

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 1 (73)
январь
2011

Издается с января 2005 г.

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

**Председатель редакционного
совета**

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

**Заместитель главного
редактора**

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ

А.П. БАБИЧЕВ

В.П. БАЛКОВ

В.М. БАШКОВ

А.И. БЕЛИКОВ

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.А. ЗЕМСКОВ

С.А. КЛИМЕНКО

В.А. ЛАШКО

В.А. ЛЕБЕДЕВ

В.В. ЛЮБИМОВ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО

Х.М. РАХИМЯНОВ

Б.П. САУШКИН

В.П. СМОЛЕНЦЕВ

А.М. СМЫСЛОВ

Г.А. СУХОЧЕВ

В.П. ТАБАКОВ

В.А. ШУЛОВ

М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Е.П. ЗЕМСКОВА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.

Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Виноградова Н.В., Прокофьев М.А. Взаимосвязь скрытой энергии деформации с технологическими условиями механической обработки 3



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Витязь П.А., Гордиенко А.И., Хейфец М.Л. Проектирование процессов, использующих для упрочняющей обработки конструкционных материалов концентрированные потоки энергии 8

Полетика И.М., Гнусов С.Ф., Голковский М.Г., Иванов Ю.Ф., Крылова Т.А., Макаров С.А., Тересов А.Д. Создание упрочняющих покрытий электронно-лучевой наплавкой и последующей импульсной обработкой электронным пучком 15



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Блюменштейн В.Ю. Структурные модели технологического наследования 23

Васильев А.С., Кондаков А.И., Клименко С.А., Хейфец М.Л., Гайко В.А. Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей 32



ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Бровер А.В. Наноструктурные эффекты в лазерно-облученной стали 39



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Колина Т.П., Брюханов В.В., Тарасов А.Н. Влияние исходной структуры и подготовки поверхности высоколегированных сталей на свойства диффузионных слоев при цементации в древесно-угольных смесях 41



ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Указатель статей, опубликованных в 2010 г. 46

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

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

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 1 (73)
January
2011

Since 2005, January

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Vinogradova N.V., Prokophev M.A. Interaction the latent energy of deformation with machining conditions of the mechanical operation 3



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Vityaz P.A., Gordienko A.I., Kheifetz M.L. Designing of the processes using for strengthening processing of constructional materials concentrated energy fluxes 8

Poletika I.M., Gnyusov S.F., Golkovskii M.G., Ivanov Yu.F., Krylova T.A., Makarov S.A., Teresov A.D. The fabrication of strengthening coatings by electron-beam surfacing and pulsed electron beam post treatment 15



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Blyumenshtein V.Yu. Structural models of technological inheritance 23

Vasiliev A.S., Kondakov A.I., Klimenko S.A., Kheifetz M.L., Gaiko V.A. Technological control of the hardened surfaces performance quality parameters inheritance 32



THERMAL PROCESSING

Brover A.V. Nanostructural effects in the laser-irradiated steel 39



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Kolina T.P., Bryuhanov V.V., Tarasov A.N. Influence of initial structure and surface preparation high-alloy steels on properties of diffusive layers at cementation in drevsno-coal mixes 41



INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

The index of the articles published in 2010 46

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

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



УДК 621.391

Н.В. Виноградова, М.А. Прокофьев

(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)

E-mail: frostiest@list.ru

Взаимосвязь скрытой энергии деформации с технологическими условиями механической обработки

Изложены результаты теоретического исследования уровня удельной скрытой энергии деформации в зависимости от технологических условий механической обработки. Представлены математическая зависимость, позволяющая рассчитывать удельную скрытую энергию деформации по глубине наклепа, и графические зависимости удельной скрытой энергии деформации от каждого из параметров процесса резания при токарной обработке.

Ключевые слова: скрытая энергия деформации, дислокация, упрочнение, глубина наклепа, режимы обработки.

The results of the theoretical study level of specific latent energy of deformation depending on machining conditions of mechanical operation are stated. Mathematical dependency, allowing calculate the specific latent energy of deformation on the depth of work hardening and graphic dependencies of specific latent energy of deformation from each of parameter of the cutting operation under turning are represented.

Keywords: latent energy of deformation, dislocation, strain hardening, depth of work hardening, machining conditions.

Согласно исследованиям [1, 2] рассмотрение вопроса о соотношении затраченной и поглощенной энергий при механическом воздействии на материал имеет определенный научный и практический интерес. Так, величина поглощенной энергии несет информацию о свойствах и состоянии деформированного (упрочненного) материала, поскольку она почти полностью определяет энергию дислокаций, образовавшихся при деформации. Свойства и состояние поверхностного слоя материала, в свою очередь, определяют показатели качества поверхностного слоя, которые характеризуют эксплуатационные характеристики деталей машин.

Изучение закономерностей накопления и выделения скрытой энергии деформации в значительной мере способствует развитию представлений как о процессах, происходящих в материале во время деформирования, так и о характере возникающих при этом остаточных искажений решетки. Очевидно, что изменение свойств материала при деформировании обуславливается изменением его внутренней энергии.

А.М. Сулима (при анализе кривых упрочнения при сжатии–растяжении) отмечает, что насыщение

или порог упрочнения для углеродистых сталей наступает при степенях деформации 40...50 %.

Основываясь на теории закономерности скрытой энергии деформации, можно ожидать, что она определяется не только отходом, но и упрочнением. Скрытая энергия деформации металлов, представляющая, главным образом, плотность дислокаций, характеризует их механические свойства, в частности упрочнение.

Количество выделившейся энергии при механической обработке является основой для энергетических критериев, позволяющих оптимизировать технологические режимы механической обработки. Статус комплексного показателя качества поверхностного слоя деталей объясняет пристальное внимание к скрытой энергии деформации различных научных школ, которые на ее основе предлагают энергетические критерии оптимизации операций механической обработки [2].

Расчетные методы определения уровня скрытой энергии деформации в поверхностном слое материала при обработке точением применительно к жаропрочным сплавам на хромоникелевой основе разработаны В.К. Старковым. Скрытая энергия деформа-

ции является параметром, определяющим свойства поверхностных слоев обработанной детали, так как трансформация свойств этих слоев относительно исходных является результатом изменения энергии межатомных или межмолекулярных связей в пределах данного объема, т.е. результатом поглощения или выделения энергии.

Удельную скрытую энергию деформации образовавшихся при пластической деформации дислокаций можно определить по зависимости [2]

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} (\sigma - \sigma_{0,2})^2, \quad (1)$$

где W – удельная накопленная энергия, Дж/мм³;
 Q – коэффициент пропорциональности,

$$Q = \frac{1}{4\pi k} \ln \frac{R}{r_0} \approx 0,5 \dots 1,$$

где k – коэффициент ($k = 1$ для винтовой дислокации, $k = 1 - \mu$ для краевой дислокации);

μ – коэффициент Пуассона;

R – внешний ограниченный радиус ($R = 1$ мкм);

r_0 – радиус внутреннего цилиндра (ядра дислокации), $r_0 = b/2$;

b – модуль вектора Бюргерса;

α' – параметр междислокационного взаимодействия [2];

G – модуль сдвига материала обрабатываемой детали, МПа;

σ – напряжение течения, МПа;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа.

Исследования В.М. Розенберга, Г.Д. Деля и других авторов показывают, что между напряжением течения σ и микротвердостью HV существует взаимосвязь вида

$$\sigma = 0,32HV. \quad (2)$$

Тогда удельную скрытую энергию деформации можно определить по формулам (1), (2) как

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} [0,32(HV - HV_0)]^2, \quad (3)$$

где $(HV - HV_0)$ – изменение микротвердости на определенной глубине в сравнении с микротвердостью недеформированного металла, МПа.

Степень наклепа N , %, согласно источнику [3], определяется следующим образом:

$$N = \frac{h_c}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B,Э})^{0,8}}, \quad (4)$$

где h_c – глубина наклепа, мкм;

σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, МПа;

$\sigma_{B,Э}$ – предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон, МПа.

Также степень наклепа может быть рассчитана по формуле

$$N = \frac{HV - HV_0}{HV_0}. \quad (5)$$

Приравнявая выражения (4) и (5), получаем

$$HV - HV_0 = \frac{h_c}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B,Э})^{0,8}} HV_0. \quad (6)$$

При подстановке правой части выражения (6) в уравнение (3) определяем

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} \left(\frac{0,32 h_c}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B,Э})^{0,8}} HV_0 \right)^2. \quad (7)$$

Согласно зависимости (2) предел текучести материала $\sigma_{0,2} = 0,32HV_0$.

Тогда математическая модель, позволяющая рассчитать удельную скрытую энергию деформации, приобретает вид

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} \left(\frac{h_c \sigma_{0,2}}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B,Э})^{0,8}} \right)^2. \quad (8)$$

Исследования [4, 5] показывают, что решающее влияние на формирование в поверхностном слое детали шероховатости, наклепа, остаточных напряжений оказывают технологические условия обработки (режимы резания, геометрия режущего инструмента, свойства обрабатываемого и инструментального материала). Поэтому установление функциональной зависимости, отражающей влияние технологических условий обработки на уровень скрытой энергии деформации в поверхностном слое материала при механической обработке, является актуальной технологической задачей.

Пример. Рассмотрим данную задачу для наиболее распространенного вида механической обработки деталей – точения. Решение сформулированной выше задачи сводится к расчетному определению глубины наклепа в поверхностном слое детали в зависимости от технологических условий токарной обработки. Для этого воспользуемся методикой, разработанной в результате теоретических исследований профессором В.Ф. Безязычным.

Для расчета скрытой энергии деформации в поверхностном слое детали были выбраны следующие материалы: стали 15 и 45, ХН77ТЮР, ВТ3-1. Рассмат-

ривали обработку на токарном станке нормальной точности в центрах.

Для обработки сталей 15 и 45 в качестве материала инструмента был выбран сплав Т15К6, для сплавов ХН77ТЮР и ВТ3-1 – режущий инструмент из ВК8.

Геометрия инструмента в соответствии с общемашиностроительными рекомендациями применялась следующая: главный угол в плане $\varphi = 45, 50, 55, 60^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 10, 15, 20, 25, 30^\circ$; задний угол $\alpha = 6, 8, 10, 12^\circ$; передний угол $\gamma = \alpha$; радиус при вершине резца в плане $r = 0,5; 0,7; 1; 1,2; 1,5$ мм; радиус округления режущей кромки $\rho_1 = 18, 20, 22, 24, 30$ мкм; фаска износа резца $\Delta_{\text{изн}} = 0, 20, 40, 60, 80$ мкм.

В расчетах коэффициент Q принят равным 1. Режимы обработки: для сталей 15 и 45 скорости резания $v = 180, 195, 210, 225, 240, 246, 270, 282$ м/мин; для ХН77ТЮР и ВТ3-1 скорости резания $v = 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 95$ м/мин; подачи $S = 0,11; 0,15; 0,23; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45$ мм/об; глубины резания $t = 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ мм.

Перед расчетом скрытой энергии деформации было установлено изменение глубины наклепа в поверхностном слое детали при точении для сравнения закономерностей ее изменения с изменением скрытой энергии деформации в зависимости от режимов резания, геометрии инструмента и свойств обрабатываемого материала и материала инструмента.

Глубину наклепа определяли в соответствии с программным обеспечением, разработанным в Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева и зарегистрированным в отраслевом фонде алгоритмов и программ [6]. Примеры графиков, отражающих результаты расчетов глубины наклепа в зависимости от технологических условий обработки, представлены на рис. 1 и 2.

Далее определяли влияние технологических условий обработки на уровень скрытой энергии деформации в поверхностном слое материала при токарной обработке для указанных выше условий и модельных материалов (рис. 3, 4).

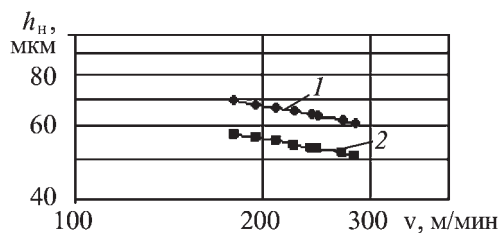


Рис. 1. Зависимости глубины наклепа от скорости резания для сталей 15 (1) и 45 (2) ($S = 0,23$ мм/об; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{\text{изн}} = 20$ мкм)

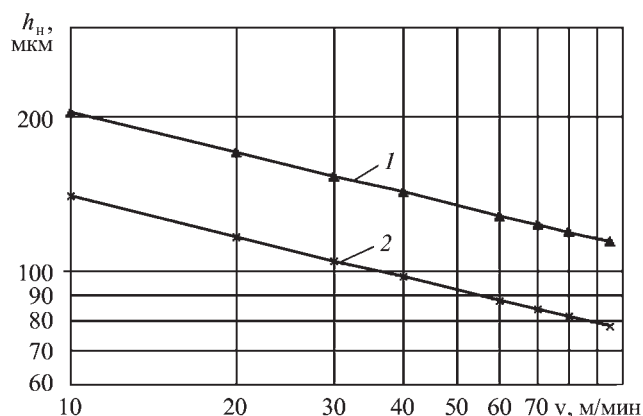


Рис. 2. Зависимости глубины наклепа от скорости резания для ХН77ТЮР (1) и ВТ3-1 (2) ($S = 0,23$ мм/об; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{\text{изн}} = 20$ мкм)

Установлено, что:

1. С возрастанием скорости резания скрытая энергия деформации уменьшается. Это обусловлено снижением интенсивности деформационного упрочнения

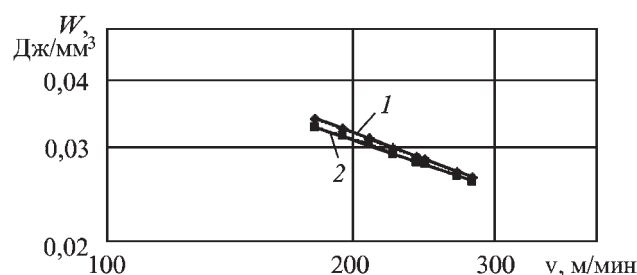


Рис. 3. Зависимости скрытой энергии деформации от скорости резания для сталей 15 (1) и 45 (2) ($S = 0,23$ мм/об; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{\text{изн}} = 20$ мкм)

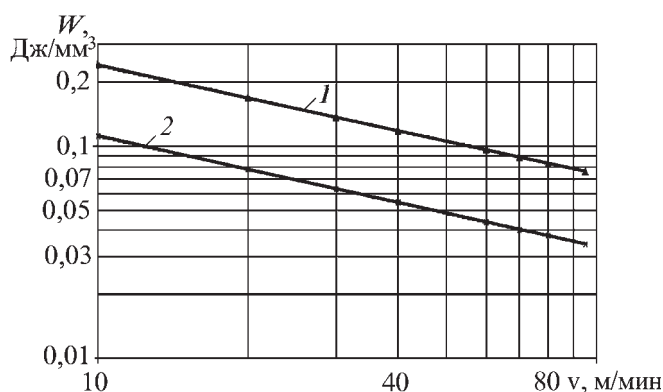


Рис. 4. Зависимости скрытой энергии деформации от скорости резания для ХН77ТЮР (1) и ВТ3-1 (2) ($S = 0,23$ мм/об; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{\text{изн}} = 20$ мкм)

поверхностного слоя в связи с активизацией процессов разупрочнения. С увеличением скорости резания возрастает температура нагрева, приводящая к повышению диффузионной подвижности атомов кристаллической решетки, уменьшению искажений кристаллической решетки, следовательно, к снижению упрочнения и уровня скрытой энергии деформации.

2. При увеличении подачи скрытой энергии деформации возрастает в связи с увеличением глубины наклепа, так как подача в основном оказывает силовое воздействие на поверхностный слой и при ее возрастании повышается упрочнение поверхностного слоя детали.

3. С ростом глубины резания уровень скрытой энергии деформации увеличивается. Это обуславливается тем, что увеличение глубины резания приводит к увеличению числа дефектов кристаллической структуры, сопровождаясь увеличением поверхностной твердости, наклепа и, следовательно, возрастанием накопленной энергии.

4. При увеличении главного угла в плане ϕ и радиуса округления режущей кромки резца ρ_1 удельная скрытая энергия деформации увеличивается, так как возрастание этих параметров приводит к повышению упрочнения поверхностного слоя материала детали. С увеличением переднего γ и заднего α углов резца, а также радиуса r при вершине резца в плане уровень удельной скрытой энергии деформации снижается по причине уменьшения количества искажений кристаллической решетки, а следовательно, снижения упрочнения поверхностного слоя детали.

Для расчетного определения удельной скрытой энергии деформации при точении могут быть получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между

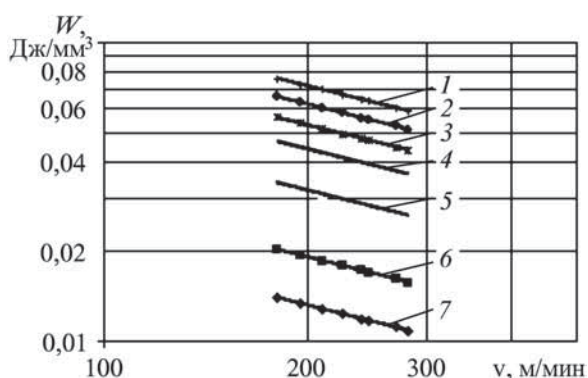


Рис. 5. Зависимости скрытой энергии деформации от скорости резания для стали 15 ($t=0,8$ мм; $\phi=45^\circ$; $\phi_1=15^\circ$; $\alpha=10^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $r=0,5$ мм; $\rho_1=30$ мкм; $\Delta_{изн}=20$ мкм):
 1 – $S=0,45$ мм/об, $W=1,4014 v^{-0,5610}$; 2 – $S=0,4$ мм/об, $W=1,2108 v^{-0,5608}$; 3 – $S=0,35$ мм/об, $W=1,0326 v^{-0,5609}$; 4 – $S=0,3$ мм/об, $W=0,8588 v^{-0,5611}$; 5 – $S=0,23$ мм/об, $W=0,6304 v^{-0,5628}$; 6 – $S=0,15$ мм/об, $W=0,3733 v^{-0,5609}$; 7 – $S=0,11$ мм/об, $W=0,2624 v^{-0,5644}$

скрытой энергией деформации и технологическими условиями обработки, на основании расчетов по ранее изложенной методике и обработке результатов расчета (рис. 5).

Установлен общий характер взаимосвязи удельной скрытой энергии деформации W при токарной обработке для всех рассматриваемых материалов с каждым из основных параметров процесса резания в отделимости (от $v, t, S, \phi_1, \phi, \alpha, \gamma, r, \rho_1, \Delta_{изн}$). Из графических зависимостей (см. рис. 5) были получены формулы для определения удельной скрытой накопленной энергии деформации в зависимости от всех параметров процесса резания одновременно для рассматриваемых материалов:

сталь 15: $W = C_1 t^{0,2386} v^{-0,5618} S^{9,5236} \phi^{0,7054} \alpha^{-0,1861} \gamma^{-0,6248} \times \rho_1^{0,2885} r^{-0,3077}$, $C_1 = 1,9 \cdot 10^{-6}$;

сталь 45: $W = C_2 t^{0,2395} v^{-0,5605} S^{9,4671} \phi^{0,6968} \alpha^{-0,1854} \gamma^{-0,6256} \times \rho_1^{0,2881} r^{-0,3030}$, $C_2 = 1,2 \cdot 10^{-6}$;

ХН77ТЮР: $W = C_3 t^{0,2404} v^{-0,562} S^{9,6741} \phi^{0,6997} \alpha^{-0,185} \gamma^{-0,625} \times \rho_1^{0,2872} r^{-0,2906}$, $C_3 = 115 \cdot 10^{-6}$;

ВТЗ-1: $W = C_4 t^{0,24} v^{-0,5603} S^{9,9703} \phi^{0,7017} \alpha^{-0,1863} \gamma^{-0,6207} \times \rho_1^{0,2878} r^{-0,2980}$, $C_4 = 31,2 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициенты C_1-C_4 предположительно характеризуют способность материала сопротивляться пластическому деформированию и разрушению в процессе обработки и непосредственно связаны с его механическими свойствами, такими как предел прочности σ_B ; условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ с допуском на величину пластической деформации при нагружении 0,2 %, относительное удлинение δ .

Математически данные свойства можно представить в виде безразмерного комплекса $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \delta}$ [2]. Уста-

новим математическую и графическую зависимости коэффициентов C_1-C_4 от безразмерного комплекса $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \delta}$ каждого из рассматриваемых материалов, кото-

рую обозначим C , и для получения которой может быть использована степенная аппроксимация значений коэффициентов C_1-C_4 . Данная зависимость представлена на рис. 6.

Из математических зависимостей для удельной скрытой энергии деформации в зависимости от параметров процесса резания видно, что показатели степеней для различных параметров одинаковы для всех обрабатываемых материалов, что позволяет получить универсальную зависимость для всех материалов. Зависимость для коэффициента C от механических свойств материалов также позволяет привести формулы для определения удельной скрытой энергии

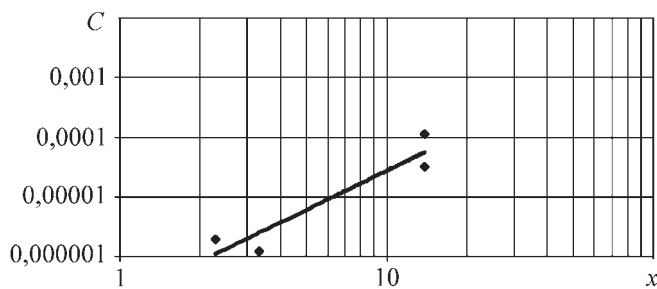


Рис. 6. Зависимость коэффициента C от безразмерного комплекса $x = \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \delta}$ ($C = 2 \cdot 10^{-7} x^{2,1698}$; $R^2 = 0,8859$)

деформации в зависимости от режимов токарной обработки к универсальной формуле

$$W = 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \delta} \right)^{2,1698} t^{0,2396} v^{-0,5612} S^{9,6588} \times \varphi^{0,7009} \alpha^{-0,1857} \gamma^{-0,6240} \rho_1^{0,2879} r^{-0,3} \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) позволяет рассчитывать удельную скрытую энергию деформации в зависимости от режимов токарной обработки и параметров геометрии режущей части резца для любого обрабатываемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Свойства** сплавов в экстремальном состоянии / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2004. 256 с.
2. **Прокофьев М.А.** Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе определения скрытой энергии деформации: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2006. 199 с.
3. **Безъязычный В.Ф.** Взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, модулем упругости и пределом выносливости детали // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 9.
4. **Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Константинов А.В.** и др. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 1993. 183 с.
5. **Безъязычный В.Ф.** Разработка теоретических основ технологического обеспечения качества и эффективности механической обработки деталей авиационных двигателей: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МАИ им. К.Э. Циолковского, 1982. 533 с.
6. **Свидетельство** об отраслевой регистрации разработки № 3457. Расчет технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя и точность обработки / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, С.А. Волков; организация-разработчик Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева; зарегистрировано в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 21.04.04. 1 с.

12-15 апреля 2011 г.
Санкт-Петербург

При поддержке Северо-Западного федерального округа Российской Федерации и Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга

13-я Международная научно-практическая конференция
«ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ, ИНСТРУМЕНТА
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ ОТ НАНО- ДО МАКРОУРОВНЯ»

Темы конференции:

- технологии диагностики, дефектации, мойки, очистки, восстановления геометрии, упрочнения поверхности, обработки нанесенных покрытий, окраски и консервации
- трение и износ, защита от коррозии, конструкционные, технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества и повышения долговечности изделий

К началу конференции будет издан сборник докладов.
Познакомьтесь с темами докладов предыдущих конференций
Вы можете на сайте www.plasmacentre.ru в разделе «Конференции»

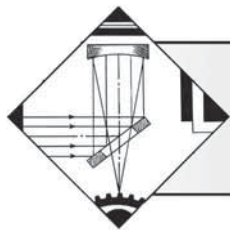
www.plasmacentre.ru/conf

Организаторы:
• Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
• НПФ «Плазмацентр»

РЕМОНТ
ТЕХНОЛОГИИ
МАТЕРИАЛЫ
ОБОРУДОВАНИЕ

Плазмацентр

Заявки на участие принимаются:
тел.: (812) 4449336, (901) 3043191
факс: (812) 4449337, (812) 5287484
e-mail: info@plasmacentre.ru



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 658.512:621.002

П.А. Витязь (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси),
А.И. Гордиенко (Физико-технический институт НАН Беларуси),
М.Л. Хейфец (ГНПО "Центр" НАН Беларуси)
E-mail: kheifetz@presidium.bas-net.by

Проектирование процессов, использующих для упрочняющей обработки конструкционных материалов концентрированные потоки энергии

Рассмотрено доминирование свойств отношений технологических решений при проектировании методов упрочняющей обработки поверхности материалов концентрированными потоками энергии. Получены критерии, описывающие доминирование контролируемых параметров технологической системы. Рассмотрено проектирование плазменно-механической, электромагнитной и электронно-лучевой поверхностной упрочняющей обработки конструкционных материалов.

Ключевые слова: концентрированные потоки энергии, плазменно-механическая, электромагнитная, электронно-лучевая упрочняющая обработка.

The dominance relations properties of the technological decisions is considered for use when developing the methods of the surface strengthening treatment with the concentrated energy fluxes. There are developed the dominance criteria for the controlled parameters of the technological system. The plasma-assisted, electromagnetic and electron-beam surface strengthening treatment of the structural materials is considered.

Keywords: concentrated energy fluxes, plasma-assisted, electromagnetic, electron-beam strengthening treatment.

Введение

Преимущество решений при математическом моделировании, конструкторско-технологическом проектировании, производстве и эксплуатации сложных технических систем базируется на принципах передачи свойств в жизненном цикле изделий. Применение синергетической концепции позволяет сформировать математическую модель технологического наследования эксплуатационных показателей качества, описывающую различные режимы поведения при производстве и применении технических систем.

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий [1, 2]. Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [3, 4].

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом — технологической средой при тождественности результатов такой замены. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения его показателей ка-

чества и осуществлять направленное формирование технологической среды. Эта среда должна предусматривать благоприятное развитие полезных свойств и пресечение развития свойств, снижающих качество изделий путем использования барьеров [5, 6].

Особенно актуально понижение размерности задачи описания трансформации свойств при создании методов обработки, основанных на применении концентрированных потоков энергии [7].

В общем виде системная модель технологии [8, 9] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: материальной и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку для изменения ее физико-химических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения определенной формы, размеров и свойств изделия.

В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [8, 9].

Алгоритм выбора технологических решений

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов упрочняющей обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество *технологических решений* (ТР). Такой подход [9, 10] позволяет любой метод обработки представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества ТР.

Полагая, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор ТР по эквивалентности и предпочтению [10]. По эквивалентности выбирают равноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбирают решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора ТР по конкретному значению установленного критерия выбора и дает возможность выбирать решение по нескольким критериям, соответствующим различным свойствам ТР.

Анализ свойств отношений. Принятие ТР в системах автоматизированного проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ($x \equiv y$) и предпочтения (нестрогого $x \leq y$ или строгого $x < y$) решений, заложенных в базу знаний [11]. Это предполагает использование свойств [12]:

- 1) рефлексивности ($x \equiv x$, $x \leq x$ – истинно; $x < x$ – ложно);
- 2) симметричности ($x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$ – истинно; $x \leq y$ и $y \leq x \Rightarrow x = y$ – антисимметрично; $x < y$ и $y < x \Rightarrow$ взаимоисключение – несимметрично);
- 3) транзитивности ($x \equiv y$ и $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$, $x \leq y$ и $y \leq z \Rightarrow x \leq z$, $x < y$ и $y < z \Rightarrow x < z$ – истинно).

В результате, используя свойство транзитивности, наиболее предпочтительное из предыдущих решений сравнивают с новым предложенным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

Однако в общем случае разные неэквивалентные ТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества из требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее ТР ($x \ll y$), характеризующееся свойствами [12]:

- 1) антирефлексивности ($x \ll x$ – ложно);
- 2) несимметричности ($x \ll y$ и $y \ll x \Rightarrow$ взаимоисключение);
- 3) нетранзитивности (из $x \ll y$ и $y \ll z$ не следует $x \ll z$).

Синергетический подход. При отсутствии симметричности и транзитивности для определения доминирования параметра целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [13].

Распределения случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами [14]:

- 1) равномерным $f(x) = 1/(\mu_1 - \mu_0)$ при $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$;

- 2) экспоненциальным $f(x) = (1/\mu) \exp(-x/\mu)$ при $\mu > 0$, $x > 0$;

- 3) нормальным $f(x) = (1/(\sigma\sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2/(2\sigma^2))$ при $\sigma > 0$, $-\infty < \mu < \infty$, $-\infty < x < \infty$ или др.,

где μ_0 и μ_1 – ограничения;

μ – математическое ожидание;

σ^2 – дисперсия случайных величин x .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, а следовательно, о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k},$$

где λ_p^2 – критерий Пирсона;

k – число степеней свободы, т.е. число групп в изучаемом ряду, рассчитанных (μ , σ и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ характеристик производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий, оборудования и средств оснащения позволяет ограничить номенклатуру рассматриваемых объектов и процессов. При выборе числа ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований по надежности и гибкости производственной системы. В результате соотношение надежности – устойчивости и гибкости – адаптивности может служить критерием, позволяющим принять ТР о рациональной структуре производственной системы.

Самоорганизующиеся системы. В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [15]. Каждая подсистема i имеет выходы: q_1 – детерминированный строго определенный и q_2 – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)}.$$

Считая, что в условиях производства $q^{(i)}$ – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)}.$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем n , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню \sqrt{n} . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик [15, 16].

Таким образом, при автоматизированном проектировании принятие ТР по совершенствованию производственных систем целесообразно проводить на основе синергетического анализа технологических и эксплуатационных процессов и объектов [16, 17].

Термодинамическая модель интенсивной обработки

Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров – степеней свободы. Остающиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих ТР [15].

Уравнения физико-химических процессов. В результате сокращения числа степеней свободы получаются уравнения, группирующиеся в несколько универсальных классов, вида [13, 15]:

$$\frac{\partial \vec{U}^*}{\partial \tau} = \vec{G}(\vec{U}^*, \nabla \vec{U}^*) + D \nabla^2 \vec{U}^* + \vec{F}(\tau),$$

где τ – текущее время; \vec{U}^* – контролируемый параметр; \vec{G} – нелинейная функция \vec{U}^* и, возможно, градиента \vec{U}^* ; D – коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или описывающий распространение волн при мнимом значении; \vec{F} – флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием с внешней средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида схожи с описывающими фазовые переходы первого и второго рода, которые, в свою очередь, определяются критериями переноса [16, 17].

Фазовые переходы. В соответствии с синергетической концепцией фазовые переходы происходят в результате самоорганизации [15], процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (П), сопряженному (С) ему полю и управляющему (У) параметру [18].

Единственная степень свободы – параметр порядка – описывает только квазистатические фазовые переходы. В системах, значительно удаленных от состояния равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение, а процесс самоорганизации складывается в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем [13, 15]. Поэтому, кроме релаксации к равновесному состоянию в течение времени τ^p , при участии двух степеней свободы могут реализовываться как режим запоминания, так и автоколебания, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние.

В результате состояние технологической системы характеризуется несколькими режимами [5, 6, 18]:

1) релаксационным – при времени релаксации параметра порядка, намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ($\tau_{\text{П}}^p \gg \tau_{\text{У}}^p$ и $\tau_{\text{П}}^p \gg \tau_{\text{С}}^p$);

2) с запоминанием – при переходе из неупорядоченного состояния в "замороженный" беспорядок, реализуемым в случае, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ($\tau_{\text{П}}^p \ll \tau_{\text{У}}^p$ и $\tau_{\text{П}}^p \ll \tau_{\text{С}}^p$);

3) автоколебательным – при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_{\text{П}}^p \approx \tau_{\text{У}}^p$ или $\tau_{\text{П}}^p \approx \tau_{\text{С}}^p$);

4) стохастическим – возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ($\tau_{\text{У}}^p \approx \tau_{\text{П}}^p \approx \tau_{\text{С}}^p$).

Таким образом, при моделировании технологического наследования возможно понижение размерности задачи описания передачи показателей качества до трех степеней свободы среды в процессах обработки изделия. Моделирование процессов передачи на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологических процессов при использовании обратных связей [3, 16].

Критерии процессов упрочняющей обработки

При обосновании выбора ТР и синтезе интенсивных методов упрочняющей обработки необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [3, 16, 19]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [20], то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [21].

Производство энтропии. Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [22, 23]:

$$\varepsilon = -K \int_0^{\infty} \rho \ln p \, d\rho,$$

где K – постоянный коэффициент; ρ – плотность распределения вероятных состояний системы.

Уравнение баланса локальной плотности энтропии $\rho\varepsilon$ по времени τ

$$\partial(\rho\varepsilon)/\partial\tau + \nabla(\rho\varepsilon\vec{v}) + \nabla\vec{F}_\varepsilon = \sigma,$$

где \vec{v} – скорость потока; \vec{F}_ε – плотность потока энтропии;

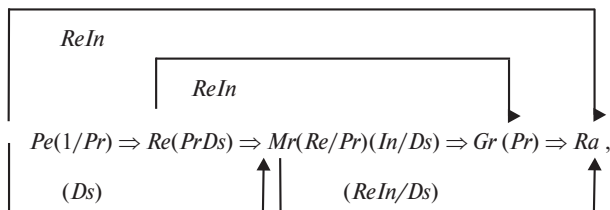
$\sigma = d\varepsilon / d\tau$ – производство энтропии:

$$\begin{aligned} \sigma = & \vec{F}_q [\nabla(1/T)] - \sum_{i=1}^k \vec{F}_{di} [\nabla(W_i/T) - (1/T)\vec{F}_{mi}] - \\ & - (1/T) P_g \nabla \vec{v} + (1/T) \sum_{i=1}^k W_i \sum_{r=1}^{R_0} v_{ir} \omega_r, \end{aligned}$$

где \vec{F}_q – плотность теплового потока; T – абсолютная температура; k – число компонентов; \vec{F}_{di} – плотность диффузионного потока i -го компонента; W_i – химический потенциал i -го компонента; \vec{F}_{mi} – сила масс, действующая на i -й компонент; P_g – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы; R_0 – число протекающих реакций; v_{ir} – стехиометрический коэффициент i -го компонента r -й реакции; ω_r – скорость r -й реакции.

Производство энтропии в соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина–Гленсдорфа, определяющей условия перехода к эволюции, стационарному и устойчивому состояниям [24], дает возможность рассматривать режимы изменений состояний технологической системы по критериям, описывающим фазовые переходы.

Критерии термомеханических процессов. Критерии переноса устанавливают последовательности структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при постепенном (\Rightarrow) и резком (\rightarrow) возрастании мощности воздействий потоками энергии [6, 16, 17]:



где $Pe = vt/\omega$ – критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности;

$Pr = \nu/\omega$ – критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде;

$Pe = vt/\nu$ – критерий Рейнольдса, описывающий переход движения обрабатываемого материала из ламинарного в турбулентное;

$In = \beta g \nabla T l^2 / \nu^2$ – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;

$Ds = \lambda \nabla T l / (\nu \rho \nu)$ – отношение сил капиллярности и вязкости;

$Mr = \lambda \nabla T l^2 / (\rho \omega \nu)$ – критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения;

$Gr = \beta g \nabla T l^4 / \nu^2$ – критерий Грасгофа, характеризующий естественную конвекцию при свободном движении обрабатываемого материала внутри формируемого слоя;

$Ra = \beta g \nabla T l^4 / (\omega \nu)$ – критерий Рэлея, описывающий образование силой плавучести пространственно-периодических конвекционных вихрей,

где ν – коэффициент кинематической вязкости;

l – характерный размер;

ω – коэффициент температуропроводности;

β – коэффициент объемного расширения;

g – ускорение свободного падения;

T – абсолютная температура;

λ – коэффициент термокапиллярности;

ρ – плотность обрабатываемого материала.

Критерии электромагнитных процессов. Критерии, характеризующие электромагнитные потоки, при интенсивной обработке взаимосвязаны с последовательностями критериев переноса, поэтому они оказывают существенное влияние на последовательности изменения поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [3, 17, 25]:

$$Sm (Em/Se) \Rightarrow Si \rightarrow Mr (Ek) \Rightarrow E (Tk/Ek) \Rightarrow Ra,$$

где $Sm = IB / (\nu^2 \rho t)$ – критерий магнитного взаимодействия;

$Em = v E_1 / (H' B)$ – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;

$Se = E_1 t^2 / (IR)$ – критерий напряженности электрического поля;

$Si = I^2 R / (\nu \rho H' t^3)$ – энергетический критерий;

$Ek = \varepsilon^* \gamma^{*2} \nabla T / \lambda$ – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;

$E = \varepsilon^* \gamma^{*2} \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$ – термоэлектрический критерий;

$Tk = \rho \beta g t^2 / \lambda$ – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе,

где I – сила тока;

B – магнитная индукция;

E_1 – напряженность электрического поля;

H' – энтальпия потока;

R – электросопротивление;

ε^* – диэлектрическая проницаемость;

γ^* – коэффициент термоэлектродвижущей силы.

Совершенство критериев теплопереноса и критериев, характеризующих электромагнитные потоки, описывает взаимодействие гидродинамических и электродинамических подсистем в открытой технологической системе интенсивной обработки. Такое взаимодействие осуществляется как на уровне подсистем путем наложения полей и воздействия потоков на технологическую среду, так и на уровне элементов системы, посредством изменения их кинематических, динамических и объемных характеристик [16, 17, 26].

Проектирование технологий упрочняющей обработки

Использование последовательностей критериев переноса, анализ режимов перехода и состояний технологической системы многократно сокращают объем экспериментальных исследований при проектировании методов упрочняющей обработки поверхности материалов [3, 16, 17, 25].

Рассмотрим проектирование плазменно-механического (рис. 1), электромагнитного (рис. 2) и электронно-лучевого

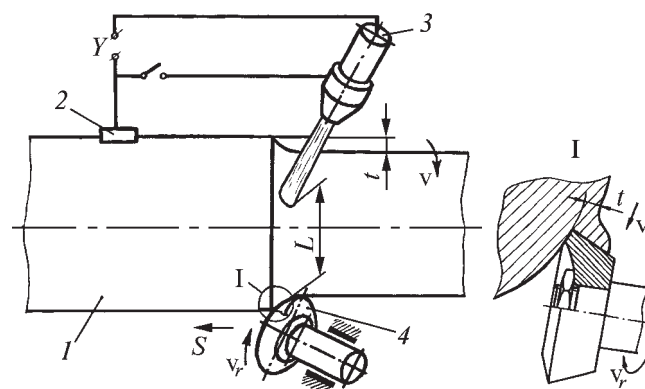


Рис. 1. Обработка ротационным резцом с предварительным плазменным нагревом (v – скорость главного движения; v_r – скорость дополнительного движения; S – подача; t – глубина резания; L – расстояние от пятна нагрева до инструмента; I – сила тока плазменной дуги);

1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – плазматрон; 4 – ротационный резец

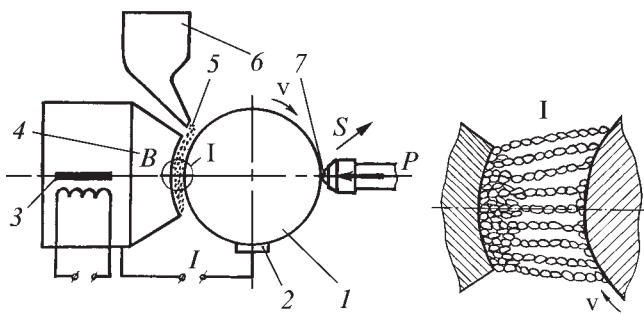


Рис. 2. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием (v – скорость главного движения; S – подача; P – сила деформирования; B – магнитная индукция; I – сила тока электродугowych разрядов):
 1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – электромагнит; 4 – полюсный наконечник; 5 – ферромагнитный порошок; 6 – дозирующее устройство; 7 – шариковый обкатчик

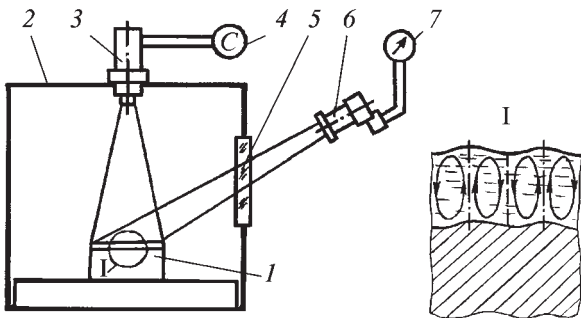


Рис. 3. Электронно-лучевой нагрев поверхности:
 1 – обрабатываемая деталь; 2 – вакуумная камера; 3 – электронная пушка с системами фокусировки и развертки; 4 – секундомер; 5 – иллюминатор; 6 – пирометр; 7 – милливольтметр

(рис. 3) методов формирования поверхности материалов, используя предложенные последовательности критериев, анализируя режимы обработки и состояние технологической системы.

Плазменно-механическая обработка. Для определения режимов устойчивого формирования параметров качества обработки в процессе ротационного резания с предварительным плазменным нагревом (см. рис. 1) согласно критериям Pe , Pr , Re , описывающим изменения проводимости и вязкости среды при увеличении интенсивности воздействий, рассматривали малые отклонения составляющих сил P и моментов M формообразования поверхности (рис. 4).

Результаты исследований показали, что возможны два типа равновесных состояний: *неустойчивый узел* (НУ) и *неустойчивое седло* (НС) [16, 27]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает аперiodические самовозбуждающиеся движения, которые переходят в устойчивые автоколебания *предельного цикла* (ПЦ).

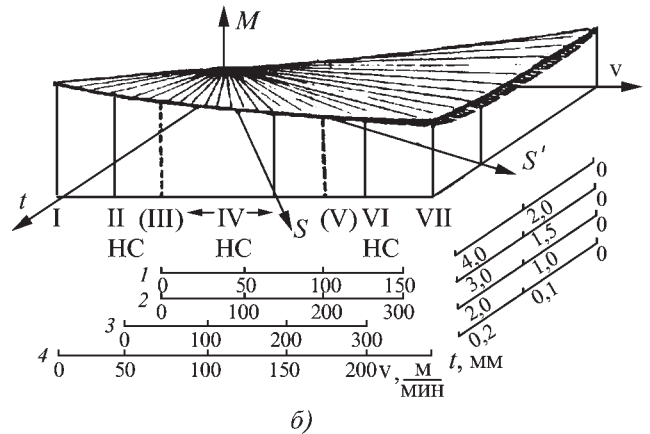
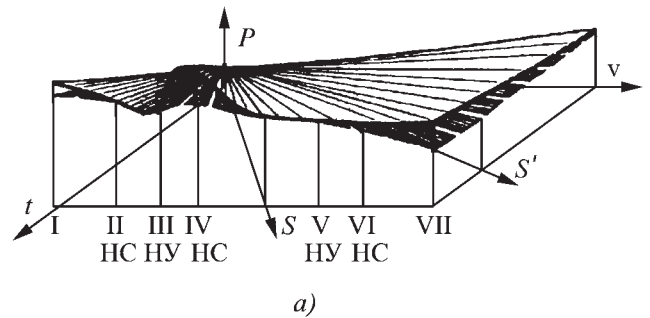


Рис. 4. Отклонения составляющих сил P (а) и моментов M (б) формообразования поверхности на стадиях структурообразования (I–VII) в зависимости от скорости v и глубины t резания:
 1 – титановых сплавов; 2 – конструкционных сталей; 3 – хромоникелевых сталей; 4 – хромоникелевых порошковых покрытий

В режиме НС при малых отклонениях динамические параметры системы удаляются от положения равновесия в заданных направлениях. Всегда существуют два новых стабильных состояния, к которым приближается система (см. рис. 4, а). Эти состояния могут слиться, расширив диапазоны своего существования, при использовании дополнительных перемещений – вращений режущей кромки ротационного инструмента (см. рис. 4, б).

Анализ образования структур упрочненного поверхностного слоя в процессе плазменно-механической обработки при исследовании влияния устойчивости динамических характеристик P и M на формирование параметров качества поверхности показал возможность использования режимов НУ при черновой обработке и позволил рекомендовать режимы НС для чистовой обработки [16, 27].

Электромагнитная обработка. Оптимальные режимы электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (см. рис. 2) определяли с использованием критериев тепломассопереноса Pe , Pr , Re и электромагнитных потоков Sm , Se , Si .

Вязкость и проводимость технологической среды, формируемой в рабочей зоне под воздействием электромагнитного поля частицами ферромагнитного порошка, описываются соотношениями ротационной и трансляционной со-

ставляющих напряженного состояния ферропорошковой среды [16, 28]. Электромагнитное поле согласно критерию магнитного взаимодействия Sm изменяет напряженное состояние технологической среды через произведение IB , управляя магнитными потоками и создавая, в соответствии с критерием напряженности электрического поля Se , через отношение E_1/I необходимую разность потенциалов между частицами порошка, заготовкой и полюсным наконечником. В результате при электромагнитной наплавке обеспечивается тепловое действие тока I^2R , описываемое энергетическим критерием Si .

В процессе поверхностного пластического деформирования нагретой при наплавке поверхности определены те же типы равновесных состояний НУ и НС, характеризующие не только вращением, но и прецессией деформирующего элемента – шарика. В соответствии с режимом формируется траектория пятна контакта по обрабатываемой поверхности: петлеобразная или волнообразная кривая [16, 28].

В результате управление процессом формирования поверхностного слоя осуществляется воздействиями потоков энергии и вещества через потоки электромагнитного поля, степени свободы частиц технологической среды и инструментов.

Электронно-лучевая обработка. Стабильность формирования параметров качества при электронно-лучевом нагреве поверхности (см. рис. 3) определяли по критериям тепломассопереноса Mr, Gr, Ra и по термоэлектрическому критерию E . При этом параметры качества обработки (рис. 5, а) сравнивали с количеством формируемых структур, характеризующим относительной площадью S_0 модифицированной поверхности (рис. 5, б) [17, 29].

Образование ячеистой структуры на модифицируемой поверхности титанового однофазного псевдо- α -сплава происходит при формировании вихревых диссипативных структур в жидком состоянии (см. рис. 3). Вначале зарождаются, а затем отодвигаются на периферию узкие ячейки, формируемые термокапиллярной силой, описываемой критерием Марангони Mr .

С ростом интенсивности электронно-лучевого воздействия в центре зоны нагрева естественная конвекция, характеризующая критерием Грасгофа Gr , размывает вихревые диссипативные структуры. Широкие тороидальные вихри, создаваемые силой плавучести, описываемой критерием Рэлея Ra , при электронно-лучевом воздействии наблюдаются только при глубоком оплавлении поверхности [26, 29]. Термоэлектрический критерий E характеризует влияние ионизированного жидкого металла на вихревые течения в ванне расплава [17, 26].

Исследование соотношения площади S_0 поверхности с ячеистой структурой и общей площади оплавленного участка в зависимости от удельной мощности q и продолжительности нагрева τ показало, что наибольшая площадь с регулярной структурой ($S_0 = 40\%$) образуется в узком диапазоне интенсивности нагрева [16, 29].

Рассмотренные типы равновесных состояний технологической системы НУ и НС наблюдаются также и при электронно-лучевой обработке. Так, образование ячеистой структуры на максимальной площади характеризуется режимом НУ, трансформирующимся в предельный цикл. Огра-

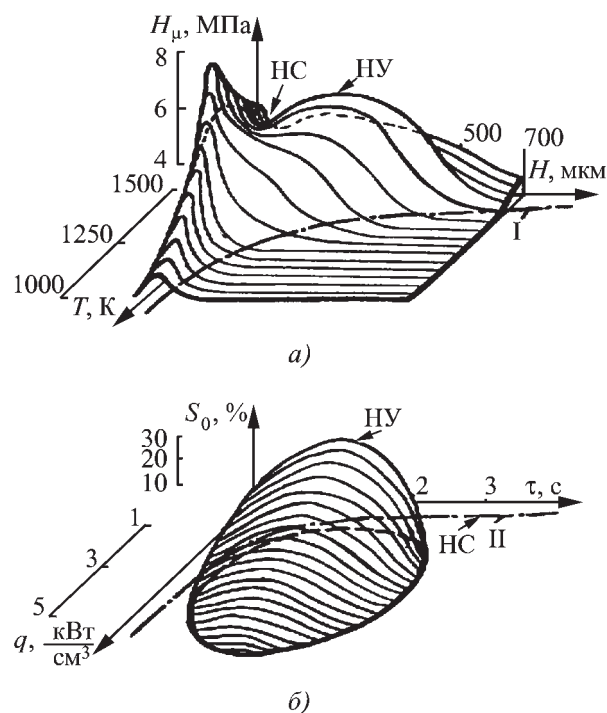


Рис. 5. Распределение микротвердости H_u по глубине H поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (а) при изменении температуры T и относительная площадь поверхности S_0 с модифицированной структурой в зависимости от удельной мощности q и продолжительности τ электронно-лучевого нагрева (б) (видимая граница модифицированного слоя (I) и граница плавления (II))

нением цикла являются процессы перехода обрабатываемого материала из твердого в жидкое состояние. Формирование поверхности раздела – границы плавления – описывается режимом НС. Движения от поверхности раздела в противоположных направлениях, путем теплопроводности и конвекции тепловых потоков, стабилизируют различные фазы системы [3, 16, 17, 25].

Зависимости изменения микротвердости структур (см. рис. 5, а), характеризующие физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов с покрытиями, выглядят аналогично зависимостям формирования ячеистых структур (см. рис. 5, б). Химические реакции, растворение в твердом состоянии элементов покрытия, образование фаз эвтектического состава, оплавление поверхности покрытия с образованием регулярной структуры, подплавление основы с образованием переходной зоны, формирование диффузионной зоны при электронно-лучевых воздействиях приводят к изменению микротвердости по глубине поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (см. рис. 5, а) [16, 19, 29].

Следовательно, для управления прочностью сцепления покрытия с основой и улучшения физико-химических параметров обрабатываемых поверхностей необходимо ограничивать диапазон интенсивности электронно-лучевого воздействия в соответствии как с химическим составом, так и толщиной покрытия [30].

Заключение

Математическое моделирование и алгоритмизация принятия решений путем определения вида уравнений, установления критериев подобия и анализа равновесных состояний системы при проектировании технологий упрочняющей обработки поверхностей концентрированными потоками энергии показали, что системный анализ при проектировании методов обработки, помимо эквивалентности и предпочтения, должен базироваться на доминировании свойств отношений технологических решений.

Согласно синергетической концепции определено, что доминирование контролируемых параметров приводит к ограничению числа состояний технологической системы, которые определяются отношениями времен релаксации параметров системы. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями переноса, характеризующими определяющие параметры интенсивных воздействий, а механизмы формирования параметров качества обработки определяются режимами равновесных состояний технологической системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.
2. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. Минск: Наука и техника, 1984. 288 с.
3. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко, А.С. Васильев // Доклады НАН Беларуси. 2005. Т. 49. № 2. С. 130–135.
4. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк: ПГУ, 2001. 156 с.
5. Управление свойствами технологической среды при электрофизической обработке / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов, М.Л. Хейфец // Тяжелое машиностроение. 2004. № 7. С. 18–23.
6. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын, А.И. Аверченков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 106–109.
7. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, И.А. Сенчило, М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. 1995. Т. 39. № 1. С. 112–116.
8. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
9. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Навукова думка, 1989. 192 с.
10. Голоденко Б.А., Смоленцев В.П. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 1994. № 4. С. 25–28.
11. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А.Г. Раковича. Минск: ИТК НАНБ, 1997. 276 с.
12. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.
13. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.
14. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев: Техника, 1977. 768 с.
15. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
16. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 276 с.
17. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. Минск: ФТИ НАНБ; Новополоцк; ПГУ, 2000. 172 с.
18. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 10. С. 1105–1144.
19. Технологическо-эксплуатационные барьеры в поверхностном слое при высокоинтенсивной обработке металлов / П.И. Ящерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро // Доклады АН Беларуси. 1997. Т. 41. № 5. С. 110–113.
20. Артоболевский И.И., Ильинский Д.Я. Основы синтеза машин автоматического действия. М.: Наука, 1983. 280 с.
21. Совершенствование производственных систем на основе создания условий для самоорганизации технологических процессов и объектов / П.И. Ящерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок // Доклады АН Беларуси. 1996. Т. 40. № 1. С. 118–121.
22. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем. М.: Сов. радио, 1976. 296 с.
23. Проектирование мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева, Л.М. Акулович // Доклады НАН Беларуси. 2003. Т. 47. № 6. С. 120–124.
24. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 280 с.
25. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, М.Л. Хейфец и др. Минск: ФТИ НАНБ; Новополоцк; ПГУ, 2002. 216 с.
26. Эйдельман Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 11. С. 1279–1294.
27. Комбинированный метод обработки ротационным инструментом с нагревом срезаемого слоя концентрированными потоками энергии / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, Н.Н. Попок, М.Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси. 1992. Т. 36. № 5. С. 429–432.
28. Комбинированный метод электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием / П.И. Ящерицын, Г.А. Деев, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси. 1993. Т. 37. № 4. С. 114–117.
29. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Минск: Наука и техника, 1995. 280 с.
30. Использование критериев подобия при проектировании комбинированных физико-химических методов обработки материалов / А.И. Гордиенко, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. 2004. Т. 48. № 4. С. 107–110.

УДК 621.791.927:620

И.М. Полетика, С.Ф. Гнюсов, М.Г. Голковский, Ю.Ф. Иванов, Т.А. Крылова,
С.А. Макаров, А.Д. Тересов (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск)
E-mail: poletika@list.ru

Создание упрочняющих покрытий электронно-лучевой наплавкой и последующей импульсной обработкой электронным пучком*

Получены покрытия с ультрадисперсной и наноразмерной структурами, обладающие высокой твердостью и износостойкостью, методом наплавки в пучке релятивистских электронов и последующей импульсной обработкой низкоэнергетическим электронным пучком. Предложены диаграммы "нагружение—разгрузка" нескольких типов. Показано, что формирование наноразмерной структуры с развитой системой пор предотвращает хрупкое разрушение покрытий.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, импульсная обработка, наноструктура, нанотвердость, износостойкость, разрушение.

The coatings with ultradispersed and nanodimensional structure has been fabricated by method of low energy electron-beam surfacing and pulsed post treatment. Few types of "loading-unloading" diagrams are suggested. The formation of nanodimensional structure with pore system was shown to prevent brittle fracture of coatings.

Keywords: electron-beam surfacing, pulse treatment, nanostructure, nanohardness, wear resistant, fracture.

В последние годы успешно развиваются технологии нанесения упрочняющих покрытий с использованием концентрированных источников энергии. Одним из таких источников является поток релятивистских электронов. Ускорители электронов позволяют выводить пучок с энергией 1...1,6 МэВ и мощностью до 100 кВт в атмосферный воздух, расплавлять любые тугоплавкие компоненты и соединения с последующей их кристаллизацией в виде высокотвердых, износостойких и коррозионно-стойких фаз, получать покрытия практически любого состава и назначения [1–4].

Одним из путей дальнейшего модифицирования наплавленных покрытий может служить их перевод в нанокристаллическое состояние, что приведет к качественному изменению механических и физико-химических свойств. Измельчения структуры покрытий можно добиться путем их переплавления низкоэнергетическими (5...30 кэВ) импульсными (30...200 мкс) электронными пучками, которые обеспечивают сверхвысокие (до 10^9 К/с) скорости нагрева, плавления и последующей кристаллизации. В работах [5–7] выявлены и обоснованы режимы электронно-пучковой обработки в вакууме, позволяющие формировать приповерхностные слои с аморфной, нано- и субмикрокристаллической структурой.

Результаты исследований нанокристаллических материалов обобщены в работах [8–12]. Особый интерес представляет изучение механических свойств таких материалов, определение которых в локальных объемах, соответствующих наноразмерам структурных составляющих, требует применения специальных методик, которые в настоящее время успешно развиваются [11–13]. Это, прежде всего, силовой нанотестинг приповерхностных слоев материалов.

Вопросы наноиндентирования и нанотрибологии рассмотрены в работах [11, 12]. Большой интерес представляет также исследование явлений деформации и разрушения в зоне наноструктуризации.

Целью данной работы явилось получение покрытий методом электронно-лучевой наплавки в пучке релятивистских электронов порошка карбида хрома на низкоуглеродистую сталь, повторная обработка этих покрытий низкоэнергетическими электронными пучками в импульсном режиме облучения и изучение закономерностей формирования структуры и механических свойств наноразмерных слоев.

Материалы и методы исследования

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки при ускоряющем напряжении электронов 1,4 МэВ, токе пучка 22,5 мА и скорости поступательного перемещения образца под пучком 0,67 м/с на поверхности низкоуглеродистой стали Ст3 сформировали покрытия, используя в качестве наплавочного материала порошок карбида хрома (Cr_3C_2).

Повторную электронно-лучевую импульсную обработку производили на лабораторной установке Solo при ускоряющем напряжении 18 кэВ, плотности энергии пучка электронов 15...45 Дж/см², длительности импульса излучения 200 мкс, частоте следования импульсов 0,3 Гц и их количестве 1...10. Давление остаточного газа аргона в рабочей камере установки составляло 10^{-2} Па. Образцы с исходной наплавкой перед облучением на установке Solo шлифовали и полировали.

Структуру исходных наплавленных слоев исследовали методом металлографии на поперечных шлифах с помощью микроскопа Neophot ($\times 500$). Проводили также электронно-микроскопическое исследование образцов на микроскопе ЭМ-125 методом тонких фольг с привлечением мето-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 09-03-12039 офи-м).

дов электронной микродифракции с отдельных деталей микроструктуры и темнопольного изображения.

Фазовый состав определяли на дифрактометре ДРОН-2М в кобальтовом излучении. Распределение хрома в наплавленных слоях исследовали на рентгеновском микроанализаторе САМЕВАХ. На приборе ПМТ-3 изучали распределение микротвердости в направлении от поверхности в глубь образца при нагрузке 0,49 Н с шагом 40...100 мкм. Проводили испытания на абразивный износ о незакрепленные абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом (ГОСТ 23.208–79).

Поверхность после вторичной электронно-лучевой обработки исследовали на микроскопе Neophot ($\times 500...1000$) и на растровом электронном микроскопе SEM-515 марки Philips ($\times 2000...40\,000$). Одновременно с помощью имеющегося в микроскопе рентгеновского микроанализатора (диаметр зонда 50 нм) определяли содержание хрома в поверхностных слоях и строили зависимости концентрации хрома от расстояния до поверхности. Фазовый состав слоев, как и в предыдущем случае, определяли методом стандартного рентгеноструктурного анализа.

На приборе Nano Hardness Tester фирмы CSEM методом кинетической твердости на поперечных шлифах покрытий измеряли нанотвердость и ее распределение в слоях вторичной импульсной обработки. В каждом отдельном измерении к материалу прикладывали изменяющуюся во времени нагрузку P и записывали параметры нагружения и перемещения индентора h в функции времени, а также зависимость $P(h)$. Метод позволял в одном цикле "нагружение–разгрузка" определять глубину невосстановленного h_{\max} и восстановленного (пластического) h_r , отпечатков и модуль упругости Юнга E (по наклону $\tan \alpha$ линейной части разгрузочной кривой).

Твердость по Виккерсу находили делением максимальной нагрузки P_{\max} на площадь контакта алмазной пирамидки A_c с материалом после разгрузки

$$HV = P_{\max} / A_c \cdot 9,81.$$

Измерение нанотвердости производили на глубине от 1 до 30 мкм при нагрузке на индентор 5...10 мН. Строили зависимости нанотвердости и модуля Юнга от расстояния до поверхности. По форме кривых "нагружение–разгрузка" определяли характер деформации при вдавлении пирамидки.

Трение и износ в нанобъемах исследовали с использованием трибометра High Temperature Tribometer, действие которого основано на трении находящегося под нагрузкой индентора о поверхность плоского образца, на который нанесли трек. Связанный с индентором тензодатчик передает сигнал на компьютер, где определяется коэффициент трения. Морфологию поверхности трека изучали на трехмерном профилометре Micro Measure 3D station с диаметром зондирующего светового луча 2 мкм, разрешением по оси z – 1 нм, по осям x и y – 0,1 мкм и площадью сканирования 100 мм².

Анализ полученных данных с помощью компьютерной программы Mountains Map Universal позволяет получить

трехмерное изображение поверхности образца с треком и определить площадь трека в различных его сечениях. В качестве индентора использовали шарик из вольфрамового твердого сплава, прилагая к нему нагрузку 5 Н.

Проводили испытания на изгиб (ГОСТ 18228–94) образцов с наплавленным слоем на машине МИРИ-100К со скоростью нагружения 3 мм/мин. Образцы представляли собой шлифованные прямоугольные призмы размером 5×5×55 мм с толщиной слоя электронно-лучевой наплавки 0,5...1,5 мм. Часть образцов подвергали импульсной обработке электронным пучком. Испытания прекращали в момент появления в слое магистральной трещины.

По результатам испытаний определяли угол изгиба α и прочностные характеристики материала. На полированных поверхностях в поперечном сечении образца методом металлографии исследовали картину образования и развития трещин. Особенности трещинообразования и разрушения наблюдали также в растровом электронном микроскопе.

Структура покрытий до и после импульсной электронно-лучевой обработки

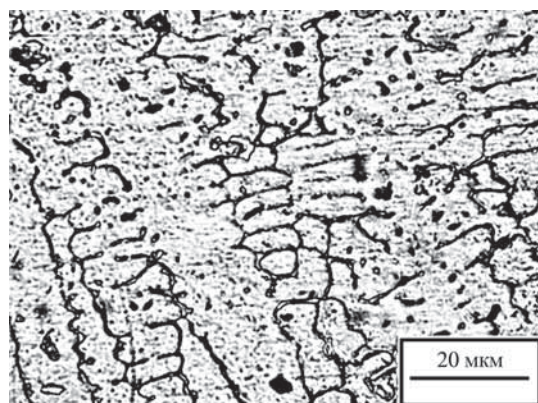
При наплавке на поверхности стали образуется слой толщиной 1,5 мм, содержащий 23...25 % мас. хрома. Методом рентгеноструктурного анализа в слое выявлена α -фаза (феррит). Присутствие карбидов хрома не обнаружено, что, по-видимому, связано с их дисперсностью и относительно небольшим количеством.

Основная часть вводимого при наплавке хрома переходит в твердый раствор. Это подтверждается данными металлографического исследования, согласно которым структура слоя состоит из зерен твердого раствора и небольшого количества перитектики, располагающейся в виде прослоек по границам зерен (рис. 1, а), а также низкими значениями твердости и износостойкости (среднее значение микротвердости составляет 1750 МПа, коэффициент износостойкости покрытия равен 1,4), незначительно превышающими таковые в исходном металле, и могут быть связаны с твердорастворным упрочнением. Средний размер зерен феррита в наплавленном покрытии составляет 13 мкм.

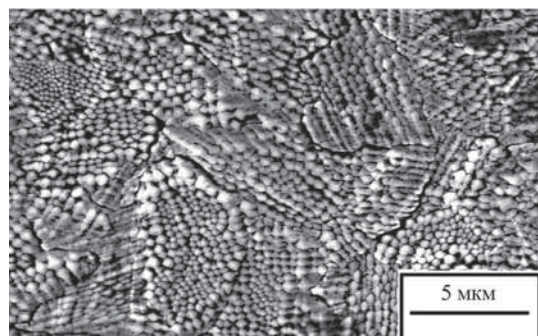
Электронно-микроскопическое исследование показывает, что прослойки перитектики состоят из скоплений образований пластинчатой формы. Полученные с этих участков электронограммы имеют наборы рефлексов, принадлежащих α -фазе и карбидным фазам – соединениям Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$, иногда обнаруживаются рефлексы, связанные с выделениями цементита.

После импульсной электронно-лучевой обработки поверхностного слоя покрытий, предварительно наплавленных в пучке электронов, образуется зона переплава толщиной 10...20 мкм, где в связи с высокой скоростью охлаждения из жидкого состояния (до 10^9 К/с) формируется ультрадисперсная и наноразмерная структуры (рис. 1, б, в).

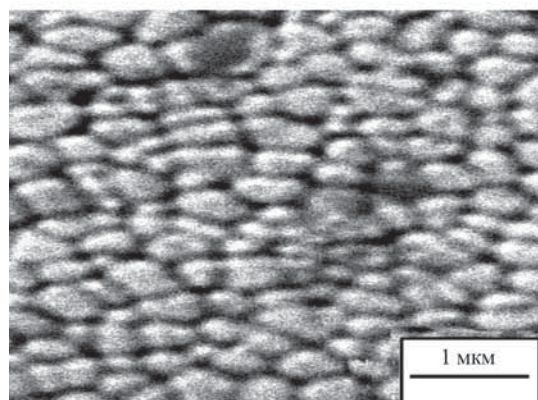
Кристаллизация расплава развивается следующим образом. От границы жидкого металла с находящейся в твердом состоянии подложкой в направлении, обратном направлению теплоотвода, растут столбчатые кристаллы, которые дорастают до поверхности образца. Столбчатые кристаллы внутри имеют дендритное строение и состоят из пакетов одинаково ориентированных дендритных зерен. Пакеты



а)



б)



в)

Рис. 1. Структура слоя наплавки карбидом хрома (а) и зоны импульсной обработки (б, в) при плотности энергии излучения $W = 20$ (в) и 30 (б) Дж/см²

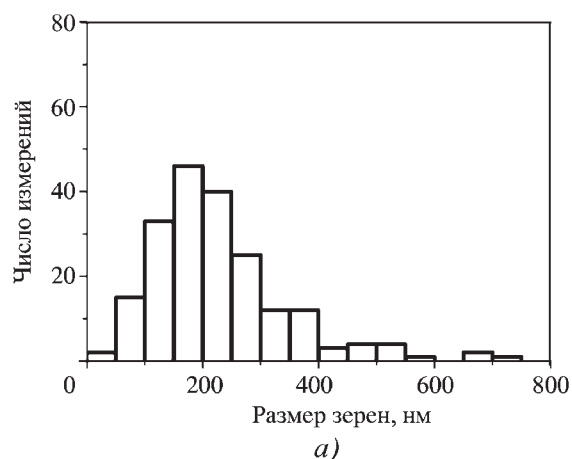
дендритов, принадлежащие различным кристаллам, повернуты друг относительно друга на некоторый угол. Разориентация пакетов хорошо видна, если посмотреть на поверхность обработки сверху (см. рис. 1, б).

На лицевой поверхности покрытия наблюдаются верхушки проросших из расплава зерен дендритов (см. рис. 1, в). Из-за сверхвысокой скорости охлаждения расплава дендриты не успевают развиться до нужных размеров и заполнить собой все пространство слоя – промежутки между

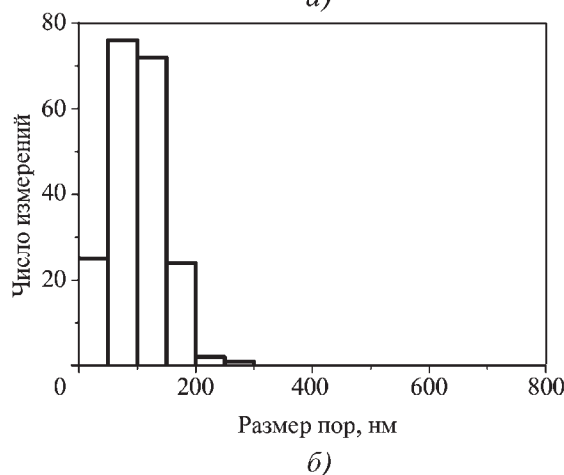
дендритами остаются свободными. Образуется система пустот (пор), которые создают своеобразную решетку, пронизывающую весь слой импульсной обработки сверху донизу. Сечения дендритных зерен имеют округлую форму, оси второго порядка не успевают сформироваться – наблюдаются лишь бугорки на боковой поверхности главных осей (см. рис. 1, б, в).

Определенное методом рентгеновского микроанализа распределение хрома и железа в покрытии после импульсной обработки согласуется с характером образующейся в нем структуры. Концентрации хрома и железа при продвижении от периферии к поверхности покрытия уменьшаются, что соответствует уменьшению среднего содержания элементов в единице объема слоя при наличии в нем пор. Что касается фазового состава слоев импульсной обработки, наплавленных карбидом хрома, кроме α -железа, других фаз методом рентгеноструктурного фазового анализа выявить не удалось.

Для количественного описания структурных изменений в зоне импульсного воздействия были оценены (методом секущей) распределения зерен и пор по размерам в боковом и поперечном сечениях главных осей дендритов. На рис. 2 приведены гистограммы таких распределений. Средние размеры дендритных зерен и пор на поверхности покрытий



а)



б)

Рис. 2. Гистограммы распределений зерен (а) и пор (б) по размерам в слое импульсной обработки при $W = 20$ Дж/см²

после импульсной обработки в интервале значений плотности энергии излучения 15...45 Дж/см² соответственно равны 190...440 нм и 90...160 нм. Доля зерен с размером, меньшим или равным 100 нм, который, согласно общепринятому критерию, считается наноразмерным, составляет 25...30 %. Объемная доля пор равна 10...15 %, среди них число наноразмерных пор достигает 50...80 %.

**Определение твердости методом
наноиндентирования**

Проведены измерения нанотвердости в направлении от поверхности слоя импульсной обработки в слой исходной наплавки. Определены соответствующие значениям нанотвердости модули упругости. Из анализа полученных результатов следует, что в зоне импульсного облучения твердость по Виккерсу и модуль упругости *E* достигают высоких значений, в отдельных случаях близких к твердости и упругости алмаза, но на одной и той же глубине проникновения индентора колеблются в широких пределах (рис. 3).

Наблюдаемое явление связано с наличием в материале системы пор. При попадании индентора в зерно твердость возрастает, а при попадании в пору падает. Характерно, что в исходном наплавленном состоянии увеличения твердости в сравнении со стальной подложкой фактически не было. Причиной роста твердости после импульсной обработки служит формирование наноразмерной и ультрадисперсной структуры, обладающей уникальными свойствами.

При наноиндентировании регистрируются диаграммы "нагрузка-разгрузка" нескольких видов:

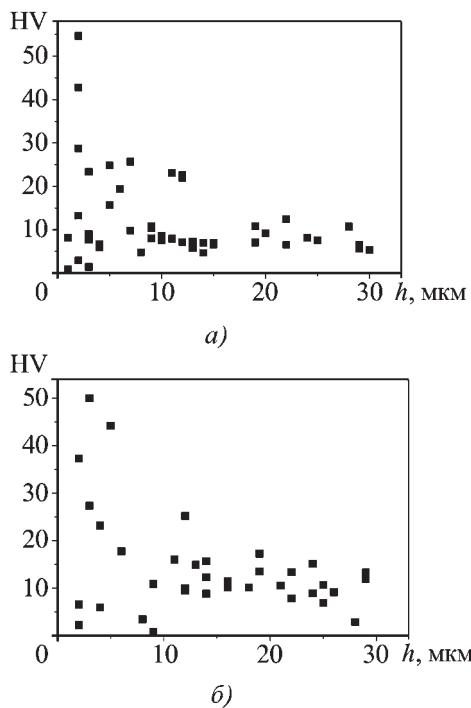


Рис. 3. Распределение нанотвердости, ГПа, (а) и модуля упругости (б) в слое импульсной обработки

1) диаграммы преимущественно упругой деформации, когда кривые нагружения и разгрузки очень близки или сливаются (рис. 4, а);

2) диаграммы, для которых вклад упругой и пластической деформации под контактной площадкой становится сопоставимым или пластическая деформация преобладает – кривые нагружения и разгрузки не совпадают (рис. 4, б);

3) диаграммы с площадкой на кривой нагружения, что соответствует резкому переходу от упругой к пластической деформации под индентором (рис. 4, в);

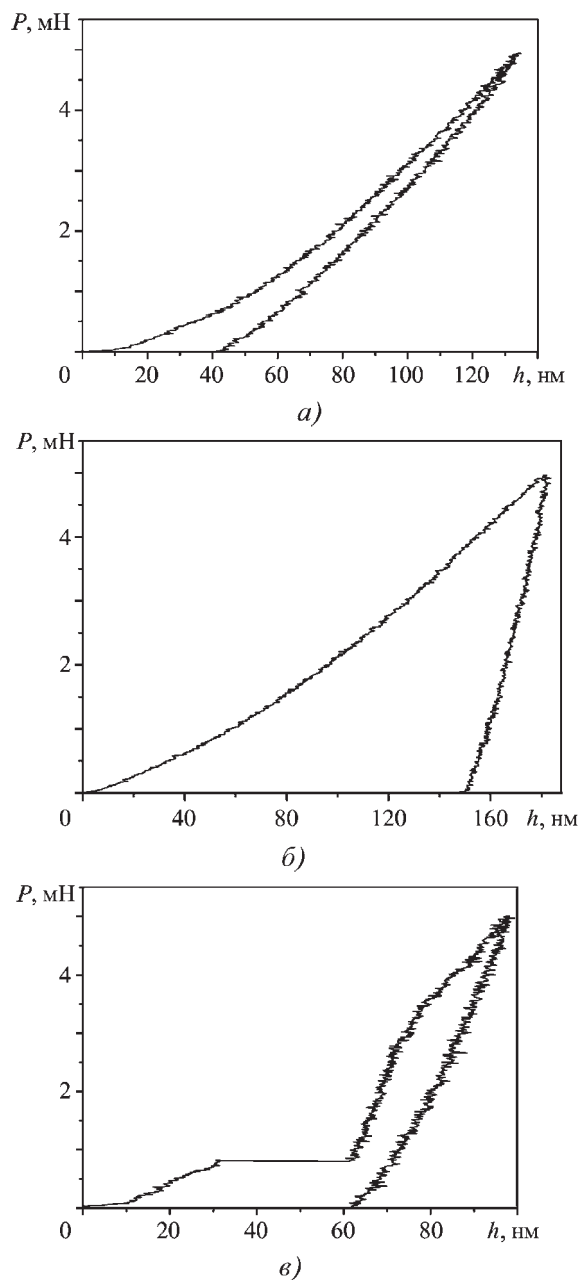


Рис. 4. Диаграммы "нагрузка-разгрузка", полученные при измерении нанотвердости (глубина измерения – 3 (а), 5 (б) и 9 (в) мкм)

4) диаграммы с резкими колебаниями, протяженными площадками и аномальным ходом кривых $P(h)$ на графиках при попадании индентора в поры.

Диаграммы, аналогичные типам 1, 2 и 3, полученные при наноиндентировании широкого круга материалов (Fe, Al, Cu, Au, Nb, Ta, W и др.), наблюдались и в работах [11, 12].

Диаграммы типа 2, характеризующиеся малой пластичностью, в этих работах связывают с начальными стадиями развития пластической деформации, когда дислокационные механизмы еще не работают, происходит зарождение и перемещение точечных дефектов (междоузельных атомов, кластеров, нанодвойников и др.).

Недислокационный (вакансионный) механизм пластической деформации нанокристаллических материалов обсуждается в работе [13]. Диаграммы типа 2 с большим вкладом пластической деформации свидетельствуют о включении дислокационных механизмов течения – зарождении и движении дислокационных петель при достижении ими критического радиуса.

Наличие площадки на кривых нагружения диаграмм типа 3 объясняется скачкообразным переходом от упругой к пластической деформации при лавинообразном увеличении количества носителей пластической деформации, в основном, заблокированных ранее дислокационных петель. Это явление по своей природе аналогично появлению "зуба текучести" в моно- и поликристаллах и сопровождается быстрым погружением индентора в материал под действием неизменной нагрузки – своеобразный "предел текучести в нанобъеме".

Обращает на себя внимание неустойчивость (нестабильное развитие) деформации при наноиндентировании, что

проявляется в зигзагообразной форме кривых нагружения и разгрузки (см. рис. 4). Это, согласно упомянутым выше работам, может быть обусловлено динамическим деформационным старением, связанным с закреплением дислокаций диффундирующими точечными дефектами – проявлением эффекта Портевена–Ле–Шателье в условиях пластической деформации микрообъема; локализацией деформации в полосах сдвига; фазовыми превращениями, в частности мартенситным, индуцированными высокими давлениями под индентором; зарождением микротрещин и др.

Имеющее место разнообразие типов диаграмм "нагружение–разгрузка" связано с неоднородным распределением концентрации напряжений в слое импульсной обработки и с наличием в нем пор. Причем, отдельные области металла находятся в сильно напряженном состоянии и выталкивают индентор. Прибор реагирует на это аномальным повышением определяемых значений твердости и модуля упругости.

Исследование износостойкости наноразмерных покрытий

На трибометре High Temperature Tribometer проводили испытания образцов с покрытиями до и после импульсной обработки на износостойкость, определяли коэффициент трения f . Для оценки сопротивления покрытий износу измеряли площади треков в их поперечных сечениях ΔS . Для каждого из треков находили по четыре значения площадей и вычисляли их средние арифметические значения.

Исследование показало, что после импульсной обработки образцов коэффициент трения f понижается (рис. 5, а, б). Если значение коэффициента трения в исходной на-

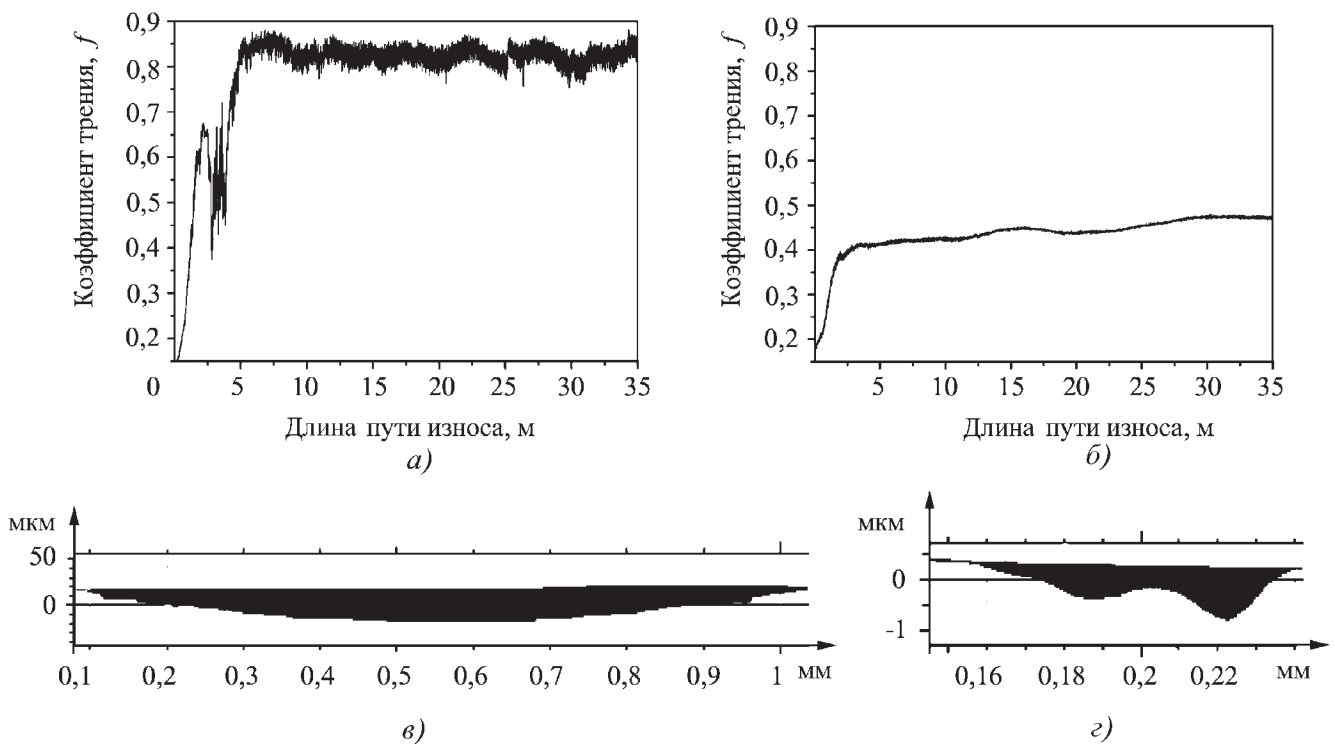


Рис. 5. Изменение коэффициентов трения в зависимости от пути износа (а, б) и площади поперечных сечений треков (в, г) в исходной наплавке (а, в) и после импульсной обработки (б, г)

Площади треков ΔS и коэффициенты износостойкости K в исходной наплавке и в слоях импульсной обработки

W , Дж/см ²	Наплавка	Импульсная обработка				
	9400	20	25	30	35	40
ΔS , мкм ²	24 534	2201	165	2767	6454	11 062
	15 574	2968	86,7	3202	9242	10 850
	16 593	2053	139	2655	6908	8 202
	25 031	3611	177	2873	7502	10 164
$\Delta S_{\text{ср}}$, мкм ²	20 433	2708,3	141,9	2874,3	7526,5	10 069,5
K	—	7,54	143,97	7,11	2,71	2,03

плавке карбидом хрома равно 0,85, то после импульсной обработки оно уменьшается в зависимости от плотности энергии излучения до 0,40...0,55. Аналогичным образом меняются площади треков (рис. 5, в, з), текущие и средние значения которых приведены в таблице.

У исходных наплавленных образцов среднее значение площади поперечного сечения трека $\Delta S = 20\ 433$ мкм². После импульсной обработки при плотностях энергии 20...40 Дж/см² средние значения ΔS понижаются и составляют, в зависимости от режима облучения, 142...10 070 мкм².

Наличие неровностей на поверхности треков (см. рис. 5, в, з) свидетельствует о выламывании при износе отдельных фрагментов покрытия. Очевидно, твердости индентора, сопоставимой с твердостью покрытия, не хватает для равномерного удаления материала — удаляются целые области, в которых накапливаются сжимающие напряжения.

Для количественной оценки сопротивляемости покрытий износу при изнашивании наноиндентором был введен условный коэффициент износостойкости $K = \Delta S_1 / \Delta S_2$ (ΔS_1 , ΔS_2 — средние значения площадей треков в образцах с наплавкой соответственно до и после импульсной обработки). Коэффициенты K для всех использованных режимов импульсной обработки также приведены в таблице.

Анализ полученных значений K показывает, что при испытаниях слоев импульсной обработки износостойкость существенно возрастает в сравнении с исходной наплавкой. Максимальное значение коэффициента ($K = 144$) достигается при плотности энергии импульсного излучения $W = 25$ Дж/см². Меньшее значение коэффициента K при $W = 20$ Дж/см² связано с недостатком энергии импульсного излучения для равномерного проплавления слоя — на поверхности покрытия видны не проплавленные участки и капли застывшего расплава. При увеличении энергии W наблюдается снижение износостойкости (уменьшение K), которое можно связать с ростом среднего размера зерна в зоне импульсной обработки.

При испытаниях в наноразмерной шкале площадь контакта индентора с образцом сопоставима с размерами структурных составляющих. Как показывают оценки, проведенные на основании измерения ширины треков у поверхности износа и определения размеров зерен и пор в наноразмерном слое, при испытаниях на износ с индентором соприкасается всего от 400 до 700 зерен, и нагрузка на от-

дельное зерно велика. Поэтому, видимо, следует рассматривать деформацию отдельных зерен.

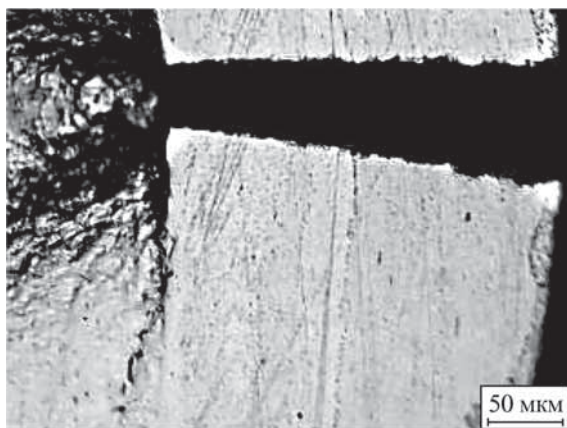
Поскольку дендритные зерна в покрытии имеют ферритную структуру (выделения вторых фаз не обнаружены), при нагружении индентором зерна феррита, который является самой мягкой фазой в стали, пластически деформируются без разрушения. Высокая износостойкость в данном случае связана с малым размером зерна и является особенностью наноразмерной структуры.

Разрушение покрытий

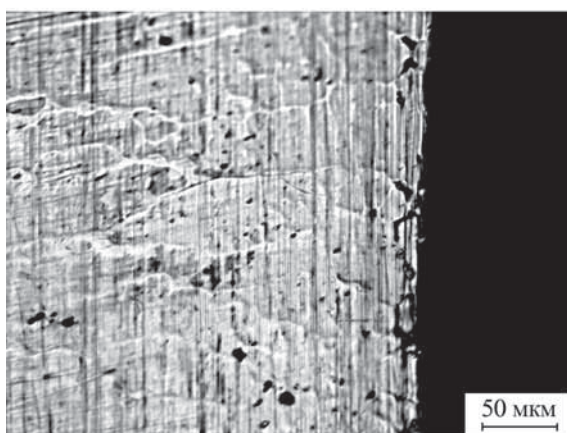
Слой импульсной обработки с нано- и ультрадисперсной структурой и развитой системой наноразмерных пор может служить барьером для развития хрупкого разрушения. Механизм действия такого слоя, по-видимому, следующий. Слияние двух (или нескольких) пор представляет собой готовую микротрещину. Траектория движения такой микротрещины пройдет через другие поры, но будет часто меняться, поскольку поры не выстроены в ряд, а распределены в структуре сложным образом. Многократное изменение траектории трещины, связанное с характером распределения пор и необходимостью огибать препятствия в виде зерен, приводит к значительному снижению ее энергии и торможению.

Подтверждением барьерного действия наноразмерного слоя служат данные, полученные при испытаниях образцов на изгиб. Испытания исходных наплавленных образцов показали значения угла изгиба, не превышающие 30°. Металлографическая картина разрушения свидетельствовала об образовании одиночной магистральной трещины, распространяющейся мгновенно через всю толщину покрытия (рис. 6, а), что характеризовало материал как очень хрупкий. Заходя в подложку (сталь Ст3), трещина разветвлялась на несколько мелких, совершая значительную пластическую деформацию. Кроме того, наблюдались многочисленные отслоения покрытия от основы.

Исследование поверхностей излома методом растровой электронной микроскопии показало, что разрушение обширной верхней части покрытия происходит путем хрупкого отрыва с реализацией микромеханизмов транскристаллитного разрушения — скола по кристаллографическим плоскостям с последующим слиянием элементарных повреждений — характерный речной узор (рис. 7, а). В нижней части покрытия (ближе к основному металлу) транскри-



a)



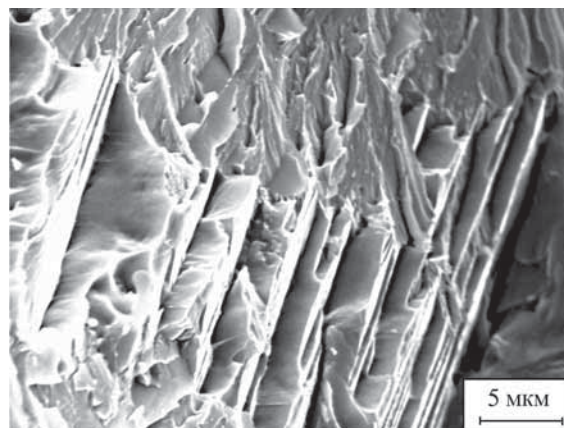
б)

Рис. 6. Образование трещин в слое наплавки до (a) и после (б) импульсной обработки при $W = 25 \text{ Дж/см}^2$

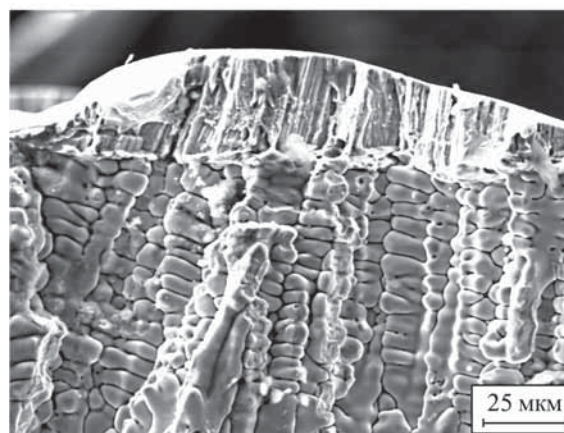
сталлитный излом чередуется с квазихрупким, который характеризуется наличием фасеток скола, окруженных гребешками пластического течения.

Испытания на изгиб образцов с покрытиями, подвергнутыми дополнительной импульсной электронно-лучевой обработке, показывают увеличение угла изгиба на $9...11^\circ$. При этом работа деформации, которая является комплексной характеристикой материала и определяется площадью под кривой "нагрузка–стрела прогиба", возрастает в среднем на 30%. На боковой поверхности образца, вместо одной магистральной, наблюдается множество мелких трещин, развивающихся с меньшей энергией. В промежутках между этими трещинами обнаруживаются области с расположенными в ряд неглубокими "надрывами" у поверхности покрытия (см. рис. 6, б).

Полученная методом растровой электронной микроскопии картина разрушения показывает, что слой вторичной импульсной обработки (переплава) также разрушается хрупко – по границам раздела между отдельными кристаллитами. При этом "обнажается" описанная выше структура, состоящая из столбчатых кристаллов, растущих со дна ван-



a)



б)

Рис. 7. Морфология поверхностей изломов покрытий в исходном наплавленном состоянии (a) и после импульсной обработки поверхностного слоя (б) с $W = 25 \text{ Дж/см}^2$

ны с расплавом. Однако расположенная под зоной импульсного воздействия, остальная часть покрытия разрушается вязко – во всех случаях наблюдается типичный вязкий ямочный излом (рис. 7, б).

Таким образом, формирование в поверхностных слоях наплавленных покрытий наноразмерных структур, содержащих поры, с одной стороны, провоцирует зарождение и развитие множества микротрещин, но с другой, является препятствием для образования крупных трещин и служит эффективным барьером для хрупкого разрушения покрытия в целом. Возникающие на поверхности покрытия растягивающие напряжения распределяются между множеством концентраторов, что увеличивает работу разрушения для отдельно взятой трещины и заканчивается вязким изломом.

Заключение

1. Наплавкой на ускорителе электронов и последующей импульсной обработкой электронным пучком сформированы ультрадисперсные и наноразмерные покрытия с развитой системой пор. Значения нанотвердости покрытий ме-

няются в широких пределах, в отдельных случаях приближаясь к твердости алмаза.

2. При наноиндентировании наблюдаются диаграммы "нагружение—разгрузка" нескольких типов, соответствующих различному характеру деформации локальных участков покрытия. Переход от упругой к пластической деформации в ряде случаев сопровождается образованием площадки текучести.

3. Коэффициенты трения и площади поверхностей износа покрытий в нанобъемах после импульсной обработки существенно уменьшаются в сравнении с исходной наплавкой. При формировании однородной наноразмерной структуры достигается аномально высокая износостойкость.

4. Формирование в зоне импульсной обработки наноразмерной структуры с развитой системой пор приводит к увеличению работы деформации и служит эффективным барьером для развития хрупкого разрушения. Характер износа наплавленного покрытия после импульсного воздействия становится вязким ямочным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скринский А.Н., Мизин В.Г., Фоминский Л.П. и др. Высокопроизводительная наплавка и оплавление порошковых покрытий пучком релятивистских электронов // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 865–869.
2. Полетика И.М., Голковский М.Г. и др. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 5. С. 29–41.

3. Полетика И.М., Голковский М.Г. и др. Формирование коррозионно-стойких покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Перспективные материалы. 2006. № 2. С. 80–86.

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

5. Rotshten V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams // Charter 6 in Book: Materials surface processing by directed energy techniques. Paris: Elsevier, 2006. P. 205–240.

6. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Овчаренко В.Е. Электронно-пучковая модификация твердого сплава TiC–NiCr. Рельеф поверхности обработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 12. С. 59–60.

7. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электронно-импульсного облучения на микроструктуру поверхностного слоя металлокерамического сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 7. С. 48.

8. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр "Академик", 2005. 192 с.

9. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физмалит, 2007. 416 с.

10. Рамбиди Н.А., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. М.: Физмалит, 2008. 456 с.

11. Головин Ю.А. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.

12. Головин Ю.А. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2142.

13. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 6. С. 961–982.



АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА: справочник И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев

2010 г. 352 с. : ил. ISBN 978-5-94275-522-5

Цена 700 р.

Содержит данные об основных видах современных абразивных инструментов, выборе их характеристик и подготовке к эксплуатации. Для наиболее распространенных способов абразивной обработки приведены рекомендации по режимным параметрам, применяемому оборудованию и технологической оснастке, смазывающим технологическим средствам, оценке эксплуатационных свойств инструментов. Учтены изменения в стандартах, произошедшие в последние годы.

Предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторов и технологов, студентов и преподавателей высшего и среднего профессионального образования.

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



УДК 621.01:539.3:004.9

В.Ю. Блюменштейн (Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово)
E-mail: blumenstein@rambler.ru

Структурные модели технологического наследования

Разработана концепция технологического наследования состояния поверхностного слоя в единых физических терминах и категориях механики деформирования. Представлены структурные модели в категориях функций, процессов и состояний поверхностного слоя на стадиях механической обработки резанием, поверхностного пластического деформирования и эксплуатации деталей.

Ключевые слова: структурная модель, механика технологического наследования, поверхностный слой, поверхностное пластическое деформирование, пластичность.

The conceptual foundation of the technological inheritance of surface coating condition in terms of physics, stress and strain is developed. The structural models in the context of functions, processes and conditions of the surface coating at the stages of cutting, surface plastic deformation and running machine parts are presented.

Key words: structural model, technological inheritance mechanics, surface coating, surface plastic deformation, plasticity.

Технологическое наследование как результат накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла поверхностного слоя на стадиях механической обработки и эксплуатации деталей

Одной из ключевых проблем современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин технологическими методами. Долговечность деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя, параметры которого формируются на протяжении всего технологического процесса. Среди технологических методов, повышающих долговечность детали на заключительных стадиях технологического маршрута, в производстве широко используют методы *поверхностного пластического деформирования* (ППД).

Практика показала, что при правильно назначенных режимах ППД можно увеличить долговечность детали в 5 и более раз, в то время как неверно назначенные режимы обработки и неучет накопления свойств на предшествующих операциях могут привести к разрушению поверхностного слоя уже на стадии изготовления или преждевременному разрушению детали на стадии эксплуатации.

В настоящее время не вызывает сомнения необходимость учета *технологического наследования* (ТН) при исследовании существующих и проектировании новых технологических процессов. Это стало возможным благодаря исследованиям А.М. Дальского, П.И. Яшеричина, А.Г. Сулова, В.М. Смелянского и их учеников.

ТН рассматривается как совокупность сложных явлений переноса всего комплекса параметров качества детали, при-

чем зависимых друг от друга. В то же время показано, что ТН не может быть описано простыми одномерными моделями, а рассмотрение технологической цепочки "режим – состояние поверхностного слоя – эксплуатационные свойства" предполагает наличие более сложных связей в виде функционалов.

Разработка моделей ТН в виде системы функционалов требует знания физических закономерностей формирования поверхностного слоя деталей машин. Наличие такого описания позволяет не только проследить закономерности самого ТН, но и использовать их как для пооперационного контроля с использованием физических методов, так и для проектирования технологий, обеспечивающих высокую долговечность деталей машин.

Традиционный технологический процесс упрочняющей обработки, ориентированный на повышение долговечности деталей машин, включает в себя ряд операций чернового, полустогового и чистового резания и последующее ППД. В совокупности это требует рассмотрения процессов механической обработки и эксплуатации во времени и явлений, свойственных этим процессам, благодаря которым они и осуществляются – явлений протекания пластической деформации. Подобное возможно, если исследуется процесс пластического течения металла в некотором *очаге деформации* (ОД), свойства поверхностного слоя рассматриваются как результат этого пластического течения, а процесс эксплуатации – как продолжающийся процесс изменения этих свойств.

Автор подчеркивает четыре важных обстоятельства [1]:

1. Технология машиностроения находится на таком уровне развития, когда простое накопление научных фак-

тов и результатов уже не приводит к получению новых знаний.

2. Высокие темпы развития машиностроения, непрерывное появление новых материалов и усложнение условий эксплуатации машин требуют снижения сроков конструкторско-технологической подготовки производства за счет сокращения экспериментальных работ и увеличения расчетных. В связи с этим появляется необходимость в создании более сложных, но и более достоверных моделей поведения металла под нагрузкой, что особенно важно для создания процессов пластической упрочняющей обработки.

3. Большие объемы конкретных данных, к сожалению, не всегда могут быть положены в основу современных автоматизированных методик проектирования технологических процессов. Для этого необходимо выявление и описание физических связей между изучаемыми явлениями и процессами, систематизация и структуризация полученной информации в виде, пригодном для применения современных информационных технологий.

4. Сложность раскрытия закономерностей ТН заключается в том, что различные стадии нагружения поверхностного слоя (например, резание, ППД, эксплуатационное усталостное нагружение) в настоящее время рассматриваются с привлечением различных понятийных аппаратов и методологий.

Несмотря на всю сложность протекающих в поверхностном слое явлений, современная наука позволяет описать ТН с использованием основных положений механики деформируемых сред. Сущность этого подхода заключается в том, что физическое *состояние поверхностного слоя* (СПС) определяется как результат пластического течения металла в ОД, происходящего в условиях сложного напряженно-деформированного состояния.

В связи с таким подходом, наряду с традиционными параметрами СПС, такими как шероховатость, волнистость, твердость, остаточные напряжения, используются известные из механики деформирования параметры, такие как степень деформации сдвига Λ и степень исчерпания запаса пластичности Ψ .

Известно, что стадии ППД предшествует чистовая или получистовая обработка резанием, которая приводит к накоплению деформаций и частичному исчерпанию запаса пластичности металла. Следовательно, материал поверхностного слоя перед обработкой ППД уже имеет свойства, отличные от исходных, что приводит к большему пределу текучести, наличию остаточных напряжений, определенной микрогеометрии поверхности. Все это говорит о необходимости учитывать историю нагружения поверхностного слоя при резании и влияние этой истории как на процесс нагружения, так и на формирование СПС на стадии ППД.

Кроме того, обработка ППД чаще всего используется для повышения циклической долговечности в условиях приложения усталостных нагрузок.

В основе предлагаемого подхода лежат представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпании запаса пластичности металла в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения.

В общем виде жизненный цикл представлен стадиями резания, ППД и усталостного нагружения, состоящего, в

свою очередь, из двух стадий – циклической долговечности и циклической трещиностойкости.

При решении задач механики в качестве исходных характеристик металла используют кривую упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\Lambda)$ (σ_s – интенсивность напряжений), кривую предельной пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ (Λ_p и Π – предельная степень деформации сдвига и показатель схемы напряженного состояния) и диаграмму циклической трещиностойкости $v = v(K)$ (в координатах "коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины v ").

Внедрение и перемещение инструмента на стадии резания приводит к возникновению ОД, в котором происходит течение металла, приводящее к накоплению деформаций $\Lambda_{рез}$, исчерпанию запаса пластичности $\Psi_{рез}$ и формированию поверхностного слоя. Последующее нагружение на стадии ППД приводит к возникновению ОД, зависящего от истории нагружения, и означает продолжение деформационных процессов. Следствием этого является формирование поверхностного слоя с накопленной за две стадии деформацией ($\Lambda_{рез} + \Lambda_{ППД}$) и исчерпанным запасом пластичности ($\Psi_{рез} + \Psi_{ППД}$). Тензор остаточных напряжений сформирован также с учетом истории нагружения.

В процессе циклического нагружения накопление деформаций продолжается до предельного уровня Λ_p , которому соответствует *степень исчерпания запаса пластичности* (СИЗП) $\Psi = 1$. Этому моменту соответствует зарождение начальной трещины и окончание стадии циклической долговечности.

Дальнейшее развитие трещины описывается в категориях диаграмм циклической трещиностойкости.

Описание сложного явления ТН – это, в первую очередь, описание влияния сложного знакопеременного характера протекания пластической деформации в предшествующие периоды времени на формирование свойств на рассматриваемой стадии нагружения.

Решение задач в такой постановке не означает отказа от традиционных представлений о качестве поверхностного слоя деталей машин. В то же время, это означает, что для более полного и глубокого изучения ТН базовые (онтологические) закономерности формирования поверхностного слоя, накопленные на предыдущих стадиях развития науки, могут привлекаться в виде граничных или начальных условий при решении задач механики. В связи с этим возникает необходимость развития онтологических наследственных закономерностей формирования ОД как основы преобразования феноменологических представлений о формировании поверхностного слоя в технологические.

Создание методики сквозного автоматизированного проектирования упрочняющего технологического процесса на базе принципов механики ТН требует разработки документированных расчетных процедур в единых терминах и категориях феноменологической теории. В свою очередь, это требует проведения структурирования и информационной интеграции большого объема технологической информации при использовании современных CALS-технологий, описывающих концепцию и идеологию информационной поддержки всех стадий жизненного цикла.

Поэтому для решения поставленных задач с использованием единой интегрированной модели изделия и его жиз-

ненного цикла разработан комплекс функциональных моделей, моделей процессов и моделей СПС.

Структурные модели ТН

Для задания требований к системе и ее функциям, а затем для разработки системы, которая соответствует заданным требованиям и исполняет заданные функции, использована методология структурного анализа SADT (Structural Analysis and Design Technology) и ее реализация в соответствии с требованиями стандартов серии IDEF и программного продукта VPwin.

Функциональная модель механики ТН. В терминах и категориях IDEF0 на контекстной диаграмме определены и описаны основные взаимодействия (стрелки), которые активируют родительскую функцию (рис. 1) [1–3].

В качестве входа принято СПС заготовки (СПС0), поступающей на первую операцию механической обработки – стадию резания. Это состояние описывается совокупностью параметров напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя $\Lambda, \Psi, [T\sigma_{от}]$, а также традиционных параметров упрочнения, микроструктуры, волнистости, шероховатости и др.

Продуктом выполнения данной функции является СПС после соответствующего эксплуатационного нагружения (СПС31 – СПС34), описываемое той же совокупностью параметров. Четыре стрелки на выходе из блока означают, что поверхностный слой в ОД после выполнения нагружения на данной стадии может быть представлен в одном из возможных четырех состояний в зависимости от требований к детали.

В качестве управляющего воздействия принята история нагружения ИН, описываемая в категориях и терминах механики ТН.

В качестве механизма исполнения функции принята программа нагружения ПН, описывающая развитие процесса пластической деформации на данной стадии.

В рамках данной контекстной модели для реализации ПН проводится запрос к базе данных технологического наследования БДТН для получения информации о правилах формирования ОД, начальных и граничных условиях задач механики и др.

В единых терминах и категориях механики деформирования и разрушения проведена декомпозиция функциональной модели по рассматриваемым стадиям нагружения (рис. 2).

Отличительными особенностями детализированной диаграммы А0-уровня являются:

1. Выделены три основных исследуемых стадии нагружения – стадии резания А1, ППД А2 и эксплуатационного усталостного нагружения А3.
2. Каждый блок диаграммы представляет основную подфункцию исходной функции.
3. Каждая подфункция содержит только те элементы, которые входят в исходную функцию.

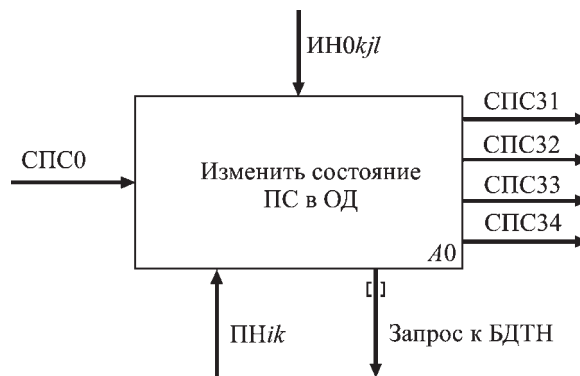


Рис. 1. Функциональная модель механики ТН А0-уровня. Родительский блок (ярлык и семантика названий)

4. Проведено описание ИН и сохранения наследственных свойств под воздействием ПН поверхностного слоя на каждой стадии.

5. Наличие функциональных связей между блоками, которые описаны математическими формулами.

6. Семантика ярлыков на данной и последующих функциональных схемах представлена в терминах и категориях механики ТН (таблица).

Исходное состояние неупрочненного поверхностного слоя СПС0 представляет собой совокупность параметров заготовки, к которым можно отнести: кривую упрочнения, диаграмму пластичности в координатах, нулевые значения степени деформации сдвига ($\Lambda = 0$), СИЗП ($\Psi = 0$) и тензора остаточных напряжений ($[T\sigma_{от}] = 0$).

На стадии резания А1 изменение СПС в ОД происходит под воздействием ПН (ПН1k), которая формируется в зависимости от режимов резания на основе запроса информации из БДТН. ИН заготовки (ИН0k1l) представлена как управляющая информация, показывающая обязательность

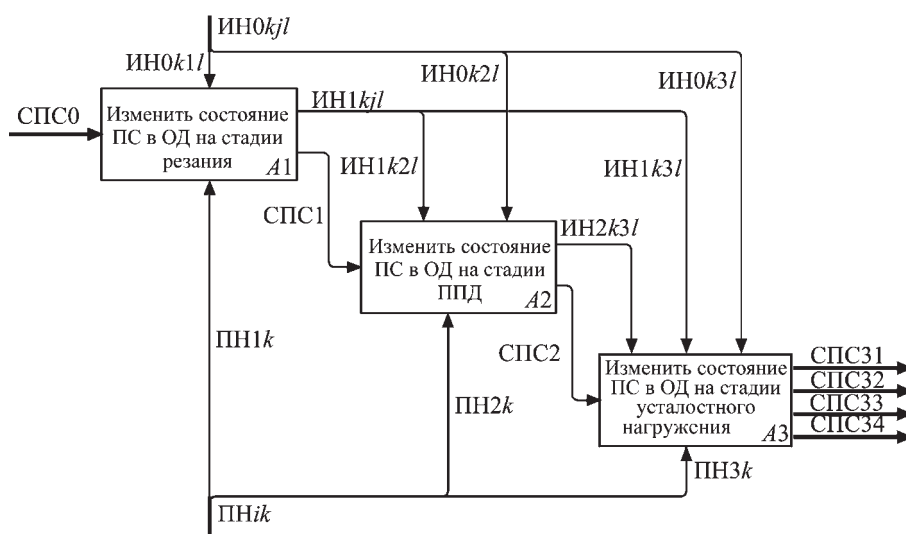


Рис. 2. Декомпозиция функциональной модели механики ТН А0-уровня (по стадиям нагружения)

Семантика некоторых ярлыков на функциональных схемах

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков	Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
СПС	Состояние поверхностного слоя (ресурс или продукт)	ИН1 <i>jl</i>	ИН, несущая информацию, которая передается с первого этапа первой стадии на все этапы всех последующих стадий
ИН	История нагружения		
ПН	Программа нагружения		
БДТН	Запрос к базе данных технологического наследования по правилам формирования ОД	ИН1 <i>kjl</i>	ИН, несущая информацию, которая передается со всех этапов первой стадии на все этапы всех последующих стадий
<i>Программы нагружения</i>		ИН <i>ik2l</i>	ИН, несущая информацию, которая передается со всех этапов всех предшествующих стадий на первый этап второй стадии
<i>i</i>	Номер стадии		
<i>k</i>	Номер этапа	<i>Состояние поверхностного слоя стадии в целом</i>	
ПН1 <i>k</i>	Программы нагружения на всех этапах первой стадии	<i>i</i>	Номер стадии, после которой сформировалось текущее СПС
ПН11, ПН12, ПН13	Программы нагружения на первом, втором и третьем этапах первой стадии	СПС0, СПС1, СПС2, СПС3	СПС после нулевой, первой, второй и третьей стадий нагружения
ПН2 <i>k</i>	Программы нагружения на всех этапах второй стадии	<i>Текущее СПС после данного этапа данной стадии нагружения</i>	
ПН21, ПН22, ПН23	Программы нагружения на первом, втором и третьем этапах второй стадии	<i>i</i>	Номер стадии, после которой сформировалось текущее СПС
ПН3 <i>k</i>	Программы нагружения на всех этапах третьей стадии	<i>k</i>	Номер этапа, после которого сформировалось текущее СПС
ПН31, ПН32, ПН33, ПН34	Программы нагружения на стадиях и участках третьей стадии	СПС31–СПС34	СПС после соответствующей стадии эксплуатационного нагружения
<i>История нагружения</i>		<i>Текущее состояние поверхностного слоя в пределах стадии нагружения</i>	
<i>i</i>	Номер предшествующей стадии	<i>i</i>	Номер текущей стадии
<i>k</i>	Номер предшествующего этапа	<i>k</i>	Номер предшествующего этапа
<i>j</i>	Номер последующей стадии	<i>l</i>	Номер последующего этапа
<i>l</i>	Номер последующего этапа	СПС212	СПС на второй стадии после выполнения первого этапа, переносимое на второй этап этой стадии
ИН0 <i>k1l</i>	ИН, несущая информацию, которая передается со всех предшествующих этапов нулевой стадии на все этапы первой стадии	СПС223	СПС на второй стадии после выполнения второго этапа, переносимое на третий этап этой стадии
		Примечание. Если в индексе встречается буквенное обозначение, то это следует читать как "все стадии" или "все этапы".	

учета наследственной информации. Кроме того, ИН заготовки управляет функциями на стадии ППД ИН0*k2l* и усталостного нагружения ИН0*k3l* (на рисунке не показаны). Продуктом выполнения данной подфункции является состояние СПС1 с некоторыми накопленной деформацией и остаточными напряжениями, распределенными по глубине поверхностного слоя. При этом поверхностный слой отчасти исчерпал свою пластичность.

Важно, что другим продуктом этой функции является наследственная (управляющая) информация для стадии 2 в

виде ИН*ik2l* и стадии 3 в виде ИН*ik3l*. Таким образом, на данной стадии происходит не только формирование поверхностного слоя, но и формирование наследственной информации для последующих стадий нагружения.

Выполнение функции на стадии А2 происходит под воздействием ПН (ПН2*k*), информации из БДТН и наследственной управляющей информации предшествующих стадий получения заготовки и резания в виде ИН0*k2l* и ИН1*k2l*. СПС на входе (СПС1) трансформируется в состояние СПС2, которое характеризуется дальнейшим накопле-

нием деформаций и исчерпанием запаса пластичности поверхностным слоем. Остаточные напряжения от предшествующей обработки претерпевают изменения, возникают благоприятные сжимающие напряжения, распространяющиеся на значительную глубину. В свою очередь, данная стадия формирует наследственную информацию для последующей стадии эксплуатации в виде $ИН2k3l$.

Сложность прогнозирования усталостных свойств изделия во многом объясняется сложным характером наследственной информации, поступающей с различных стадий нагружения. Диаграмма на рис. 2 показывает, что выполнение функции усталостного нагружения $A3$ осуществляется под воздействием наследственной информации всех предшествующих стадий нагружения в виде $ИН0k3l$, $ИН1k3l$ и $ИН2k3l$. Под воздействием рабочих напряжений происходит постепенная трансформация СПС, состоящая в уменьшении (релаксации) остаточных напряжений, и продолжаемся исчерпанию запаса пластичности.

Полному исчерпанию запаса пластичности при $\Psi = 1$ соответствует и полное снятие остаточных напряжений. В материале поверхностного слоя возникают необратимые дефекты в виде несплошностей материала поверхностного слоя. Дальнейшее усталостное нагружение приводит к развитию этих дефектов и полному разрушению изделия. СПС после полного или неполного выполнения этой стадии описывается в виде СПС31, СПС32, СПС33, СПС34.

Рассматриваемая диаграмма полностью соответствует диаграмме $A0$ -уровня при наличии того же количества соединяющих внешних стрелок (интерфейсов). Таким образом, прямоугольник-предок и его взаимодействия определяют контекст диаграммы-потомка.

Особенностью данной иерархии моделей является рассмотрение процессов нагружения с позиций монотонности пластической деформации. С этой точки зрения целесообразно проведение наследственной детализации каждой стадии по этапам, выделяемым по признакам монотонности (квазимонотонности) пластической деформации. В соответствии с механическими представлениями смена знака деформации приводит к частичному залечиванию дефектов, поэтому на стадиях резания и ППД в соответствии с механическими представлениями выделено по три этапа квазимонотонной деформации.

В качестве примера показана диаграмма, детализирующая стадию нагружения при ППД $A2$ (рис. 3).

Для этой диаграммы характерны:

1. Наличие исходного СПС в виде СПС1.
2. Формирование свойств на этапах под воздействием ПН ($ПН21$, $ПН22$, $ПН23$).
3. Запрос к БДТН для формирования в зависимости от режимов ППД вышеназванных ПН.

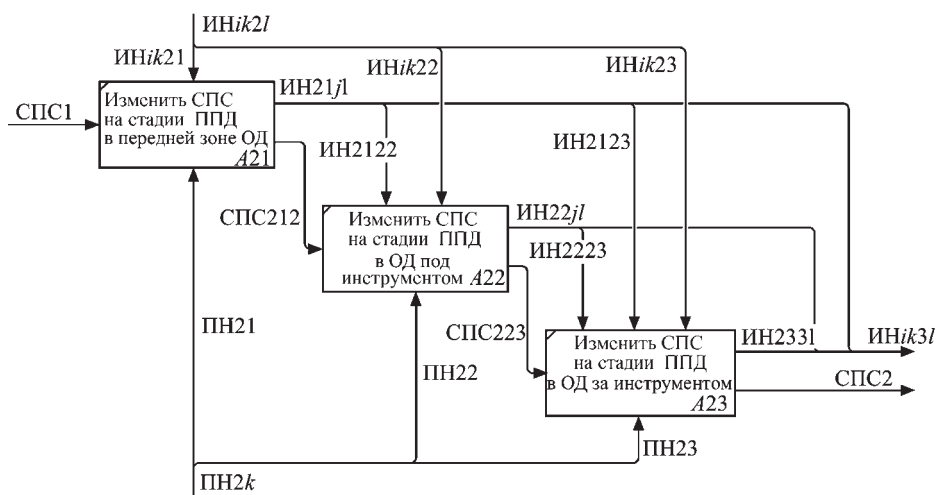


Рис. 3. Декомпозиция функциональной модели механики ТН $A2$ -уровня. Декомпозиция стадии ППД по этапам нагружения

4. Наличие трех этапов квазимонотонной деформации (блоки $A21$, $A22$, $A23$).

5. Наличие наследственной информации в виде ИН на предшествующих стадиях $ИН0k2l$ и $ИН1k2l$, поступающей на каждый этап в виде $ИН0k21$, $ИН0k22$, $ИН0k23$ и $ИН1k21$, $ИН1k22$, $ИН1k23$.

6. Генерирование собственной наследственной информации в виде $ИН2k3l$.

7. СПС после выполнения нагружения в виде СПС2.

8. Дальнейшее накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности в ОД; окончанию каждого этапа соответствует смена знака деформации, что приводит к частичному залечиванию дефектов.

9. Окончанию процесса ППД соответствует формирование определенных остаточных напряжений.

Детальная диаграмма третьей стадии $A3$ представлена на рис. 4. Полностью сформированный в процессе механической обработки поверхностный слой СПС2 претерпевает изменения под воздействием программ усталостного нагружения $ПН31$, $ПН32$, $ПН33$ и $ПН34$, а также всей наследственной информации $ИН0k3l$, $ИН1k3l$ и $ИН2k3l$. Информация из БДТН позволяет составить четкое представление о характере протекающих в ОД или очаге усталостного разрушения явлений в зависимости от режимов усталостного нагружения и ИН на стадиях механической обработки.

Стадии и этапы усталостного нагружения выделены по признакам завершенности каждого из них на основе физических критериев поверхностного слоя.

На первой стадии (блок $A31$) происходит дальнейшее накопление деформации вплоть до полного исчерпания запаса пластичности. Этому соответствует $\Psi = 1$, полное снятие остаточных напряжений и образование дефектов в виде несплошностей поверхностного слоя. В терминах и категориях усталостного нагружения эта стадия, как было отмечено, называется стадией циклической долговечности. Продуктом этой стадии может быть деталь с поверхностным слоем в виде СПС31. По завершении этой стадии заверша-

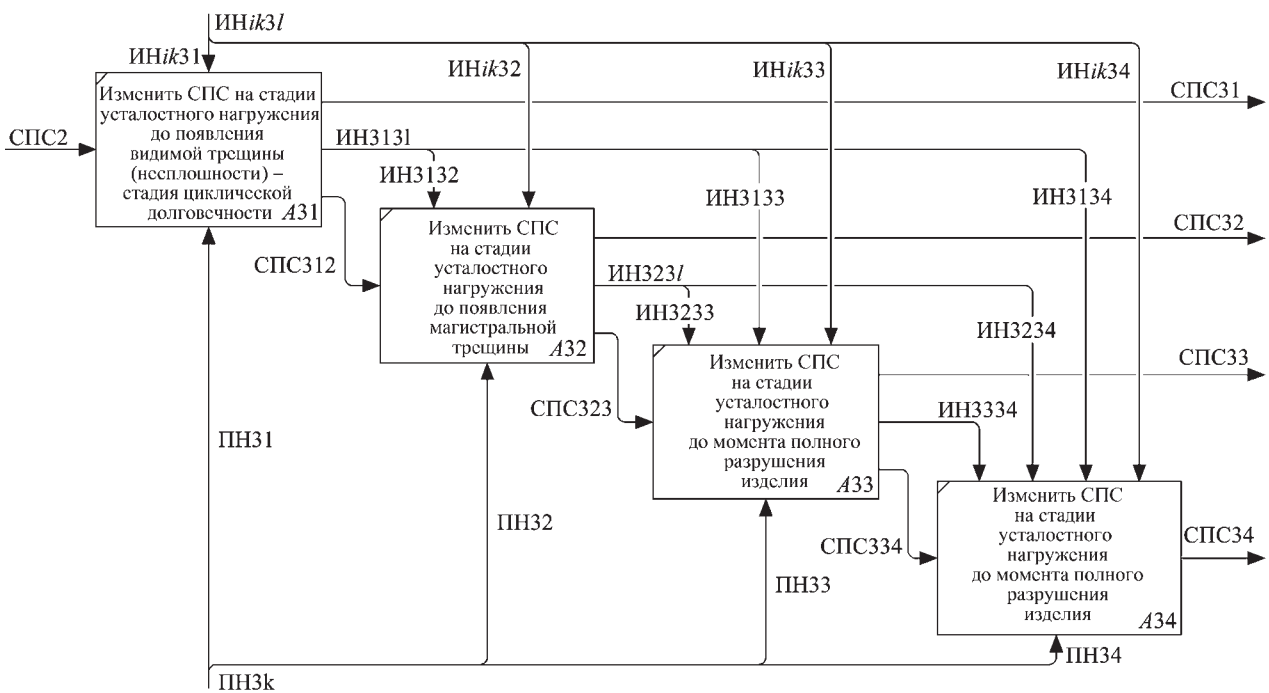


Рис. 4. Декомпозиция функциональной модели механики ТН А3-уровня. Декомпозиция стадии усталостного нагружения по стадиям циклической долговечности и циклической трещиностойкости

ется феноменологическое описание поверхностного слоя в терминах и категориях механики деформирования.

При описании блоков А32, А33 и А34 использованы представления о циклической трещиностойкости и феноменологическая теория разрушения. Эти блоки характеризуют "живучесть" изделия с трещиной. В категориях диаграммы *циклической трещиностойкости* (ЦТ):

1. Этап А32 (первый участок диаграммы ЦТ) – это этап развития дефектов в виде несплошностей, их слияния и зарождения магистральной трещины (состояние СПС32).
2. Этап А33 (второй участок диаграммы ЦТ) – это этап устойчивого роста трещины, окончанию которого соответствует состояние СПС33.
3. Этап А34 (третий участок диаграммы ЦТ) – это этап, по окончании которого происходит полное разрушение изделия, а состояние может быть определено как СПС34.

Структура диаграмм-потомков может быть изменена, дополнена и уточнена, например, включением на ранних стадиях термообработки. С позиций механики термообработка – это тоже стадия нагружения, позволяющая полностью или частично залечить дефекты поверхностного слоя, т.е. полностью или частично восстановить пластичность материала. В этом случае диаграмма А0-уровня будет состоять из 4-х стадий. По аналогии функциональную модель можно дополнить и заготовительной стадией, определяя СПС исходной заготовки в соответствующих терминах и категориях.

Функциональное описание ТН позволяет представить наследственную информацию в структурированном виде и детализировать описание вплоть до уровня единичных актов пластической деформации. Диаграммы имеют наследственный характер и с позиций используемых терминов –

родитель, потомок, родовое планирование системы и др. В дальнейшем описание было развито и представлено в виде аналитических моделей, трех- и двухмерных диаграмм и др.

Функциональная модель – один из элементов информационной модели механики ТН, которая лежит в основе автоматизированной системы проектирования технологии упрочняющей обработки на основе учета наследственных связей.

ТН представлено в виде закономерности, когда накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности на данном квазимонотонном этапе определяется ПН и ИН, описываемой в терминах и категориях ПН на предшествующих стадиях и этапах.

Модель процесса формирования и трансформации СПС на стадиях жизненного цикла детали. В терминах и категориях IDEF3 каждый функциональный элемент на графической модели обозначает стадию процесса нагружения (рис. 5). Стрелки или линии отображают перемещение объекта (деталь с определенным СПС) в ходе процесса нагружения. Каждый элемент этой схемы может иметь произвольную последовательность декомпозиций, т.е. может быть детализирован с любой необходимой точностью. Особенностью модели процесса является возможность математического описания каждой стадии в категориях кинетической модели в виде системы уравнений, определяющих развитие деформационных процессов в поверхностном слое.

Предполагается, что СПС известно и для случая отожженного материала заготовки (элемент 1.1.2, см. рис. 5) описывается в категориях механики деформирования как

$$\Lambda_{ij|_{i=0, j=0}} = 0;$$

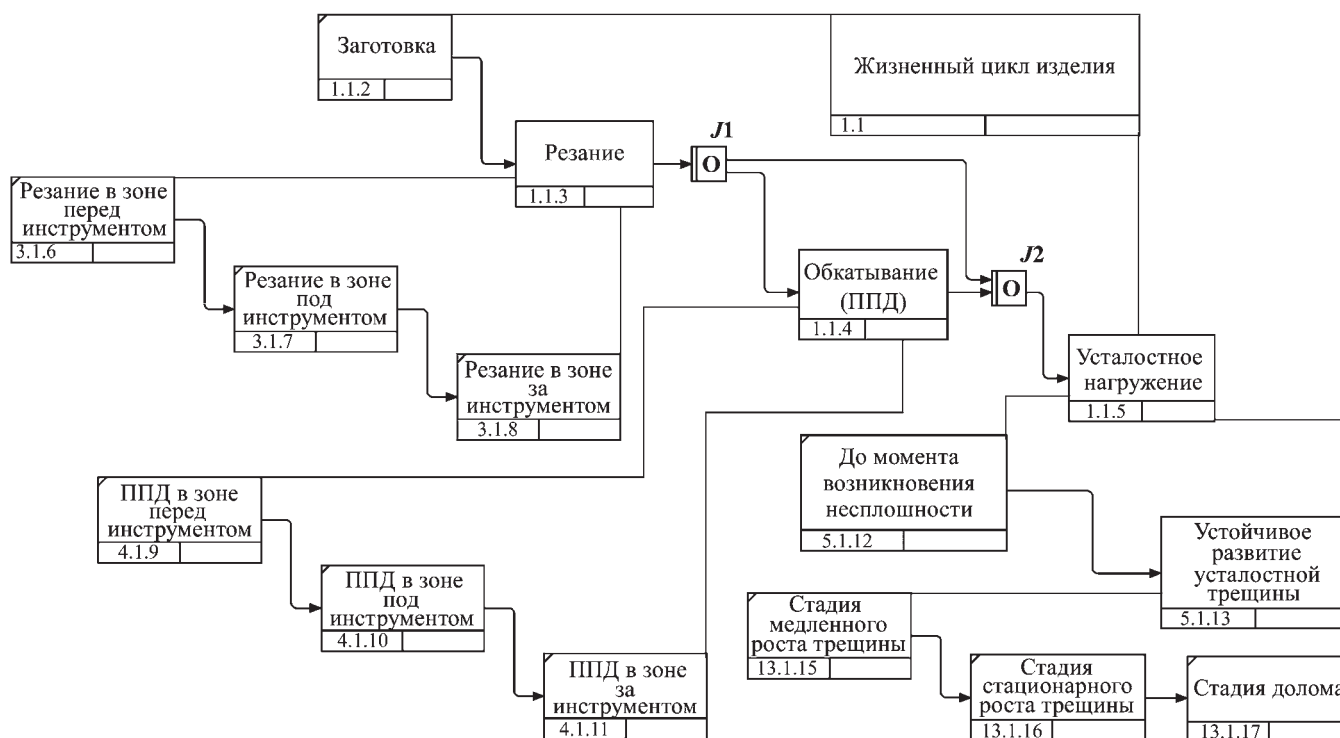


Рис. 5. Модель процесса исчерпания запаса пластичности

$$\Psi_{ij|_{i=0, j=0}} = 0;$$

$$\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi);$$

$$[T\sigma_{ост}]_{ij|_{i=0, j=0}} = 0,$$

где i соответствует номеру стадии нагружения, а j – номеру квазимоноотонного этапа на данной стадии. Иными словами, известна диаграмма пластичности для данного материала, тензор остаточных напряжений равен нулю, дефекты в поверхностном слое отсутствуют.

Первая стадия (стадия резания) стартует с начальных нулевых значений деформации и показателя исчерпания запаса пластичности (элемент 1.1.3, см. рис. 5). За три этапа квазимоноотонной деформации накапливается деформация $\Lambda_{рез}$, частично исчерпывается запас пластичности на величину $\Psi_{рез}$, в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, описываемые тензором $[T\sigma_{ост}]_{рез}$.

СПС после обработки резанием является начальным для стадии ППД. На стадии ППД (элемент 1.1.4, см. рис. 5) в процессе нагружения и создания очага пластической деформации происходит снятие остаточных напряжений, полученных после обработки резанием. За три этапа квазимоноотонной деформации происходит дальнейшее накопление пластической деформации и исчерпание запаса пластичности, приводящее в итоге к новому СПС с определенными степенью деформацией сдвига, СИЗП и тензором остаточных напряжений.

$\Psi_{ППД}$ представляет собой поврежденность, накопленную на второй стадии с учетом ИН. Накопленное значение поврежденности представляет собой сумму СИЗП 1-й и 2-й стадий нагружения, т.е. стадий механической обработки.

При этом остаточное напряженное состояние зависит от суммарной накопленной деформации.

Стадия эксплуатационного усталостного многоциклового нагружения (элемент 1.1.5, см. рис. 5) состоит, в свою очередь, из стадии циклической долговечности и стадии циклической трещиностойкости.

Начальное состояние для стадии циклической долговечности описывается $\Lambda_{мех}$, $\Psi_{мех}$ и $[T\sigma_{ост}]_{ППД}$. Данная стадия характеризуется дальнейшим накоплением деформаций, происходящим в условиях совместного действия тензоров эксплуатационных (усталостных) $[T\sigma_{уст}]$ и остаточных $[T\sigma_{ост}]_{ППД}$ напряжений. Сжимающие остаточные напряжения после обработки ППД приводят к более мягким схемам усталостного нагружения. Тензор действующих напряжений представляет собой сумму тензоров остаточных и усталостных напряжений.

Процесс многоциклового усталостного нагружения так же, как резание и ППД, описывается ПН, свойственными каждому квазимоноотонному этапу (циклу) нагружения. В каждом усталостном цикле нагружения происходит накопление степени деформации сдвига, частичная релаксация остаточных напряжений, приводящие к изменению показателя схемы; в момент окончания стадии циклической долговечности тензор остаточных напряжений равен нулю.

На стадии циклической долговечности под влиянием тензора действующих напряжений накапливается деформация $\Lambda_{цд}$ и поврежденность $\Psi_{цд}$. В итоге за три стадии (резания, ППД и циклического нагружения) накопилась предельная деформация и произошло полное исчерпание запаса пластичности в некоторой точке вероятного разрушения металла поверхностного слоя детали. Этому

состоянию соответствует $\Psi = 1$, число циклов составляет $N_{ЦД}$, а в поверхностном слое возникает видимая трещина (элемент 5.1.12, см. рис. 5).

Дальнейшее усталостное нагружение (стадия циклической трещиностойкости) описывается в категориях диаграмм циклической трещиностойкости, реализуемых в координатах "коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины $v_{тр} = db_{тр}/dN$ " ($b_{тр}$ – характерный размер усталостной трещины).

На данной диаграмме выделяют три участка (этапа), характеризующихся различными скоростями роста трещины (элементы 13.1.15–13.1.17, см. рис. 5). Развитие видимой трещины начинается с порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , а заканчивается вязким разрушением образца (детали), соответствующим критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{fc} .

Окончанию процесса усталостного нагружения соответствует полное разделение детали на части, описываемое параметрами циклической вязкости разрушения.

На различных стадиях и этапах жизненного цикла упрочненной детали возможно применение таких воздействий, которые увеличивают их продолжительность. В первую очередь, это термические воздействия, позволяющие полностью или частично восстановить первоначальные свойства (запас пластичности металла). Это могут быть и механические воздействия, изменяющие характер приложения нагрузок и создающие в самом изделии новое механическое состояние и т.д. Структура модели процесса и кинетических уравнений позволяет учесть иные термические и механические стадии нагружения.

Модель СПС на стадиях механической обработки и эксплуатации деталей. Формирование представлений о ТН связано с закономерностями формирования ОД на каждой из рассматриваемых стадий нагружения. На эмпирическом уровне требуется определить необходимые наследуемые параметры в цепи исследований "режим обработки – ОД – ПН – механическое СПС – качество поверхностного слоя – долговечность".

Для этого были описаны фундаментальные закономерности формирования и трансформации свойств поверхностного слоя, формирующегося в ОД. В свою очередь, решение вышеназванных задач требует знания базовых закономерностей (онтологий) формирования и трансформации ОД по стадиям нагружения.

Для систематизации, визуализации и логической завершения проведено описание онтологии с использованием методологии стандарта онтологического исследования IDEF5. Была выделена область данных, в которой существуют объекты нескольких порядков (от высшего до низшего). Отношения между объектами представлены в виде схем, показывающих связи между ними. При этом у объектов выделены ряд состояний или свойств, которые при внешних воздействиях в пределах области данных могут изменяться, трансформироваться и т.д.

Модель состояний, отражающая суть процесса изготовления и эксплуатации изделия с точки зрения ТН, показана на рис. 6. В соответствии с этой схемой объект "СПС" имеет пять состояний, причем переход из предыдущего в последующее происходит под воздействием соответствующей ПН, формирующейся в ОД. Всякому СПС присущ опреде-

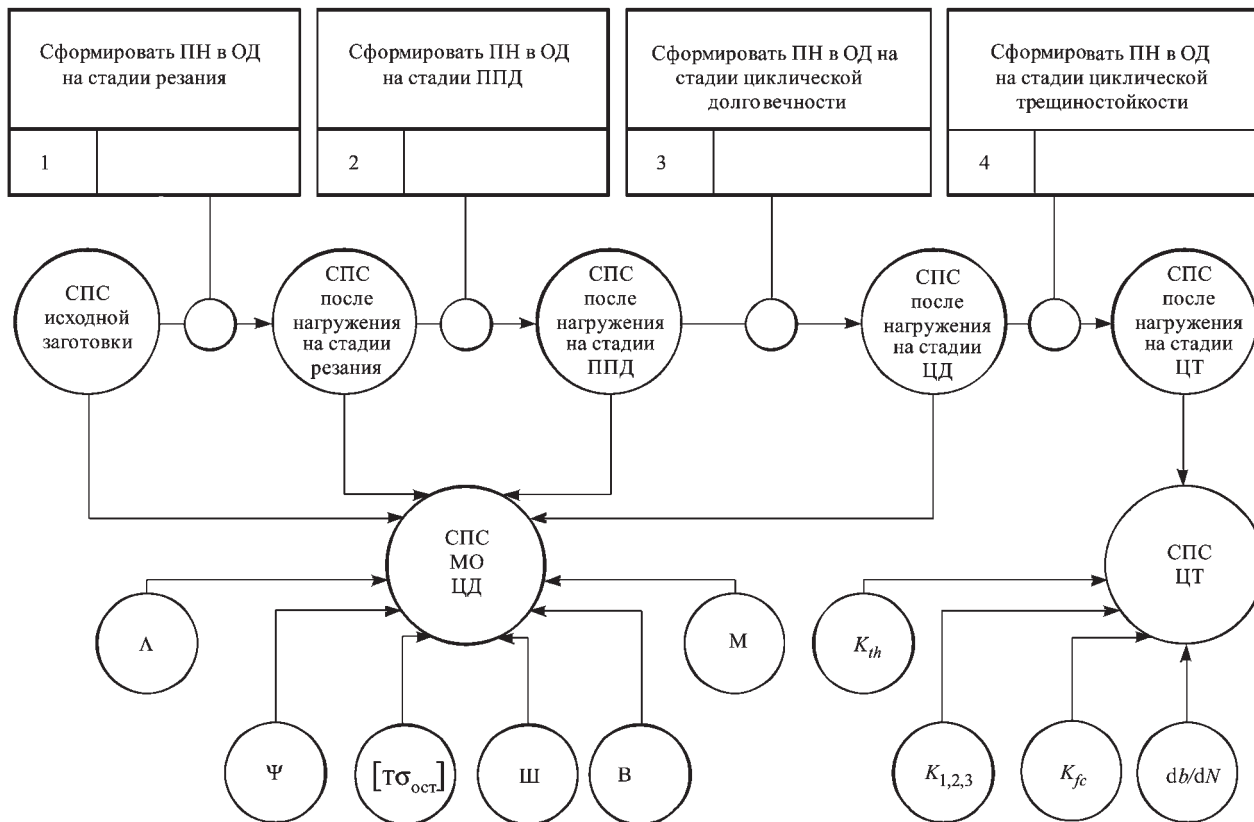


Рис. 6. Модель СПС детали по стадиям нагружения

ленный набор параметров и определенные соотношения этих параметров.

К таким параметрам относятся параметры микроструктуры M , механические – накопленная степень деформации сдвига Δ , СИЗП Ψ и тензор остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$, геометрические – шероховатость Π и волнистость B .

СПС МО ЦД на стадиях механической обработки (МО) резанием и ППД и *циклической долговечности* (ЦД) описывается одними и теми же параметрами. Воздействие на поверхностный слой индентором (режущим или деформирующим инструментом) или путем приложения циклических нагрузок приводит к возникновению ОД и пластическому течению материала в условиях определенного напряженного состояния. Следствием этого является накопление деформаций, контролируемое ПН. В результате происходит исчерпание запаса пластичности и появление поверхностного слоя с определенной твердостью, шероховатостью, микроструктурой и остаточными напряжениями.

Можно выделить следующие закономерности формирования поверхностного слоя:

1. По ходу технологического процесса механической обработки и последующего усталостного нагружения в ОД происходит постепенное накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности, являющихся наследуемыми параметрами поверхностного слоя. Формирование ОД на каждой последующей стадии происходит под влиянием этих наследуемых свойств.

2. Формирование ПН в ОД на каждой последующей стадии происходит под влиянием наследственной информации.

3. Каждая последующая ПН стартует с накопленного (наследуемого) значения степени деформации сдвига и СИЗП.

4. Формирование тензора остаточных напряжений на каждой последующей стадии определяется накопленной деформацией и ее распределением по глубине упрочненного слоя.

5. Полную картину упрочнения дает описание в категориях деформационных параметров, дополненное описанием распределения твердости (микротвердости) по глубине упрочненного поверхностного слоя.

6. Параметры микрогеометрии – шероховатость и волнистость – зависят не только от условий нагружения, но и от характера накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности.

Наследуемые параметры поверхностного слоя (степень деформации сдвига, СИЗП, тензор остаточных напряжений, микрогеометрия поверхности) проявляют себя на стадии ЦД. Тензор остаточных напряжений суммируется с тензором напряжений от внешней нагрузки, создавая тензор действующих напряжений. Тензор действующих напряжений формирует ПН, которая описывает дальнейшее накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности. Интенсивность этого процесса определяется историей и режимом нагружения. В поверхностном слое имеются подслои с "жесткой" схемой нагружения, где наиболее вероятно появление несплошности к моменту полного исчерпания запаса пластичности и полное разрушение (разделение) образца (детали) на части.

Таким образом, описание ТН с единых методологических позиций предполагает использование ПН в ОД на каждой стадии, оценку характера их трансформации по мере накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности.

Результаты экспериментальных исследований базовых (онтологических) закономерностей формирования ОД и их

влияния на формирование и трансформацию СПС явились основой преобразования механических представлений о формировании поверхностного слоя в технологические.

Выводы

1. Разработаны основные положения системного подхода к проблеме ТН. Показано, что при разработке системы правил ТН должны учитываться как механизм накопления свойств на данной операции, так и влияние предшествующих свойств на характер этого накопления. Показано, что для успешной реализации информационная система, отражающая ТН, должна быть адекватно описана, должны быть построены полные и непротиворечивые структурные и аналитические модели в единых физических терминах и категориях процессов обработки и эксплуатации, СПС и функции изменения этого состояния.

2. Разработана концепция механики ТН СПС в единых физических терминах и категориях механики деформирования и разрушения в виде функциональной модели, новизной которой является представление явления ТН как совокупности функционалов, описывающих основные закономерности переноса свойств по операциям механической обработки резанием и ППД с последующей эксплуатацией деталей в условиях приложения циклических нагрузок.

3. Разработана модель процесса ТН СПС, новизной которой является использование представлений о непрерывности накопления повреждений и исчерпания запаса пластичности на стадиях жизненного цикла детали и учет сложной немонотонной истории нагружения этого поверхностного слоя.

4. Построена наследственная онтологическая модель – модель СПС детали по стадиям нагружения на операциях резания, ППД и последующего усталостного нагружения.

5. Использование современных CALS и CASE-технологий при разработке комплекса структурных и математических моделей ТН позволило провести декомпозицию элементов информационной системы на автоматизируемые функции вплоть до конкретных расчетных и проектных процедур и привести их к виду, удобному для инженерного использования при сохранении целостности представлений о наследуемом СПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.: ил.
2. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.: ил.
3. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А. Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. Функциональная модель механики технологического наследования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 14–23.
4. Блюменштейн В.Ю. Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. Модель процесса исчерпания запаса пластичности металла на стадиях жизненного цикла детали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 2. С. 17–22.
5. Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П. Онтология технологической наследственности с позиции программ нагружения очагов деформации на стадиях резания и ППД // Инструмент Сибири. 2000. № 3 (6). С. 21–24.

УДК 658.512:621.002

А.С. Васильев, А.И. Кондаков (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
С.А. Клименко (Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины),
М.Л. Хейфец, В.А. Гайко (ГНПО "Центр" НАН Беларуси)
E-mail: kheifetz@presidium.bas-net.by

Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей

Предложены мероприятия по управлению качеством упрочненных поверхностей деталей трибосопряжений с позиций технологического наследования эксплуатационных параметров. Разработана математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении деталей машин.

Ключевые слова: технологическое наследование, эксплуатационные параметры качества, упрочненные поверхности, трибосопряжения.

The quality of the tribounits hardened surfaces control measures are suggested on the background of the performance parameters inheritance. There has been developed a mathematical model of the quality metrics inherited in product life which describes various operating modes in the process of the machine elements production and application.

Keywords: technological inheritance, performance quality parameters, hardened surfaces, tribounits.

Введение

Отличительной особенностью существующих подходов к определению и прогнозированию показателей качества машиностроительной продукции является использование принципа суперпозиции, согласно которому каждый из действующих технологических факторов независим от других, а результат совместного действия определяется их парциальной суммой, представляемой в той или иной форме [1, 2].

Технологические системы многосвязны, объекты производства характеризуются нелинейностью, необратимостью и неравновесностью. Однако применение принципа суперпозиции сводит многосвязные взаимодействия, осуществляемые в технологических системах, к односвязным, игнорируя взаимное влияние технологических факторов [3].

Рост требований к качеству обработки и упрочнения поверхностей деталей машин делает методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции, малоприменимыми, так как эффект взаимного влияния факторов соизмерим с результатами их прямого воздействия. Процесс обеспечения свойств изделий должен рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов, изменения и сохранения свойств [4, 5].

Множественность свойств изделий, каждое из которых характеризуется соответствующим множеством показателей качества, является также проявлением многосвязности технологических факторов при формировании качества изделия. Свойства изделия взаимосвязанно формируются при его изготовлении, однако в производственной практике машиностроения этот факт недостаточно учитывается. Изолированное рассмотрение процесса формирования выделенных показателей качества может привести к серьезным ошибкам при проектировании и реализации технологических процессов [1, 2].

Технические трудности, связанные с описанием многосвязных взаимодействий при формировании множества показателей качества при обработке и упрочнении поверхностей изделия, а также в процессе его эксплуатации, могут

быть преодолены на основе применения методологии принятия проектных решений [4, 5].

Анализ процессов изнашивания упрочненных поверхностей

При анализе процессов изнашивания упрочненных поверхностей деталей в трибосопряжениях целесообразно рассматривать вектор [6]:

$$\varphi(X, t) = [\xi_{u_1}(X, t), \dots, \xi_{u_i}(X, t), \dots, \xi_{u_n}(X, t)],$$

где $\xi_{u_i}(X, t)$ – скорость изнашивания i -й детали (сопряжения) в момент времени t при нагрузочном воздействии X на узел машины.

Процесс изнашивания обладает последствием, если модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят не только от модуля и направления вектора X в данный момент времени, но и от модуля и направления вектора X в моменты времени $\tau < t$, а также от износа U трущихся поверхностей за отрезок времени $[0, t]$ (здесь U – n -мерный вектор: $U = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)$, у которого u_i – износ i -й детали) [6, 7]:

$$u_i(t) = \int_0^t \xi_{u_i}(\tau) d\tau.$$

Для процесса изнашивания без последствия характерно то, что модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят от модуля и направления вектора X только в данный момент.

В зависимости от времени τ_p , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают два вида последствия: первого и второго рода [6]. Последствие первого рода характеризуется тем, что изменения в процессе утраты работоспособности изделия, обусловленные предысторией нагрузочного воздействия X , сохраняются в течение всего срока службы изделия τ_d ,

т.е. $\tau_p \geq \tau_d$. Если $\tau_p < \tau_d$, то имеет место процесс с "затухающей памятью" – последствие второго рода.

Зависимости интенсивности изнашивания узлов трения машин от продолжительности работы t (рис. 1) отличаются друг от друга видом связей между управляющим параметром – нагрузочным воздействием X и сопряженным с ним изнашиванием интенсивностью I .

Выбор параметра порядка H в каждом конкретном случае зависит от задач исследования (определения долговечности, сравнения износостойкости, оценки динамических свойств системы с учетом изнашивания ее элементов и др.). Не исключено, что для одной и той же детали, но для различных показателей процесс утраты работоспособности может иметь или не иметь последствие при постоянной интенсивности изнашивания I трущихся поверхностей. Это обусловлено видом связи (линейной или нелинейной) между определяющим параметром H , по которому производится оценка ресурса работоспособности исследуемого изделия и накопленным износом U [6, 7].

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения без последствия (см. рис. 1, а). В случае, когда сопряженная параметру порядка H интенсивность изнашивания I зависит только от нагрузочного воздействия X :

$$\begin{cases} I(t) = f_H(X(t)); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t), \end{cases}$$

где f_H – параметры системы;

g_H – характеристики процесса утраты работоспособности.

Если процесс изнашивания рассматривать как непрерывный стохастический процесс [6], то можно получить условие изнашивания без последствия. При постоянных условиях трения приращение износа $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$ не зависит от времени (процесс с независимыми приращениями), следовательно, скорость изнашивания $\xi_u = dU/dt$ стационарна в период времени τ [6, 7]. Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с запоминанием: ($\tau_H^p \ll \tau_C^p$ и $\tau_H^p \ll \tau_C^p$).

Однако процессы утраты работоспособности деталей в периоды приработки и катастрофического разрушения поверхностных слоев не могут быть описаны с помощью приведенных уравнений, так как интенсивность изнашивания I в эти периоды не постоянна и зависит от накопленного износа U трущихся поверхностей.

Модели процессов утраты работоспособности узлов трения с последствием первого рода (см. рис. 1, б). В случаях, когда интенсивность изнашивания I зависит как от нагрузочного воздействия X , так и от накопленного износа U к рассматриваемому моменту времени t

$$\begin{cases} I(t) = f_H(X(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t), \end{cases}$$

а при учете обратной связи нагрузочного воздействия X^* с износом U

$$\begin{cases} I(t) = f_H(X^*(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X^*(t), U(t), t); \\ X^*(t) = q_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Изменения в период времени τ интенсивности изнашивания I трущихся сопряжений при постоянном нагрузоч-

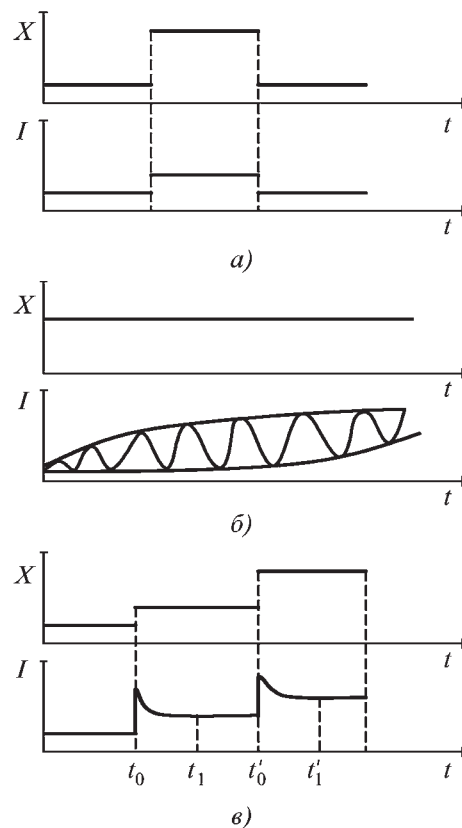


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания I узлов трения от длительности работы t :

а – I зависит только от нагрузочного воздействия X в момент времени t ; б – I зависит от времени работы t при постоянном X ; в – I зависит от времени работы t при ступенчатом изменении X на отрезках времени $[t_0, t_1], [t'_0, t'_1]$ и т.д.

ном воздействии на входе технической системы X могут быть вызваны двумя группами причин [6, 7]:

- не учитывающими обратную связь нагрузки X с износом U , такими как различие физико-механических свойств материала по глубине поверхностного слоя изделия, обусловленное технологией изготовления; старение смазочных материалов, приводящее к ухудшению их трибологических свойств, к изменению теплового режима работы сопряжения, а в некоторых случаях и к смене видов изнашивания трущихся поверхностей; увеличение в процессе эксплуатации концентрации абразивных частиц, продуктов износа и т.п.;

- учитывающие изменения зависимости q_H нагрузочного воздействия X^* на детали узла трения в результате износа сопряжения U , которые связаны с увеличением зазоров в трущихся сопряжениях; с трансформацией макрогеометрии поверхностей трения при изнашивании и короблении деталей; с изменением контактной жесткости подвижных стыков и др.

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с последствием первого рода относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между параметрами порядка $H_i(\Delta t)$ и $H_{i+1}(\Delta t)$ даже при сравнительно больших $\tau = t_{i+1} - t_i$. Здесь $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$; $H_{i+1}(\Delta t) = H(t_{i+1} + \Delta t) - H(t_{i+1})$, $t_i < t_{i+1}$.

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, характеризуются автоколебательным ($\tau_{\Pi}^p \geq \tau_{\text{в}}^p$ или $\tau_{\Pi}^p \geq \tau_{\text{с}}^p$) и стохастическим ($\tau_{\text{в}}^p \geq \tau_{\Pi}^p \geq \tau_{\text{с}}^p$) режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы.

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода (см. рис. 1, в). Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [6]. В переходный период $[t_0, t_1]$ интенсивность изнашивания I отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_{i-1} , и от значения, соответствующего новому уровню X_i :

$$I(t) = \begin{cases} f_H(X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t_1; \\ f_H(X_i, t), & t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами: эксплуатационной наследственностью материалов, деформируемых в процессе трения поверхностных слоев деталей; изменением эпюры удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим "вторичной приработкой" трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между нагрузочным воздействием и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях [6, 7].

Показатель качества изготовления	Период процесса изнашивания		
	приработка	нормальное изнашивание	ускоренное изнашивание
Точность размеров и форма (неплоскостность, некруглость и др.)			
Волнистость			
Шероховатость			
Остаточные напряжения			
Структура основного материала			
Структура поверхностных слоев			
Структура поверхностного рельефа			

↑
↑
 Выход детали из строя Полное разрушение поверхности

Рис. 2. Изменение начальных показателей качества поверхности изделий в процессе эксплуатации (заштрихованные участки характеризуют длительность сохранения начальных значений геометрических параметров, остаточных напряжений и структуры материала в пределах допускаемых отклонений)

Исходя из представлений о природе явлений последствия второго рода можно заключить, что с позиции вероятностного анализа [6] процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i+1}(\Delta t)$ [6, 7].

Поэтому их следует рассматривать как релаксационные ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\text{в}}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\text{с}}^p$) с характерным периодом $[t_0, t_1]$.

Таким образом, понижение размерности при описании передачи свойств изделий в технологических и эксплуатационных процессах производится путем выделения параметров порядка и определения режимов состояния системы. После этого на каждом из режимов целесообразно рассмотреть взаимосвязи основных показателей качества изделия с определяющим параметром порядка и условия их устойчивого формирования [8].

Показатели качества поверхностей изделий. Показатели качества изделий машиностроения, являющиеся основными, делятся на две категории [7, 9]: к первой относятся показатели, характеризующиеся наследственными явлениями, связанными со свойствами материалов изделий; ко второй – связанные с геометрическими параметрами их поверхностей.

Показатели обеих категорий в многосвязных технологических и эксплуатационных средах взаимно влияют друг на друга. Геометрические параметры изделий (конфигурации и размеры) могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоях. И, наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций упрочнения и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров деталей. Это свидетельствует о взаимной связи и обусловленности явлений, сопровождающих технологические и эксплуатационные процессы.

Наиболее полно наследование основных показателей качества раскрывается при рассмотрении последовательности процессов с синергетических позиций совместного действия технологических факторов при взаимном влиянии показателей [7, 10].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях (рис. 2) в процессе эксплуатации изменяются [6, 7]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей.

В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняется шероховатость и структура поверхностного рельефа. Волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допускаемых значений, принятых при изготовлении, практически до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по параметрам точности [1, 2, 6].

Снижение чувствительности технологических и эксплуатационных сред к изменению условий реализации режимов производства и применения изделий позволяет с наименьшими затратами осуществлять направленное формирование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения [1, 11]. Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постанов-

ки решаемой задачи осуществлять редукцию ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных при сохранении корректности и адекватности [3].

Методология принятия проектных решений

Математический аппарат методологии базируется на основных положениях [3]:

- качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории и множество показателей качества является результатом предыстории;
- любое технологическое и связанное с ним воздействие на заготовку изменяет все показатели качества;
- любой показатель качества, изменяясь, приводит к изменению всех остальных показателей качества заготовки.

Характеристики технологических сред и закономерности их изменения позволили сформировать основную задачу направленного формирования показателей качества изделия: при известных начальных и конечных свойствах предмета производства определить наиболее оптимальную с точки зрения трансформации свойств технологическую среду.

В результате предложен общеметодический подход к обеспечению направленного формирования оптимальных свойств изделий (рис. 3).

Важной особенностью подхода является формирование для каждого технологического передела сквозного процесса изготовления изделия оптимальной технологической среды, обеспечивающей наиболее рациональное распределение значений показателей качества по переделам и придающей процессу формирования качества изделия необходимую направленность. Изменяя среду или ее характеристики, можно управлять формируемыми свойствами изделий.

Модель многосвязных взаимодействий среды. На основе сравнения характеристик сред базового технологического процесса и желаемых процессов могут быть определены необходимые корректирующие воздействия по изменению состава, структуры и условий взаимодействия как элементов технологических сред, так и последних с предметом производства.

На базе концептуального подхода предложено определять следующие коэффициенты [3]:

- оперативного изменения *i*-го показателя качества при использовании *j*-го технологического метода – $(m_i)_j$;
- изменения *i*-го показателя качества изделия, связанного с условиями реализации *j*-го технологического метода, – $(u_i)_j$;
- изменения *i*-го показателя качества при взаимодействии с технологической средой операции, реализующей *j*-й технологический метод, – $(S_i)_j$.

Оперативно формирующая составляющая $(K_i)_j^{on}$ значения показателя K_i :

$$(K_i)_j^{on} = (m_i)_j (K_i)_{j-1} + (u_i)_j (K_i)_{j-1},$$

где $(K_i)_j$ – множество значений показателей качества изделия после выполнения операции при его изготовлении с учетом закономерностей технологической наследственности; $(K_i)_{j-1}$ – множество значений показателей качества, характеризующих состояние изделия после выполнения предыдущей операции.

Если метод не реализован $(m_i)_j = 1$, $(u_i)_j = 0$, иначе $0 < (m_i)_j \leq 1$. Изменение знака и значения показателя качества

происходит в результате совокупного изменения коэффициентов $(m_i)_j$ и $(u_i)_j$. Для каждого технологического метода найдены штатные условия реализации, определяющие значения $(m_i)_j$. Коэффициент $(m_i)_j$ учитывает штатные условия реализации метода (в частности, штатные экономически обоснованные условия обработки), а $(u_i)_j$ – отличающиеся от штатных, а также иные условия, дополнительно характеризующие среду (базирование и закрепление заготовки, упругие характеристики элементов технологической системы и т.д.).

Аналитическое определение коэффициентов $(m_i)_j$, $(u_i)_j$, $(S_i)_j$ невозможно, поэтому они определяются статистической обработкой экспериментального материала.

Для конкретного метода с индексом реализации *r* слагаемое $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ выделяется в систематическую составляющую (С):

$$[(K_i)_j^{on}]_r = (m_i)_j [(K_i)_{j-1}^{on}]_r + C.$$

Методики определения коэффициентов передачи. При определении значений коэффициентов оперативного изменения показателей качества $(m_i)_j$ используют методики максимального пересечения множества входных и выходных значений показателей качества, а также усреднения границ диапазонов (рис. 4).

При известных $(m_i)_j$ значения $(u_i)_j$ определяются в соответствии с

$$[(u_i)_j]_r = [(K_i)_j^{on}]_r / [(K_i)_{j-1}^{on}]_r - (m_i)_j.$$

А при известных $(m_i)_j$, $(u_i)_j$

$$(S_i)_j = \frac{(K_i)_j^{on}}{(K_i)_{j-1}^{on}}$$

используют таблицы усредненных значений коэффициентов оперативного изменения свойств $(m_i)_j$ для основных технологических методов обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, а также плоскостей.

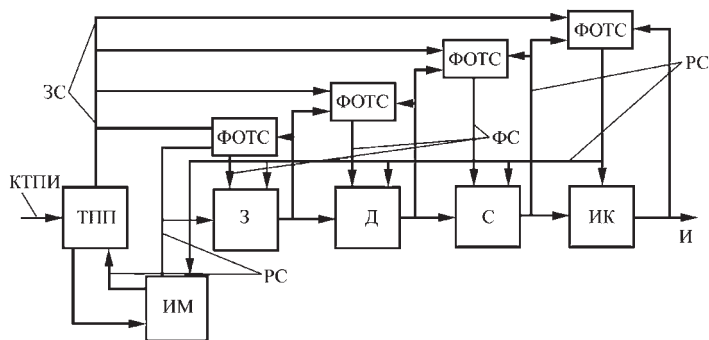


Рис. 3. Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий:

И – изделие; ЗС, РС, ФС – заданные, реальные, формируемые свойства изделия соответственно; ТПП – технологическая подготовка производства; ИМ – изготовление исходных материалов; З – изготовление заготовок; Д – изготовление деталей; С – сборка; ИК – испытание и контроль; КТПИ – конструктивно-технологические параметры изделия; ФОТС – формирование оптимальных технологических сред

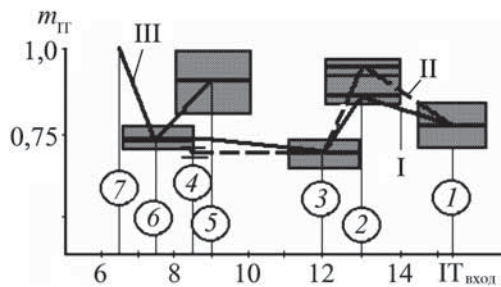


Рис. 4. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_{TT}) упрочненных наружных цилиндрических поверхностей различными методами обработки:

1, 2, 3, 4 – точение черновое, получистовое, чистовое, тонкое соответственно; 5, 6, 7 – шлифование предварительное, окончательное, тонкое соответственно; I, III – методика максимального пересечения множеств; II – методика усреднения границ

Установлено, что оптимальная погрешность определения коэффициентов оперативного изменения показателей качества обрабатываемых заготовок для методов абразивной обработки в среднем в 3 раза выше, чем для лезвийной, что свидетельствует о большей чувствительности соответствующих технологических сред к изменению условий реализации и состояния образующих их объектов.

Среднее значение относительной погрешности определения коэффициента оперативного изменения точности размеров m_{TT} для группы методов точения и шлифования деталей с износостойкими покрытиями составило 2,5 %, а шероховатости $m_{Ra} - 11,0$ %. Зависимости коэффициентов изменения свойств технологической среды операции от состояния образующих её объектов адекватно представляются с помощью линейных регрессионных моделей или кусочно-линейно аппроксимируются при относительной погрешности, не превышающей 10 % (рис. 5, 6).

Установлено, что сохранение и взаимное влияние свойств особенно проявляются при плосковершинной алмазно-абразивной обработке, полировании и суперфинишной обработке, когда снимаемый припуск находится в пределах исходной высоты неровностей шероховатости.

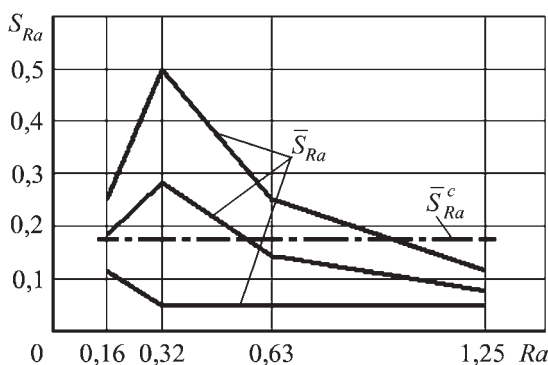


Рис. 5. Зависимости коэффициента S_{Ra} от исходного параметра шероховатости деталей с покрытиями при суперфинишной обработке (\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение; \bar{S}_{Ra}^c – усредненное постоянное значение)

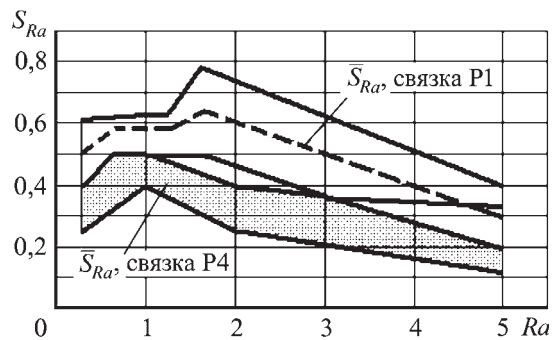


Рис. 6. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходного параметра шероховатости деталей с покрытиями при шлифовании абразивной лентой (\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение коэффициента)

Определение коэффициентов сохранения и взаимовлияния. Многосвязность технологических сред, различие физических процессов, сопровождающих взаимодействие сред с предметом труда, является основной причиной отсутствия единого методического подхода к определению элементов коэффициентов сохранения и взаимного влияния формируемых свойств k_{ij} матрицы $[k_{ij}]$. Коэффициенты определяют при реализации сквозного технологического процесса изготовления изделия при непрерывном исследовании состояния качества предмета производства.

Первичное значение k_{ij} для начальной фазы процесса

$$k_{ij} \approx \frac{(K_i)_1 - S_{ij}(K_i)_0}{(K_i)_0},$$

где $(K_i)_1$ и $(K_i)_0$ – значения показателя K_i после и до выполнения операции соответственно; S_{ij} – коэффициент изменения показателя качества при взаимодействии предмета производства с технологической средой операции.

В отличие от m_i, u_i , коэффициенты k_{ij} имеют физическую размерность.

Предложенный аппарат описания трансформации показателей качества с учетом их взаимодействия и взаимного влияния в многосвязных технологических средах адекватен реальным процессам формирования свойств изделий машиностроения и может быть использован для прогнозирования технологических решений. Применение предложенного подхода позволяет от 2 до 5 раз уменьшить относительную погрешность предварительного определения значения показателя качества в сравнении со значением, полученным на основе известных закономерностей технологии машиностроения [3].

Расчетно-аналитический метод

Рассмотрение взаимного влияния технологических факторов при взаимодействии технологических сред с предметом производства позволяет внести соответствующие уточнения в расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности обработки. Возникающие при обработке заготовки погрешности взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга и суммарную погрешность обработки. Составляющие погрешности формируются как в результате взаимодействия заготовки с технологической средой операции, так и с технологической средой процесса.

Определение погрешности обработки. Для составляющих погрешности обработки справедливо

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} 1 & a_{\Delta Y, \varepsilon} & a_{\Delta Y, \Delta H} & a_{\Delta Y, \Delta u} & a_{\Delta Y, \Delta T} \\ a_{\varepsilon, \Delta Y} & 1 & a_{\varepsilon, \Delta H} & a_{\varepsilon, \Delta u} & a_{\varepsilon, \Delta T} \\ a_{\Delta H, \Delta Y} & a_{\Delta H, \varepsilon} & 1 & a_{\Delta H, \Delta u} & a_{\Delta H, \Delta T} \\ a_{\Delta u, \Delta Y} & a_{\Delta u, \varepsilon} & a_{\Delta u, \Delta H} & 1 & a_{\Delta u, \Delta T} \\ a_{\Delta T, \Delta Y} & a_{\Delta T, \varepsilon} & a_{\Delta T, \Delta H} & a_{\Delta T, \Delta u} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{oj}$$

где $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_j^T$ – вектор-столбец значений составляющих погрешностей (погрешность, вызываемая упругими деформациями; погрешность установки; погрешность настройки; погрешность, вызываемая размерным износом; погрешность, вызываемая тепловыми деформациями), определяемых с учетом взаимного влияния; a – коэффициенты трансформации погрешностей, учитывающие взаимное влияние погрешностей; $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_{oj}^T$ – вектор-столбец детерминированных значений составляющих погрешностей, определенных на основе традиционного расчетно-аналитического метода.

Квадрат итогового значения суммарной погрешности Δ определяется в форме

$$\Delta^2 = [\lambda_i P_i]^T [P_i],$$

где λ_i – коэффициенты, определяющие форму кривой распределения составляющей погрешности P_i ;

T – символ транспонирования.

Учет многосвязности технологических сред при определении суммарной погрешности обработки позволяет более чем в 2 раза повысить точность существующих методов расчета [3].

Модель формирования показателей качества. Разработанный аппарат описания трансформации свойств изделий позволяет желаемым образом распределять уровни свойств изделия по этапам технологического процесса его изготовления. Для любой части сквозного технологического процесса изготовления изделия и для любого из свойств последнего на основании разработанной методики может быть определен и при необходимости оптимизирован желательный уровень значений соответствующих показателей качества.

Так, например, по завершении заготовительного периода достигнутые значения квазистабильных K_c^3 и изменяющихся K_v^3 показателей качества определяются следующим образом:

$$\begin{cases} K_c^3 = S_c^3 K^M + k_c^{3,M} K^M; \\ K_v^3 = S_v^3 K^M + k_v^{3,M} K^M, \end{cases}$$

где S_c^3, S_v^3 – коэффициенты изменения свойств предмета производства в результате его взаимодействия с технологи-

ческой средой уровня заготовительного периода; K^M – значения показателей качества исходного материала; $k_c^{3,M}, k_v^{3,M}$ – коэффициенты сохранения и взаимного влияния свойств исходного материала, проявляющиеся на заготовительном этапе сквозного процесса изготовления изделия соответственно.

Аналогичные соотношения могут быть определены для пределов обработки и упрочнения деталей. Эти соотношения можно рассматривать как модель формирования свойств изделия в сквозном технологическом процессе его изготовления. Практически для любого этапа N группы операций могут быть получены соотношения вида

$$K_N = H_N K^M,$$

где K_N – значение сформированного после этапа N показателя качества; H_N – коэффициент трансформации свойств изделия по отношению к исходным (K^M).

Введением множества критериев оптимизации можно перейти к решению задач оптимизации значений показателей качества для каждого этапа (операции) технологического процесса. Так как не все показатели качества равнозначны с позиции технологического обеспечения их значений целесообразно определять желаемые уровни не для всех, а лишь для труднообеспечиваемых показателей качества, считая при этом "по умолчанию", что другие показатели будут обеспечены. Использование "паспорта" предмета производства, включающего, например, для детали данные о наиболее труднодостижимых значениях показателей качества и общем числе ее поверхностей, позволяет корректно снизить размерность решаемых технологических задач.

Технологический алгоритм обработки и упрочнения

Распределение уровней свойств в сочетании с определением количественных характеристик возможной трансформации свойств позволяет принципиально изменить существующие подходы к построению технологических процессов обработки и упрочнения [12].

Для успешного выполнения заданного множества функций технологическая среда должна быть обеспечена необходимыми резервами. Резерв технологической среды образует множества ее характеристик и значений последних, не используемые при выполнении средой заданных функций и условий их реализации.

Оценка среды по каждому из ее параметров может проводиться на основании предложенных количественных характеристик. Среда любого уровня должна обязательно обладать резервом по параметрам (возможностям), величина которого должна оптимально соответствовать множеству выполняемых функций и диапазону возможных изменений условий их реализации.

Выбор технологических сред и любого из технологических объектов, обладающих рациональными резервами, может эффективно осуществляться на базе предложенного аппарата оценки качества соответствующих технологических решений. Формирование резерва среды может выполняться по каждому из отдельно взятых ее параметров и должно учитывать как стохастический характер последних, так и их взаимодействие.

С учетом влияния всего цикла изготовления детали на ее эксплуатационные свойства разработан алгоритм, в соответствии с которым по требуемым эксплуатационным свойствам рекомендуются значения параметров состояния по-

Заключение

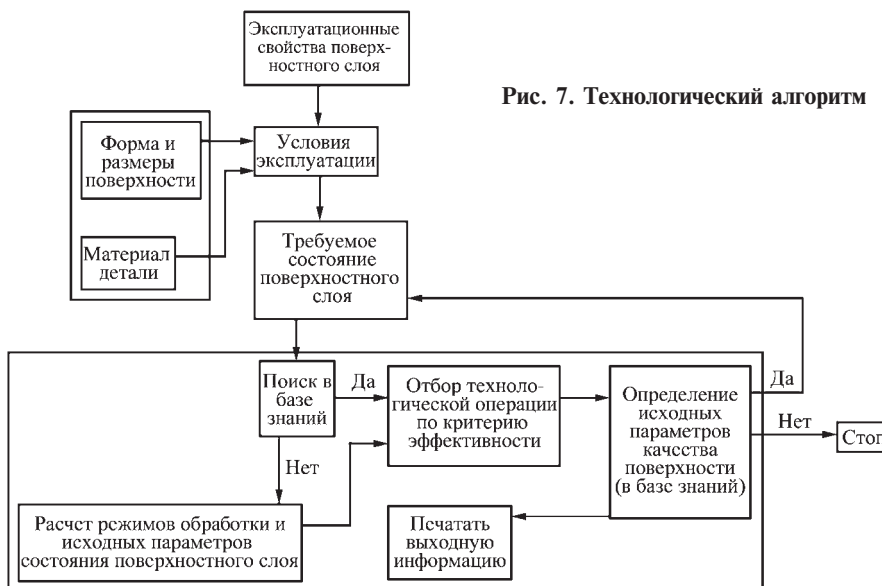
Автоматизированная генерация технологических сред заданного уровня относительно выделенного объекта принципиально возможна на основе их функциональных моделей, созданных с применением CALS-технологий. Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять снижение ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных при сохранении корректности и адекватности.

Снижение чувствительности технологических и эксплуатационных сред к изменению условий реализации режимов производства и применения изделий позволяет с наименьшими затратами осуществлять направленное формирование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников К.С., Баландин Г.Ф., Дальский А.М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
3. Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
4. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын, А.И. Аверченков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 106–109.
5. Управление свойствами технологической среды при электрофизической обработке / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов, М.Л. Хейфец // Тяжелое машиностроение. 2004. № 7. С. 18–23.
6. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. Минск: Наука и техника, 1984. 288 с.
7. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко, А.С. Васильев // Доклады НАН Беларуси. 2005. Т. 49. № 2. С. 130–135.
8. Использование критериев подобия при проектировании комбинированных физико-химических методов обработки материалов / А.И. Гордиенко, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. 2004. Т. 48. № 4. С. 107–110.
9. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.
10. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
11. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. М.: МАИ, 2000. 364 с.
12. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития/ Под ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. Новополоцк: ПГУ, 2002. 268 с.
13. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А.Г. Раковича. Минск: ИТК НАНБ, 1997. 276 с.

Рис. 7. Технологический алгоритм



верхностного слоя готовой детали и формируется технологический процесс ее изготовления, обеспечивающий указанные параметры, назначаются режимы обработки и упрочнения, характеристики инструмента и оборудования, обеспечивающие необходимые параметры состояния поверхностного слоя заготовки и полуфабриката на каждом этапе обработки (рис. 7).

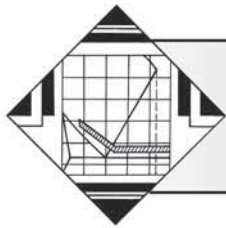
Технологический алгоритм включает следующие этапы:

- исходя из эксплуатационных свойств и условий эксплуатации элементарных поверхностей детали устанавливаются требования к состоянию поверхности детали;
- на основании математических моделей или в базе данных по требуемому состоянию поверхностного слоя определяют режимы обработки и упрочнения, инструмент и оборудование, необходимые для реализации окончательной обработки заданной детали;
- по параметрам состояния поверхностного слоя определяют режимы обработки и упрочнения, инструмент и оборудование, необходимые для реализации предыдущей операции (перехода) обработки.

Проектирование технологических процессов изготовления изделий с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества малоэффективно вне его автоматизации. Проектирование единичных *маршрутных технологических процессов* (МТП) изготовления деталей желательнее осуществлять в режиме автоматизированного синтеза при минимальном диалоге пользователя с системой [11, 13].

Стратегия разрешения проблемы автоматизированного синтеза МТП с учетом закономерностей изменения, сохранения и взаимного влияния формируемых показателей качества предусматривает:

- выполнение синтеза МТП в автоматизированном режиме на основе общетехнологических принципов и получение основных характеристик маршрута;
- прогнозирование изменения показателей качества с учетом закономерностей трансформации свойств на основе структуры сформированного МТП;
- выполнение необходимой корректировки МТП в случае, если желательный уровень значений показателей качества не достигнут.



Наноструктурные эффекты в лазерно-облученной стали

Рассмотрена структурная картина стали P6M5 после импульсной лазерной обработки с оплавлением поверхности. Показаны факторы, способствующие диспергированию формирующихся кристаллов до наномасштабного уровня. Установлена взаимосвязь наноструктуры с прочностными характеристиками лазерно-облученных изделий.

Ключевые слова: лазерное облучение металлов, локальная пластическая деформация, наноразмерные кристаллы.

The structure of steel P6M5 after pulse laser processing with surface fusion is considered. The factors promoting crushing of formed crystals to nanoscale level are shown. The interrelation of a nanostructure with characteristics of durability of the laser-irradiated products is established.

Keywords: laser irradiation of metals, local plastic deformation, nanodimensional crystals.

Введение

В современном машиностроении большое внимание уделяется качеству поверхностных слоев, поскольку они подвергаются при эксплуатации упрочненных изделий воздействию значительных колебаний температур и напряжений, вызывающих преждевременный выход изделий из строя вследствие разрушения. Поэтому одним из перспективных и быстро развивающихся методов термической обработки поверхности металлических материалов является импульсная лазерная технология, позволяющая существенно повысить эксплуатационные свойства поверхностных слоев сталей и сплавов.

Лазерная поверхностная обработка машиностроительных материалов в целом носит локальный характер. Размеры зон импульсного лазерного воздействия составляют несколько миллиметров (диаметр пятна ~ 1...5 мм), глубина зон термического влияния (~ 50...150 мкм) [1].

Методика выполнения исследований

Импульсное лазерное облучение образцов размером 10×10×15 мм (не менее 7 шт. для каждого варианта упрочнения) проводили на технологических установках "Квант-16" и "ГОС-30М" при последовательном перемещении их относительно оси пучка. Изменение энергии излучения (10...30 Дж), степени дефокусировки луча (3...6 мм), длительности излучения (1...6)·10⁻³ с позволили варьировать плотность мощности излучения в широких пределах.

Металлографические исследования осуществляли на поперечных шлифах. Съемку микроструктур проводили на микроскопах МИМ-8 и Neophot-21.

Наноструктурное состояние исследовали на научно-учебном комплексе Nanoeducator (производство компании НТ-МДТ, г. Зеленоград) в режиме атомно-силовой микроскопии.

Износостойкость оценивали по потере массы образцов в условиях сухого трения по схеме "диск-колодка" на машине трения МИ-1М.

Обсуждение результатов

При металлографических исследованиях лазерно-облученных сталей наблюдается выраженная неоднородность структуры, состава и свойств облученного пятна, связанная с гипервы-

сокими скоростями нагрева и охлаждения, а также со значительными градиентами температур и напряжений (см. ниже). Таким образом, на поверхности материалов формируется структура, особенности которой обусловлены степенью завершенности фазовых и структурных превращений при нагреве и охлаждении.

В общем случае в облученном слое различимы три принципиально различных по природе фазовых превращений зоны: зона оплавления (ЗО); зона закалки из твердого состояния (ТС); переходная или зона термического влияния (ЗТВ), формирующаяся при нагреве основного металла за счет теплоотвода от облученного пятна. Лазерная обработка металлов с оплавлением поверхности открывает новые возможности для получения качественно иного структурного состояния в сплавах в сравнении с традиционными процессами термоупрочнения концентрированными потоками энергии [2, 3].

При этом возрастанию уровня напряжений в фазах способствуют:

- протекание мартенситного превращения при охлаждении после лазерной закалки;
- повышенная плотность формирующихся при этом дефектов кристаллического строения, превышающая аналогичную для объемно-закаленного металла в 10 раз;
- значительная химическая и структурная неоднородность твердых растворов, возникающая вследствие замедления диффузионных процессов перераспределения легирующих элементов при скоростных процессах нагрева, т.е. основные факторы, приводящие также к упрочнению лазерно-облученных сталей.

Следует отметить, что лазерная обработка с оплавлением поверхности формирует конечную структуру на стадии охлаждения расплавленного металла. После начала действия светового луча на материал в центральной части облучаемого пятна возникает тонкий слой жидкой фазы (10...30 мкм), для которого характерны дендритные формы роста кристаллов. Их форма во многом определяет показатели качества поверхности после лазерной обработки, поэтому они являются одним из объектов исследования при структурообразовании различных материалов, подвергнутых лазерному воздействию.

Дендриты растут в направлении отрицательного градиента температур, т.е. от поверхности изделия вглубь. При этом вы-

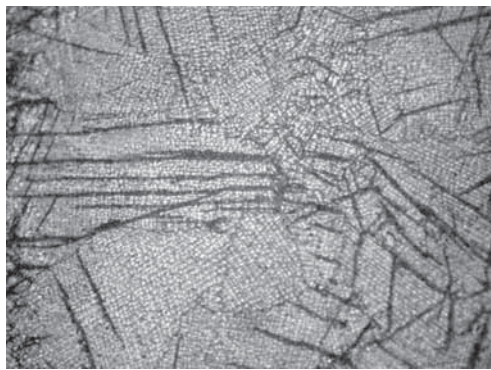


Рис. 1. Микроструктура (вид сверху) оплавленной зоны на стали Р6М5 (×900)

сокая скорость кристаллизации способствует существенному диспергированию кристаллов в поперечном сечении вплоть до наномасштабного уровня.

Подтверждением вышесказанному являются микроструктурные исследования поверхностных слоев стали Р6М5 после импульсной лазерной обработки с оплавлением поверхности. На рис. 1 в оплавленной части пятна хорошо просматривается мозаичное строение структуры, а также зубчатость границ зерен и присутствие полос скольжения.

Подобный эффект может быть связан с протеканием процессов, аналогичных динамической высокотемпературной деформации. Искривленность границ зерен в виде зубчатости, видимо, является следствием миграции границ за счет возникающих при лазерной обработке значительных микронапряжений и пластической деформации в микрообъемах.

При лазерном оплавлении поверхности металла, т.е. когда в пятне облучения возникает слой застывшего расплава, основным источником локальной пластической деформации являются термические напряжения при кристаллизации, а также напряжения, возникающие на границе зон ЗО–ТС. Дополнительный вклад в появление напряжений и формирование наблюдаемой мозаичной структуры, состоящей из субзерен (блоков), вносит гидродинамическое перемешивание расплава под действием термокапиллярных сил, возникающих вследствие неоднородного нагрева поверхности (рис. 2, см. с. 3 обложки).

Установлено, что в зонах лазерной закалки из жидкого состояния вследствие температурных и концентрационных градиентов возникают высокая степень неравновесности жидкой фазы, бифуркационная неустойчивость расплава и переход ламинарного течения жидкости к турбулентному. Возникающие при этом циркуляционные вихри, распадающиеся на ряд завихрений (см. рис. 2, с. 3 обложки), обеспечивают на различных масштабных уровнях диссипацию энергии, аномальные потоки массопереноса и диспергирование растущих кристаллов, в том числе наноструктурные эффекты.

Управляющим параметром в данном случае является градиент колебательного давления на границе раздела твердая–жидкая фаза, который при достижении критического уровня становится параметром, контролирующим конвективные и аномальные диффузионные потоки, обеспечивая диспергирование растущих кристаллов. Конвективное течение является ответственным за дисперсию в объеме ванны богатых растворенными элементами участков расплава.

Малый размер кристаллитов оплавленного металла приводит к тому, что значительную долю материала (до 50 %) занимают межкристаллитные границы. Это коренным образом изменяет механизмы, ответственные за формирование макроскопических характеристик лазерно-оплавленного металла.

Описанное выше диспергирование в поверхностных слоях лазерно-облученной стали Р6М5 исследовали с использованием сканирующей зондовой микроскопии. Результаты экспериментов выявили наноструктурные эффекты (рис. 3, см. с. 3 обложки). Как видно из рисунка, импульсная лазерная обработка

приводит к формированию элементов размером порядка 100 нм и менее.

При этом данный порядок характерен:

– для поперечного сечения кристаллов, т.е. в направлении, перпендикулярном действию лазерного луча (см. рис. 3, с. 3 обложки);

– для осевого направления роста кристаллов (перпендикулярно поверхности облучения). Подтверждением сказанному является гистограмма распределения высот структурных элементов на исследованной поверхности, т.е. рельеф (расположена в правой части рис. 3, а, см. с. 3 обложки).

Исходя из современных представлений о наноструктурных материалах [4], данный эффект является прямым подтверждением своеобразного и нетривиального "дуализма" свойств лазерно-упрочненных слоев – высокая твердость сопутствует определенному запасу вязкости, не уступающему объемно-термоупрочненным сталям.

По-видимому, при формировании в облученных слоях описанного наномасштабного строения возникает значительный градиент напряжений (фазовых, механических и др.), что способствует образованию развитой дислокационной субструктуры, которая простирается в глубь материала. В результате создается структурная картина, изобилующая полупроницаемыми барьерами [5] для движения дислокаций, что способствует релаксации пиковых напряжений не путем зарождения и распространения трещин, а путем эстафетной передачи напряжений в соседние микрообъемы кристаллов.

Для подтверждения вышесказанного проводили испытания на износостойкость образцов из стали Р6М5 после импульсной лазерной обработки с оплавлением поверхности и после стандартной термической обработки – закалки от 1220 °С и 3-кратного отпуска. Результаты показали сравнительное превосходство лазерно-оплавленных слоев в 2,5 раза после 10 мин и до 7-кратного преимущества после 120 мин испытаний.

Испытания на трение показывают, что поверхности объемно-упрочненных образцов имеют поврежденную поверхность контакта с участками схватывания и смещения металла, и наоборот, образцы, подвергнутые лазерному оплавлению, имели после испытаний достаточно чистую поверхность.

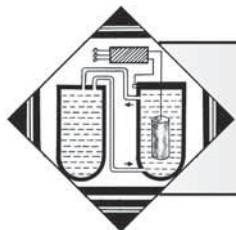
Однако следует отметить, что конструкционная прочность лазерно-оплавленных зон имеет достаточно высокие значения только при их эксплуатации в условиях действия сжимающих напряжений. Если работа обработанного слоя связана с растягивающими напряжениями, то указанное свойство значительно снижается.

Вывод

Установлено, что при скоростной лазерной обработке стали с оплавлением поверхности происходит практически мгновенное поглощение энергии за счет высокой скорости охлаждения, что приводит к генерации волн напряжений, ускоряющих процессы массопереноса элементов металла и к высокоскоростной локальной пластической деформации микрообъемов поверхностного слоя. В данных условиях формируется наноструктурная картина, способствующая повышению прочностных характеристик лазерно-облученных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. 664 с.
2. Гуреев Д.М. Фазовый состав быстрорежущих сталей при быстрой кристаллизации лазерного расплава // Физика и химия обработки материалов. 1994. № 6. С. 126–138.
3. Ломаев Г.В., Харанжевский Е.В. Упрочняющая обработка поверхности методом высокоскоростной лазерной перекристаллизации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 3. С. 27–32.
4. Рыжонков Д.И. Наноматериалы: Учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 365 с.
5. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. 255 с.



УДК 621.785.5:669.14.018.25

Т.П. Колина, В.В. Брюханов, А.Н. Тарасов
(ФГОУ ВПО "Калининградский государственный технический университет")
E-mail: tamarakolina@mail.ru

Влияние исходной структуры и подготовки поверхности высоколегированных сталей на свойства диффузионных слоев при цементации в древесно-угольных смесях

Проведены исследования и обобщен опыт выбора оптимальных условий подготовки мелкоразмерного инструмента, оснастки, деталей из сталей ферритного, мартенситного и карбидного классов для высокотемпературной цементации в новых активированных древесно-угольных смесях. Установлены технологические схемы обработки, позволяющие формировать износостойкие карбидные диффузионные слои при химико-термической обработке в смесях на основе древесных углей с введением азотсодержащих компонентов карбамида и трилона-Б.

Ключевые слова: стали карбидного класса, цементация, износостойкость, карбамид.

The choice of optimal conditions for preparation of small size tooling, construction of ferrite, martensite and carbide steel classes for high temperature cementation in activated woodencol compositons has been analyzed. Technological processing schemes allowing to form wear resistant carbide and carbide-nitrate diffusion layers at chemical heat treatment in compositions on the basis of wooden coals with addition of nitride components of carbamide and trilon-B have been established.

Keywords: carbide steel classes, cementation, wear resistant, carbamide.

Введение

Высокотемпературные процессы химико-термической обработки (ХТО) цементации и нитроцементации деталей, инструмента из высоколегированных хромистых и сложнoleгированных вольфрамомолибденовых, ванадийсодержащих сталей, осуществляемые в жидких и твердых карбюризаторах, эффективны лишь при введении дополнительных натрийсодержащих и азотсодержащих компонентов, повышающих скорости диффузии углерода и азота в условиях существования на поверхности пассивирующих соединений с хромом [1, 2]. При этом исходная структура и шероховатость поверхности перед ХТО в интервалах температур от 840 до 960 °С также могут влиять на степень науглероживания и характер формирования износостойких карбидных и карбонитридных диффузионных слоев [3–6].

В ОКБ "Факел" совместно с Калининградским государственным техническим университетом, являющимся единственным разработчиком и изготовителем в России электрических двигателей малой тяги (ЭРД МТ), накоплен значительный опыт применения мелкоразмерного инструмента, оснастки, деталей, упрочняемых цементацией, нитроцементацией в активированных смесях на базе древесных углей [7–10]. При этом в последнее время проведены исследования влияния условий предварительной термической и механической обработки деталей из высоколегированных сталей,

применяемых в производстве ЭРД МТ, на структуру и свойства упрочненных диффузионных слоев, а также для определения оптимальных технологических схем изготовления прецизионных деталей и специального инструмента в условиях мелкосерийного производства приборостроительного предприятия.

Приведены результаты исследования структуры и свойств сталей, применяемых в основном и вспомогательном производствах предприятия при изготовлении ЭРД МТ, с повышенными ресурсами эксплуатации и надежности работы в космическом пространстве.

Методика исследований

Марки сталей, условия предварительной обработки приведены в табл. 1.

Цементацию образцов и деталей проводили в одних садках, в герметичных контейнерах из коррозионно-стойкой стали, с упаковкой по схеме "контейнер в контейнер" (рис. 1), что позволяло поддерживать стабильный высокий углеродный потенциал в течение длительной выдержки при температурах от 780 до 980 °С и монотонно убывающий азотный потенциал в процессе прогрева деталей и образцов до температуры выдержки.

Количество активизирующих добавок карбамида и трилона-Б к березовому углю составляло 10...12 % из расчета 1...6 г на единицу площади обрабатываемых деталей, при

Таблица 1

Марки сталей, твердость в исходном состоянии, виды предварительной обработки

Марка стали, класс, технические условия, термообработка	Твердость, НВ	Подготовка поверхности
20Х13, мартенситная, улучшаемая, ГОСТ 5949–70, пруток Ø32 мм, отожженная	224...235	Токарная, фрезерная
16Х-ВИ, ферритная, магнитомягкая, ГОСТ 10160–75, пруток Ø20, горячекатаная, отожженная	153...166	Токарная, фрезерная
4Х5МФС, мартенситная, теплостойкая, ОСТ 92-1137–86, квадрат 16×16 мм, отожженная	245...250	Токарная, шлифовальная, АСО
Р6М5, быстрорежущая, карбидная, ГОСТ 590–73, пруток Ø24...80 мм, отожженная	255...260	Токарная, фрезерная, шлифовальная
<p>Примечание. Химсостав в пределах ТУ, образцы и детали из заготовок одной плавки. АСО – абразивно-струйная обработка.</p>		

этом диссоциация компонентов в древесно-угольной смеси в процессе прогрева и выдержки протекала в присутствии атомарного активного углерода древесного угля по реакциям:

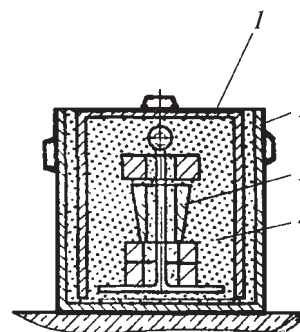
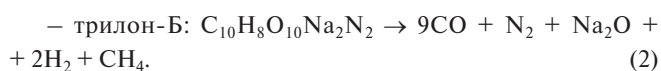


Рис. 1. Упаковка деталей при цементации по схеме "контейнер в контейнер":

1 – внутренний балластный контейнер; 2 – наружный; 3 – детали; 4 – древесно-угольный активированный состав



Режимы цементации исследованных сталей в электропечах СНОЛ-1,6,2,5.1/10И2, СНО-3.6.2/10ИЗ, условия подготовки поверхностей деталей и инструмента, углерод-азотный потенциал по образцам-свидетелям приведены в табл. 2.

На всех этапах работ проводили металлографический анализ диффузионных слоев на микроскопах ММР-4, "Неофот" с компьютерными и цифровыми приставками. Твердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3, рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на установке "Дрон-3". Прочностные характеристики определяли по стандартным методикам, а износостойкость – по потере массы при сухом скоростном трении о микронные шлифовальные бумаги на станках "Нерис".

Таблица 2

Условия подготовки и режимы цементации сталей

Марка стали, изделие	Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Режим ХТО		Содержание, %	
		T, °C	t, ч	C	N
20Х13, упоры, втулки, пуансоны	Механическая обработка, АСО, Ra = 0,9...1,5 мкм	940...960	2...6	2,3...2,5	0,08...0,10
16Х-ВИ, якоря, магнитопроводы	Токарная, фрезерная, Ra = 0,6...0,8 мкм	780...960	4...5	2,1...2,3	0,06...0,08
4Х5МФС, бойки, матрицы, пуансоны	Механическая обработка, АСО, Ra = 0,5...0,6 мкм	960...980	4...5	1,9...2,2	0,05...0,06
Р6М5, фильеры, диски остро-угольные, валики раскаточные	Шлифование, Ra = 0,5...0,6 мкм	940...960	3...6	2,0...2,4	0,07...0,08

Примечание. По данным анализа образцов из стали 10, из проволоки Ø 0,15 мм.

Результаты исследований

Режимы цементации, результаты металлографического анализа, измерения толщины слоев, а также рентгеноструктурного анализа класса карбидов приведены в табл. 3.

На рис. 2–4 показаны микроструктуры карбидных слоев на исследованных сталях трех классов с различной подготовкой поверхности и исходной термообработкой перед цементацией. Установлено, что при цементации в составах на основе древесных углей с введением трилона-Б и карбамида наблюдается ускоренное образование карбидных слоев с тонкой поверхностной зоной внутреннего окисления. Плотность количества карбидов в объемной доле мартенсита определяет лучшие свойства – износостойкость и контактную прочность при трении.

На стали 16Х-ВИ с предварительным высокотемпературным отжигом при цементации происходит образование массивной карбидной сетки, что связано со скоплением по границам зерен атомарного углерода при высокотемпературной выдержке. Влияние натрия в составе активаторов на ускорение диффузии аналогично установленному для высокохромистых сталей в работах [1, 2, 8].

На стали Р6М5 отмечено формирование крупноглобулярных карбидов в сравнении со сталями 20Х13, 4Х5МФС,

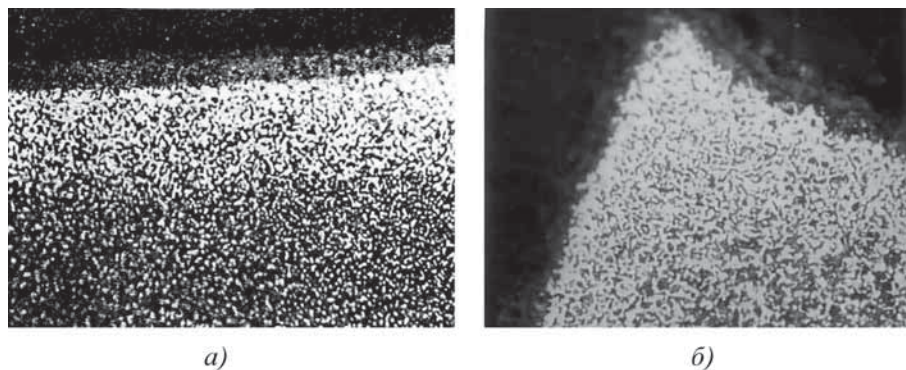


Рис. 2. Микроструктура карбидных слоев стали 20Х13 (отожженная после механической обработки; $Ra = 1,5$ мкм (а) и рельеф резбовой (б); ХТО 960 °С; 6 ч)

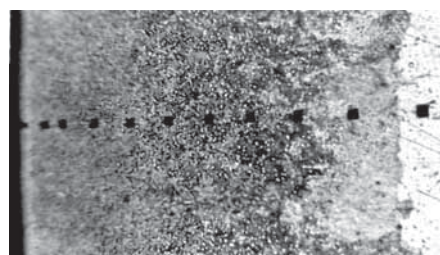


Рис. 3. Микроструктура карбидных слоев стали 16Х-ВИ (токарная обработка; $Ra = 0,7$ мкм; горячекатаная; цементация; 980 °С; 6 ч)

Таблица 3

Режимы цементации, толщина и класс карбидов в диффузионных слоях

Марка стали, исходное состояние, режимы цементации	Подготовка поверхности	Характеристики диффузионного слоя					Класс карбидов
		$h_{ок}$	$h_{с.к}$	$h_{общ}$	$V_k, \%$	$\alpha_k, \text{мкм}$	
		мкм					
20Х13, отожженная, 960 °С, 6 ч, охлаждение в масле	Фрезерование ($Ra = 1,5$ мкм)	20	140	580	85	7...13	$(Fe, Cr)_3C$
	АСО	25	130	600	87	8...12	$(Fe, Cr)_7C_3$; $(Fe, Cr)_{23}C_6$
16Х-ВИ, горячекатаная, 960...980 °С, 5 ч, охлаждение с печью	Токарная ($Ra = 0,7$ мкм)	10	—	720	46	3...4	$(Fe, Cr)_3C$
16Х-ВИ, с отжигом 1150 °С, 780...800 °С, 4 ч, охлаждение с печью	Фрезерование ($Ra = 1,2$ мкм)	14	Сетка карбидов	530	34	5...48	$(Fe, Cr)_7C_3$
4Х5МФС, отожженная, 980 °С, 4,5 ч, закалка в масле	Шлифование ($Ra = 0,5$ мкм)	27	180	510	82	6...11	$(Fe, Cr)_7C_3$
	Резбовой рельеф 200 мкм	16	210 (ветвистые)	530	84	5...12	MoC; VC; $(Fe, Cr)_3C$
Р6М5, отожженная, 960 °С, 4 ч, охлаждение в масле	Шлифование ($Ra = 0,4$ мкм)	10	65	500	78	5...9	$(Fe, Cr)_7C_3$; MoC; VC; WC
	Токарная ($Ra = 100$ мкм)	15	80	600	75	4...10	

Обозначения: $h_{ок}$ – толщина зоны внутреннего окисления; $h_{с.к}$ – толщина зоны сросшихся и ветвистых карбидов; $h_{общ}$ – суммарная толщина диффузионного слоя; V_k – объемная доля карбидов в зоне срастания; α_k – крайние значения толщины и длины.

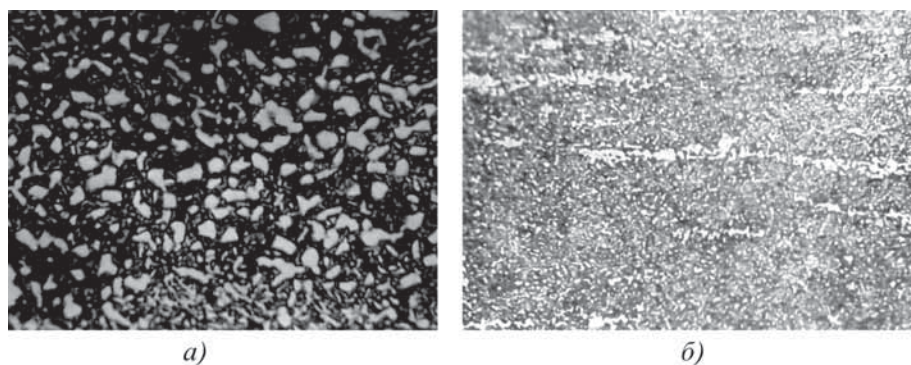


Рис. 4. Микроструктура карбидных слоев стали 4X5MΦC (а) и P6M5 (б) (шлифование 0,4 мкм; отожженные; в сечении стали P6M5 строчки первичных карбидов в цементованном диффузионном слое; 960 °C; 6 ч)

Таблица 4

Свойства диффузионных карбидных слоев деталей и инструмента

Детали, марка стали, режимы цементации, закалки, отпуска	Свойства карбидного слоя			
	Толщина, мкм	Микротвердость, Н _{0,5Н}	Износостойкость*	Шлифуемость**
Пальцы, втулки трения, 20X13, 940 °C, 6 ч, охлаждение в масле, отпуск 250 °C, 4 ч	380...390	944...953	1,5...1,7	0,95
Якоря электромагнитных клапанов, 16X-ВИ, в процессе отжига 960 °C, 5 ч, охлаждение с печью	410...420	680...710	4,0...4,2	0,82
Бойки вибростендов, 4X5MΦC, 980 °C, 4 ч, охлаждение в масле, отпуск 320 °C, 3 ч	330...360	809...830	1,6...1,7	0,87
Фильтр электродов, P6M5, 960 °C, 6 ч, охлаждение в масле, отпуск 220 °C, 4 ч	270...280	930...970	1,3...1,4	0,90

* В сравнении с термически обработанными по стандартным режимам.
 ** Относительная при шлифовании кругами из синтетических алмазов после обработки на максимальную твердость, без ХТО.

образующихся на фоне первичных карбидов исходных заготовок, что вызывает повышение хрупкости, например рабочих кромок тонколезвийного инструмента. В табл. 4 и на рис. 5, 6 приведены данные измерений твердости, прочностных характеристик и износостойкости деталей и инструмента из выбранных сталей при термообработке по различным режимам.

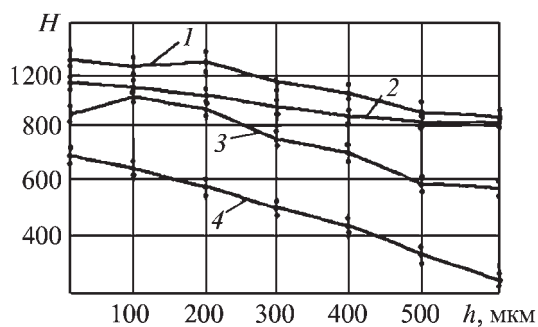


Рис. 5. Зависимость твердости от толщины карбонитридного слоя:
 1 – P6M5; 2 – 20X13; 3 – 4X5MΦC; 4 – 16X-VI

Результаты механических испытаний и определение контактной абразивной износостойкости высокотемпературной цементации в древесно-угольных составах при суммарной добавке карбамида и трилона-Б 10...12 % показали,

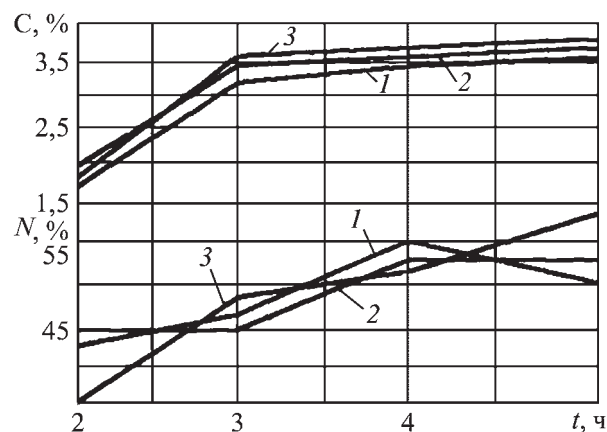


Рис. 6. Зависимости содержания углерода (а) и азота (б) от времени в сталях:
 1 – 16X-VI (960 °C); 2 – P6M5 (950 °C); 3 – 20X13 и 4X5MΦC (940 °C)

что карбидные слои, содержащие выше 45...50 % карбидов и карбонитридов, имеют высокую твердость и износостойкость. При этом наблюдается снижение ударной вязкости сталей 20X13, 4X5MФC, P6M5, закаленных от температур цементации, а прочность на изгиб сохраняется на уровне 1750...1800 МПа, не ниже, чем после закалки на максимальную твердость без цементации.

Снижение шлифуемости при затачивании и доводке для снятия поверхностных слоев внутреннего окисления не превышает 5...15 %. Это соизмеримо со шлифуемостью твердых сплавов, а рост трудоемкости компенсируется повышением износостойкости упрочненного инструмента, деталей, оснастки.

Установлено, что для магнитомягкой стали 16X-ВИ повышение износостойкости при контактном трении металл по металлу наибольшее, ресурс работы клапанных пар достигает 107 циклов при сохранении высоких магнитных характеристик коэрцитивной силы и магнитной индукции в различных магнитных полях.

Выводы

При проведении высокотемпературной цементации в древесно-угольных смесях с азото- и натрийсодержащими активаторами сталей 20X13, 16X-ВИ, 4X5MФC, P6M5 наблюдается заметное влияние предварительной обработки механической и АСО на скорость науглероживания.

Путем создания перед цементацией направленных резьбовых и шаговых рельефов высотой 100...200 мкм на рабочих поверхностях инструмента из сталей 20X13, 4X5MФC, P6M5 удается за счет встречной диффузии сформировать слои с повышенным количеством карбидов.

Исходное состояние и структура сталей 20X13 и 4X5MФC влияют на структуру и свойства карбонитридных слоев. Для стали 16X-ВИ крупное зерно предварительного отжига влияет на уровень износостойкости и эксплуатационные свойства упрочняемых цементацией деталей.

Процессы цементации в древесно-угольных активированных смесях, не содержащих дефицитных компонентов, осуществимы и экономически эффективны в условиях мелкосерийных, опытных приборных производств и ремонтных цехов, и позволяют существенно повысить износостойкость деталей, инструмента и оснастки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борисенок Г.В., Васильев В.А., Ворошин Л.Г.** и др. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М. Металлургия, 1981. 424 с.
2. **Тарасов А.Н., Колина Т.П.** Структура и свойства нитроцементованных сталей 4X5MФC и 20X13, используемых при изготовлении режущего инструмента // *МиТОМ*. 2003. № 5. С. 32–36.
3. **Бабул Т.Д., Кучариева Т.Г., Наконечный А.** Влияние исходной структуры инструментальных сталей на толщину и твердость слоев, полученных в результате карбонитрирования // *МиТОМ*. 2004. № 7. С. 7–20.
4. **Жигунов К.В., Маленко П.И., Овчинникова Е.Ю.** Влияние состояния поверхностного слоя материалов на процессы химико-термической обработки // *Машиностроитель*. 2004. № 2. С. 40–42.
5. **Мовчан В.И., Воронкина Л.А., Педан Л.Г.** Структура низкоуглеродистых быстрорежущих сталей после цементации // *МиТОМ*. 1987. № 1. С. 36–38.
6. **Тарасов А.Н., Колина Т.П., Евсина Е.Н.** Особенности формирования структур и коррозионные свойства азотоцементированных высокохромистых сталей // *Защита металлов*. 2004. Т. 40. № 1. С. 100–105.
7. **Пат. 2 205 892 РФ**, С 23 С 8/76. Способ упрочнения режущего и формообразующего инструмента из теплостойких хромистых сталей / Тарасов А.Н. и др. 2003, Бюл. № 16.
8. **Пат. 2 237 774 РФ**, С 23 С 8/76. Способ никотрирования стальных деталей и инструмента / Тарасов А.Н. и др. 2004, Бюл. № 28.
9. **Пат. 2 253 692 РФ**, С 23 С 8/76. Способ химико-термической обработки деталей электромагнитных клапанов из магнитомягкой стали / Тарасов А.Н. и др. 2005, Бюл. № 16.

21–25 февраля 2011 г.

11-й Международный научно-технический семинар "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ" (M11-1)

(г. Свалява, Карпаты)

Тематика семинара

- Современные тенденции развития технологии машиностроения
- Подготовка производства как основа создания конкурентоспособной продукции
- Состояние и перспективы развития заготовительного производства
- Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки трения деталей машин
- Упрочняющие технологии и покрытия
- Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве
- Ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления
- Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий
- Технический контроль и диагностика в машино- и приборостроении

- Экологические проблемы и их решения в современном производстве

В рамках семинара проводится практический семинар

"Оборудование и инструмент для камнедобычи и камнеобработки"

Тематика семинара

- Технология разработки месторождений природного камня
- Оборудование и инструмент для добычи и обработки камня
- Природный камень в архитектуре и интерьере
- Новости и проблемы мирового и отечественного рынков природного камня

По вопросам участия в мероприятиях обращаться по адресу:

04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2. АТМ Украины.

Тел./Факс +38-0440430-85-00

E-mail: atmu@ism.kiev.ua, kopeykina@voliacable.com,

atmu@meta.ua



Указатель статей, опубликованных в 2010 г.

- Указатель статей, опубликованных в 2009 г. № 1
Петрова Л.Г. К 100-летию со дня рождения Ю.М. Лахтина: история создания и становления научной школы металлостроения МАДИ № 4

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Блюменштейн В.Ю., Образцов Л.Н., Образцова И.И. Повышение контактной долговечности подшипников качения на основе учета технологической наследственности и применения смазочных материалов с наноструктурными алмазами № 10
Камышанченко Н.В., Кузьменко И.Н., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Неклюдов И.М., Волчок О.И. Температурная зависимость механических свойств титана марки ВТ1-0 № 7
Кремнёв Л.С., Виноградова Л.А. Быстрорежущие стали для металлорежущих инструментов с плазменными покрытиями № 6
Овсеев А.Н., Клауч Д.Н., Кушева М.Е., Овсеев Е.С. Качество поверхностного слоя деталей, упрочненных методами поверхностного пластического деформирования № 6
Овсеев А.Н., Клауч Д.Н. Современные проблемы, связанные с технологическими остаточными напряжениями № 6
Симонова Ю.Э., Ткаченко Ю.С. Состояние вопроса технологических методов ремонта и восстановления плоских пар трения металлорежущих станков (анализ состояния и перспективы развития) № 9
Ситников А.А., Алексеев Н.С., Бойко Е.А. Износ электрокорунда при микрорезания плазменного покрытия № 7

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Петренко К.П. Влияние истории нагружения на трансформацию программ нагружения в процессах механической обработки № 3
Гаврилова Т.М., Пегашкин В.Ф., Балдин Е.В., Якимов М.А. Оценка скорости деформации при ультразвуковом раскатывании № 11
Губанов В.Ф. Параметры шероховатости выглаженных поверхностей № 11
Губанов В.Ф. Отделочно-упрочняющая обработка деталей обкатывающим № 8
Гуров Р.В. Взаимосвязь режимов обработки и геометрических параметров инструмента с параметрами качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД № 8
Костенков С.А. Повышение эффективности упрочняющей и абразивной вибрационной обработки путем автоматизации № 10
Кречетов А.А., Мирошин И.В. Моделирование процессов обработки деталей резанием и поверхностным пластическим деформированием № 10
Крупняя Е.Ю., Лебедев В.А. Повышение качества поверхности деталей в процессе их виброотделки средами органического происхождения № 3
Непершин Р.И. Поверхностное пластическое деформирование скользящим инструментом № 6

- Отений Я.Н., Ольштынский Н.В., Ольштынский С.Н., Щеголев Н.Г. Особенности определения рациональных параметров деформирующих элементов и технологических режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании № 12
Попов М.Е. Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД № 7
Рахиянов Х.М., Семенова Ю.С. Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин № 10
Рахиянов Х.М., Семенова Ю.С. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании № 2
Сулов А.Г., Гуров Р.В. Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием № 3
Тамаркин М.А., Проскорякова Ю.А. Методика выбора рациональных режимов технологических процессов центробежной обработки № 11
Шин И.Г. Деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей колеблющимся индентором № 10
Шин И.Г. Интенсивность остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании деталей машин № 2
Щеголев Н.Г. Исследование сил деформирования, создаваемых инерционным рычажным раскатывающим устройством № 11

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Камышанченко Н.В., Гальцев А.В., Дручинина О.А., Неклюдов И.М. Влияние знакопеременного изгибового нагружения на изменение механических характеристик высококачистого никеля в зависимости от предварительной термообработки № 8

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Андреев А.А., Столбовой В.А., Шулаев В.М., Григорьев С.Н., Горбань В.Ф. Вакуумно-дуговое осаждение наноструктурных TiN покрытий с ионной имплантацией № 12
Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Поляков А.Н., Широкова Н.В. К вопросу снижения потерь при лазерной наплавке № 8
Блюменштейн В.Ю., Павлуша А.С., Логов А.Б., Земскова Е.П. Математическое моделирование влияния управляющих технологических факторов процесса МДО на толщину и коррозионную стойкость тонких покрытий № 5
Бровер А.В., Пустовойт В.Н. О локализованных напряжениях в лазерно-облученной поверхности металлических материалов № 1
Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А., Гордиенко П.С., Панин Е.С., Баринов Н.Н., Меглицкая Л.П. К вопросу о микроструктуре, фазовом и химическом составех продуктов эрозии при электроискровом легировании боридами переходных металлов № 3
Верхотуров А.Д., Николенко С.В. Классификация. Разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования № 2

- Гавриленко Т.П., Ульяницкий В.Ю. Значение рельефа поверхности в формировании покрытия при соударении нагретых частиц с подложкой..... № 12
- Гречихин Л.И., Иващенко С.А., Голушко В.М., Койда С.Г. Упрочнение конструкционных материалов наноразмерными многослойными покрытиями..... № 9
- Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В. Изготовление канавок на износостойкой диэлектрической поверхности с помощью широкого пучка быстрых атомов аргона..... № 6
- Давыдов В.М., Ледков Е.В., Химухин С.Н., Гиль А.В., Муромцева Е.В. Влияние нагрева электродов на изменение их массы при электроискровой обработке..... № 3
- Дзюба В.Л., Васецкая Л.А., Кляхина Н.А., Зема А.В. Особенности формирования и физические свойства защитных металлических пленок нитрида титана..... № 9
- Дударева Н.Ю. Влияние искрового упрочнения алюминиевых сплавов на износостойкость формируемых поверхностей..... № 3
- Духопельников Д.В., Марахтанов М.К., Мелик-Парсаданян А.К. Электрические параметры и массоперенос в вакуумно-дуговом разряде с монокристаллическим кремниевым катодом..... № 7
- Илюшечкин Е.В., Витальский Д.В., Абрамов А.Г. Методологический подход при моделировании процесса упрочнения посредством ионной имплантации..... № 7
- Кадырметов А.М., Станчев Д.И., Сухочев Г.А. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах..... № 7
- Каменева А.Л., Замалетдинов И.И., Калабина Е.В. Повышение коррозионной стойкости режущего инструмента в горно-добывающей промышленности..... № 5
- Ковалевская Ж.Г., Жуков А.П., Клименов В.А., Бутов В.Г., Зайцев К.В. Численное описание процесса кристаллизации газотермически напыленного материала на основу с разным микрорельефом..... № 11
- Крашенинников Д.А., Файншмидт Е.М., Астафьев Г.И., Поломошнов П.Ю. Оптимальное износостойкое покрытие прессового инструмента для горячей деформации титановых сплавов..... № 8
- Кудряшов А.Е., Еремеева Ж.В., Замулаева Е.И., Стрелец А.В., Левашов Е.А., Свиридова Т.А. Влияние вторичной электроискровой обработки углеродсодержащими материалами на свойства титановых сплавов..... № 5
- Кудряшов Е.А., Павлов Е.В., Яцун Е.И., Алтухов А.Ю., Луний Д.Ю. Применение композиционных инструментальных материалов при ремонте деталей машин..... № 9
- Курбанов Э.Д., Горин А.В., Горин Ю.В. Активация комбинированных структур на основе волокон в тлеющем разряде..... № 1
- Михальченков А.М., Ожегов Н.М., Будко С.И., Капошко Д.А. Сравнительный анализ упрочнения лемехов применением различных технологических приемов наплавки..... № 9
- Новиков А.С., Пайкин А.Г., Шулов В.А., Быщенко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Результаты длительных испытаний на технологическом двигателе РД33 лопаток компрессора ГТД из стали ЭП866Ш, облученных сильноточным импульсным электронным пучком..... № 9
- Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Девоино О.Г., Оковитый В.В., Кулак А.И. Исследование параметров напыления биокерамических плазменных покрытий на нанокристаллические подложки..... № 10
- Рошин М.Н., Алисин В.В., Владиславлев А.А., Петрова И.М. Оценка сопротивления усталости стали 30ХГСА после лазерной наплавки металлокерамического покрытия с ультратонкой упрочняющей фазой..... № 11
- Рубштейн А.П., Трахтенберг И.Ш., Ремнев Г.Е., Выходец В.Б., Куренных Т.Е. Изнашивание низкоуглеродистой стали, обработанной мощным ионным пучком, в потоке твердых частиц..... № 1
- Сафонов Е.Н., Дружинин И.С., Орлова Н.В. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия..... № 9
- Смыслов А.М., Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Измайлова Н.Ф. Опыт применения ионной имплантации поверхности лопаток газовых турбин из жаропрочных сплавов при их производстве и эксплуатации..... № 8
- Суслов А.Г., Семенцев А.М., Говоров И.В. Особенности модифицирования поверхностного слоя стальных деталей под воздействием лазерного излучения..... № 7
- Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Тулисов А.Н., Чихранов А.В. Исследование напряженного состояния и циклической трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента..... № 7
- Табаков В.П., Порохин С.С. Влияние покрытий на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента при отрезке заготовок из конструкционных сталей..... № 5
- Хромов В.Н., Кузнецов И.С. Исследования износостойких электроискровых покрытий с нанокристаллической и аморфной структурой..... № 12
- Чудина О.В., Брежнев А.А. Поверхностное легирование углеродистых сталей при лазерном нагреве..... № 4
- Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Демин С.Б. Микродуговое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов в растворах с мелкодисперсным корундом..... № 1
- Шгерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Злобин С.Б. Применение детонационного напыления для формирования градиентных покрытий керамика-металл..... № 11
- Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быщенко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка технологического процесса ремонта и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866Ш с применением сильноточных импульсных электронных пучков..... № 2
- Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быщенко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка технологического процесса электронно-лучевого ремонта и восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием NiCrAlY..... № 3

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Баранов А.Н., Гамаюнов И.Г., Юдин А.Н. Применение композиционных покрытий на основе хрома для уменьшения падения напряжений в подшпильнике алюминиевого электролизера..... № 8
- Белашова И.С., Шашков Д.П. Азотирование в условиях регулируемых процессов термогазоциклирования..... № 4
- Веселовский А.А., Емелюшин А.Н., Кадошиников В.И. Определение критической толщины диффузионного покрытия из карбидов ванадия на зубчатых колесах из высокопрочного чугуна..... № 12
- Герасимов С.А., Сергиевский Е.А., Симонов В.Н., Ампилогов А.Ю. Коэффициент скорости роста толщины покрытия при гетеродиффузии..... № 2
- Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Марфицын В.В. Поверхностное упрочнение деталей из серого чугуна..... № 5
- Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Марфицын В.В. Поверхностное упрочнение ферритно-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом хрома..... № 11
- Жуков А.А., Шапова Л.А. Статистическая оценка эксплуатационных свойств азотированного слоя..... № 2
- Кисель Ю.Е., Гурьянов Г.В., Кисель П.Е. К структурным изменениям электрохимических покрытий при высокотемпературном нагреве..... № 8
- Кочарян Е.В. Влияние химико-термической обработки на твердость электролитических остывших покрытий..... № 12
- Мухин В.С., Рамазанов К.Н., Ишмухаметов Д.З. Упрочнение поверхности сталей и титановых сплавов путем создания макронеоднородной структуры при азотировании в тлеющем разряде..... № 10

Петрова Л.Г. Разработка технологий поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента на основе научно-методологического комплекса инженерии поверхности металлических материалов.....	№ 12
Петрова Л.Г., Александров В.А., Шестопалова Л.П. Формирование наноструктурных дисперсно-упрочненных покрытий путем химико-термической обработки легированных сталей в разделенных атмосферах воздуха и аммиака...	№ 4
Петрова Л.Г., Александров В.А., Демин П.Е. Азотирование стали в парах электролита	№ 4
Погрелок И.Н., Федирко В.Н., Васылив Х.Б., Широков В.В., Самборский А.В. Влияние технологических параметров термодиффузионного насыщения из аморфного бора на микроструктуру и топографию поверхности титановых сплавов	№ 12
Росляков И.Н. Механизм и особенности образования диффузионного слоя при науглероживании с применением термоциклирования для стали 18ХГТ	№ 5

МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Белоцерковский М.А., Жорник В.И., Кукареко В.А., Камко А.И. Трибологическое модифицирование металлических покрытий в процессе приработки и эксплуатации в узлах трения	№ 5
Верещака А.С., Верещака А.А. Функциональные покрытия для режущего инструмента.....	№ 6
Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве.....	№ 6

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Астафьева Н.А. Пластическое деформирование режущих элементов сложной геометрии из быстрорежущих сталей ..	№ 1
Глебова М.А., Корнев А.Б., Глебов В.В. Эффективность защитной способности газотермических покрытий при высокотемпературной эксплуатации	№ 1
Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Валеева И.В., Прудников В.В. Иммерсионная ионная имплантация и азотирование в плазме тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов	№ 6
Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е., Годунов С.С., Кисель П.Е. Лазерная обработка износостойких композиционных электрохимических покрытий.....	№ 9
Конькова Т.Н., Миронов С.Ю., Корзников А.В. Криогенная деформация меди.....	№ 1
Кузнецов Ю.А., Митюрева Н.В. Шлифование деталей из алюминиевых сплавов, упрочненных микроугловым оксидированием	№ 2
Матлин М.М., Дудкина Н.Г., Болдов А.Н. Особенности пластического деформирования стальных деталей, упрочненных комбинированной обработкой ЭМО+ППД....	№ 8
Михальченков А.М., Комогорцев В.Ф., Тюрева А.А. Факторы, влияющие на повышение долговечности плужных лемехов при наплавочном армировании.....	№ 3

Мокрицкий Б.Я. Управление работоспособностью металлорежущего инструмента путем нанесения покрытий, механической упрочняющей обработки и контроля качества.....	№ 9
Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Пантелеенко А.Ф., Шевцов А.И., Бломенштейн В.Ю. Методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов	№ 10
Рамазанов К.Н., Будилов В.В., Вафин Р.К. Азотирование быстрорежущей стали Р6М5 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля	№ 5
Рахимьянов Х.М., Никитин Ю.В. Прогнозирование состояния поверхностного слоя при комбинированном поверхностном упрочнении деталей машин.....	№ 10
Сухочев Г.А., Кириллов О.Н., Небольсин Д.М., Смоляникова Е.Г., Кадырметов А.М. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой	№ 8
Табакон В.П., Смирнов М.Ю., Тулисов А.Н., Чихранов А.В. Методика расчета трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента	№ 3
Федосов В.В., Федосова А.В. Межкритериальная оценка эффективности газопламенного напыления.....	№ 1
Чудина О.В., Александров В.А., Барабанов С.И., Брежнев А.А. Формирование диффузионного покрытия на поверхности стали путем лазерного и термодиффузионного легирования	№ 4
Чудина О.В., Александров В.А., Брежнев А.А. Комбинированное поверхностное упрочнение углеродистых сталей лазерным легированием с последующим азотированием ...	№ 4

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Кадырметов А.М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров	№ 11
--	------

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Зайдес С.А., Рудых Н.В. Разработка программного комплекса для расчета деформированного состояния изделий микроструктурным методом	№ 5
---	-----

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Белобородов В.Н., Ли А.Н., Емелин В.И., Долматов Г.Н. Технология нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов	№ 2
--	-----

НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Измерения параметров и характеристик лазерного излучения. ГОСТ 24453-80	№ 4
Покрытия полимерные защитные, снимаемые для радиационно-защитных камер и боксов. Требования к технологическому процессу. ГОСТ Р 53370-2009	№ 5

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

E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.

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

Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.*

Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 08.11.10 г. Подписано в печать 13.01.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,49. Заказ 12. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15