижением хрупкости диффузионных слоев. Это достигается отсутствием необходимости в предварительной цементации при насыщении поверхностей стальных деталей одновременно бором и хромом либо бором и титаном и увеличением толщины получаемых диффузионных слоев до 75...95 мкм (в зависимости от химиче-

ского состава сталей), образованных при насыщении из обмазки, содержащей феррохром (диборид титана), мелкодисперсный графит, бентонит, фторид аммония.

Повышение экономичности процесса упрочнения при диффузионном борохромировании и боротитанировании обусловлено, во-первых, тем, что процесс упрочнения осуществляется путем использования термических печей любого принципа действия, имеющих на каждом металлообрабатывающем предприятии, во-вторых, отсутствия необходимости применения предварительной цементации, связанной с использованием дорогостоящего муфеля, изготавливаемого из дорогостоящих высоколегированных сталей, в-третьих, многократного использования насыщающей обмазки.

Процессы многокомпонентного насыщения позволяют сформировать многофазную структуру поверхностного слоя, обладающего комплексом полезных свойств. Более того, химико-термической обработкой можно получать такое сочетание свойств упрочненного изделия, которое другими методами получить невозможно. В этом случае ХТО можно рассматривать не как определенную операцию изготовления детали, а как метод получения принципиально нового конструкционного материала. Многокомпонентное насыщение разными элементами или насыщение ими наружной и внутренней поверхности изделия дает возможность создавать многослойные композиционные материалы с уникальными свойствами.

Список литературы

1. *Гурьев А.М.* Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, С.Г. Иванов, О.А. Власова, И.А. Гармаева, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев // *Успехи современного естествознания.* - 2007. - № 10. - С. 89–91.
2. *Иванов С.Г.* Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, Е.А. Кошелева, О.А. Власова, М.А. Гурьев // *Ползуновский альманах.* - 2008. - № 3. - С. 53–54.
3. *Гурьев А.М.* Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, С.Г. Иванов, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев, С.А. Земляков // *Ползуновский альманах.* - 2008. - № 3. - С. 10–16.
4. *Кошелева Е.А.* Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном бороировании инструментальных сталей / Е.А. Кошелева, А.М. Гурьев // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* - 2009 - № 5 - С. 76–77.
5. *Гурьев А.М.* Совершенствование технологии химико-термической обработки инструментальных сталей / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, О.А. Власова // *Обработка металлов.* - 2009. - № 1. - С. 14–15.
6. *Способ* упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей: пат. 2345175 Рос. Федерация: / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, Б.Д. Лыгденов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев - № 2007112368/02: заявл. 03.04.2007: опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.
7. *Способ* упрочнения деталей из штамповых сталей: пат. 2360031 Рос. Федерация: / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев. - № 2007127587/02: заявл. 18.07.2007: опубл. 27.06.2009. Бюл. № 18.

УДК 621.791

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СТЫКОВОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЗАГОТОВОК ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

*А.А. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, доцент,
А.А. БАТАЕВ, доктор техн. наук, профессор,
А.И. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент,
В.Г. БУРОВ, канд. техн. наук, профессор,
НГТУ, г. Новосибирск*

Статья получена 06 апреля 2010 г.

Никулина А.А. – 630092, Новосибирск,
Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: aelita27@mail.ru

Основным объектом исследований являлись соединения элементов железнодорожных стрелочных переводов, полученные методом стыковой контактной сварки. Проведены структурные исследования сварных швов на различных масштабных уровнях, определена микротвердость структурных составляющих. Анализ результатов выявил наличие высокопрочных структур в переходной зоне сварного шва, которые являются главной причиной образования хрупких трещин при эксплуатации стрелочных переводов.

Ключевые слова: разнородные стали, сварка, структура.

In the article the welded joints of railway element were studied. It was found that the main reason of destruction of the switches is martensite structure formed at welding. Martensite is the brittle, high-strength and high-hardness structure, thus has low plasticity. It causes high level of internal stresses in the welded joint, which give rise to cracking and further final destruction.

Key words: heterogeneous steels, welding, structure.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности сварки разнородных сталей связаны с различным структурным состоянием и химическим составом соединяемых деталей. При сварке сталей аустенитного и перлитного класса следует учитывать также различные условия охлаждения после формирования сварного шва.

В связи с ростом уровня механической нагрузки, прикладываемой к рельсам, и необходимостью существенного повышения скорости движения поездов резко возрастают требования к надежности важнейших элементов железнодорожного пути, в том числе к стрелочным переводам. Технология их изготовления должна обеспечивать высокий уровень прочностных свойств и трещиностойкости применяемых материалов.

В значительной степени это требование относится к сварным швам современных стрелочных переводов. В процессе получения железнодорожных крестовин (рис. 1) по технологии, предложенной авторами патента [1], образуется два шва: между сталями 12Х18Н10Т и Э76 (рельс), а также между сталями 12Х18Н10Т и 110Г13Л (крестовина). Комбинированная конструкция, включающая крестовину и рельсовые окончания, является достаточно сложной с точки зрения получения качественного соединения, так как сталь Гадфильда (110Г13Л) относится к трудносвариваемым. После сварки эта сталь должна ускоренно охлаждаться с целью исключения формирования карбидной сетки по границам аустенитных зерен. Для рельсовой же стали необходимо охлаждение



Рис. 1. Железнодорожная крестовина

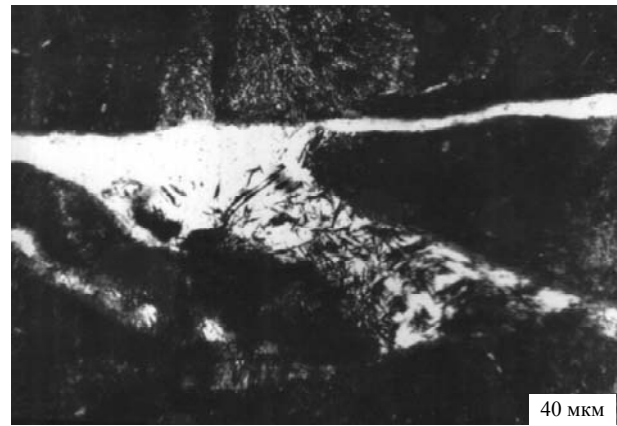
с умеренными скоростями. В значительной степени проблема решается путем применения промежуточной вставки из стали 12Х18Н10Т [2-4]. Однако при использовании такого перехода не исключается возможность образования трещин в сварных швах. В наибольшей степени эта опасность характерна для шва между рельсовыми окончаниями и промежуточными вставками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным объектом исследования в работе являлись сварные крестовины производства Новосибирского стрелочного завода (НСЗ). Образцы были вырезаны в зоне сварных швов и включали в себя все три стали. Структурные исследования образцов проводили на световом микроскопе AxioObserver A1m, растровом электронном микроскопе Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act и просвечивающем электронном микроскопе FEI Tecnaï 20 TWIN. ДюрOMETрические исследования выполняли на микротвердомере ПМТ-3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования [4] позволяют говорить о причинах разрушения сварного соединения между рельсовой и хромоникелевой сталями, которые заключаются в формировании в переходной зоне сварного шва высокопрочных



а

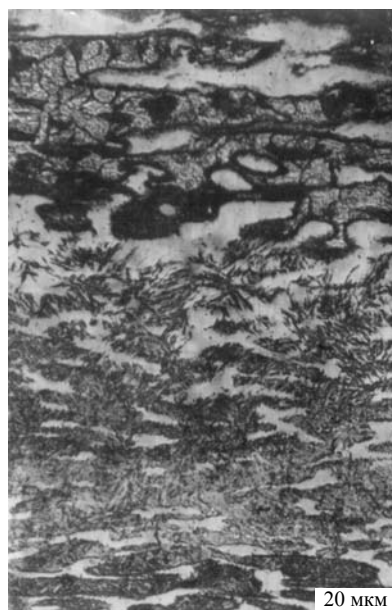


б

Рис. 2. Закаленные области в переходной зоне сварного шва со стороны рельсовой стали

структур за счет диффузии присутствующих в сплавах элементов из более обогащенных в соседние обедненные области, а также за счет перемешивания свариваемых материалов. Основную роль в формировании неблагоприятной структуры играет диффузия углерода из рельсовой стали и хрома из стали 12Х18Н10Т в зону сварного шва. За счет этого в рельсовой стали образуются области, насыщенные хромом, а в хромоникелевой – углеродом, что приводит к появлению мартенситной структуры даже при медленном охлаждении. На рис. 2 представлены закаленные зоны, которые сформировались со стороны рельсовой стали. Проведенные исследования показали, что микротвердость данных зон составляет 4500...5000 МПа, в то время как уровень микротвердости основного материала равен 2000...2500 МПа. Мартенситная структура со стороны хромоникелевой стали (рис. 3) также характеризуется высоким уровнем микротвердости (до 7000 МПа).

Анализ фольг, приготовленных из материала переходной зоны «сталь Э76 – сталь 12Х18Н10», на просвечивающем микроскопе свидетельствует о формировании сложной структуры.


a

б

Рис. 3. Высокопрочные структуры, сформированные в сварном шве со стороны хромоникелевой стали

Наиболее часто встречаются микрообъемы мартенсита и перлита (рис. 4, *a, б*), однако в структуре сварного шва зафиксированы также аустенит и бейнит (рис. 4, *в, г*). Выделение перлита обычно происходит в пластинчатой форме и реже – в глобулярной. Во многих случаях пластины цементита изогнуты по винтовой линии (рис. 4, *д*), что обусловлено, вероятно, высокими степенями пластической деформации при формировании сварного соединения. При охлаждении аустенита образуется мартенсит как двойникованного, так и реечного типа (рис. 4, *е*). Наличие мартенсита обоих типов, очевидно, обусловлено недостаточным временем для завершения диффузионных процессов и образования однородного по химическому составу аустенита.

Сложная структура переходной зоны сварного шва между рельсовым окончанием и хромоникелевой вставкой обуславливает возможность проявления различных механизмов разрушения при динамической нагрузке. Анализ изломов на растровом электронном микроскопе показал, что чаще всего образцы разрушались по одной из сталей – хромоникелевой (рис. 5, *a*) или рельсовой (рис. 5, *б*). В некоторых случаях реализуется сложный механизм разрушения по двум сталям (рис. 5, *в*), что подтверждается результатами микрорентгеноспектрального анализа (рис. 6). В случае прохождения трещины по рельсовой стали наблюдаются участки вязкого и хрупкого разрушения (рис. 5, *г*), что также свидетельствует о наличии высокопрочных закаленных зон.


a

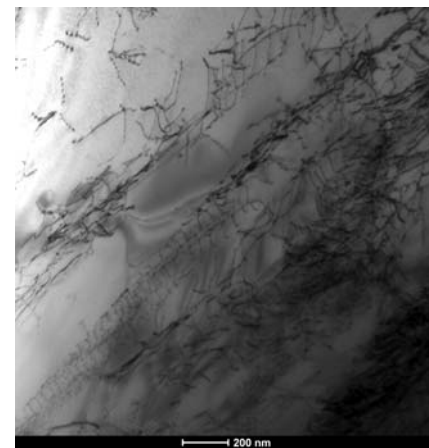
б

в

Рис. 4. Тонкое строение сварного соединения между рельсовой и хромоникелевой сталями (см. также с. 27)

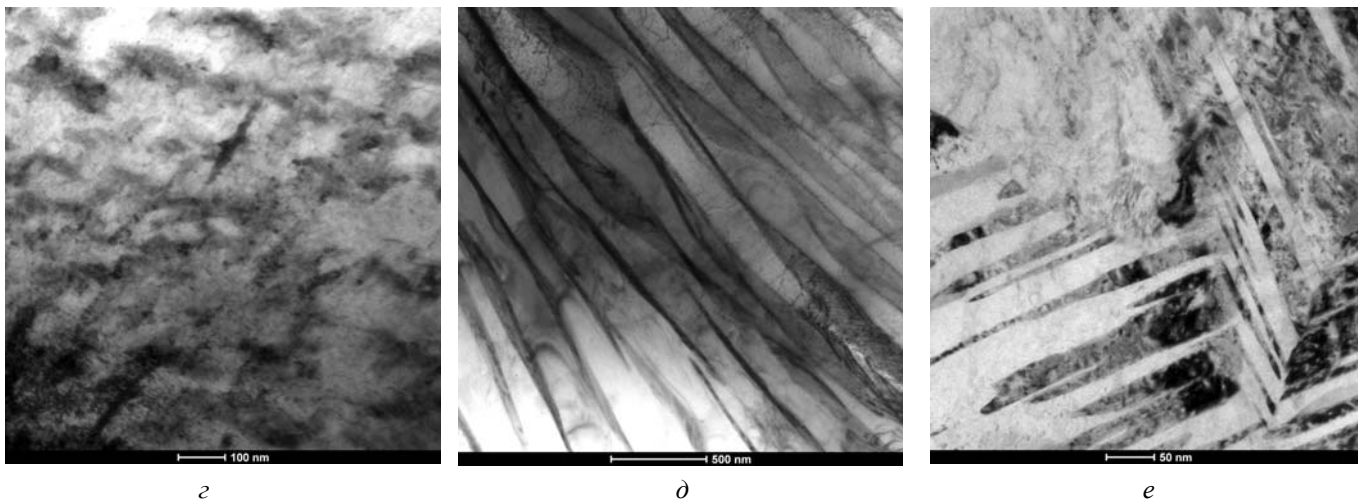
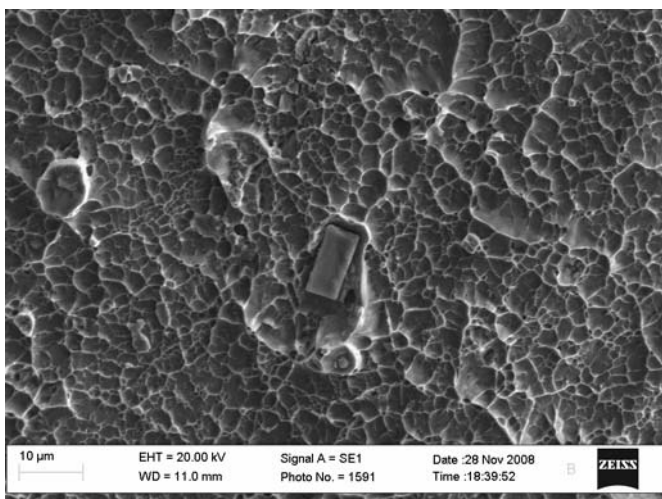
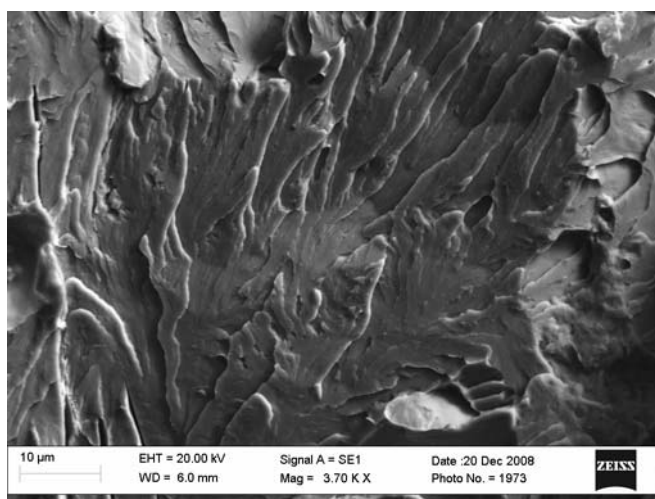


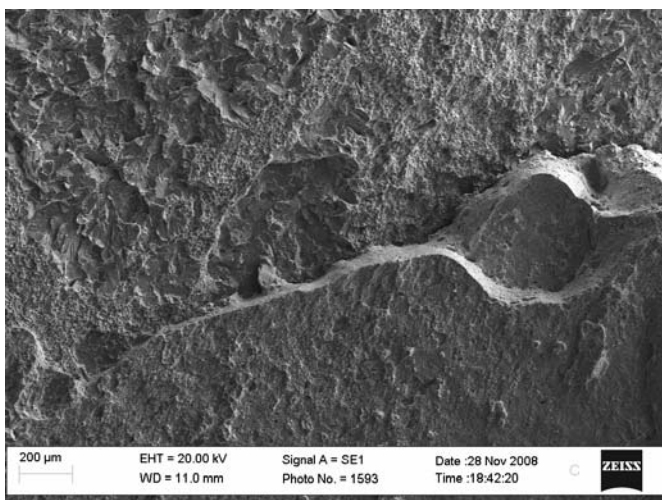
Рис. 4. Окончание



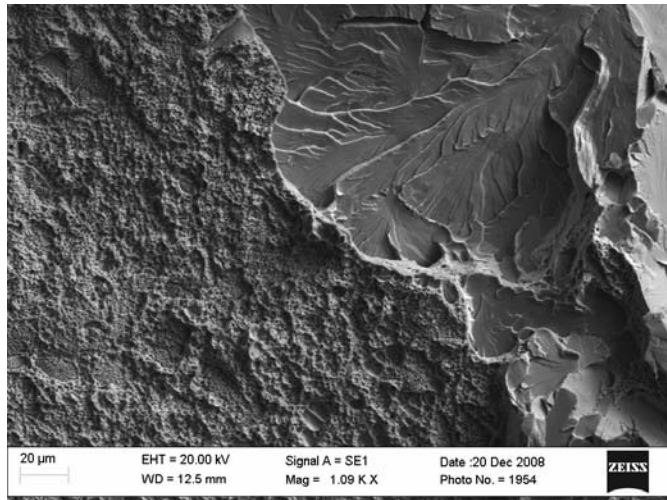
а



б

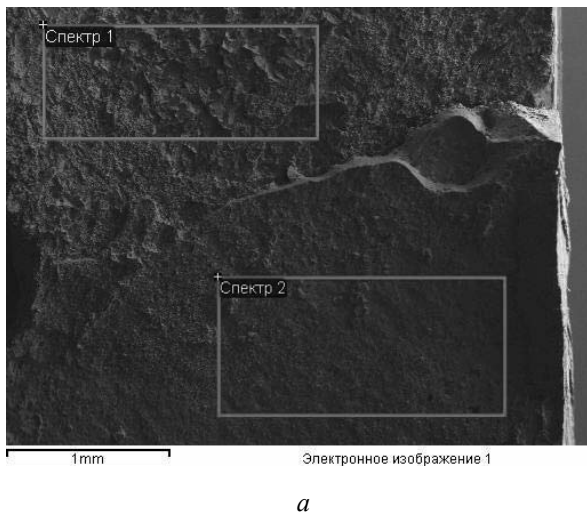


в

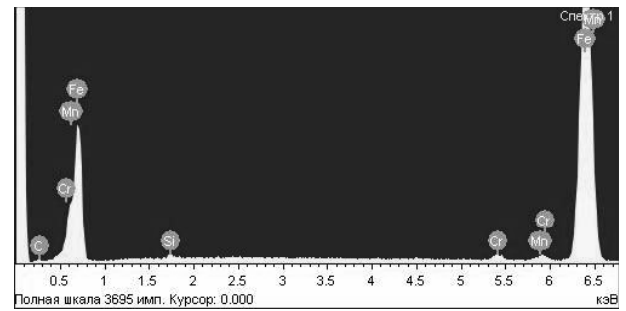


г

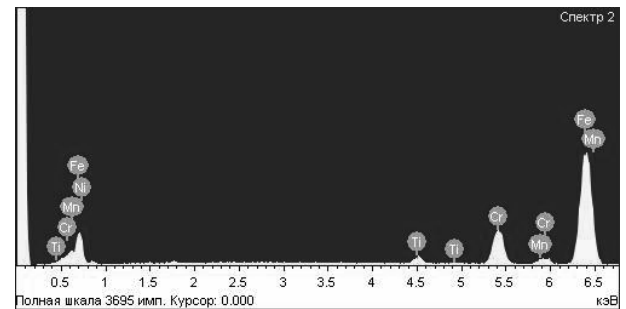
Рис. 5. Поверхности разрушения сварного соединения между рельсовой и хромоникелевой сталями



а



б



в

Рис. 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности разрушения сварного соединения:
а – электронное изображение; б – спектр 1; в – спектр 2

Проведенные исследования показали, что при сварке литых сердечников и рельсовых окончаний с использованием промежуточной хромоникелевой вставки мартенсит образуется практически всегда. Особенностью этой структуры в сварных швах и прилегающих к ним зон является различный уровень твердости, обусловленный различием химического состава микрообъемов аустенита, из которого он образуется. Чем выше твердость мартенсита и выше степень его неоднородности, тем опаснее его присутствие в сварном шве. Экспериментально установлено, что приемлемый уровень микротвердости мартенсита, обеспечивающий достаточную надежность сварного шва, составляет $HV = 3500 \dots 4000$ МПа.

Список литературы

1. Патент 1819305 СССР, МКИ⁵ E01B11/44. Способ соединения деталей стрелки / Йоханесс Блумауер; заявитель и патентообладатель Фост Альпине Айзенбанзюстеме ГмбХ (АТ). - № 5001090/11; заявл. 19.07.91; опубл. 30.05.93, Бюл. № 20. – 2 с.
2. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы / И.З. Генкин // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 12. – С. 14 – 20.
3. Никитин А.С. Контактная стыковая сварка стали Гадфильда с рельсовой сталью / А.С. Никитин // Сварочное производство. – 2000. – № 9. – С. 38 – 40.
4. Особенности хрупкого разрушения сварных соединений разнородных сталей / А.А. Бивалькевич, А.А. Батаев, В.Г. Буров, В.А. Батаев, С.В. Хлебников // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2004. – № 2. – С. 44 – 46.

УДК 621.923

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ*

С.Г. БИШУТИН, доктор техн. наук, профессор
Брянский ГТУ, г. Брянск

Статья поступила 15 апреля 2010 г.

241035, г. Брянск, б-р им. 50-летия, д.7,
Брянский государственный технический университет,
trt@tu-bryansk.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования тонких приповерхностных структур конструкционных материалов при шлифовании. Описаны особенности, сопровождающие формирование неравновесных состояний приповерхностных слоев в ходе абразивной обработки.

Ключевые слова: абразивная обработка материалов; тонкие приповерхностные структуры; структурно-фазовое состояние, поверхностный слой.

Results of experimental researches of formation of thin superficial structures of constructional materials are submitted at grinding. The features accompanying formation of nonequilibrium conditions of superficial layers during abrasive processing are described.

Key words: abrasive processing of materials; thin superficial structures; a structural - phase condition, a superficial layer.

Ресурс большинства деталей машин определяется в первую очередь состоянием их поверхностных слоев. Выявленное разнообразие структур и фазового состава приповерхностных слоев железоуглеродистых и твердых сплавов после абразивной обработки [1-3] обусловлено, прежде всего, различными уровнями распределения легирующих элементов, термического и силового воздействий. Последнее является основным условием формирования при шлифовании в поверхностном слое неравновесного структурно-фазового состояния материала. Можно констатировать, что в результате сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения материала при шлифовании (в отдельных случаях более 5000 °С/с [1]) формируется микро- и наноструктурированный поверхностный слой дисперсного строения, в значительной степени определяющий ресурс детали.

Таким образом, изучение особенностей формирования тонких приповерхностных структур в различных условиях абразивной обработки позволит повысить долговечность деталей машин на финишных этапах их механической обработки.

Показательной иллюстрацией формирования неравновесного состояния материала при шлифовании являются микро- и наноструктуры среднеуглеродистой стали при доминировании силового воздействия (рис. 1).

При предварительном шлифовании или абразивной обработке крупнозернистыми брусками (зернистость 25...63) с открытой структурой приповерхностные зерна значительно вытягиваются вдоль вектора D_r главного движения резания (рис. 1, а), нередко образуя сильно дефрагментированную субструктуру из ансамблей зеренных блоков (рис. 1, б). Размер блока составляет

* Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 2.1.2/4914 по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)».

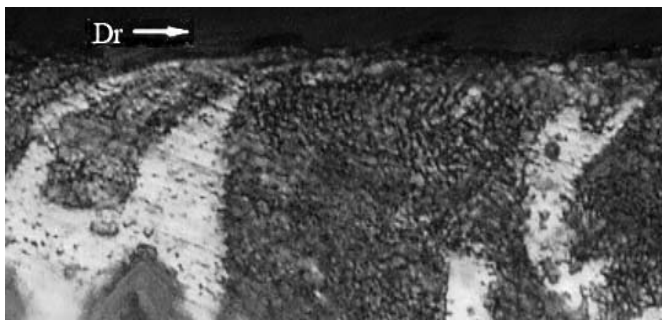
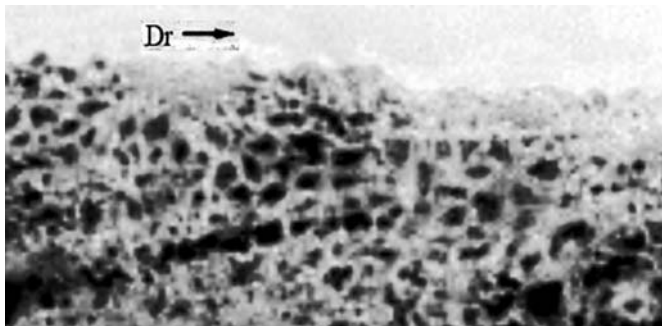

a

б

Рис. 1. Приповерхностный слой стали:
a – микроструктура ($\times 800$); *б* – наноструктура ($\times 7000$, инвертированный цвет)

от 0,1 до 1,0 мкм. Такая обработка характеризуется накоплением напряжений и деформаций, вызывающих дробление приповерхностных структур и генерацию большого количества дефектов с очень высокой плотностью дислокаций (до $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Поверхностные слои при этом характеризуются неравномерным распределением дефектов по их глубине (рис. 2).

Так, в зоне А материал находится в диспергированном состоянии – в виде мелких блоков (субзерен) с высокоугловыми границами и максимальной плотностью дислокаций. Зона Б непосредственно контактирует с исходной структурой.

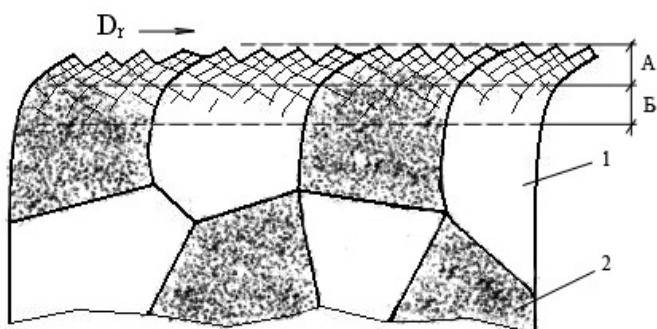


Рис. 2. Принципиальная схема поверхностного слоя среднеуглеродистой стали после бесприжогового шлифования:

1 – ферритное зерно; 2 – перлитное зерно

рой материала. В зернах этой зоны наблюдаются локальные дислокационные сгущения, не приводящие к значительной разориентации отдельных объемов кристаллов.

При переходе на чистовые и тонкие режимы шлифования материалов мелкозернистыми (зернистость 16 и менее) и «острыми» кругами с обильным охлаждением (во избежание доминирования температурного фактора) поверхностные зерна не вытягиваются вдоль вектора главного движения резания, а дробятся на крупные зеренные блоки. Размер этих блоков в 7–25 раз меньше размера исходного зерна, причем более мелкие блоки расположены ближе к поверхности (рис. 3).

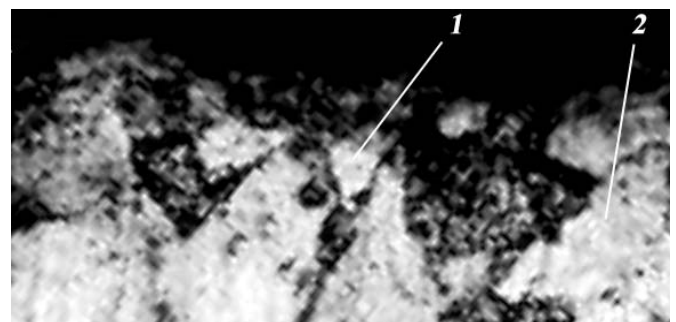


Рис.3. Приповерхностный слой ($\times 3000$) среднеуглеродистой стали после чистового шлифования:

1 – зеренный блок; 2 – исходное зерно

Усиление температурного фактора при абразивной обработке (например, вследствие повышения производительности шлифования) приводит к формированию поверхностных слоев с сильно измененным структурно-фазовым состоянием, которые хорошо видны под микроскопом в виде темных участков после травления нителем микрошлифов исследуемых сталей. При этом зачастую происходят фазовые превращения, связанные с распадом исходных приповерхностных метастабильных структур, например мартенситных, и формированием новых структур в ходе вторичной закалки. Толщина поверхностного слоя в этих условиях может достигать нескольких десятых миллиметра и зависит в основном от глубины проникновения в материал температур выше критических точек данного железоуглеродистого сплава. Следует отметить, что значения критических точек в значительной степени определяются деформацией структуры, скоростью ее нагрева и охлаждения в ходе абразивной обработки.

В высокоуглеродистых сталях, особо восприимчивых к термическому воздействию, зна-

чительное повышение контактной температуры может вызвать появление микротрещин и даже отслаивание фрагментов приповерхностных слоев (рис. 4), что крайне негативно сказывается на эксплуатационных показателях детали, в частности, на интенсивности изнашивания, поскольку значительно облегчается процесс отделения материала с поверхности трения.



Рис. 4. Отслоение приповерхностного слоя вследствие высоких контактных температур ($\times 500$)

Следует отметить, что чрезмерное увеличение времени выхаживания или затупление вершин зерен электрокорундовых инструментов приводило также к образованию микро- и субмикротрещин в поверхностном слое.

Снижение термического воздействия на обрабатываемый материал (сталь 9ХС) путем тщательной правки круга, уменьшения глубины шлифования (до 5...6 мкм) и повышения скорости перемещения заготовки (до 25...30 м/мин) способствовало достижению материалом более равновесного структурно-фазового состояния с интенсивным дроблением приповерхностных зерен на блоки размером 70...500 нм.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Абразивная обработка, обеспечивая периодический сверхскоростной нагрев материала до высоких температур и столь же высокоскоростное охлаждение, приводит к формированию в поверхностном слое неравновесного структурно-фазового состояния. Последнее можно регулировать в широких пределах вплоть до диспергирования приповерхностных зерен до наноструктурного состояния и с упрочнением железуголеродистого сплава.

2. Управлять состоянием приповерхностного слоя без негативного влияния температурного фактора можно путем увеличения числа выхаживающих ходов круга, скорости вращения (перемещения) заготовки и расхода смазочно-охлаждающей жидкости, применения высокопористых и прерывистых шлифовальных кругов, а также путем перехода на более грубые режимы правки или применения непрерывных способов правки круга.

3. Шлифование закаленной и нормализованной стали «острыми» кругами на тонких режимах или лепестковыми кругами способствует формированию более однородной и мелкодисперсной (вследствие дробления зерен на блоки) структуры приповерхностного слоя. Размер зеренных блоков зависит от условий обработки и колеблется в пределах от 50 до 1000 нм.

При шлифовании «острыми» электрокорундовыми кругами высокоуглеродистых закаленных сталей с производительностью менее 2 см³/мин удается получить сильно измельченную субмикроструктуру без существенных изменений вследствие термического воздействия.

4. При шлифовании на невысоких скоростях резания или абразивной обработке крупнозернистыми инструментами (брусками) с открытой структурой приповерхностные зерна значительно вытягиваются вдоль вектора главного движения резания с образованием развитой деформационной текстуры. Такая обработка характеризуется высокой анизотропией свойств поверхностного слоя, накоплением напряжений и деформаций, вызывающих дробление приповерхностных структур и генерацию большого количества дефектов.

Проведенные исследования позволяют целенаправленно выбирать режимы и условия абразивной обработки поверхностей, повышающие долговечность деталей машин.

Список литературы

1. Бишутин С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
2. Полянчиков Ю.Н. Анализ и оптимизация операции шлифования/ Ю.Н. Полянчиков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 270 с.
3. Янюшкин А.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании/ А.С. Янюшкин, В.С. Шоркин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 230 с.

УДК 539.374.2

ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНА В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ РАСКАТКИ ТРУБ*

*И.А. БАТАЕВ, аспирант, Е.Б. МАКАРОВА, аспирант,
А.И. ПОПЕЛЮХ, канд. техн. наук, доцент,
Т.В. ЖУРАВИНА, аспирант, Д.В. ПАВЛЮКОВА, аспирант,
А.А. РУКТУЕВ, студент, НГТУ, г. Новосибирск,
З.Б. БАТАЕВА, канд. техн. наук, доцент,
НГАВТ, г. Новосибирск*

Статья получена 12 мая 2010 г.

Макарова Е.Б. – 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: geni-makk@mail.ru

Изучены структура и механические свойства раскатанных титановых труб. Установлено, что раскатка позволяет формировать трубы без потери сплошности со степенью до 65 %. Определено, что раскатка труб обеспечивает формирование однородной структуры с уровнем микротвердости, постоянным по всей толщине стенки. Лучшее сочетание показателей прочности и пластичности обеспечивает раскатка с деформацией на 53...55 %. При обжатии труб на 53 % предел прочности возрос от 387 до 703 МПа.

Ключевые слова: интенсивная деформация материала, титан, раскатка, деформационное упрочнение.

The structure and mechanical properties of plugged titanium tubes have been studied. It was determined that plugging provides a formation of tubes without any continuity loss with deformation degree of about 65%. Plugging was found to be an appropriate way of forming a homogeneous structure with constant micro hardness rate over the entire wall thickness. Plugging with deformation degree equal to 53...55% provides the best combination of strength and plasticity. Under a tube plugging equal to 53%, ultimate strength increases from 387 to 705 MPa.

Key words: severe plastic deformation, titanium, rolling, cold working.

Для заготовок из нелегированного титана характерны высокие показатели пластических свойств, ударной вязкости, коррозионной стойкости. В то же время в отличие от титановых сплавов чистый титан имеет весьма низкий уровень прочностных свойств, что во многих случаях ограничивает его применение в качестве конструкционного материала.

Специалистами выполняются многочисленные исследования, ориентированные на разра-

ботку эффективных технологических процессов упрочнения титана, основанных на интенсивной пластической деформации заготовок [1–4]. Специалистами Уфимского авиационного технического университета получены титановые прутки диаметром 6 мм, предел прочности которых превышает 1000 МПа. Такой уровень прочностных свойств характерен для титановых сплавов, применяемых для изготовления конструкций ответственного назначения. Обладая высоким уров-

* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

нем предела текучести и предела прочности, упрочненные методами пластической деформации заготовки из нелегированного титана имеют ряд характерных недостатков. Один из них, имеющий принципиальное значение, заключается в низком уровне показателей пластичности и ударной вязкости. Кроме того, для технологических процессов, обеспечивающих перевод титана в высокопрочное состояние, характерна достаточно низкая производительность. Отмеченные особенности сдерживают широкое применение методов упрочнения титана на практике и инициируют работы по применению иных подходов к решению отмеченной проблемы.

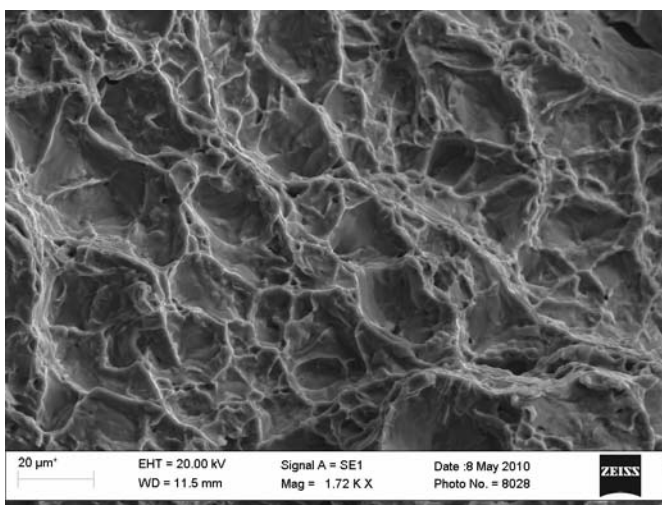
Цель данной работы заключалась в изучении возможности применения для упрочнения нелегированного титана технологии ротационной раскатки заготовок трубчатой формы. В качестве технологического оборудования использовали стан типа «Ляйфельд», функцию инструмента на котором выполняли три раскатных ролика диаметром 160 мм из закаленной и низкоотпущенной стали 9ХС.

Для раскатки использовали трубы из титана ВТ1-0. Внутренний диаметр заготовок составлял 50 мм, наружный 52 мм, длина 300 мм. Раскатка труб выполнялась в холодном состоянии. Во избежание перегрева заготовки в процессе деформации обильно поливались охлаждающей жидкостью. Раскатка заготовок осуществлялась за один проход. Степень обжатия образцов ε составляла 25, 53, 61, 64 %.

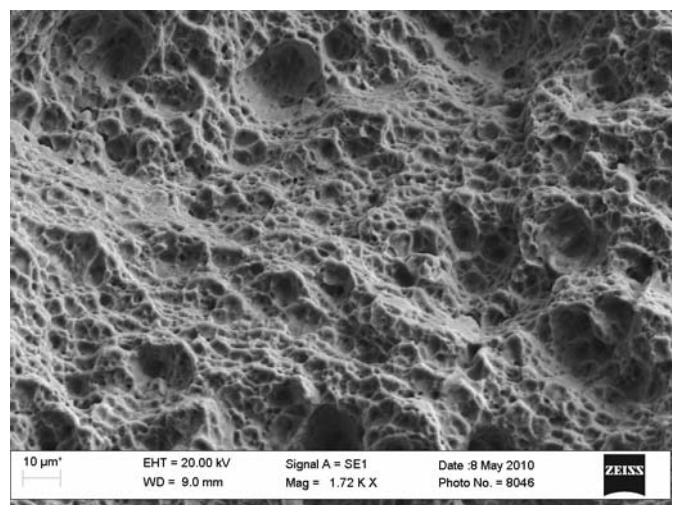
Структурные исследования материалов выполняли с применением металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m. Для выявления структуры металла на металлографических шлифах использовали травитель следующего химического состава: 10 мл 2 %-го водного раствора азотной кислоты и 10 мл 2 %-го водного раствора плавиковой кислоты. Для оценки микротвердости образцов в исходном и деформированном состоянии использовали прибор типа Wolpert Group V2D138. Прочностные свойства материалов оценивали на измерительном комплексе Instron 3369 в условиях растяжения образцов. Использовали образцы в форме колец и узких лопаток, вырезанных из стенок труб в осевом направлении.

Экспериментально установлено, что при обжатии титановых труб на 25...65 % образования макротрещин не происходит. Это свидетельствует о том, что напряженное состояние, реализующееся в процессе холодной деформации материала, является благоприятным, способствующим сохранению его сплошности.

Поверхности разрушенных в процессе растяжения образцов были исследованы на растровом электронном микроскопе. Анализ полученных фрактограмм свидетельствует о том, что все образцы, в том числе исходные и деформированные с различными степенями, были разрушены с проявлением признаков вязкого излома (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Поверхности образцов, разрушенных в процессе растяжения:
а – исходные образцы; б – образцы, деформированные со степенью 64 %

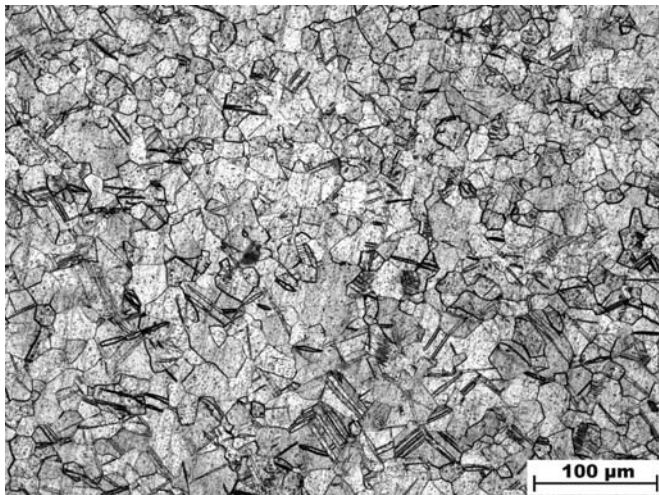
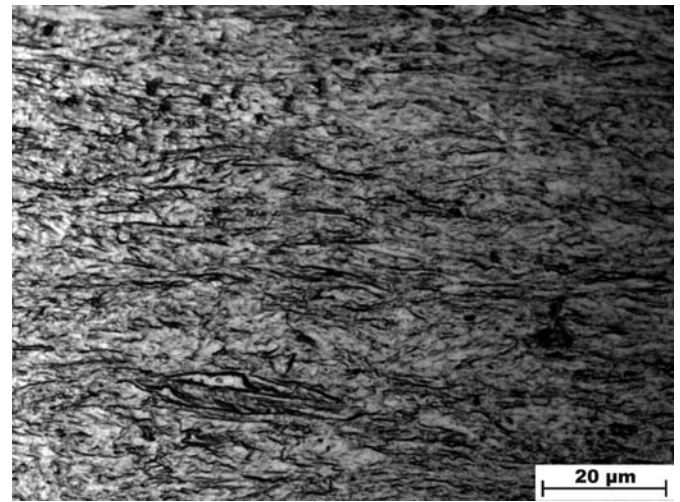

a

б

Рис. 2. Структура титана:

a – в исходном состоянии; *б* – после деформации со степенью 53 %

На всех зафиксированных электронно-микроскопических снимках наблюдаются характерные для вязкого разрушения чашки. В то же время следует отметить, что чашки максимального размера образуются при растяжении исходных недеформированных титановых заготовок (рис. 1, *a*). Раскатка труб со степенью 25 % приводит к формированию чашек меньшего размера. После обжата со степенью 53 % чашки становятся менее выраженными, их размер уменьшается еще в большей степени. Распределение чашек по размерам становится более однородным (рис. 1, *б*). Дальнейшее увеличение степени деформации трубчатых заготовок к существенному изменению характера разрушения материала не приводит.

Структура титана, зафиксированная в процессе металлографических исследований, представлена на рис. 2. В исходном состоянии методом химического травления выявлены равноосные зерна α -титана, средний размер которых составляет 23 мкм. Холодная пластическая деформация приводит к характерному преобразованию структуры материала. Под действием валков зерна вытягиваются. Наиболее заметна строчечность деформационного происхождения в поперечном направлении (перпендикулярном оси трубы) (рис. 2, *б*).

С целью оценки степени упрочнения материала по толщине трубы были проведены измерения микротвердости. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что под действием валков титан упрочняется равномерно по всей толщине трубы. Явно выраженного поверхностного упрочнения деформированных труб не обнаружено.

Результаты прочностных испытаний кольцевых образцов представлены на рис. 3. Максимальный уровень предела прочности соответствует обжатию труб со степенью 64 %. Однако такая обработка приводит к значительному снижению показателей пластичности образцов. Лучшее сочетание прочностных свойств и относительного удлинения зафиксировано на образцах, деформированных со степенью 53...55 %. Полученные по такой технологии заготовки представ-

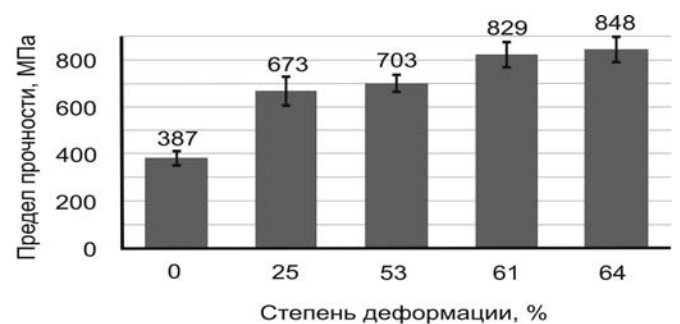


Рис. 3. Предел прочности титановых труб, определенный на заготовках кольцевого типа

ляют интерес для реализации процесса формирования слоистых композиционных материалов сваркой взрывом.

ВЫВОДЫ

1. В процессе ротационной раскатки реализуется напряженное состояние, позволяющее за один проход без разрушения деформировать титановые трубы с обжатием не менее 65 %.

2. Ротационная раскатка труб обеспечивает формирование однородной структуры с уровнем микротвердости, постоянным по всей толщине стенки.

3. Анализ результатов испытания образцов на растяжение свидетельствует о том, что лучшее сочетание показателей прочности и пластичности обеспечивает раскатка с обжатием труб на 53...55 %.

4. Ротационная раскатка титановых труб с обжатием 53 % обеспечивает почти двукратный рост предела прочности (от 387 до 703 МПа). При этом величина относительного удлинения составляет не менее 10 %.

5. Титановые заготовки, полученные методом ротационной раскатки труб, могут быть использованы для получения слоистых композиционных материалов методом сварки взрывом.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства. – М.: ИКЦ «Академнига», 2007. – 398 с.

3. Дударев Е.Ф. Деформационное поведение и механические свойства ультрамелкозернистого титана, полученного методом равноканального углового прессования / Е.Ф. Дударев, Г.П. Грабовецкая, Ю.Р. Колобов, Г.П. Бакач, О.А. Кашин, Ю.Т. Жу // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 87–95.

4. Салищев Г.А. Формирование субмикросталлической структуры в титане при пластической деформации и ее влияние на механическое поведение / Г.А. Салищев, В.Р. Валиахметов, Р.М. Галеев, С.П. Малышева // *Металлы*. – 1996. – № 4. – С. 86–91.

УДК 621.73.073: 621.735.073

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

*А.В. КУТЫШКИН, доктор техн. наук, профессор,
НГТУ, г. Новосибирск,*

*А.В. ШАШОК, канд. техн. наук, доцент,
Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алт ГТУ,
г. Рубцовск Алтайского края*

Статья получена 21 апреля 2010 г.

Кутышкин А.В. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
avk_200761@mail.ru

В статье рассматривается использование показателя надежности функционирования штамповой оснастки (вероятности безотказной работы) при принятии организационно-технических решений, связанных с заменой штамповых сталей, используемых для ее рабочих элементов, и определением размеров партий заготовок, запускаемых в производство.

Ключевые слова: надежность технологических систем, штамповая оснастка, эксплуатационные отказы, оптимизация эксплуатации штамповой оснастки.

In a paper use of an index of reliability of functioning stamping equipments (probability of non-failure operation) is considered at acceptance of the organizational-technical decisions linked with substitution of steels, used for its working elements, and definition of the sizes of batches of preforms started in manufacture.

Key words: reliability of technological systems, stamping equipments, operation refusals, maintenance optimization stamping equipments.

В настоящее время основным критерием принятия решений о замене инструментальной стали, используемой для изготовления рабочих элементов штамповой оснастки, является снижение количества комплектов инструмента, необходимого для выпуска определенного количества поковок – программы выпуска. При этом, как правило, оцениваются только затраты, связанные с изготовлением и эксплуатацией требуемого количества комплектов инструмента, и практически не учитываются затраты, обусловленные возникновением брака поковок, вызванного недостаточной надежностью функционирования самого инструмента.

Для комплексного учета показателей при принятии решения о замене марки инструментальной стали для рабочих элементов штамповой оснастки предлагается использовать следующую зависимость:

$$\begin{aligned} \Pi \gamma (1 - P_H) C_1 (P_H^{3c} - P_H) > \sum_{i=1}^m \left(C_i \frac{\bar{x}_i}{\sigma_{x_i}} \right) + \\ + \frac{\Pi}{N_D} C_3 \left(\frac{N_0^3}{N_{0H}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь P_H^c , P_H^c – вероятности безотказной работы штамповой оснастки из предлагаемой для замены стали и заменяемой стали; Π – программа выпуска поковок; γ – доля брака поковок, обусловленная отказами штамповой оснастки; C_1 – затраты на выпуск одной бракованной поковки; N_{0H} – нормативная стойкость штамповой оснастки на рассматриваемой технологической операции; N_0^3 – средняя стойкость штамповой оснастки из предлагаемой для замены марки стали; C_3 – величина затрат, необходимых для повышения стойкости штамповой оснастки:

$N_0^3 > N_{0н}^3$; \bar{x}_i – средние значения технологических параметров, влияющих на отказы штамповой оснастки; σ_{x_i} – среднеквадратические отклонения величин x_i ; C_i – затраты на обеспечение единичного значения $\frac{\bar{x}_i}{\sigma_{x_i}}$ для I -го технологического параметра; N_d – величина партии запуска поковок в производство; P_n – надежность рассматриваемой технологической операции производства поковок [2].

В случае выполнения условия (1) решение по замене марки штамповой стали оправданно.

Оценка величин P_n^3 , P_n^c осуществляется следующими выражениями [1, 2]:

$$P_n^{(3/c)} = \frac{1}{B} [1 + (B-1)\exp(-B)], \quad (2)$$

$$B = \sum_{j=1}^J \frac{1}{P_{нj}^{(3/c)}} - (J-1),$$

$$P_{нj}^{(3/c)} = 1 - \left\{ 1 + \beta_j \left[1 + \frac{\beta_j^2}{1 + \beta_j} + \frac{\beta_j^4}{(1 + \beta_j)(2 + \beta_j)} + \frac{\beta_j^6}{(1 + \beta_j)(2 + \beta_j)(3 + \beta_j)} + \dots \right] \right\}^{-1},$$

$$\beta_j = \frac{N_{0j}^{(3/c)}}{l_j N_d}. \quad (3)$$

Здесь J – количество преимущественных видов отказов, возникновение которых возможно при эксплуатации штамповой оснастки; $P_{нj}^{(3/c)}$ – вероятность отсутствия j -го преимущественного вида отказа штамповой оснастки, изготовленной из предлагаемой для замены стали и заменяемой стали; $N_{0j}^{(3/c)}$ – среднее число поковок, штамповка которых возможна до возникновения j -го преимущественного вида отказа штамповой оснастки, изготовленной из предлагаемой для замены стали и заменяемой стали; l_j – число элементов штамповой оснастки, наиболее критичных к возникновению j -го отказа; N_d – число заготовок в партии.

Средняя стойкость штамповой оснастки N_0^3 из предлагаемой для замены марки штамповой стали, определяется зависимостью [1]

$$N_0^3 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^J \left(\frac{[N_{0j}^3]^2}{l_j N_d} - \left(\frac{N_{0j}^3}{l_j} - N_{дн} \right) P_{нj}^3 \right) \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим возможность замены штамповой стали 4ХМФС, используемой при изготовлении штамповых вставок, на сталь 4Х5В2ФС. Штампуется поковка ведущего колеса гусеничного пропашного трактора Т4А. Объем партии: $N_d = 2000$ шт. Материал поковки – сталь 50Г, механические свойства при $t = 20$ °С: $\sigma_b = 700$ МПа, $\psi = 0,55$, $\delta = 0,18$; исходная заготовка: $\varnothing 120 \times 241 \pm 2,5$ мм; прутки горячекатаные нормальной точности. Предварительный нагрев заготовок осуществляется в полуметодической печи до температуры 1210 °С. Среднее значение температуры заготовок перед штамповкой: $T_m = 1150$ °С. Средняя температура предварительного нагрева штампа – $T_0 = 200$ °С. Смазка – раствор КБЖ (КБЖ–10...15 %, графит – 1...30 %, бура – 2...3 %, щелочь – 0,5 %).

Физико-механические свойства рассматриваемых штамповых сталей [1,3]:

- ст. 4ХМФС, 41...46 HRC₃; предел прочности при температуре 20 °С: $\sigma_b = 1520$ МПа; температура начала интенсивного разупрочнения – $T_p = 430$ °С; $\sigma_{T_{430}} = 1100$ МПа;
- ст. 4Х5В2ФС, 41...46 HRC₃; предел прочности при температуре 20 °С: $\sigma_b = 1780$ МПа; температура начала интенсивного разупрочнения – $T_p = 500$ °С; $\sigma_{T_{500}} = 1200$ МПа.

Преимущественными видами отказов штамповых вставок при штамповке поковки являются пластическое смятие элементов гравюры штампа ($j = 1$), адгезионный износ облойного мостика штампа ($j = 2$) и образование разгарных трещин гравюры штампа ($j = 3$). Оценка величин $N_{0j}^{(3/c)}$ осуществлялась по методике, изложенной в работе [1].

В качестве допущения принято, что значение

первого слагаемого $\sum_{i=1}^m \left(C_i \frac{\bar{x}_i}{\sigma_{x_i}} \right)$ выражения (1)

для обеих марок сталей одинаково и в данном расчете не учитывается. Значения $N_{0j}^{(3/c)}$ и $P_{нj}^{(3/c)}$ приведены в табл. 1. Значения переменных, входящих в зависимость (1), приведены в табл. 2. Представленные там же результаты расчета показывают нецелесообразность проведения предполагаемой замены инструментальной стали для изготовления штамповой оснастки.

Таблица 1

j	Преимущественные виды отказов штамповой оснастки	Расчетная стойкость штамповой оснастки, шт.		Вероятность отсутствия отказа	
		4ХМФС	4Х5В2ФС	4ХМФС	4Х5В2ФС
1	Пластическое смятие элементов гравюры штампа	$N_{01}^c = 4000$	$N_{01}^3 = 5000$	$P_{н1}^c = 0,924$	$P_{н1}^3 = 0,995$
2	Адгезионный износ облойного мостика штампа	$N_{02}^c = 6000$	$N_{02}^3 = 7000$	$P_{н2}^c = 0,994$	$P_{н2}^3 = 0,999$
3	Образование разгарных трещин	$N_{03}^c = 3400$	$N_{03}^3 = 4200$	$P_{н3}^c = 0,88$	$P_{н3}^3 = 0,974$
Средняя стойкость штамповой оснастки		$N_0^c = 3500$	$N_0^3 = 4500$		
Надежность функционирования штамповой оснастки				$P_n^c = 0,898$	$P_n^3 = 0,978$

Таблица 2

№ п/п	Переменные зависимости (1)	Значения переменных	
		4ХМФС	4Х5В2ФС
1	Стоимость комплекта вставок, C_2	$2,1 \cdot 10^5$ руб.	$2,3 \cdot 10^5$ руб.
2	Надежность технологической операции штамповки поковок [2], P_n	0,982	
3	Доля брака поковок, обусловленная отказами штамповой оснастки, γ	0,4	
4	Стоимость одной бракованной поковки, C_1	20000 руб.	
5	Величина затрат, необходимых для повышения стойкости штамповой оснастки: $N_0^3 > N_{он}^3$; C_3	60000 руб.	
6	Программа выпуска, П	19000 шт.	
7	Нормативная стойкость вставок, $N_{он}$	2500 шт.	
8	Затраты на замену марки штамповой стали	$3,42 \cdot 10^5$ руб.	
9	Эффект от снижения брака поковок, вызванного отказами инструмента	$2,73 \cdot 10^5$ руб.	
10	Суммарный эффект от замены марки штамповой стали	$-0,69 \cdot 10^5$ руб.	

Одним из направлений повышения эффективности работы штамповой оснастки является рационализация режима его эксплуатации за счет оптимизации размеров партии запуска N_d , с учетом вероятностей возникновения преимущественных видов отказов инструмента и оптимизации затрат, связанных с обеспечением заданного уровня надежности его функционирования. Зависимость для оценки затрат, связанных с эксплуатацией инструмента при заданном уровне надежности его функционирования, можно представить в следующем виде:

$$З = \Pi \gamma C_1 (1 - P_H^H) + \frac{\Pi}{N_d} \left[C_2 + C_3 \left(\frac{N_0}{N_{0H}} - 1 \right) \right], \quad (5)$$

где C_2 – средняя стоимость одного комплекта с нормативной стойкостью N_{0H} ; N_0 – средняя стойкость штамповой оснастки (4); P_H^H – вероятность безотказной работы штамповой оснастки (2). Остальные обозначения аналогичны (1).

Первое слагаемое выражения (5) определяет затраты, связанные с неисправимым браком штампуемых поковок, вызванным отказами штамповой оснастки. Второе слагаемое определяет затраты на необходимое число комплектов инструмента с учетом обеспечения его средней стойкости N_0 . Значения P_H^H в первом приближении можно аппроксимировать зависимостью

$$P_H^H = A \left(\frac{N_d l}{N_0} \right)^b, \quad (6)$$

где l – количество наиболее критичных к отказам элементов штамповой оснастки; A, b – коэффициенты аппроксимации.

Оптимальная партия запуска поковок оценивается зависимостью

$$N_d^* = N_0 \sqrt[b+1]{\frac{C_{23} + C \left(\frac{N_0}{N_{0H}} - 1 \right)}{A b l^b \gamma C_1}} \quad (7)$$

при $N_d^* \geq N_{d \min}$,

где $N_{d \min}$ – минимально допустимая партия запуска поковок в производство.

Наряду с этим можно также оценить и оптимальную стойкость штамповой оснастки, характеризующуюся количеством поковок, изготовление которых возможно при заданном уровне надежности ее функционирования:

$$\frac{\partial З}{\partial N_0} = 0, \quad N_{0d}^* = N \sqrt[b+1]{\frac{A b l^b \gamma C_1}{C_{23} + C \left(\frac{N_0}{N_{0H}} - 1 \right)}} \quad (8)$$

при $N_0^* \geq N_0$;

Определим оптимальный размер партии поковок ведущего колеса гусеничного пропашного трактора Т4А. Материал штамповых вставок – ст. 4ХМФС. Физико-механические свойства материала поковки и штамповой стали, а также технологические параметры изготовления поковки аналогичны приведенным выше. В результате аппроксимации зависимости (2), определяющей величину P_H^H при принятых значениях переменных, входящих в зависимости (2, 3, 5) (табл. 1), методом наименьших квадратов получены следующие значения параметров A и b : $A = 0,35$; $b = 2,4$. Количество наиболее критичных к отказам элементов штамповой оснастки l принимается равным трем [2]. Подставляя полученные и принятые значения переменных в зависимость (7), получаем: $N_d^* = 1965$ шт.

Определенный интерес представляет оценка коэффициента вариации величины N_d^* : $v_{N_d^*} = \frac{\sigma_{N_d^*}}{N_d^*}$, где $\sigma_{N_d^*}$ – среднеквадратическое отклонение N_d^* . Значение N_d^* определяется зависимостью

$$\sigma_{N_d^*} = \frac{\partial N_d^*}{\partial N_0} \sigma_{N_0}, \quad (9)$$

$$\sigma_{N_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_0}{\partial N_{0j}^c} \right)^2 \sigma_{N_{0j}^c}^2},$$

$$\sigma_{N_{0j}^c} = \sqrt{\sum_{i=1}^l \left(\frac{\partial N_{0j}^c}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}, \quad (10)$$

где σ_{N_0} – среднее квадратическое отклонение величины N_0 ; $\sigma_{N_{0j}^c}$ – среднее квадратическое отклонение величин N_{0j}^c .

На основании (10) для рассматриваемого примера получены следующие оценки величин

$$\sigma_{N_{0j}^c} \text{ и } \sigma_{N_0}: \sigma_{N_{01}^c} = 0,038 N_{01}^c; \sigma_{N_{01}^c} = 0,042 N_{02}^c;$$

$$\sigma_{N_{03}^c} = 0,042 N_{03}^c; \sigma_{N_0} = 0,044 N_0. \text{ При подстановке в (9) выражения (7) с учетом значения величины}$$

$$\sigma_{N_0} \text{ получаем: } \sigma_{N_d^*} = 0,048 N_d^* \text{ (96 шт.).}$$

Рассчитанные оценки величин N_d^* и $\sigma_{N_d^*}$ показывают, что принятая партия запуска поковок в производство в количестве 2000 шт. является приемлемой для рассматриваемых техно-

логических условий эксплуатации штамповой оснастки.

Выводы

Использование такого показателя надежности функционирования штамповой оснастки, как вероятность ее безотказной работы по преимущественным видам отказов, позволяет принимать более обоснованные управленческие решения, связанные как с заменой марки штамповой стали, используемой для изготовления рабочих элементов оснастки, так и определением размеров партий поковок, запускаемых в производство.

Список литературы

1. Степанский Л.Г. Прогнозирование надежности деформирующего инструмента: учеб. пособие. – М.: МГТУ «Станкин», 1995. – 99 с.
2. Кутышкин А.В. Прогнозирование надежности технологических систем процессов горячей объемной штамповки // КШП.ОМД. – 2003. – № 4. – С. 11–18.
3. Штампы для горячего деформирования металлов: учеб. пособие для вузов / М.А. Тылкин, Д.И. Васильев и др. – М.: Высш. шк., 1977. – 496 с.