ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 7 (43)
ИЮЛЬ
2008

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р физ.-мат. наук,
заслуженный деятель науки РФ
В.Н. НЕВОЛИН

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

Заместители главного редактора:
И.Н. ЖЕСТКОВА
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК
д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.Ю. ЗАМЯТИН
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Ю.В. ПАНФИЛОВ
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:
И.В. СИНЦОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Отв. за подготовку номера:
д-р техн. наук А.В. КИРИЧЕК

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.: (495) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (495) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Лебедев В.А., Чумак И.В. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД . . . 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Силантьев С.А. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой . . . 9

Камышанченко Н.В., Гальцев А.В., Неклюдов И.М. Сравнительные характеристики эффекта Баушингера в зависимости от исходного состояния структуры никеля . . . 16

Бабичев А.П., Максимов Д.В., Пастухов Ф.А., Мотренко П.Д., Чучукалов А.П. Поэлементная отделочно-зачистная и упрочняющая вибрационная обработка крупногабаритных деталей пространственной ориентации . . . 22

Катунин А.А. Анализ способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей . . . 24

МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Анкудимов П.Ю., Анкудимов Ю.П., Чаава М.М. Повышение антикоррозионных свойств деталей из спеченных материалов нанесением покрытий из металлических порошков методом вибрационной обработки . . . 27

Копылов Ю.Р. Трехмерная оценка формирования качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении . . . 32

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Люлько А.В., Гриценко В.В., Чан Мань Тунг, Люлько В.Г. Исследование поровой структуры и свойств упрочненной матрицы композиционных материалов на основе железных порошков . . . 34

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Исаев А.Н., Любимов Ю.В. Применение методов ППД для формирования составных цилиндров со свернутыми из пластин втулками . . . 39

Бабичев А.П., Месхи Б.Ч., Медведев М.В., Кайнбанда В. Снижение шумовых характеристик и улучшение экологических показателей виброударной обработки крупногабаритных деталей . . . 46

Афонин А.Н. Перспективы производства резьбонакатного оборудования и инструмента в Российской Федерации . . . 50

Шамшура С.А. Виброакустические характеристики оборудования для виброударного упрочнения труб лонжеронов вертолетов . . . 54

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

© Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2008

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 7 (43)
July
2008

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr of Phys. Math. Sci.,
The honoured worker
of a science of the RF
V.N. NEVOLIN
Chair of Editorial Council
Dr of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI
Editorial Assistants:
I.N. ZHESTKOVA
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY
Chairman Assistants:
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA
Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
S.N. GRIGORIEV
V.Yu. ZAMYATIN
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
Yu.V. PANFILOV
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.A. SHULOV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS
Edition:
I.V. SINTSOVA
T.V. PARAYSKAYA
Responsible for preparation of number:
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK

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.: (495) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (495) 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

Lebedev V.A., Chumak I.V. The kinetic model of details' surface strengthening by vibroshock methods of surface plastic deformation (SPD) 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Silantiev S.A. The increase of contact endurance of machine elements after heterogeneous deformation strengthening by static impulse processing 9

Kamyshanchenko N.V., Galtsev A.V., Neklyudov I.M. Comparison characteristics of Bauschinger's effect depending on the initial state of the nickel structure 16

Babichev A.P., Maksimov D.V., Pastukhov P. A., Motrenko P.D., Chuchukalov A.P. Consecutive surface-finishing and strengthening vibration processing of large-sized details of spatial orientation 22

Katunin A.A. The analysis of methods of planetarium rolling of incomplete spherical surfaces 24

METHODS OF DEPOSITION OF FUNCTIONAL COATINGS

Ankudimov P.Yu., Ankudimov Yu.P., Chaava M.M. Improving of antirust properties of powder metallurgy components by surface metal powder plating using vibrating treatment method 27

Kopylov U.R. Three-dimentional estimation of formation of quality of a superficial layer at vibroimpact strengthening 32

QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

Lyulko A.V., Gritsenko V.V., Tran Manh Tung, Lyulko V.G. Research of porosity structures and properties as characteristics of strengthened matrix composite materials on the iron powders basis 34

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Isaev A.N., Lubimov Yu.V. Application of surface plastic deformation methods for forming of compound cylinders with bushing formed from rolled up plates 39

Babichev A.P., Meskhi B.Ch., Medvedev M.V., Kayibanda V. Noise characteristics lowering and improvement of the ecological figures of the vibration-proof processing of large-scale parts 46

Afonin A.N. The future trends of production of thread-rolling equipment and tool in RF 50

Shamshura S.A. Vibroacoustic characteristics of equipment for vibroimpact strengthening of longeron pipes of helicopters 54

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

© **"Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2008**

В.А. Лебедев, И.В. Чумак *(Азовский технологический институт, филиал Донского ГТУ)*

Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД

На основе структурно-энергетической интерпретации процесса предложена кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей при их обработке виброударными методами поверхностного пластического деформирования (ППД), отражающая энергетическую сущность физических явлений, обусловливающих упрочнение поверхностного слоя, и позволяющая оценить продолжительность обработки, при которой обеспечивается наибольший эффект упрочняющей обработки с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей.

The kinetic model of details' surface strengthening by vibroshock processing in the time of surface plastic deformation (SPD) methods on the base of structure energetic interpretation has been offered. This model reflects the energetic essence of physical phenomenon leading to the strengthening of the surface lager, the evaluation of the duration processing to provide the best effect of strengthening has been got.

В работе [1] показано, что процесс поверхностного пластического деформирования, как и любой процесс деформирования, является кинетическим и необратимым независимо от физико-химической природы материала, его структуры и условий нагружения. Это позволяет для моделирования энергетических изменений, протекающих в деформируемых объемах *поверхностного слоя* (ПС) в процессе ППД, виброударными методами вполне объективно применить кинетические уравнения повреждаемости и разрушения твердых тел, предложенные в термодинамической теории прочности и разрушения твердых тел [2].

Так, кинетическое уравнение повреждаемости деформируемого элемента твердого тела, описывающее кинетику изменения в деформируемых объемах потенциальной составляющей внутренней энергии E, имеет вид:

$$\dot{E} = A_{\Sigma}\,\mathrm{sh}\left(\frac{\alpha\sigma_i^2 - \nu E}{2RT}\right), \qquad (1)$$

где $A_{\Sigma} = \dfrac{2RT}{N_0 h}\sum_{1}^{n} U_i'(\sigma_0, T)\exp\left[-\dfrac{U_i'(\sigma_0, T)}{RT}\right]$;

N_0 – число Авогадро;

n – число независимых (по механизму протекания) элементарных дефектов (микроскопических актов перегруппировок структурных частиц материала);

$U_i'(\sigma_0, T)$ – энергия активации образования i дефектов, отнесенная к одному молю вещества,

$$U_i'(\sigma_0, T) = U_i'(T) \pm \beta\sigma_0^2;$$

$U_i'(T)$ – свободная энергия активации процесса при температуре T и $\sigma_0 = 0$;

$\alpha = \dfrac{k_\sigma^2}{2G}$;

$\beta = \dfrac{k_\sigma^2}{2k}$;

k_σ – коэффициент перенапряжения на межатомных связях;

R – универсальная постоянная;

h – постоянная Планка;

k – модуль объемной упругости;

G – модуль сдвига;

σ_i – интенсивность нормальных напряжений;

ν – коэффициент неравномерности распределения скрытой энергии.

Из уравнения (1) следует, что интенсивность повреждаемости $\dot{E}$ ПС при ППД зависит от степени повреждения элемента в данный момент, характеризуемый плотностью потенциальной составляющей внутренней энергии E. С увеличением E после каждого цикла нагружения интенсивность повреждаемости $\dot{E}$ уменьшается.

Необратимый процесс повреждения деформируемого элемента ПС носит затухающий характер. При приложении внешней силовой нагрузки $\sigma_i > 0$ к элементу поверхностного слоя, находящегося в термодинамическом равновесном состоянии ($E = E_0$), в на-

чальный период процесса интенсивность повреждения максимальна. По мере возрастания плотности скрытой энергии в поверхностном слое интенсивность повреждаемости уменьшается и асимптотически стремится к нулю. В этом случае плотность скрытой энергии E достигает значения σ_i, устанавливается новое квазиравновесное напряженное состояние, соответствующее внешним условиям деформирования, характеризующихся параметрами σ_0, σ_i и T. Такой характер явлений, протекающих в ПС под действием приложенных внешних сил, установлен в фундаментальных работах, посвященных исследованиям процесса ППД [3, 4].

Из уравнения (1) также следует, что необратимые процессы зарождения и накопления различного рода дефектов и повреждений в деформируемом ПС могут протекать только в том случае, если градиент напряжений, характеризующий внешнее силовое поле $\sigma_i > E$. Если же $\sigma_i < E$, интенсивность процесса будет равна нулю и элемент ПС будет деформироваться обратимо (упруго), что соответствует основным законам механики материалов и подтверждается экспериментальными данными.

Интенсивность деформационного упрочнения (повреждаемости) элемента твердого тела кинетического уравнения (1) в наиболее общем случае зависит от n независимых (по механизму протекания) микроскопических актов перегруппировок структурных частиц материала, что позволяет судить о спектре энергии активизации процесса ППД. Однако, как показано в работе [5], вклад различных механизмов в суммарное деформационное упрочнение зависит от скорости протекания микроскопического элементарного акта, зависящего в основном от свободной энергии активации U'_{0i}. При этом решающий вклад в суммарное деформационное упрочнение вносит тот механизм, энергия активации которого является наименьшей. Это позволяет микроскопическими механизмами, имеющими более высокие значения энергии активации, пренебречь, а в выражении (1) принять $n = 1$.

В качестве основополагающей дислокационной модели элементарного акта процесса ППД в большинстве экспериментальных и теоретических работ, посвященных объяснению этого механизма упрочнения, рассматривается вакансионная модель, что позволяет рекомендовать ее для определения свободной энергии активации микроскопических актов атомно-молекулярных структурных перегруппировок при деформационном упрочнении поверхностного слоя виброударными методами ППД.

Одним из основополагающих условий, определяющим процесс деформационного упрочнения поверхностного слоя при ППД и вытекающим из уравнения (1), является обеспечение в результате воздействия внешних сил требуемой энергии активации элементарных дефектов. Не раскрывая основные методы по оценке активационных процессов, наиболее предпочтительными с позиции энергетического подхода представляются исследования термоактивированных процессов в твердых телах и сплавах, выполненные К.А. Осиповым [6]. На основе развитых представлений о предельных и переменных значениях энергии активации различных процессов, происходящих в металле под действием напряжения и температуры, им был предложен универсальный энергетический параметр в виде

$$q_0 = -\left(\int_0^{T_s} C_p dT - T_s \int_0^{T_s} \frac{C_p}{T} dT \right), \qquad (2)$$

где C_p – удельная теплоемкость металла;

T_s – температура плавления.

Величина q_0 равна абсолютному значению изменения термодинамического потенциала (свободной энергии), которое происходит при нагреве металла от нуля градусов по Кельвину до температуры плавления, т.е. характеризуется работой, которую необходимо затратить на устойчивую при температуре нуля градусов систему, чтобы перевести ее в состояние, подобное состоянию при температуре плавления.

Параметр q_0 связан с энергией активации различных процессов в твердых металлах соотношением

$$U'(T) = q_0 m, \qquad (3)$$

где m – количество атомов в активируемом комплексе, по данным [6] $m = 5$ для интервала температур 500...800 К и $m = 4$ при 250...375 К.

Для получения наиболее приемлемой для расчетов кинетической модели, отражающей энергетические особенности процесса виброударного ППД, кинетическое уравнение повреждаемости твердого тела (1) рассмотрим в виде

$$\dot{E}(n) = A_1 \operatorname{sh}[b - a\Delta E(n)], \qquad (4)$$

$\dot{E}(n)$ – интенсивность повреждаемости элемента поверхностного слоя в процессе ППД;

$$\dot{E}(n) = \frac{dE}{dn};$$

$\Delta E(n)$ – степень повреждаемости элемента поверхностного слоя в зависимости от числа циклов силового воздействия i;

$$A_1 = \frac{2RT}{hN_0}(q_0 m - \beta\sigma_0^2)\exp\left[-\frac{q_0 m - \beta\sigma_0^2}{RT}\right];$$

$$b = a\left(\frac{\alpha}{\nu}\sigma_i^2 - E_0\right);$$

$$a = \frac{\nu}{2RT}.$$

Учитывая, что процессы пластической деформации при обработке виброударными методами ППД характеризуются высокой интенсивностью напряжений, можно сделать вывод – значение аргумента под гиперболическим синусом в уравнении (4) $x = b - a\Delta E(t)$ будет принимать значения больше 1,6. В этом случае гиперболический синус можно с достаточной степенью точности заменить экспонентой. Тогда уравнение, описывающее кинетику повреждаемости поверхностного слоя при обработке виброударными методами ППД, можно записать следующим образом:

$$\dot{E}(t) = \frac{A_1}{2}\exp\left[b - a\Delta E_c(t)\right]. \qquad (5)$$

Согласно энергетической интерпретации процесса ППД [1] часть работы пластической деформации $A_{пл}$ (10...30 %) задерживается в пластически деформируемом ПС материала в виде скрытой энергии различного рода дефектов и повреждений, повышая его внутреннюю энергию на величину E. Преобладающая часть работы пластической деформации (70...90 %) превращается в тепловую энергию q и рассеивается в окружающую среду за счет теплообмена. В результате теплообмена происходит релаксация пластически деформированного ПС, приводящая к уничтожению элементарных дефектов, зарождающихся в деформируемом элементе ПС в процессе ППД. Значительная часть этих дефектов уничтожается в связи с их миграцией (движением), взаимодействия и аннигиляции с дефектами противоположных знаков или поглощается стоками дефектов, обусловленными тепловым эффектом.

Мощность теплового эффекта пластической деформации в термодинамической теории прочности и разрушения твердых тел [2] описывается дифференциальным уравнением вида

$$\dot{q} = B_\Sigma \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\sigma_i^2 + \nu E}{2RT}\right), \qquad (6)$$

где $B_\Sigma = \frac{2RT}{hN_0}\sum_1^n U_i'(\sigma_0, T)\exp\left[-\frac{U_i''(\sigma_0, T)}{RT}\right]$,

$U_i''(\sigma_0, T)$ – энергия активации самодиффузии дефектов i-го типа, по данным [6] соотношение между энергией активации обращения дефектов (вакансий) $U'(\sigma_0, T)$ и энергией активации самодиффузии $U''(\sigma_0, T)$ примерно составляет 1/3, т.е. $U''(\sigma_0, T) = \frac{1}{3}U'(\sigma_0, T)$.

В соответствии с уравнением (6) мощность теплового эффекта при ППД зависит от плотности накопленной в деформируемых объемах скрытой энергии E. Чем больше плотность скрытой энергии, тем выше мощность теплового эффекта $\dot{q}$ и наоборот. Если в процессе пластической деформации структурное состояние материала, а следовательно, и плотность скрытой энергии остаются неизменными, то и мощность теплового эффекта пластической деформации будет постоянной.

Отмеченные закономерности подтверждаются экспериментальными исследованиями как процессов объемной пластической деформации, так и процессов ППД, что свидетельствует о возможности использования уравнения (6) для разработки кинетической модели упрочнения ПС виброударными методами ППД.

По аналогии с аналитическим описанием кинетики повреждаемости поверхностного слоя при обработке виброударными методами ППД воспользуемся кинетическим уравнением мощности теплового эффекта (6), преобразовав его к виду

$$\dot{q}(t) = B_1 \operatorname{sh}[b' + a\Delta E_c(t)], \qquad (7)$$

где $\dot{q}(t) = \frac{dq}{dt}$ – интенсивность теплового эффекта процесса ППД;

$$B_1 = \frac{2RT}{hN_0}(q_0 m - \beta\sigma_0^2)\exp\left[-\frac{q_0 m - \beta\sigma_0^2}{3RT}\right];$$

$$b' = a\left(\frac{\alpha\sigma_i^2}{\nu} + E_0\right).$$

Процесс ППД при обработке виброударными методами сопровождается высокой интенсивностью σ_i напряжений, тогда в зоне силового нагружения аргумент под гиперболическим синусом в уравнении (7) так же, как и в уравнении (4), будет принимать значения, бóльшие 1,6. Следовательно, кинетическое уравнение интенсивности теплового эффекта, сопровождающего процесс виброударного ППД, можно записать следующим образом:

$$\dot{q}(t) = \frac{B_1}{2}\exp[b' + a\Delta E(t)]. \qquad (8)$$

Как отмечалось ранее, в результате теплового обмена происходит релаксация пластически деформированного поверхностного слоя, приводящая к уничтожению элементарных дефектов, зарождающихся

в деформируемом элементе ПС в процессе ППД. Таким образом, можно сделать вывод, что по физической сущности уравнение (8) можно рассматривать как кинетическое уравнение динамического возврата, связанное с разупрочнением пластически деформированного поверхностного слоя, в ходе которого происходит высвобождение скрытой энергии E, накопленной в процессе виброударного упрочнения ППД.

Предпосылками к такому выводу являются исследования о влиянии внешних напряжений и пластических деформаций на кинетику диффузии и самодиффузии в некоторых металлах и сплавах [2], из которых следует, что между интенсивностью теплового эффекта $\dot{q}(t)$ и интенсивностью высвобождения скрытой энергии $\dot{E}'$ существует однозначная взаимная связь.

Предположим, что эта связь описывается соотношением $\dot{E}' = -\dot{q}$. Тогда кинетическое уравнение динамического возврата при ППД можно представить в виде

$$\dot{E}'(t) = -\frac{B_1}{2}\exp\left[b' + a\Delta E(t)\right]. \qquad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что интенсивность динамического возврата, как и интенсивность теплового эффекта, определяется интенсивностью напряжений, обусловленных силовым воздействием внешних сил и как следствие энергетическим состоянием поверхностного слоя, сформированного в процессе ППД.

При упрочняющей обработке виброударными методами ППД процессы динамического упрочнения и динамического возврата в поверхностном слое согласно энергетической интерпретации протекают во времени одновременно, постоянно конкурируя друг с другом. Поэтому установить влияние в конкретный момент или промежуток времени практически невозможно. Однако после прекращения силового воздействия в упрочненном ППД поверхностном слое начинают протекать синергетические процессы, связанные с высвобождением накопленной энергии, обусловленные тепловым эффектом ППД, релаксацией объемно-напряженного состояния поверхностного слоя.

В связи с этим последеформационные процессы, протекающие в упрочненном виброударными методами ППД поверхностном слое, можно рассматривать как процессы статического (естественного) возврата при $\sigma_0 = \sigma_i = 0$.

Если в уравнении (9) положить $\sigma_0 = \sigma_i = 0$, получим уравнение (10) высвобождения накопленной энергии (статического возврата) в упрочненном ПС после его ППД, из которого следует, что процесс статического возврата не зависит от цикловой нагрузки, а происходит во времени:

$$\dot{E}'(t) = -\frac{B_0}{2}\exp\left[aE(t)\right], \qquad (10)$$

где $B_0 = \frac{2RT}{N_0} q_0 m \exp\left[-\frac{q_0 m}{3RT}\right]$.

При упрочняющей обработке виброударными методами ППД формируется поверхностный слой, имеющий высокую степень упрочнения. Что касается температуры нагрева поверхностного слоя после ППД, то по сравнению с высокими температурными градиентами, возникающими в локальных зонах контакта обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью в момент соударения, она во много раз ниже. Этот экспериментально установленный факт [4, 7] является одним из аргументов в пользу того, что кинетически как динамический, так и статический возвраты происходят по экспоненциальной зависимости.

Решение уравнения (10) при $t = 0$ и $E = E_0$ позволяет представить его в виде

$$\exp(aE(t)) = \frac{d}{B_0 t/2 + M}, \qquad (11)$$

где $d = \frac{1}{a} = \frac{2RT}{\nu}$,

$M = d\exp(-aE_0)$.

Подставив (11) в (10), получим следующее кинетическое уравнение высвобождаемой, накопленной в процессе ППД, энергии:

$$\dot{E}' = -\frac{d}{t + t_0},$$

где $t_0 = \frac{2M}{B_0}$.

Пренебрегая t_0 ввиду малости, получим кинетическую модель динамического возврата накапливаемой в деформируемом ПС элементе в процессе ППД внутренней энергии:

$$\dot{E}' = -\frac{d}{t} = -\frac{2RT}{\nu t}.$$

Согласно энергетической интерпретации процесса ППД [1] пластическую деформацию условно выделенного элемента поверхностного слоя λ следует рассматривать как сумму двух составляющих, связанных соответственно с деформационным упрочнением $\lambda_д$ и динамическим возвратом $\lambda_в$. В соответствии с этим интенсивность пластической деформации для эле-

мента поверхностного слоя, находящегося в условиях динамического силового нагружения, имеет вид:

$$\dot{\lambda}_p = \frac{1}{\sigma_i}(\dot{E} + \dot{q}). \qquad (12)$$

На основе установленных ранее кинетических уравнений повреждаемости (5) и мощности теплового эффекта (7), описывающих кинетику деформационного упрочнения и динамического возврата, уравнение (12) можно представить в виде

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{RT}{\sigma_i h N_0}(q_0 m - \beta\sigma_0^2)\exp\left[\frac{\beta\sigma_0^2 - q_0 m}{3RT} + b' + a\Delta E(t)\right] \times$$
$$\times\left[\exp\left(\frac{2(\beta\sigma_0^2 - q_0 m)}{3RT} + b - 2a\Delta E(t) - b'\right) + 1\right].$$

Так как в процессе виброударного ППД формируется качественно новый по физико-механическим характеристикам поверхностный слой, обладающий достаточно высоким уровнем энергонасыщенности, по сравнению с исходной поверхностью, то значением E_0 можно пренебречь, так как $E_0 \ll E$. Это позволяет считать $b \approx b' \approx b_0 = \frac{a\alpha\sigma_i^2}{\nu}$, а кинетическое уравнение ППД записать в виде

$$\dot{\lambda}(t) = C_0 \exp\left[-\frac{U(\sigma_0, T)}{3RT} + b_0 + a\Delta E(t)\right] \times$$
$$\times\left[\exp\left[-\frac{2U(\sigma_0, T)}{3RT} - 2a\Delta E(t)\right] + 1\right], \qquad (13)$$

где $C_0 = \frac{RT}{\sigma_i h N_0} U(\sigma_0, T)$.

Полученное кинетическое уравнение (13) в аналитическом виде отражает двойственную природу процесса ППД виброударными методами, заключающегося в конкуренции двух групп одновременно протекающих в материалах противоположных и взаимосвязанных микроскопических процессов: деформационного упрочнения и динамического возврата.

Из кинетического уравнения (13) следует:

1. Определяющим фактором, контролирующим процесс виброударного ППД поверхностного слоя и, как следствие, интенсивность его упрочнения, является энергия активации элементарных актов, зависящая от температуры в зоне контакта и напряженного состояния элемента тела.

2. Существенное влияние на интенсивность ППД оказывают интенсивность напряжений, обусловленная силовыми факторами воздействия σ_{i0}, и энергетическое состояние поверхностного слоя.

Основываясь на кинетической модели упрощений ПС, рассмотрим технологическую задачу, связанную с оценкой продолжительности и, как следствие, производительностью упрочняющей обработки виброударными методами ППД.

С этой целью сначала решим задачу о предельном упрочнении элемента поверхностного слоя (условно выделенного единичного столбика), пластически деформируемого в условиях многократного ударно-импульсного осевого силового воздействия внешних сил, которые обеспечивают при каждом цикле нагружения $\sigma_0 = \text{const}$, $\sigma_i = \text{const}$, $T = \text{const}$. Для решения этой задачи воспользуемся кинетическим уравнением повреждаемости (5), поскольку оно характеризует продолжительность накопления дефектов в поверхностном слое во времени t, представляющую собой сумму продолжительностей единичных локальных (точечных) контактных взаимодействий обрабатывающих тел t_i с деформируемым элементом поверхностного слоя

$$t^* = \sum t_i,$$

где i – порядковый номер циклов нагружения элемента поверхностного слоя.

Для рассмотрения поставленной задачи в соответствии со структурно-энергетической интерпретацией процесса ППД [1] запишем условие предельной повреждаемости:

$$E_0 + \int_0^{t^*} E(t)\mathrm{d}t = E^*. \qquad (14)$$

Кинетическое уравнение повреждаемости преобразуем к виду

$$\dot{E} = \frac{A}{2}\exp\left(\frac{2\sigma_i^2 - \nu E}{2RT}\right). \qquad (15)$$

Тогда, проинтегрировав уравнение (15), находим

$$\frac{2RT}{\nu}\exp\left(-\frac{2\sigma_i^2 - \nu E_c}{2RT}\right) = \frac{A_1}{2}t + C. \qquad (16)$$

Учитывая начальное условие при $t = 0$, $E = E_0$, после преобразований получим уравнение для определения E:

$$E = \frac{\alpha\sigma_i^2}{\nu} + \frac{2RT}{\nu}\ln\left(\frac{A_1\nu}{4RT}t + \exp\left(\frac{\nu E_0 - \alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\right). \qquad (17)$$

Совместное решение уравнений (15) и (17) приводит к выражению для определения интенсивности изменения плотности скрытой энергии в элементе поверхностного слоя в функции от времени его деформирования t:

$$\dot{E} = \frac{A_1}{2}\left[\frac{A_1\nu}{4RT}t + \exp\left(\frac{\nu E_0 - \alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\right]^{-1}. \qquad (18)$$

Сравнительный анализ числа циклов силового нагружения элемента ПС при ППД

Материал	Твердость HB	Диаметр обрабатывающих тел, мм	Число циклов нагружения	
			экспериментальное $i^*_э$	расчетное $i^*_р$
Ст3	112	10,00	14	15
		6,34	13	
		2,32	13	
12ХН4ВА	340	10,00	6	8
		8,00	9	
		4,00	10	
35ХМ	207	10,00	11	11
		7,92	12	

Вычислив на основе (18) значение интеграла, условие предельной повреждаемости (14) представим в виде

$$\frac{2RT}{\nu}\left[\ln\left(\frac{A_1\nu t^*}{4RT}+\exp\left(\frac{\nu E_0-\alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\right)-\right.$$
$$\left.-\ln\exp\left(\frac{\nu E_0-\alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\right]=E^*-E. \quad (19)$$

Условие (19) позволяет определить предельно допустимую продолжительность внешнего силового ударно-импульсного воздействия на элемент поверхностного слоя, при котором обеспечивается наибольший эффект упрочнения:

$$i^*=\frac{4RT}{A_1\nu}\exp\left(\frac{\nu E_0-\alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\left(\exp\left(\frac{\nu(E^*-E_0)}{2RT}\right)-1\right). \quad (20)$$

Оценив среднюю продолжительность единичного цикла ударно-импульсного воздействия на элемент поверхностного слоя $t_{ср}$ в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и энергетических возможностей обрабатывающей среды, по предложенной в работе [7] методике получим выражение, позволяющее обосновать предельно допустимое число циклов ударно-импульсного воздействия, которое необходимо подвести к локальному единичному объему поверхностного слоя с целью обеспечить наибольший эффект упрочнения детали в процессе ППД,

$$i^*=\frac{4RT}{A_1\nu t_{ср}}\exp\left(\frac{\nu E_0-\alpha\sigma_i^2}{2RT}\right)\left(\exp\left(\frac{\nu(E^*-E_0)}{2RT}\right)-1\right). \quad (21)$$

В таблице дан сравнительный анализ предельного числа циклов ударно-импульсного силового нагружения элемента ПС, полученных в результате расчета по вышеустановленной формуле с результатами экспериментальных исследований, проведенных в работе [3] по установлению закономерности роста пластического отпечатка в зависимости от количества соударений сферического индентора с твердым телом. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что число циклов внешнего силового воздействия не зависит от размеров обрабатывающих тел, а определяется главным образом энергетическими возможностями метода ППД.

В заключение следует подчеркнуть, что упрочняющий эффект при обработке деталей виброударными методами ППД, обусловливающий повышение эксплуатационных свойств деталей, будет достигнут в том случае, когда при выбранных условиях обработки каждая точка поверхности, намеченная для упрочняющей обработки, будет подвергнута ударно-импульсному силовому воздействию с предельно допустимым числом циклов нагружения i^*.

Так, при обработке виброударными методами ППД соответствующий эффект обеспечивается при сплошном i^*-кратном покрытии поверхности следами ударов (пластическими отпечатками), представляющими собой результат взаимодействия обрабатывающих тел энергонесущей среды с обрабатываемой поверхностью.

Значение предельной кратности заполнения поверхности следами ударов позволяет оценить продолжительность упрочняющей обработки виброударными методами ППД, используя следующую обобщенную зависимость, предложенную в работе [1]

$$\bar{\tau}=\frac{i^*}{Pf},$$

где P – вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности пластически деформируется за один энергоимпульс, сообщаемый энергонесущей среде;

f – частота энергоимпульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедев В.А.** Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2006. 183 с.
2. **Федоров В.В.** Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во ФАН, 1979. 168 с.
3. **Кудрявцев И.В.** Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа. М.: Машгиз, 1965. 264 с.
4. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. Ростов н/Д: изд. центр ДГТУ, 2003. 192 с.
5. **Иванова В.С.** Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963. 272 с.
6. **Осипов К.А.** Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах. М.: АН СССР, 1962. 129 с.
7. **Петросов В.В.** Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 166 с.

А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев *(ОрелГТУ)*

Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой

Предложен новый способ повышения контактной выносливости деталей машин – статико-импульсная обработка, при которой создается наклепанный поверхностный слой с высокой твердостью на большой глубине. Важной особенностью статико-импульсной обработки является возможность получения различной равномерности упрочненного поверхностного слоя. Проведены исследования влияния параметров упрочненного поверхностного слоя, полученного статико-импульсной обработкой на контактную выносливость, разработана методика исследований. В результате впервые получены рекомендации по равномерности деформационного упрочнения поверхностного слоя, способствующей повышению контактной выносливости деталей машин.

The new way of increasing of contact endurance of machine elements – is static-impulse processing which creates the riveted superficial layer with high hardness of the high depth is offered. The important feature of static-impulse processing is the opportunity of receiving of the various uniformity of the strengthened superficial layer. The researches of influence of parameters of the strengthened superficial layer received by static-impulse processing on the contact endurance are carried out, the technique of researches is developed. For the first time as a result, the recommendations on the uniformity of the deformation strengthening of the superficial layer, promoting the increase contact endurance of the machine elements have been received.

Долговечность деталей машин обычно определяется состоянием их поверхностного слоя. Для зубчатых колес, подшипников качения, рельс и рельсовых колес, прокатных валков, толкателей кулачков, бойков, элементов червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, направляющих, шлицевых соединений с телами качения, обгонных роликовых муфт и других деталей контактная выносливость поверхностного слоя является одним из важных эксплуатационных свойств. В результате действия на поверхность таких деталей локальных циклических контактных нагрузок в поверхностном слое зарождаются микротрещины, которые в дальнейшем приводят к отслоению частиц металла и образованию на поверхности ямок (выкрашиваний, лунок). При достижении определенных размеров выкрашиваний и их количества дальнейшая эксплуатация детали становится невозможной.

Процесс изнашивания фрикционного контакта (по И.В. Крагельскому) рассматривается как непрерывное разрушение и восстановление микрообъемов вещества в тонком пограничном слое, толщина которого растет с увеличением нагрузки на трибосопряжение. Образование фрагментов износа происходит через многократное число взаимодействий, т.е. процесс разрушения носит преимущественно усталостный характер. Роль подповерхностного слоя заключается в перераспределении локальных, действующих со стороны пограничного слоя, нагрузок на нижележащие слои материала, и диссипации генерируемой в поверхностном слое энергии знакопеременных нагрузок.

Для повышения контактной выносливости используют различные способы упрочнения: термообработка, химико-термическая обработка, нанесение покрытий, *поверхностное пластическое деформирование* (ППД).

Весьма распространенной ошибкой при выборе технологии упрочнения деталей, работающих в условиях контактной выносливости, является пренебрежение толщиной и равномерностью упрочнения поверхностного слоя, градиентом изменения микротвердости и технологических остаточных напряжений по толщине слоя. Несущая способность поверхностей, имеющих одинаковые высотные характеристики шероховатости, поверхностную и объемную твердость, но обработанных разными методами, различна. Например, нанесение твердых тонких покрытий на мягкую неупрочненную основу часто приводит к растрескиванию покрытия в процессе эксплуатации в результате деформации основы под нагрузкой.

Увеличение толщины цементованного слоя от 0,5 до 1,8 мм сопровождается ростом контактной выносливости в 2,7 раза. Однако дальнейшее увеличение глубины цементации сопровождается снижением контактной выносливости вследствие пересыщения поверхности углеродом. Видимо, поэтому при одинаковой твердости более высокую контактную выносливость имеет сталь, закаленная ТВЧ, а не цементованная сталь вследствие большей толщины упрочненного слоя. Кроме того, стали пониженной прокаливаемости после закалки ТВЧ и низкого отпуска имеют более выгодное соотношение твердости и ударной вязкости в сравнении с цементованными сталями.

Поверхностно упрочненные сопрягаемые детали подвержены не только поверхностным, но и глубинным контактным разрушениям. Они возникают независимо, так как обусловлены различными факторами. Наиболее опасны глубинные контактные разрушения, имеющие прогрессирующий характер. Причина описанного явления состоит в том, что в подавляющем большинстве случаев поверхностный слой деталей работает в условиях сложного напряженного состояния, формирующегося в результате действия не только сил трения.

Для обеспечения высокой контактной выносливости деталей машин необходимо технологически обеспечить не только низкую шероховатость и высокий уровень поверхностной твердости, но и необходимую толщину упрочненного слоя (1,5...2 мм и более), достаточную, чтобы исключить его деформацию и продавливание под влиянием циклической контактной нагрузки [1, 2].

Одним из перспективных направлений повышения контактной выносливости деталей машин является создание упрочненного поверхностного слоя с неравномерно упрочненной (гетерогенной) структурой, т.е. когда в результате упрочнения в поверхностном слое детали формируются чередующиеся участки высокой и низкой твердости. Преимуществом материалов с гетерогенной структурой при действии на них циклических контактных нагрузок является торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. Создание гетерогенной структуры удавалось лишь методами термической [3–5], химико-термической обработки [6, 7] и посредством нанесения покрытий [8]. Деформационное упрочнение для формирования гетерогенной структуры не применяли, поэтому отсутствовали исследования равномерности упрочнения при ППД. В значительной степени это связано с тем, что чередующиеся менее и более твердые наклепанные участки с достаточной точностью могут быть созданы, например, обкатыванием, но только на глубине не более 1,5...3 мм. Получение более глубокого упрочненного слоя поверхностным пластическим деформированием связано с высокими энергетическими затратами и усложнением технологической оснастки. Для получения большой глубины упрочнения энергетически более выгодны ударные способы ППД, такие как чеканка, однако при этом значительно снижается точность управления обработкой и в конечном счете результаты упрочнения, в том числе и равномерность, становятся менее предсказуемыми.

В настоящее время разработан новый способ ППД – *статико-импульсная обработка* (СИО), которая обладает широкими технологическими возможностями и позволяет получать наклепанный слой большой толщины h и степенью упрочнения ΔH (для стали 45 – ΔH = 60 %, h = 6...7 мм; для стали 110Г13Л – ΔH = 150 %, h = 8...10 мм) и практически с любой равномерностью упрочнения [9, 10].

Технология СИО заключается в предварительном статическом и периодическом ударном (импульсном) воздействии инструментом на обрабатываемую поверхность. Упрочненный поверхностный слой формируется в результате последовательного нанесения на поверхность заготовки пластических отпечатков, которые являются следствием управляемого импульсного воздействия. Статическая составляющая нагрузки необходима для наиболее полного использования импульсной. Ударная система, генерирующая импульсы, рассчитывается в соответствии с волновой теорией удара, что позволяет распределять энергию, расходуемую на пластическую деформацию, с высокой эффективностью и точностью.

Равномерность упрочнения определяется перекрытием пластических отпечатков. Степень перекрытия отпечатков зависит от режимов обработки и может быть оценена по коэффициенту перекрытия:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60},$$

где s – скорость подачи, мм/мин;

f – частота ударов, Гц;

δ – размер пластического отпечатка, измеренный в направлении подачи, мм.

Таким образом, если $K = 0$, т.е. $x = \delta$ (где x – расстояние между центрами отпечатков) – край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$ ($x < \delta$) – отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место.

В результате выполненных исследований установлено, что при режимах обработки с $0 \le K \le 0{,}5$ формируется явно выраженная гетерогенная структура упрочнен-

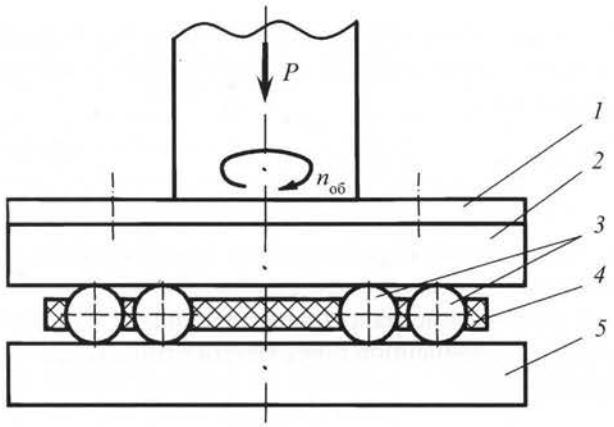


Рис. 1. Схема испытаний на контактную выносливость:
1 – державка; *2* – верхняя пластина; *3* – шары; *4* – сепаратор; *5* – нижняя пластина

ного поверхностного слоя, для которой характерно чередование более и менее твердых областей. При режимах обработки с $0,5 < K < 0,8$ верхний поверхностный слой упрочняется равномерно, а неравномерно упрочненные участки смещаются в подповерхностный слой. При режимах с $0,8 \le K < 1$ формируется практически полностью равномерно упрочненный поверхностный слой, а на поверхности появляются микротрещины (результат перенаклепа) [9].

Для того чтобы установить влияние разной степени равномерности упрочнения ППД на контактную выносливость, были проведены экспериментальные исследования.

Для исследований разработан специальный стенд, который устанавливают на сверлильных или вертикально-фрезерных станках для испытаний на контактную выносливость поверхностей плоских образцов (рис. 1). Стенд позволяет одновременно исследовать контактную выносливость двух поверхностей. При проведении экспериментов участки исследуемых поверхностей упрочняли с различной равномерностью. Нижнюю поверхность – пластину *5* – монтируют на столе станка, верхнюю поверхность – пластину *2* – на державке *1*, имеющей конус, с помощью которого она крепится в шпинделе станка. Пластину *2* поджимают к пластине *1* с помощью шаров *3*, установленных в сепараторе *4*. Перед началом испытаний необходимо контролировать зазор между верхней и нижней пластинами (посредством индикатора) и регулировать его в целях обеспечения равномерности.

Конструкцией предусмотрено несколько рядов шаров, что позволяет формировать на поверхности пластин одновременно следы нескольких дорожек качения с различной окружной скоростью. Это позволяет проследить влияние проскальзывания шаров на контактную выносливость поверхности – чем ближе шары располагаются к центру окружности, тем больше проскальзывание. Установка нескольких шаров на окружности качения способствует сокращению времени испытаний и увеличивает равномерность нагружения. Число дорожек качения и количество шаров на окружности зависят от диаметра шаров. Конструкция стенда позволяет при необходимости убирать шары из одного или нескольких радиальных рядов в ходе испытаний, например, в случае достижения на данной дорожке качения критического износа. При этом испытания могут быть продолжены для других дорожек качения.

Образцы для испытаний на контактную выносливость подвергали СИО при энергии удара 56 и 70 Дж и с режимами, соответствующими изменению коэффициента перекрытия в диапазоне $0 \le K \le 0,9$. Такой подход к выбору режимов обработки позволял обеспечивать различные толщину и равномерность упрочнения поверхностного слоя. В качестве инструмента при упрочнении использовали стержневые ролики диаметром 10 и шириной 15 мм. Испытания проводили для каждого режима упрочнения СИО не менее чем на 10 образцах (для некоторых режимов 15–20 образцах).

В целях устранения влияния шероховатости поверхности на результаты исследований после упрочнения и перед испытаниями на контактную выносливость рабочие поверхности образцов шлифовали.

В качестве материала образцов применяли сталь 45 с пределом текучести $\sigma_т = 360$ МПа. Испытания проводили шарами диаметром 8,9 и 19 мм, что позволило проследить влияние на контактную выносливость площади пятна контакта шара и образца. Площадь контакта рассчитывали в соответствии с теорией Герца, описывающей упругий контакт двух тел. Так, для шаров диаметром 8,9 мм площадь контакта составила 0,088 мм^2, а для шаров диаметром 19 мм – 0,191 мм^2. Нагрузку подбирали таким образом, чтобы для шаров различных диаметров создаваемое контактное давление было одинаковым и не превышало предела текучести материала образцов. В результате во время испытаний шары воздействовали на поверхность образцов с давлением 340 МПа. Испытания проводили на базе $1 \cdot 10^6$ цикл. при частоте вращения шпинделя 200 об/мин, время испытаний составило 10,4 ч. В зону контакта шаров с испытуемой поверхностью осуществляли регулярный подвод индустриального масла.

После $0,05 \cdot 10^6$ цикл. нагружения испытания останавливали и производили осмотр дорожек качения с целью выявить критический износ. Затем осмотр проводили каждые $0,1 \cdot 10^6$ цикл. нагружения до достижения базового числа циклов. При достижении заданного числа циклов контактного нагружения до-

рожки качения на упрочненной и неупрочненной поверхностях образцов подвергали лабораторным исследованиям с помощью инструментального микроскопа БМИ-1.

Образцы фотографировали цифровым фотоаппаратом через объектив микроскопа БИМ-1 при увеличении 1×50 с разрешением 7,1 МПк. Полученные фотографии поверхности качения шаров заносили в память компьютера, затем оценивали число n и площадь образовавшихся ямок (выкрашиваний) S, мм^2, а также площадь образовавшейся в результате качения шаров дорожки $S_д$, мм^2. Площадь измеренных выкрашиваний изменялась в диапазоне 0,0001...0,01 мм^2.

Для качественной и количественной оценки эффективности упрочнения введены показатели, позволяющие сравнить размер и число выкрашиваний на упрочненной и неупрочненной областях:

• уменьшение числа выкрашиваний (лунок) на единицу площади на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta n = \frac{n_{S_0}}{n_S};$$

$$n_{S_0} = \frac{n_0}{S_{д0}};$$

$$n_S = \frac{n}{S_д},$$

где n_S – число выкрашиваний на 1 мм^2 поверхности;

n – число выкрашиваний на исследуемом участке;

$S_д$ – площадь дорожки качения шаров на исследуемом участке, мм^2 (индекс "0" означает, что параметры характеризуют неупрочненную поверхность);

• уменьшение средней площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S = \frac{S_{ср0}}{S_{ср}};$$

$$S_{ср0} = \frac{\Sigma S_0}{n_0};$$

$$S_{ср} = \frac{\Sigma S}{n},$$

где $S_{ср}$ – средняя площадь выкрашиваний, мм^2;

ΣS – суммарная площадь выкрашиваний на исследуемом участке, мм^2;

• уменьшение минимальной площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S_{min} = \frac{S_{min0}}{S_{min}},$$

где S_{min} – площадь наименьшего выкрашивания, измеренная на исследуемом участке, мм^2;

• уменьшение максимальной площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S_{max} = \frac{S_{max0}}{S_{max}},$$

где S_{max} – площадь максимального выкрашивания, измеренная на исследуемом участке, мм^2;

• уменьшение интенсивности выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta I = \frac{I_0}{I};$$

$$I_0 = \frac{\Sigma S_0}{S_{д0}};$$

$$I = \frac{\Sigma S}{S_д},$$

где I – интенсивность выкрашивания на исследуемом участке.

По полученным экспериментальным данным построены характеристики Δn, ΔS, ΔS_{min}, ΔS_{max}, ΔI в зависимости от коэффициента перекрытия K, характеризующего равномерность деформационного упрочнения поверхностного слоя (рис. 2 и 3).

В результате установлено, что наибольшая контактная выносливость была получена на поверхности с гетерогенной структурой упрочнения при коэффициенте перекрытия $0,35 < K < 0,45$. Интенсивность выкрашивания относительно неупрочненной поверхности была снижена в 3...6 раз, при этом в 1,5...2,5 раза уменьшилось число выкрашиваний. Уменьшился размер выкрашиваний. Наибольшее выкрашивание, обнаруженное на упрочненной поверхности, было в 10...15 раз меньше, чем на неупрочненной, а наименьшее – меньше в 1,5...2 раза, средний размер выкрашиваний снизился в 2...3 раза.

Упрочнение с режимами, увеличивающими коэффициент перекрытия, повышает интенсивность выкрашиваний, увеличивает их число и площадь, а начиная с $K > 0,6...0,7$, когда в верхней части упрочненного поверхностного слоя формируется равномерная

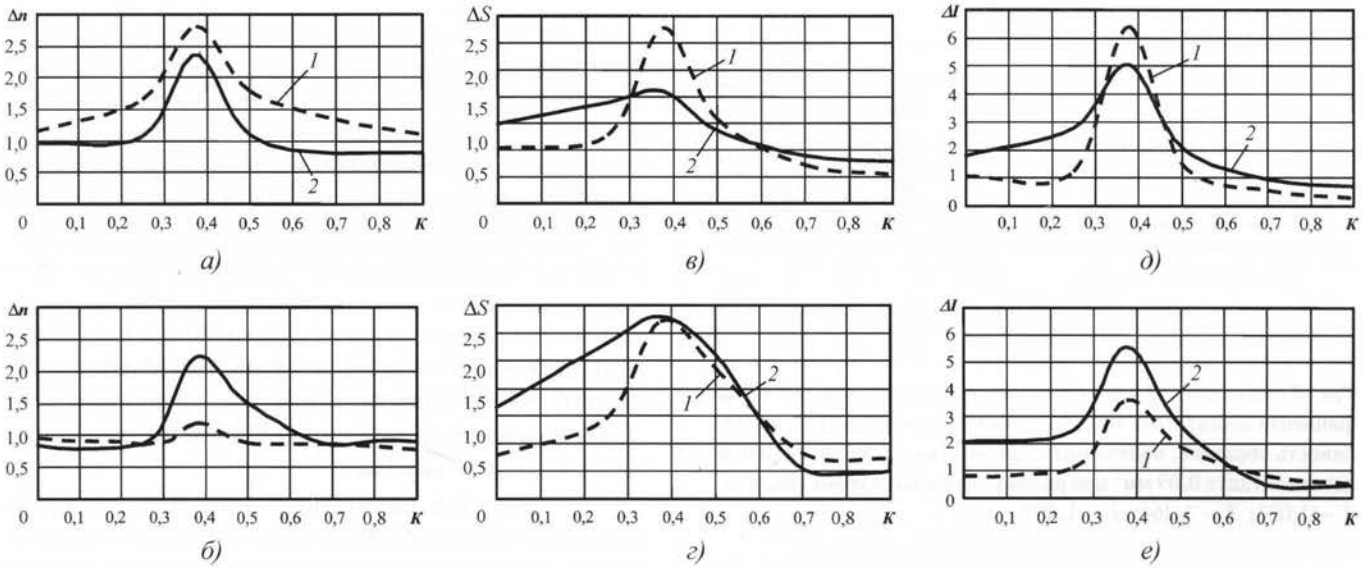


Рис. 2. Изменение (уменьшение) числа выкрашиваний на единицу площади Δn, средней площади выкрашивания ΔS и интенсивности выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной при площади контакта 0,09 (*а*, *в*, *д*) и 0,19 мм^2 (*б*): *1* – энергия удара 56 Дж; *2* – энергия удара 70 Дж

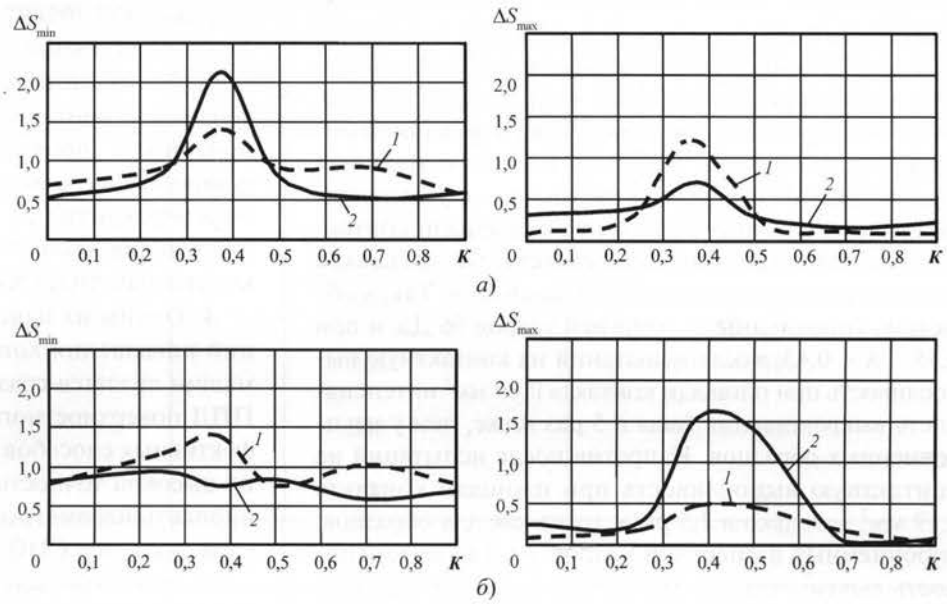


Рис. 3. Изменение (уменьшение) минимальной ΔS_{min} и максимальной ΔS_{max} площадей выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной при площади контакта 0,09 (*а*) и 0,19 мм^2 (*б*): *1* – энергия удара 56 Дж; *2* – энергия удара 70 Дж

структура, интенсивность выкрашивания становится больше, чем на неупрочненной поверхности. При $K = 0{,}8...0{,}9$ интенсивность выкрашивания упрочненной поверхности относительно неупрочненной становится практически в два раза больше. Это объясняется перенаклепом и потерей пластичности металла, быстрым развитием микротрещин, приводящих к отслоению металлических частиц.

При сравнении результатов испытаний образцов, упрочненных с различной энергией удара, необходимо учитывать, что с повышением энергии ударов деформированная (наклепанная) область под единичными отпечатками становится больше и толщина упрочненного слоя увеличивается. В большей степени это сказывается на результатах изнашивания образцов, упрочненных с коэффициентом перекрытия $0 < K < 0{,}25$. Так, если при энергии удара 56 Дж интенсивность выкрашивания относительно неупрочненной поверхности практически не менялась, то при 70 Дж, когда упрочненные области поверхности стали более значительными, интенсивность выкрашиваний снизилась в 2...2,5 раза, причем это произошло в основном за счет уменьшения размеров выкрашиваний.

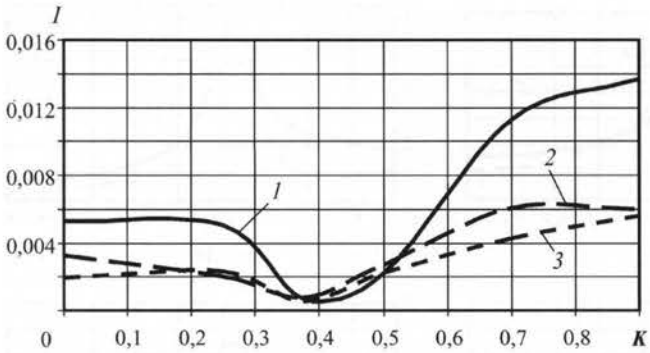


Рис. 4. Зависимость интенсивности выкрашивания *I* от коэффициента перекрытия *K* при испытаниях на контактную выносливость образцов, полученных при энергии удара 56 Дж и площади контакта 0,09 мм^2 при разных окружных скоростях, м/с: *1* – 1,031; *2* – 1,264; *3* – 1,497

Сравнение результатов испытаний при различных площадях контакта шара и образца показало, что увеличение площади контакта приводит к повышению интенсивности выкрашивания, причем в основном это происходит за счет увеличения числа выкрашиваний. Увеличение площади контакта при исследовании контактной выносливости равносильно смещению критической, наиболее напряженной, точки в глубь поверхностного слоя образца в результате повышения контактной нагрузки. В связи с этим был получен вполне ожидаемый результат – с увеличением глубины упрочнения изменение площади контакта в данном диапазоне практически не оказывало влияния на интенсивность выкрашивания. Так, у образцов, упрочненных с энергией ударов 56 Дж и при $0,35 < K < 0,45$, после испытаний на контактную выносливость при площади контакта 0,09 мм^2 интенсивность выкрашивания была в 5 раз ниже, чем у неупрочненных образцов. Напротив после испытаний на контактную выносливость при площади контакта 0,19 мм^2 – только в 2,5 раза, тогда как для образцов, упрочненных с энергией ударов 70 Дж, интенсивность выкрашивания при любой площади контакта оставалась практически одинаковой и была ниже, чем на неупрочненной поверхности в 4...4,5 раза.

Проведены исследования влияния на износ окружной скорости, определяющей соотношение трения качения и проскальзывания при испытаниях. Установлено, что уменьшение окружной скорости приводит к увеличению интенсивности выкрашиваний (рис. 4), что согласуется с мнением о том, что возникающее при трении качения проскальзывание тел качения по испытуемой поверхности приводит к возникновению дополнительных тангенциальных сил, ускоряющих процесс развития дефектов на поверхностях качения и снижающих сопротивление усталости при контактных нагрузках [11]. Причем более явно эта картина просматривалась на образцах с меньшей глубиной упрочнения, полученных при энергии удара 56 Дж и испытанных в условиях меньшей площади контакта – 0,09 мм^2. Кроме того, по рис. 4 видно, что при $0,35 < K < 0,5$ кривые интенсивности выкрашивания практически совпали, а при $K > 0,6$ износ, полученный при разных угловых скоростях, различается сильнее. Следовательно, проскальзывание при качении в большей степени сказывается на контактной выносливости равномерно и неглубоко упрочненного слоя, испытывающего сосредоточенную циклическую контактную нагрузку.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие **выводы.**

1. Глубина и равномерность (гетерогенность) упрочнения поверхностного слоя оказывают существенное влияние на контактную выносливость деталей машин.

2. Необходимая глубина упрочнения должна определяться из условия предотвращения глубинных контактных разрушений расчетом положения наиболее нагруженной точки, находящейся в сложном напряженном состоянии.

3. При достаточной глубине упрочнения огромное влияние на контактную выносливость оказывает равномерность упрочнения, которую целесообразно регулировать в соответствии со значениями коэффициента перекрытия *K*. Для обеспечения гетерогенного упрочнения необходимо, чтобы коэффициент перекрытия находился в диапазоне $K < 0,5$.

4. Одним из наиболее перспективных направлений повышения контактной выносливости деталей машин является создание гетерогенно упрочненного ППД поверхностного слоя. Одним из наиболее эффективных способов ППД, позволяющим с достаточно высокой точностью и в широком диапазоне регулировать параметры упрочненного поверхностного слоя, является СИО.

5. Максимальное повышение контактной выносливости (в 3...6 раз) относительно неупрочненной стали 45 наблюдалось при создании режимами СИО гетерогенной упрочненной структуры поверхностного слоя с коэффициентом перекрытия $0,35 < K < 0,45$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киричек А.В.** Комплексное обеспечение качества несоосных винтовых механизмов и тяжелонагруженных резьбовых деталей. М.: ИЦ МГТУ СТАНКИН, 2002. 242 с.

2. **Аджиева Т.Б., Георгиев М.Н.** Определение параметров контактной усталости в поверхностно упрочненных деталях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 7. С. 49–51.

3. **А.с. № 1782243.** Способ термической обработки изделий / А.П. Чейлях, Л.С. Малинов. 1992.

4. **Пат. РФ № 2047661.** Способ обработки резьбового изделия / В.С. Аванесов, Б.А. Авербух, Д.Г. Ашигян и др. 1995.

5. **Пат. РФ 2219271.** Способ упрочнения сплава на основе железа / Г.А. Дорофеев. 2003.

6. **Иванов Г.П., Картонова Л.В., Худошин А.А.** Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры // Строительные и дорожные машины. 1997. № 1. С. 33–34.

7. **Пат. РФ 2090828.** Противопульная гетерогенная броня из легированной стали для средств индивидуальной защиты и способ ее получения / Л.А. Кирель, О.М. Михайлова, С.А. Журавлев. 1997.

8. **Смелянский В.М., Земсков В.А.** Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 27–35.

9. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (библиотека технолога). М.: Машиностроение, 2004. 288 с.

10. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л.** Равномерность наклепа после статико-импульсной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 8. С. 3–5.

11. **Головин Г.Ф.** Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. Л.: Машиностроение, 1973. 144 с.

Скорость охлаждения стали в различных охлаждающих средах

Охлаждающая среда	Скорость охлаждения, °С/с, при температуре, °С	
	650...550	300...200
Дистиллированная вода	250	250
Вода при температуре, °С		
18	600	270
26	500	270
50	100	270
74	30	200
10%-ный раствор поваренной соли в воде при 18 °С	1100	300
10%-ный раствор серной кислоты в воде при 18 °С	750	300
Минеральное масло	100...150	20...50
Трансформаторное масло	120	25
Эмульсия масла в воде	70	200
Медные плиты	60	30
Железные плиты	35	15
Воздух под давлением	30	10

Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев *(Белгородский государственный университет),*
И.М. Неклюдов *(Национальный научный центр Харьковского технологического института)*

Сравнительные характеристики эффекта Баушингера в зависимости от исходного состояния структуры никеля

Изучение влияния эффекта Баушингера и связанных с ним технологических способов подавления воздействия эффекта на физико-механические свойства металлов были и остаются актуальными. Сделана попытка показать, что создание оптимального структурного и энергетического состояния в исследуемом металле с помощью предложенной методики обработки может существенно уменьшить влияние эффекта Баушингера на механические характеристики, долговечность и энергетические параметры исследуемого никеля сравнительно высокой чистоты при низкочастотном знакопеременном изгибе с фиксированным радиусом огибания при комнатной температуре.

The study of the Bauschinger's effect and connected with it technological methods of suppression of its influence on physical and mechanical metal properties has been and still remains actual. The attempt to show that the creation of the optimal structural and energy state in the explored metal with the help of the proposed method of treatment can substantially decrease the influence of Bauschinger's effect on the mechanical characteristics, durability and energy parameter of the studied nickel of comparatively high purity under the low-frequency alternate bend with the fixed bending radius under the room temperature is presented.

Введение

К настоящему времени эффект Баушингера (снижение пределов пропорциональности, упругости и текучести материалов в результате изменения знака нагружения, если первоначальная нагрузка вызвала наличие пластических деформаций) обнаружен практически у всех исследованных кристаллических тел и считается одной из особенностей деформированного состояния материалов. К изучению его физической природы постоянно возвращаются по мере накопления новых данных об этом явлении и представлений о процессе пластической деформации кристаллов. Интерес к исследованиям эффекта Баушингера определяется многими причинами. Во-первых, исследования особенностей знакопеременного деформирования и физической природы эффекта Баушингера дает важные сведения о микронапряжениях, возникающих при деформациях, микромеханизмах пластической деформации и упрочнения кристаллических тел. Экспериментально подтверждено, что деформационное упрочнение и эффект Баушингера внутренне связаны.

Во-вторых, по характеру изменения деформации материала за один цикл знакопеременного нагружения с определенной амплитудой в некоторых случаях можно судить о взаимосвязи деформации за первый цикл и числа циклов до разрушения [1, 2], т.е. прогнозировать долговечность материалов в области малоцикловой усталости. Выяснение особенностей процессов, протекающих в реальных условиях эксплуатации, всегда было актуальным в механике твердого тела [2]. И, наконец, наличие эффекта Баушингера приходится учитывать при эксплуатации изделий, изготовленных из многослойных наклепанных материалов.

Методика проведения эксперимента

Образцы из никеля (чистотой 99,997 %) в виде полосы вырезали из листа вдоль проката размером 50×10×1,5 мм и подвергали отжигу при температуре 1073 К в течение 60 мин в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт. ст. с последующим остыванием с печью. Эти образцы составили первую исследовательскую партию после отжига. Вторую партию образцов после отжига подвергали закалке от 1373 К в воду с последующим погружением в сосуд Дьюара с жидким азотом до начала проведения эксперимента. Третью партию отожженных образцов закаливали, деформировали с остаточной деформацией до 2 % с последующим старением под напряжением при $\sigma_н = 0{,}5\sigma_{0,2}$ и комнатной температуре в течение 60 мин. Образцы всех трех партий подвергали огибающей повторно-переменной деформации на цилиндрическом приспособлении с радиусом обжатия 35 мм (угол обжатия 180°).

Результаты эксперимента

Известно, что в процессе деформации часть энергии расходуется на преодоление внутреннего энергетического состояния кристаллической структуры, но

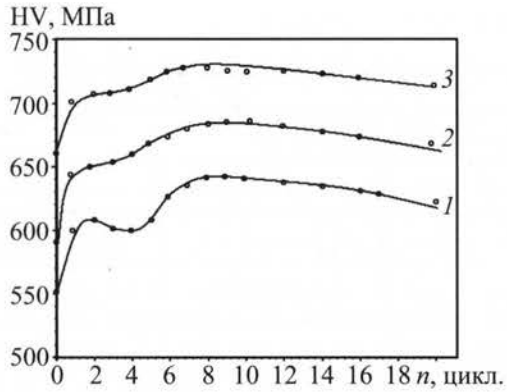


Рис. 1. Зависимость микротвердости HV от числа циклов *n* (температура исследования – 300 К):
1 – образцы первой партии; *2* – образцы второй партии; *3* – образцы третьей партии

бóльшая часть превращается в тепло. Количество запасенной энергии зависит от условий деформации, размера зерна, степени деформации и др. [3, 4]. При знакопеременном нагружении площадь образовавшейся механической гистерезисной петли равна энергии ΔW, рассеянной в единице объема за один цикл нагружения [5].

Развитие усталостных процессов сопровождается изменением микротвердости материалов (рис. 1), ростом предела текучести (рис. 2) и уменьшением доли энергии, запасенной в металле (табл. 1 и 2).

Проведенные исследования на никеле сравнительно высокой чистоты показали взаимосвязь энергетических параметров, исходного внутреннего состояния и условий знакопеременного деформационного воздействия: радиуса изгиба, числа циклов и способа циклического нагружения. В частности, было установлено, что запасенная энергия при комнатной температуре уменьшается с увеличением числа циклов и радиуса изгиба R (см. табл. 1).

Абсолютное изменение площади петли гистерезиса для образцов:

$$\Delta S_{1,2} = S_1 - S_2;$$

$$\Delta S_{1,3} = S_1 - S_3,$$

где $S_1 \ldots S_3$ – площади петель гистерезиса образцов соответствующих партий 1–3.

Относительное изменение площади петли гистерезиса, %:

$$\varepsilon_{s\,1,2} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} 100;$$

$$\varepsilon_{s\,1,3} = \frac{S_1 - S_3}{S_1} 100.$$

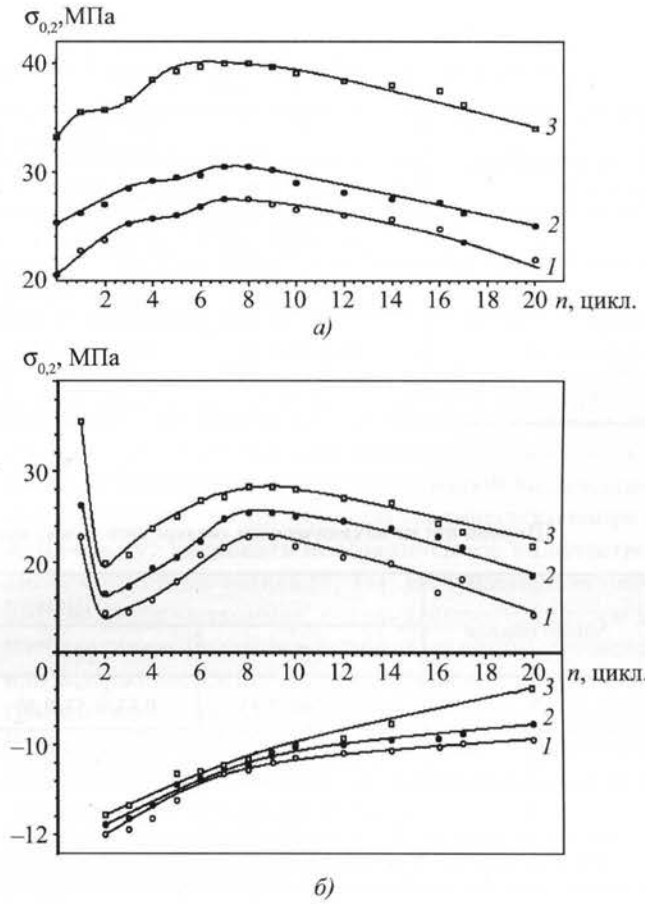


Рис. 2. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ от исходного состояния структуры образцов никеля при знакопеременном нагружении и числа циклов *n*:
а – при полуцикловом нагружении; *б* – верхнее и нижнее значения $\sigma_{0,2}$ механического гистерезиса; *1* – исходное состояние; *2* – закалка от температуры 1100 °С; *3* – закалка от температуры 1100 °С с последующим деформированием

Экспериментальные результаты показали, что подавление эффекта Баушингера зависит от условий нагружения. Так, при двустороннем изгибе на ширину петли влияют исходное состояние, число циклов и радиус изгиба при выбранной температуре исследования (табл. 2–4).

Абсолютное $\Delta l_{1,2}$, $\Delta l_{1,3}$ и относительное $\varepsilon_{l1,2}$, $\varepsilon_{l1,3}$ изменения ширины петли гистерезиса определяются аналогично изменениям площади петли.

Анализ экспериментальных данных

Ранние исследования эффекта Баушингера установили, что запасенная энергия зависит от температуры испытания [4]. Обнаруженные зависимости хорошо согласуются с результатами исследования влияния

Таблица 1

Площадь петли механического гистерезиса S, мм^2, при полном цикле огибания по цилиндрической поверхности

Число циклов	Площадь петли S, при значениях радиуса R, мм				
	15	20	25	30	35
7	15,30/13,50/12,00	14,75/13,00/11,30	14,00/12,35/10,70	13,50/11,80/9,80	12,70/11,00/9,00
10	13,00/11,50/9,30	11,50/10,10/8,70	10,50/9,40/8,00	10,00/9,30/7,70	9,50/8,70/7,20
17	6,50/5,00/4,50	6,00/4,60/3,80	5,70/4,00/3,30	5,00/3,50/3,00	3,00/2,50/2,00

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Таблица 2

Ширина петли механического гистерезиса l, мм, при полном цикле огибания по цилиндрической поверхности

Число циклов	Ширина петли l при значениях радиуса R, мм				
	15	20	25	30	35
7	0,70/0,60/0,53	0,63/0,53/0,50	0,57/0,50/0,45	0,53/0,47/0,41	0,51/0,42/0,38
10	0,42/0,40/0,35	0,40/0,38/0,35	0,35/0,31/0,28	0,31/0,27/0,22	0,33/0,27/0,22
17	0,34/0,30/0,38	0,30/0,28/0,24	0,27/0,22/0,20	0,23/0,20/0,21	0,24/0,22/0,18

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Таблица 3

Абсолютные и относительные изменения площади петли механического гистерезиса в зависимости от условий нагружений (R = 35 мм) и числа циклов

Число циклов	$\Delta S_{1,2}$, мм^2	$\Delta S_{1,3}$, мм^2	$\varepsilon_{s1,2}$, %	$\varepsilon_{s1,3}$, %
7	2,0/1,7	4,0/3,7	16,7/13,3	33,3/29,1
10	0,3/0,8	2,8/2,3	4,1/8,1	38,4/24,2
17	0,5/0,5	0,2/1,0	13,3/16,6	23,3/33,3

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие одностороннему и двустороннему нагружению.

Таблица 4

Абсолютное и относительное изменение ширины петли механического гистерезиса в зависимости от условий нагружения (R = 35 мм) и числа циклов

Число циклов	$\Delta l_{1,2}$, мм	$\Delta l_{1,3}$, мм	$\varepsilon_{l1,2}$, %	$\varepsilon_{l1,3}$, %
7	0,20/0,09	0,29/0,13	28,60/17,60	41,40/25,50
10	0,06/0,06	0,05/0,11	14,30/18,10	14,30/33,30
17	0,03/0,02	0,10/0,06	0,20/8,33	0,40/25,00

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие одностороннему и двустороннему нагружению.

температуры на кривую "нагружение–деформация". На основании данных был сделан вывод о том, что при данной степени деформации при низкой температуре остается больше дислокаций, чем при комнатной температуре.

Результаты исследования никеля также показывают, что запасенная энергия возрастает с увеличением степени деформации (см. табл. 3). При таких условиях эксперимента аннигиляция дислокаций происходит более интенсивно с ростом степени деформации [3]. Однако по абсолютным значениям итоговые результаты исследования деформированного никеля (число циклов, степень деформации) отличаются от приведенных в литературных источниках [3, 6].

Было замечено, что запасенная энергия при одних и тех же итоговых параметрах зависит от исходного внутреннего состояния исследуемого никеля (см. табл. 4). Поскольку гистерезисное внутреннее напряжение не зависит от частоты колебаний и более чувствительно к амплитуде напряжения [7], то можно ожидать, что с ростом последней ширина петли гистерезиса будет возрастать. В проведенном исследовании ширина гистерезисной петли существенно уменьшается в сравнении со второй и особенно первой партиями, то можно утверждать, что в деформационно-состаренном никеле процессы протекают при более низких значениях амплитуды напряжения. Особенно это заметно при двустороннем циклическом нагружении в сравнении с односторонним.

Известно, что при обратном знакопеременном нагружении происходит изменение направления движений дислокаций, которым приходится преодолевать кроме препятствий прямого движения еще и вновь образовавшиеся барьеры в процессе первого деформационного изгиба. При этом напряжения от образовавшихся скоплений дислокаций возрастают, приводят к более интенсивному их взаимодействию. Все это способствует увеличению запасенной энергии, что и отражается на площади и ширине петли гистерезиса на первых циклах знакопеременного нагружения.

Последующие приложения внешних нагрузок в противоположном направлении, совпадающем с направлением напряжения от скопления дислокаций, вызывает дальнейшую аннигиляцию дислокаций и стягивание петель [8–10].

Наблюдаемая зависимость скорости изменения эффекта Баушингера от исходного состояния структуры металла, очевидно, связана с возможностью образования стадии легкого скольжения дислокаций в структуре кристалла. Если предположить, что на стадии легкого скольжения длина свободного пробега не зависит от степени деформации, а число движущихся дислокаций в первичных плоскостях пропорционально приложенному напряжению, то зависимость между эффектом Баушингера и степенью упрочнения носила бы линейный характер. На практике же наблюдается непропорциональная зависимость для всех трех партий образцов. Кроме того, эта непропорциональность отличается и абсолютными величинами приращения механических параметров.

Для образцов первой партии отжиг при высокой температуре существенно уменьшает количество дефектов в объеме кристалла, которые являются барьерами для перемещения дислокаций в результате воздействия внешних напряжений. Из всех предложенных схем размножения дислокаций наиболее распространенной является классическая модель источника Франка–Рида, согласно которой дислокационные сегменты по достижению критического напряжения могут испускать неограниченное количество дислокационных петель [9, 11]. Испущенная источником дислокационная петля распространяется в плоскостях скольжения и выходит на границу раздела или задерживается перед препятствиями, например, у границ зерна, блока, у барьера Ломера–Котрелла. В последнем случае дислокация будет отталкивать другие петли, испущенные источником вслед за ней под действием приложенного напряжения. Эти петли будут скапливаться за первой петлей, располагаясь на некоторых расстояниях друг от друга.

После снятия внешней нагрузки под действием внутреннего напряжения "тыльные" дислокации начинают двигаться к первичному источнику и аннигилировать с дислокациями противоположного знака. Обратное движение дислокаций при снятии нагрузки создает условие для образования петли гистерезиса.

Сравнивая экспериментальные данные изменения механических параметров при одностороннем и полном изгибе образцов в начальный период знакопеременного нагружения, можно предположить, что наблюдаемое изменение, например, предела текучести, связано с низкой плотностью дефектов в отожженных образцах первой партии. Увеличение числа циклов знакопеременного нагружения приводит к росту числа дислокаций обратного течения. Вследствие блокировки первичных дислокаций и вынужденного перехода некоторых из них скольжением в плоскости других систем ширина петли гистерезиса при деформированиях на последующих стадиях кривой упрочнения возрастает медленнее, чем на предыдущих циклах [12]. Такая закономерность уменьшения прироста предела текучести на каждой последующей ступени деформации, кроме того, связана с сокращением петель дислокации, скопившихся у препятствий при обратном течении [12].

Поскольку в исследуемом никеле примесных атомов мало, то для создания исходной дефектной

структуры в объеме кристалла была использована закалка от высоких температур. Закалочные вакансии и их комплексы (партия 2), как и атомы примеси, оказывают заметное влияние на подавление эффекта Баушингера, поскольку они, взаимодействуя с дислокациями, способствуют образованию стопоров для движущихся дислокаций, атмосфер вокруг дислокаций. Образовавшаяся дефектная структура активизирует появление поперечного скольжения. В начальный период знакопеременного нагружения при высокой концентрации вакансий и их комплексов эти процессы проявляют свою активность при первом изгибе. Изгиб в противоположном направлении (эффект Баушингера) существенно влияет на предел текучести. С уменьшением плотности закалочных дефектов в результате последующих знакопеременных деформационных нагружений эффект снижается и происходит рост предела текучести (см. рис. 2, *б*). Заметное подавление эффекта Баушингера проявляется в образцах третьей партии.

В реальных кристаллах имеется целый спектр "слабых" мест, отличающихся значениями критических напряжений. При самых незначительных внешних нагрузках в этих местах создаются большие локальные напряжения, сравнимые с критическими напряжениями работы источников дислокаций. Под действием внешней нагрузки в перенапряженных местах еще до достижения макроскопического предела текучести протекают процессы, связанные с зарождением и смещением дислокаций, что приводит к релаксации напряжений и стабилизации структуры в этих местах.

Для повышения сопротивления деформированных кристаллов без изменения их химического состава предложены различные способы термомеханической обработки. Многие прочностные характеристики металлов и сплавов, подвергнутых термомеханическому воздействию, получены без учета процессов релаксации напряжения, восстановления сплошности материала, которые влияют на повышение сопротивления деформированию. Особый интерес представляют методы диффузионного упрочнения, которые не связаны с применением больших деформаций. Упрочнение при этом происходит благодаря перераспределению дефектов и релаксации локальных перенапряжений в объеме материала.

Истощение подвижных дислокаций в кристаллах достигается не только их аннигиляцией и выходом на поверхность, но и закреплением их точечными дефектами и комплексами из них. Термическая и механическая активация диффузионных и микросдвиговых механизмов релаксации локальных перенапряжений способствуют установлению более однородной, теоретически равновесной структуры металлов [13–17].

Во многих исследованиях было показано, что отжиг под напряжением предварительно деформированных материалов при определенной температуре изменяет предел текучести и уменьшает эффект Баушингера [18–22]. Снижение эффекта Баушингера после отжига является следствием релаксации внутренних напряжений и закрепления дислокаций точечными дефектами. Однако для получения необходимого результата требуются большие деформации, что затрудняет их практическое применение. Методы, предусматривающие малые степени деформации, создают наиболее устойчивую структуру за счет закрепления дислокаций точечными дефектами и особенно примесными атомами значительной концентрации.

Для очень чистых металлов применение описанных методов дает незначительный эффект из-за малой концентрации примесных атомов. Повышение прочностных характеристик металлов достигается путем сочетания закалки металлов от высоких температур и дальнейшей механико-термической обработки, заключающейся в деформировании в макроупругой области при оптимальной температуре с последующим отжигом под напряжением, не превышающим предела текучести, при температуре ниже температуры рекристаллизации.

За меру эффекта Баушингера было применено следующее отношение [23, 24]:

$$\beta = \frac{\sigma_S - \sigma'_S}{\sigma'_S},$$

где σ_S – предел текучести при повторном деформировании в первоначальном направлении;

σ'_S – предел текучести при повторном деформировании в обратном направлении. Расчетные данные приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительные характеристики эффекта Баушингера

Число циклов	σ_s, МПа	σ'_s, МПа	β
7	21,50/24,75/27,25	–10,65/–10,56/–10,45	1,02/1,34/1,61
10	21,75/25,00/28,00	–9,75/–10,05/–10,25	1,23/1,49/1,73
14	19,00/21,50/23,25	–8,85/–9,75/–9,85	1,14/1,40/1,61

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Заключение

Полученные результаты дают возможность утверждать, что деформационное старение предварительно закаленных образцов никеля позволяет существенно уменьшить влияние эффекта Баушингера на механические свойства исследуемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова В.С., Терентьев В.Ф.** Сб. Усталость металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1966. 321 с.

2. **Сереесен С.В.** Прочность при малом числе циклов нагружения. М.: Наука, 1969. С. 9.

3. **Ticher A.L., Bever M.B.** T.A.I.M.E. 1959. P. 215, 326.

4. **Buckley S.N., Entwistle K.M.** Acta Met. 1956. V. 4. P. 352.

5. **Кеннеди Д.Д.** Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965. 312 с.

6. **Мак Лиин Д.** Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965. С. 162–164.

7. **Roberts J.M., Hartman D.E.** Trans. Met. Soc. AIME. 1964. V. 230. P. 1125.

8. **Wooley R.W.** Phil. Mag. 1953. V. 44. P. 597.

9. **Котрелл А.Х.** Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 282 с.

10. **Зеегер А.** Дислокации и механические свойства кристаллов. М.: Иностр. лит-ра, 1969. С. 179.

11. **Фридель Ж.** Дислокации. М.: Мир, 1967. 644 с.

12. **Strutt P.R., Kear B.H.,** Wilsdorf H.G.F. Acta Met. 1966. V. 14. P. 611–619.

13. **Гарбер С.В., Неклюдов И.М., Перунина Л.М.** Упрочнение висмута при программном нагружении. Физика металлов и металловедение. 1961. № 1. С. 108–111.

14. **Гиндин И.А., Неклюдов И.М.** Физические основы программного нагружения металлов. К.: Наукова думка, 1975. 175 с.

15. **Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В.** Физические представления о путях повышения прочности кристаллических тел / Сб. "Исследование механического сопротивления материалов и конструкций": тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева и БТИСМ им. И.А. Гришманова. М. Т. 5. Вып. 20. С. 80–114.

16. **А.с. 692904 СССР, МКЛ² С22А 1/00.** Способ термомеханической обработки металлов /И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, В.В. Слезов, Н.В. Камышанченко. 1979.

17. **А.с. 378532 СССР, МКл С 221 1/00.** Способ термомеханической обработки чистых металлов / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, И.И. Бобонец, Н.В. Камышанченко. 1973.

18. **Faniche W., Stalte E., Kugler T.** Techn. Mitt. Krupp, 1965. Vol. 23. P. 117.

19. **Saks G., ShoJi H.** Zeitschr fur Physik, 1927. Vol. 45. P. 776.

20. **Махутов Н.А., Щербак А.М., Пойда В.Г., Терентьев В.Ф.** Проблемы прочности. 1969. № 5. С. 59.

21. **Wilson D.V., Ogran G.R.** J. Iron a Steel Inst. 1968. Vol. 206. No. 9.

22. **Грачев С.В., Григорьева В.Н.** 1970. ФММ. Т. 30. С. 819.

23. **Талыков Г.Б.** Пластичность и прочность стали при сложных нагрузках. Л.: изд-во ЛГУ, 1968. 182 с.

24. **Faniche W., Stalte E., Kugler T.** Techn. Mitt. Krupp. 1965. Vol. 23. P. 117.

ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.
Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (Библиотека технолога).
М.: Машиностроение, 2004. 688 с.: ил.

Цена с НДС 253 р.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса статико-импульсной обработки пластическим деформированием и рекомендации по выбору режимов обработки. Рассмотрены особенности импульсного нагружения очага деформации и конструкции экспериментальных стендов и оборудования.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, научно-исследовательских институтов, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

А.П. Бабичев, Д.В. Максимов, Ф.А. Пастухов *(Донской ГТУ),*
П.Д. Мотренко, А.П. Чучукалов *(ОАО "Росвертол", Ростов-на-Дону)*

Поэлементная отделочно-зачистная и упрочняющая вибрационная обработка крупногабаритных деталей пространственной ориентации

Описаны метод и принцип работы оборудования при поэлементной отделочно-зачистной и упрочняющей вибрационной обработке крупногабаритных деталей пространственной ориентации.

The method and work of the equipment for consecutive the surface-finishing and strengthening vibration processing of large-sized details of spatial orientation are described.

В конструкции некоторых изделий, например летательных аппаратов, судов различного класса, энергосиловых установок, нескольких видов наземного транспорта, редукторов и других, входят детали, имеющие сложную форму пространственной ориентации. Многие из них играют ответственную роль в конструкциях соответствующих изделий, работают в условиях высоких нагрузок, в том числе знакопеременных, требуют весьма тщательной всесторонней отделочно-зачистной и упрочняющей обработки.

Для обработки деталей сравнительно небольших размеров, до 300...400 мм, целесообразно и достаточно эффективно применение вибрационной обработки по технологической схеме полного погружения детали в рабочую камеру. В этом случае достигается всесторонняя равномерная обработка всех элементов сложной поверхности детали.

Рис. 1. Общий вид оборудования для поэлементной виброударной обработки крупногабаритных деталей

Однако для крупногабаритных деталей с размерами более 500...1000 мм указанная технологическая схема не применима или неэффективна по ряду причин: с увеличением объема рабочей камеры возрастает рассеяние энергии колебаний в рабочей среде и КПД процесса обработки в этом случае существенно снижается; затруднительно или невозможно обеспечение равномерной обработки всех элементов сложной поверхности детали.

Для обработки указанного типа деталей предложена технологическая схема поэлементной обработки за счет последовательной переориентации детали с помощью соответствующего манипулятора. В качестве примеров обрабатываемых деталей можно привести силовые детали и узлы, входящие в конструкцию летательных аппаратов, корпуса редукторов энергосиловых установок, крупногабаритные зубчатые колеса диаметром более 500 мм и др.

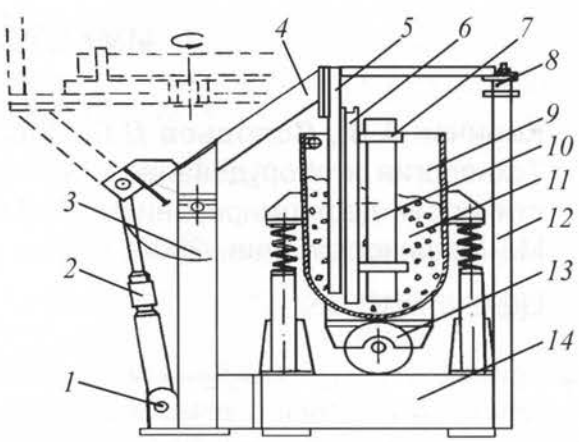


Рис. 2. Схема поэлементной обработки крупногабаритных деталей сложной формы:
1 – шарнир; *2* – гидроцилиндр; *3* – стойка; *4* – перекладина; *5* – неподвижная рамка; *6* – подвижная рамка; *7* – прихват; *8* – зажим; *9* – рабочая камера; *10* – деталь; *11* – рабочая среда; *12* – опора; *13* – вибратор; *14* – станина

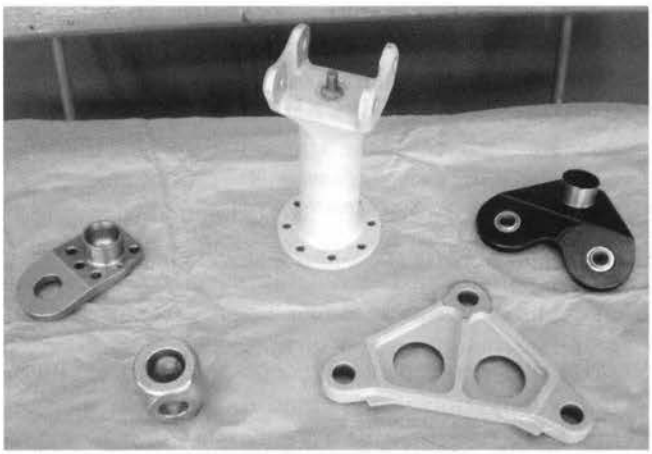


Рис. 3. Примеры обрабатываемых деталей

Заготовками для деталей рассматриваемого типа являются отливки, поковки и в отдельных случаях сварные конструкции. Заготовки подвергают механической обработке, преимущественно фрезерованию с целью обеспечить требуемую форму и размеры. Как правило, указанные заготовки на завершающем этапе изготовления подвергают всесторонней отделочно-зачистной и упрочняющей обработке [1, 2]. На этой стадии вибрационная (виброударная) обработка является наиболее предпочтительной и эффективной. Общий вид и схема оборудования для поэлементной виброударной обработки крупногабаритных деталей представлены на рис. 1 и 2 соответственно. На рис. 3 даны примеры обрабатываемых деталей.

Конструкция обрабатывающего комплекса включает вибрационный станок с объемом рабочей камеры прямоугольной формы 1100 дм^3 и *подъемно-поворотное устройство* (ППУ) с гидравлическим приводом. Рабочая камера *9* имеет заднюю стенку, выполненную по радиусу для удобства ввода-вывода подъемно-поворотного устройства. Последнее крепится на стойке *3* с тыльной стороны вибрационного станка и предназначено для закрепления и ввода в рабочую камеру обрабатываемой детали *10*. ППУ состоит из основной (неподвижной) рамки *5* и имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси от гидроцилиндра *2*. На основной рамке смонтирована подвижная рамка *6*, которая может поворачиваться относительно нее на 360° и устанавливаться в определенном (заданном) положении фиксаторами.

Для осуществления обработки деталь устанавливают и закрепляют на подвижную рамку. После включения привода вибрационного станка и ППУ деталь погружается в рабочую камеру для обработки. Глубина погружения регулируется. После окончания обработки ППУ возвращается в исходное положение, осуществляется съем обработанной детали и установка следующей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронежский ин-т МВД России, 1999. С. 386.

2. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2003. 192 с.

ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ

Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др.
Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.: ил. (Библиотека технолога).

Цена с НДС 330 р.

Впервые изложен новый одноступенчатый подход к технологическому обеспечению и повышению непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений: усталостной прочности, коррозионной стойкости, контактной жесткости, износостойкости, герметичности соединений и прочности посадок. Это позволяет значительно сократить время конструкторско-технологической подготовки производства и повысить качество машин.

Предназначена для ИТР промышленных предприятий. Может быть полезна для профессорско-преподавательского состава, студентов и аспирантов втузов.

А.А. Катунин *(ОрелГТУ)*

Анализ способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей

Представлены анализ и систематизация существующих способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей. Сделаны выводы относительно направления их дальнейшего совершенствования.

The analysis and the systematisation the real methods of the planetarium rolling of complete spherical surfaces are given. The ways of further modernization are summarised here.

Известно, что все многообразие методов чистовой обработки металлов давлением по принципу взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью может быть сведено к двум классам [1]. К первому – *классу дорнования* – относятся все процессы, для которых характерно взаимодействие инструмента и детали, основанное на трении скольжения. Ко второму классу, получившему название *класса ротационной обработки*, относятся процессы, при которых взаимодействие между инструментом и деталью осуществляется путем качения деформирующего элемента по обрабатываемой поверхности. К их числу относятся процессы планетарного обкатывания шариками или роликами, получившие широкое применение в качестве операции чистовой размерно-упрочняющей обработки неполной сферы шарового пальца шаровых шарниров современных автомобилей.

Планетарную обкатку применяют при обработке большой группы деталей, конструктивно подобных автомобильным шаровым пальцам: наконечников рулевых тяг автомобилей, шаровых опор мехатронных модулей, шаровых подпятников, шаровых шарниров талрепов, запорных элементов шаровых кранов, наконечников сцепки железнодорожных вагонов, шаровых толкателей и других. Для такой обработки характерны высокая производительность, относительная простота реализации (даже на универсальном оборудовании), надежность инструментов, высокое качество обработки. Кроме того, планетарное обкатывание является одним из немногих методов, позволяющих эффективно обрабатывать неполные сферические поверхности, ограниченные торцовыми срезами.

Учитывая, что существует целый ряд способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей, а также то, что работы по повышению ее качества активно продолжаются, определенный интерес представляет анализ указанных способов в целях обобщения, систематизации и определения направлений по их дальнейшему совершенствованию.

В основе известных способов планетарной обкатки лежит кинематическая схема (рис. 1), согласно которой ось заготовки с неполной сферической поверхностью (шарового пальца) пресекается с осью инструмента (обкатника) под углом α, а точка их пересечения совпадает с центром обрабатываемой неполной сферы.

Обкатнику, находящемуся в соприкосновении с обрабатываемой поверхностью сразу всеми деформирующими элементами (шариками или роликами), сообщают вращение по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной плоскости осей обкатника и заготовки. Плоскость, в которой вращающиеся деформирующие элементы обкатника касаются заготовки, смещена относительно центра обрабатываемой сферической поверхности и проходит через ее полюс и точку пересечения линии торцового среза со сферой. При этом обкатник охватывает деформирующими телами качения все параллели обрабатываемой неполной сферической поверхности от полюса до торцового среза.

Заготовке сообщают вращение вокруг ее оси со скоростью, которая значительно меньше скорости

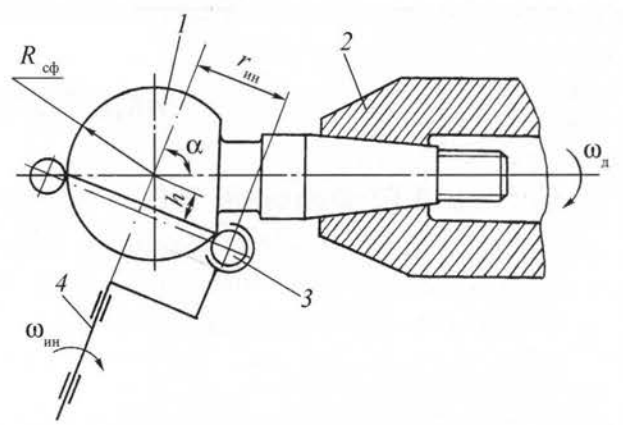


Рис. 1. Схема планетарной обкатки неполных сферических поверхностей шариковым нерегулируемым обкатником без сепаратора и дополнительных движений заготовки и инструмента: *1* – заготовка; *2* – шпиндель; *3* – деформирующие элементы (шарики) обкатника; *4* – шпиндель обкатника; $R_{сф}$ и $r_{ин}$ – радиусы сферы (детали) и инструмента; $\omega_д$ и $\omega_{ин}$ – угловая частота вращения детали и инструмента; α – угол наклона оси вращения инструмента; *h* – расстояние, определяющее положение шариков обкатника

вращения обкатника. Указанные два движения заготовки и инструмента составляют суть целой группы способов планетарной обкатки неполных сфер [1–5].

Наряду с определенными преимуществами, эти способы обладают общим недостатком – неравномерностью поверхностного пластического деформирования неполной сферы, обусловленной значительным разбросом подач на разных ее участках, имеющих различающиеся линейные скорости при обкатке, а также положением плоскости вращения шариков обкатника. В связи с этим число прокатываний деформирующих тел через полюсную часть сферической поверхности, где линейная скорость вращения поверхности головки близка к нулю, значительно больше, чем через экваториальные участки, где скорость вращения максимальна. По этой причине при определенных условиях на полюсной части сферы может иметь место отслаивание пластически обработанного (переобкатанного) металла.

Особенность указанных способов планетарной обкатки состоит в том, что для обработки неполной сферы достаточно одного оборота заготовки, а их производительность прямо пропорциональна скорости вращения обкатника, числу деформирующих тел в нем и подаче на каждое деформирующее тело.

Стремление к улучшению качества получаемой поверхности, повышение равномерности обработки различных ее участков обусловило появление ряда способов планетарной обкатки [6–9], суть которых заключается в добавлении к указанным выше основным движениям дополнительных движений заготовки или инструмента, совершаемых по определенным правилам.

Дополнительные движения призваны уменьшить кратность поверхностного пластического деформирования металла (число прокатываний деформирующих элементов) в полюсной зоне и увеличить их на экваториальной части сферы. Вместе с тем они в большей или меньшей степени усложняют конструкцию оборудования и могут потребовать дополнительных затрат времени.

В качестве деформирующих элементов обкатников используют ролики или шарики. В случае применения роликов (цилиндрических или конических) их количество в обкатнике весьма ограничено, что неблагоприятно сказывается на качестве и производительности процесса обкатки.

Планетарное обкатывание шариками осуществляют посредством регулируемых и нерегулируемых обкатников (головок) с сепаратором, позволяющих увеличить число деформирующих тел, находящихся в контакте с заготовкой, повысить производительность и качество обработки.

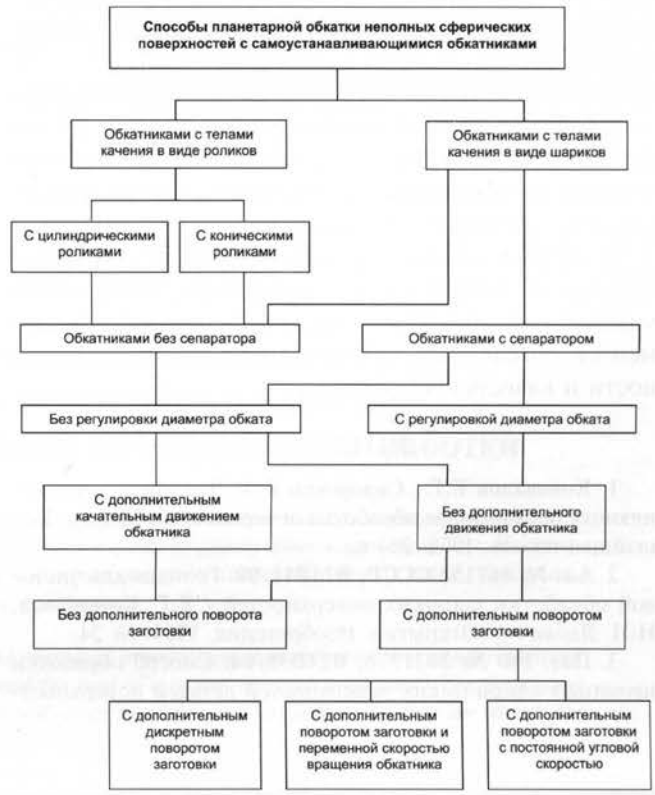


Рис. 2. Способы планетарной обкатки неполных сферических поверхностей

Конструкция регулируемых шариковых обкатников с сепараторами обеспечивает возможность изменения в небольших пределах наладочного диаметра. Вместе с тем она значительно сложнее и более трудоемка, чем конструкция нерегулируемых обкатников.

В качестве основных отличительных признаков способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей можно выделить:

1) вид деформирующих элементов (тел качения),

2) способ размещения деформирующих элементов в обкатнике,

3) возможность регулировки диаметра обката,

4) наличие и характер дополнительных движений заготовки,

5) наличие и характер дополнительных движений инструмента.

На рис. 2 приведен результат анализа и систематизации способов планетарной обкатки с самоустанавливающимися на обкатываемой сфере инструментами, являющийся отображением их развития.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие **выводы:**

1) совершенствование способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей идет по пути использования разных комбинаций основных и дополнительных движений инструмента и заготовки

для повышения равномерности пластической деформации;

2) применение дополнительных движений инструмента и заготовки сопряжено с усложнением конструкции оборудования и дополнительными затратами времени по сравнению со способами, использующими лишь основные движения;

3) следует ожидать применения нерегулируемых шариковых обкатников без сепаратора, содержащих максимально возможное число деформирующих элементов, обеспечивающих повышение производительности и качества обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А.** Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей. Минск: Вышэйшая школа, 1968. 364 с.

2. **А.с. № 167152 СССР, B24B11/00.** Головка для чистовой обработки шаровых поверхностей / Е.Г. Коновалов, Н.Н. Яцевич // Открытия. Изобретения. 1964. № 24.

3. **Пат. РФ № 2031770, B24B39/04.** Способ обработки неполных сферических поверхностей деталей поверхностным деформированием / А.М. Гаврилин, Н.Н. Самойлов // Б.И. 1995. № 9.

4. **Пат. РФ № 2103571, F16C11/06.** Способ увеличения ресурса сферического шарнира и устройство для его осуществления / А.Д. Боровлев, В.П. Недиков // Б.И. 1998. № 3.

5. **Пат. РФ № 2128574, B24B39/04.** Способ обработки поверхностным деформированием сферических поверхностей / О.С. Черненко, Г.А. Усачев, С.Г. Кудров // Б.И. 1999. № 10.

6. **Пат. РФ № 2162785, 7B24B39/04.** Способ обработки неполной сферической поверхности головки шарового пальца поверхностным деформированием / И.Г. Гунн, О.С. Железков, И.А. Михайловский // Б.И. 2001. № 4.

7. **Пат. РФ № 2188115, 7B24B39/04.** Способ обработки неполной сферической головки шарового пальца / И.А. Михайловский, И.Г. Гунн, О.С. Железков, Ю.В. Калмыков // Б.И. 2002. № 24.

8. **Пат. РФ № 2201325, 7B24B39/04.** Способ обработки неполной сферической поверхности головки шарового пальца / И.Г. Гунн, И.А. Михайловский, О.С. Железков и др. // Б.И. 2003. № 9.

9. **Пат. РФ № 2276005, B24B39/04.** Способ обкатки неполных сферических поверхностей / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Н.Н. Самойлов и др. // Б.И. 2006. № 13.

Удельная мощность источников тепла

Источник	Удельная мощность, Вт/см^2	Область применения
Газовое пламя	$10^2...3\cdot10^3$	Резка, сварка, наплавка, напыление, оплавление
Индукционный нагрев	$10^2...10^4$	Нагрев материала перед деформированием, закалка, наплавка
Процессы трения	$10^3...3\cdot10^4$	Сварка
Электроконтактный нагрев	$10^3...5\cdot10^4$	Сварка, приварка
Электрическая дуга	$10^3...10^8$	Сварка, наплавка, напыление
Плазменная струя	$10^6...10^7$	Резка, сварка, наплавка, напыление
Искровой разряд	$5\cdot10^6...8\cdot10^8$	Разрушение материала, наплавка
Электронный луч	$10^3...8\cdot10^8$	Наплавка
Непрерывный лазер	$5\cdot10^3...10^9$	Наплавка, закалка
Импульсно-периодический лазер	$10^7...10^{14}$	

П.Ю. Анкудимов, Ю.П. Анкудимов, М.М. Чаава
(Донской ГТУ, Ростов-на-Дону)

Повышение антикоррозионных свойств деталей из спеченных материалов нанесением покрытий из металлических порошков методом вибрационной обработки

Приведены результаты исследований по нанесению порошкообразных цинковых и алюминиевых покрытий на спеченные порошковые детали методом вибрационной обработки в целях их антикоррозионной защиты. Изложены теоретические предпосылки сцепления частиц порошка покрытия с поверхностью и между собой, представлены технологии покрытия и средства технологического оснащения.

The results of investigation on putting of the powder-like rink and alluminium coatings upon the powder-sintered details are given. The method of coating is vibroprocessing, and the goal of it is anticorrosion protection. The theoretical prerequisites of adhesion of powder's particles with the surface and cohesion of the particles with each other are stated, the technologies of coating and technological equipment are described.

Условия эксплуатации в закрытых помещениях с регулируемыми климатическими характеристиками, а также вне помещений, обусловливают помимо прочих повышенные по стойкости против коррозии требования к деталям. Особенно актуальны эти требования для деталей порошковой металлургии, так как их повышенная пористость увеличивает свободную поверхность металла, адсорбирующую влагу, которая "подрывает" изнутри защитные покрытия, ускоряет коррозионные процессы. Для повышения антикоррозионных свойств таких деталей применяют различные виды импрегнирования (насыщения, пропитки) поверхности материалами и составами, снижающими пористость и стойкими к действию коррозии: напыление, диффузионное насыщение, гальваническое и химическое осаждение цинка, кадмия, никеля и других металлов [1].

Технология нанесения покрытий на спеченные детали пористостью менее 10 % мало чем отличается от технологии для компактных материалов. Детали с пористостью более 10 % подвергают предварительной подготовке, заключающейся в обезжиривании, сушке, пропитке гидрофобизирующими составами, полимеризации, дробеструйной или пескоструйной обработке, что значительно усложняет технологию нанесения покрытия.

В статье приведены результаты исследований по нанесению на поверхность деталей спеченных из материалов на основе железа порошков цинка и алюминия, а также композиций на их основе методом *вибрационной обработки* (ВиО), которые закрывают поверхностные поры и создают защитный слой, предохраняющий материал основы от коррозии. Теоретические предпосылки и практика нанесения покрытий из порошкообразных материалов в процессе вибрационной обработки деталей из компактных материалов рассмотрены в работе [2], основные положения которой можно применить и для деталей порошковой металлургии.

В процессе ударного взаимодействия твердой гранулированной рабочей среды с поверхностью деталей при вибрационной обработке создаются условия для соединения частиц дисперсного порошкообразного металла, входящего в состав среды, с обрабатываемой поверхностью по механизму "холодной" сварки давлением.

Анализ современных представлений о механизмах соединения материалов в твердой фазе показывает, что в зависимости от природы соединяемых материалов и термодеформационных условий образования покрытий из порошка на спеченной металлической основе без расплавления сцепление (адгезия) последних может возникать за счет приварки частиц порошка вследствие выделения тепла при ударе, механического закрепления частиц порами и микронеровностями поверхности в отсутствие или наличии смачивания на участках контакта, действия молекулярных или атомных, в частности металлических связей.

Топохимическая реакция (соединение материалов без расплавления) проходит в три стадии [3]:

- образование физического контакта;
- активизация контактных поверхностей;
- объемное взаимодействие.

Согласно этим представлениям природа образования соединения между материалами в твердой фазе – общая. Различие заключается только в кинетике протекания отдельных стадий, определяемой условиями нагрева, характером и степенью деформационного воздействия и особенностями развития релаксационных процессов.

Большое влияние на схватываемость материалов оказывает степень их пластической деформации, которая должна быть больше некоторой минимальной величины, обеспечивающей освобождение соединяемых поверхностей от оксидных пленок, образование узлов схватывания и сохранение этих узлов после снятия нагрузки.

По данным академика А.П. Семенова алюминий является наиболее легко соединяемым металлом в твердой фазе: между собой соединяется при степени деформации 53...58 %, с медью при степени деформации 60...62 %. В то время как медь соединяется между собой при степени деформации 74...76 %, кадмий при ≈80 % деформации, олово более 80 % деформации, соединение менее пластичных материалов еще более затруднительно.

Переход от статического приложения силового воздействия к динамическому и наличие в контакте тангенциальных сил в общем случае снижают необходимую степень деформации, так как в первом случае уменьшается отвод тепла из зоны деформации, а во втором облегчается разрушение оксидных пленок.

Важнейшим фактором, влияющим на процесс соединения материалов в твердой фазе, является температура, так как она воздействует на условия образования физического контакта, чистки поверхности, образования активных центров, и, наконец, на условия сохранения соединения при снятии нагрузки.

Роль температуры не ограничивается чисто механическим снижением сопротивления материала пластическому деформированию, тем более, что механические свойства металлов и сплавов находятся в более сложной зависимости от температуры и могут иметь зоны хрупкости при средних и низких температурах. Оксидные пленки при низких температурах практически не влияют на процесс схватывания, так как необходимые для образования соединения напряжения значительно превосходят напряжения их разрушения. Однако образование активных центров резко ускоряется с повышением температуры. Так, даже при гомологических температурах ниже 0,4 (температура начала рекристаллизации) заметно перемещение вакансий и дислоцированных атомов. Таким образом, процесс нанесения порошкообразного металла на обрабатываемую вибрационной обработкой поверхность можно представить следующим образом.

На начальной стадии происходит подготовка поверхности к схватыванию с частицами порошка покрывающего материала. На этой стадии деформирование и передеформирование гранулами рабочей среды материала основы сопровождается смятием микровыступов шероховатости и активацией поверхности. Повышение температуры в зоне обработки ведет к испарению влаги, выгоранию абсорбированных органических соединений. Эта стадия заканчивается, когда на всей поверхности под ударами рабочей среды начинают возникать и снова исчезать ювенальные участки, готовые к образованию соединения. Порошок материала покрытия в этот период также претерпевает изменения. Его частицы деформируются и наклепываются.

Вторая стадия характеризуется непосредственным образованием первичного слоя покрытия. На этой стадии при совместном пластическом деформировании частиц порошка и материала основы между ними возникают прочные химические связи. Механическая энергия гранул рабочей среды, определяемая главным образом амплитудно-частотными режимами ВиО, на этой стадии должна быть больше не только пороговых значений деформации схватывания, но и величин, требуемых для передеформирования исходных микровыступов шероховатости покрываемой поверхности с целью исключить «закупорку» продуктов разрушения оксидных и органических пленок во впадинах микронеровностей.

После образования тонкого подслоя из соединений разнородных металлов (покрытие–основа) процесс вступает в третью стадию – наращивание толщины покрытия. При этом происходит соединение частиц порошка с уже нанесенным слоем, сопровождающееся пластическим оттеснением, уплотнением и сглаживанием покрытия. Рост толщины покрытия заканчивается при наступлении динамического равновесия между скоростями его наращивания и разрушения. При определенной температуре на этой стадии могут развиваться диффузионные процессы, увеличивающие толщину покрытия и прочность его сцепления с основой. Однако температурный диапазон процесса 100...200 °С, поэтому диффузионные механизмы являются вторичными.

Для реализации процесса существующее оборудование – вибрационные станки – модернизируют оснащением специальными рабочими камерами, позволяющими нагревать массу загрузки (рабочую среду и детали) до необходимых температур.

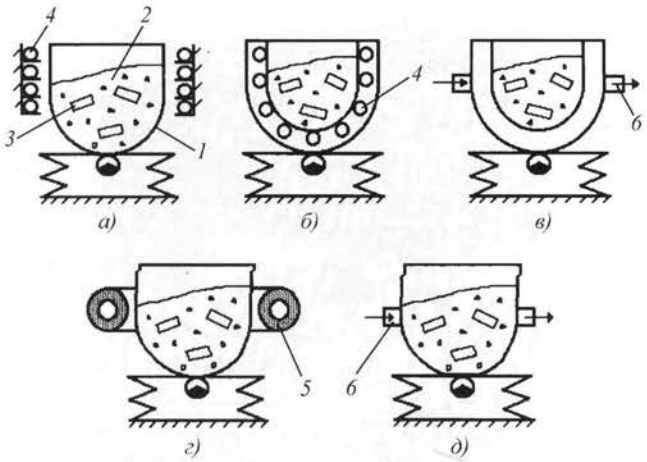


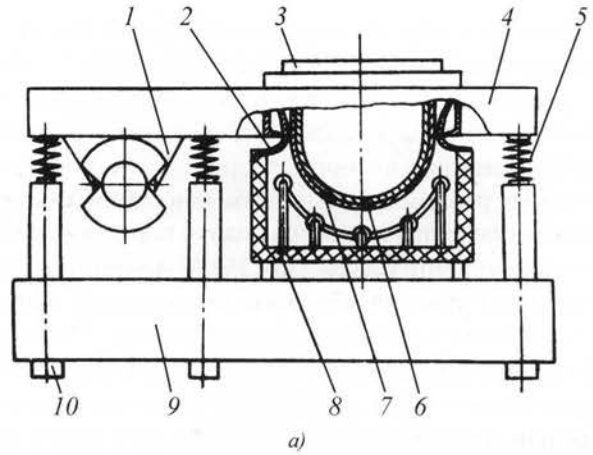
Рис. 1. Схемы нагрева рабочих камер вибрационных станков:
а – электронагревателями, установленными вне рабочей камеры; *б* – электронагревателями, установленными внутри рабочей камеры; *в* – теплоносителем, циркулирующим в рубашке рабочей камеры; *г* – индуктором; *д* – горячим воздухом, циркулирующим внутри рабочей камеры; *1* – рабочая камера; *2* – рабочая среда; *3* – обрабатываемые детали; *4* – электронагреватели; *5* – индуктор; *6* – теплоноситель

На рис. 1 представлены некоторые схемы нагрева рабочих камер, а на рис. 2 – схема и внешний вид опытно-промышленного вибрационного станка, предназначенного для совмещенного процесса вибрационной обработки с нагревом. Технические характеристики станка представлены ниже.

Технические характеристики опытно-промышленного вибрационного станка с термокамерой

Емкость рабочей камеры, дм^3	100
Амплитуда колебаний, мм	0...4
Частота колебаний, Гц	25...30
Предельная температура нагрева, °С	200
Мощность нагревателей, кВт	18
Тип электронагревателей	ТЭН
Число нагревательных элементов	5
Тип вибратора	Инерционный
Число дебалансов	4
Мощность привода, кВт	5,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	1700
ширина	1560
высота	1050

С целью экспериментально изучить особенности образования антикоррозионных металлических покрытий на спеченных порошковых материалах на основе железа (ПК6,3) были проведены исследования по изучению влияния условий ВиО на процесс получения покрытий из цинка, алюминия и композиций на их основе.



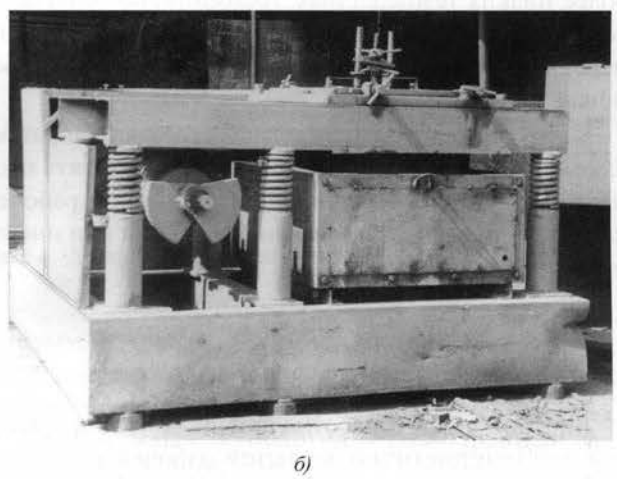


Рис. 2. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) опытно-промышленного вибрационного станка с термокамерой:
1 – вибратор; *2* – теплоизоляция; *3* – крышка; *4, 9* – верхняя и нижняя рамы; *5* – пружина; *6, 7* – съемная и стационарная рабочие камеры; *8* – нагревательное устройство; *10* – амортизатор

Сырьем для покрытий служили порошки алюминия и цинка, которые наносили на образцы с использованием лабораторной вибрационной установки в рабочей термокамере емкостью 25 дм^3. В качестве рабочей ударной среды использовали стальные шары диаметром 1,5...14 мм. Амплитудно-частотный режим: амплитуда – 1,5...3 мм и частота – 15...25 Гц.

Алюминиевое покрытие

Процесс образования покрытия начинается при температуре выше 100 °С. Ниже этой температуры отсутствуют условия для выгорания органических веществ и испарения влаги, адсорбированной поверхностью деталей и частицами порошка. Схватывания порошка с поверхностью не происходит, он измельчается, претерпевает качественные изменения и

превращается в темно-серую пыль оксидных и органических соединений алюминия. Повышение температуры до 120...150 °С приводит к получению на поверхности образцов светлого алюминиевого покрытия, толщина которого зависит от амплитудно-частотных режимов, продолжительности обработки, а также количества и способа подачи порошка в рабочую камеру. Температура 230...250 °С принципиально не изменяет условий образования покрытий, однако его поверхность становится более темной. Повышение температуры до 300 °С приводит к получению покрытий серого цвета, которые при хранении на воздухе сильно темнеют в сравнении с полученными при более низких температурах. Алюминиевое покрытие хорошо прилегает к основному металлу, копируя его неровности. Промежуточных слоев между ним и основой нет.

Следует отметить, что большая стойкость порошка алюминия к окислению позволяет осуществлять процесс нанесения покрытия без герметизации рабочей камеры и применения восстановительной или инертной газовой среды.

Цинковое покрытие

Вибрационная обработка при 20...200 °С в открытой или негерметично закрытой рабочей камере не позволяет получить качественное цинковое покрытие. Схватывание частиц цинкового покрытия с обрабатываемой поверхностью происходит в отдельных точках, между которыми остается непокрытый металл. При температуре выше 200 °С происходит интенсивное окисление порошка, делающее невозможным процесс обработки. Поэтому технология получения цинкового покрытия предусматривает обработку в герметично закрытой камере (без доступа воздуха) с добавлением в состав цинкового порошка веществ, при разложении которых от нагрева образуется восстановительная атмосфера, например хлористого аммония [4]. Это несколько усложняет технологию и делает такие покрытия сходными с диффузионными.

В связи с этим были проведены исследования по выявлению возможности получения цинк-алюминиевых покрытий вибрационной обработкой в температурном диапазоне алюминирования.

Согласно первому способу в состав алюминиевого порошка вводили цинковую пудру (30 % по объему). Механизм образования, структура такого покрытия и режимы обработки не отличаются от аналогичных при нанесении алюминия, однако частицы цинковой пудры уменьшают вредное влияние пористости алюминиевого покрытия. Микрошлиф покрытия представлен на рис. 3.

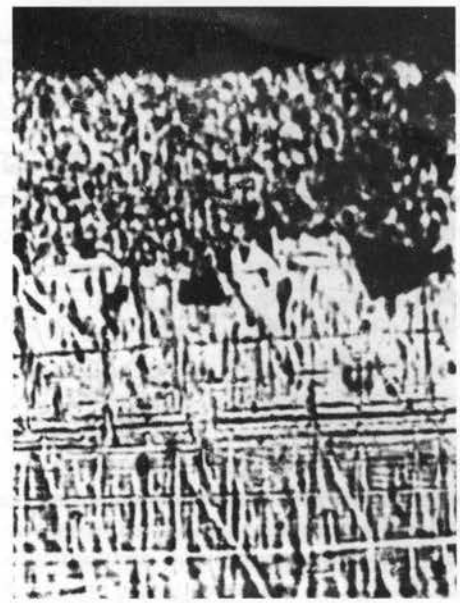


Рис. 3. Микрошлиф цинк-алюминиевого покрытия (×400)

В рамках второго способа получали двухслойные покрытия путем введения в рабочую камеру цинк-алюминиевого порошка, состоящего из 80 % цинка и 20 % алюминия, а затем после обработки в течение 60 мин – только алюминиевого порошка. Такое покрытие имеет подслой, обогащенный цинком и предотвращающий вредный контакт алюминия с железом, на котором находится верхний слой алюминия, стойкий в различных средах.

Толщина покрытий, определяемая весовым методом по увеличению массы образцов после обработки или уменьшению их массы после стравливания покрытия, а также металлографически по микрошлифам, колеблется от 3...5 до 20...30 мкм (рис. 4).

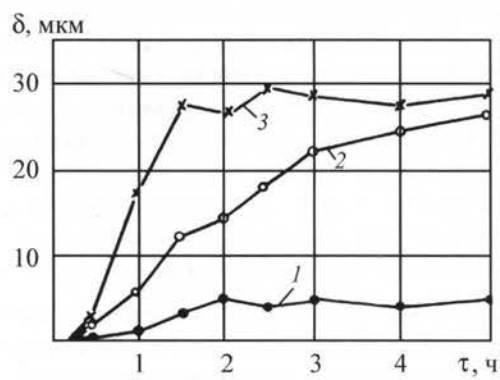


Рис. 4. Влияние продолжительности ВиО τ при температуре 150 °С на толщину цинк-алюминиевого покрытия δ:
1 – загрузка порошка разовая; *2* – подача порошка периодическая; *3* – подача порошка непрерывная

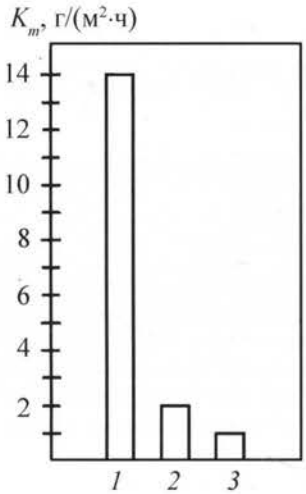


Рис. 5. Изменение весового показателя коррозии K_m спеченного материала ПК6,3 при ускоренных испытаниях на атмосферную коррозию:
1 – непокрытые образцы; *2* – образцы с цинк-алюминиевым покрытием; *3* – образцы с гальваническим цинковым покрытием

Определение толщины покрытия разными методами позволяет сделать вывод, что наиболее приемлемым из них для покрытий, полученных в процессе вибрационной обработки, является метод стравливания. Оценка толщины покрытия по привесу образцов после обработки может иметь большую погрешность вследствие уменьшения их массы на первой стадии образования покрытий.

Исследование коррозии образцов из спеченного порошкового материала на основе железа (ПК6,3) с нанесенным на их поверхность порошков цинка и алюминия по описанной технологии проводили в воде, содержащей ионы хлора (3%-ный раствор NaCl) по стандартной методике при периодическом погружении (ускоренные испытания на атмосферную коррозию по ГОСТ 9.012–73).

После испытания образцы просушивали и взвешивали. Коррозионная стойкость оценивалась по привесу образцов. Очистка плотно сцепленных продуктов коррозии или их стравливание в реактивах не позволяет оценить степень коррозии вследствие ее проникновения в поры.

На рис. 5 представлено изменение весового показателя коррозии K_m покрытых и непокрытых образцов, показывающее значительное снижение скорости коррозионных процессов у образцов с цинк-алюминиевым покрытием, приближающееся к скорости коррозии образцов после гальванического цинкования.

Рис. 6. Детали порошковой металлургии

Предлагаемая технология – совмещенный процесс вибрационной обработки с импрегнированием поверхности порошками цинка и алюминия – позволяет не только повысить коррозионную стойкость деталей порошковой металлургии, но и уплотнить их поверхностный слой, уменьшив его пористость и повысив прочностные свойства.

Процесс опробован на спеченных порошковых изделиях приборостроения, в автомобильной промышленности, постоянных магнитах (рис. 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Порошковая** металлургия. Спеченные и композиционные материалы / под ред. В. Шатта: пер. с нем. М.: Металлургия, 1983. 520 с.

2. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д: Изд. центр ДГТУ, 1998. 624 с.

3. **Каракозов Э.С.** Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.

4. **Анкудимов Ю.П., Анкудимов П.Ю., Калмыкова Н.А.** Вибродеформационная активация процесса диффузионного цинкования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 9. С. 18–22.

УДК 621.9.048

Ю.Р. Копылов *(Воронежский ГТУ)*

Трехмерная оценка формирования качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении

Изложены современные представления о равномерности формирования параметров качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении деталей сложной формы с закреплением для конечного множества элементарных площадок и определением координат их трехмерного расположения.

Modern representations about uniformity of formation of parameters of quality of a superficial layer are stated at vibroimpact strengthening of details of complex form with fastening for final set of elementary sites of a detail and with definition of coordinates of their three-dimensional arrangement.

В практике современного машиностроения для метрологической оценки параметров качества поверхностного слоя при механической обработке лезвийным или абразивным кинематически закрепленным инструментом используют усредненные значения параметров шероховатости, твердости и других, полученные в результате нескольких измерений в сечениях детали [1].

При конструировании дорогостоящих крупногабаритных деталей с ограничением массы и проектировании технологии их упрочнения возникает необходимость теоретической оценки параметров качества, в том числе на отдельных участках детали, испытывающих наибольшие эксплуатационные нагрузки, с указанием координат их точного расположения до экспериментальной отработки технологии в производстве в целях предотвращения брака. К ним относятся крупногабаритные дорогостоящие детали типа лонжеронов и нервюр крыла, балок шасси и шпангоутов фюзеляжа и другие, изготовленные из легированных стальных, титановых и алюминиевых высокопрочных сплавов.

В статье [2] приведены некоторые результаты математического моделирования распределения параметров качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении силового кронштейна с расположением упрочняемых поверхностей в трех плоскостях (рис. 1) с указанием координат расположения проблемных участков с пониженной интенсивностью упрочнения.

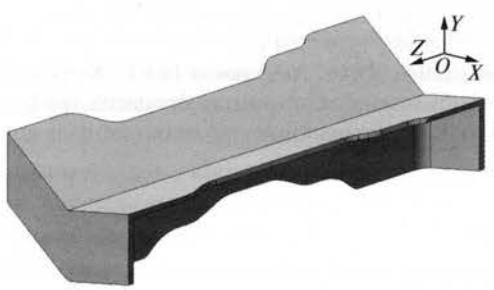


Рис. 1. Модель силового кронштейна

Актуальность этой проблемы и трудность ее решения становятся особенно очевидными, если учитывать, что при виброударном упрочнении деталей отсутствует жесткая кинематическая связь инструментальной среды, состоящей из множества интенсивно вибрирующих частиц размером 5...20 мм в технологической жидкости, со станком и деталью.

Математическое моделирование процесса виброударного упрочнения силового кронштейна с круговой траекторией колебаний, расположенной в плоскости XOY (см. рис. 1) с амплитудой $A_x = A_y = 0{,}5$ см, частотой $\omega = 131{,}88$ с$^{-1}$ при жестком закреплении в контейнере показывает следующее. Поверхности, расположенные перпендикулярно траектории колебаний детали (полки, перемычки) с контейнером и инструментальной средой, упрочняются удовлетворительно: средние значения остаточных напряжений первого рода $\sigma_{-0} = 200...300$ МПа; средние значения параметра шероховатости $Rz = 10{,}2...11{,}8$ мкм (рис. 2).

На рис. 2: амплитуда $A_x = A_y = 0{,}5$ см, частота $\omega = 131{,}88$ с$^{-1}$, материал детали – сталь 30ХГСНА, стальные шарики из ШХ15 диаметром 5 мм, коэффициент заполнения контейнера 0,75, время упрочнения 60 мин, экран установлен над деталью параллельно плоскости XOZ на расстоянии 50...70 мм.

Поверхности, расположенные вдоль траектории колебаний (боковые стенки) упрочняются недостаточно: $\sigma_{-0} = 10...20$ МПа, параметр шероховатости здесь максимален $Rz = 15...23$ мкм при исходной шероховатости $Rz_{исх} = 25$ мкм.

Наименьшие $\sigma_{-0j} = 100...150$ МПа формируются на участках 225–234, 262–280, 300–305, 369–373 (см. рис. 2); в окрестности этих участков возникают наибольшие экстремальные значения $\sigma_{-0j} = 400...500$ МПа. На этих же участках наблюдаются наибольшие значения параметров шероховатости и возникает опасность возникновения усталостных трещин в связи с наличи-

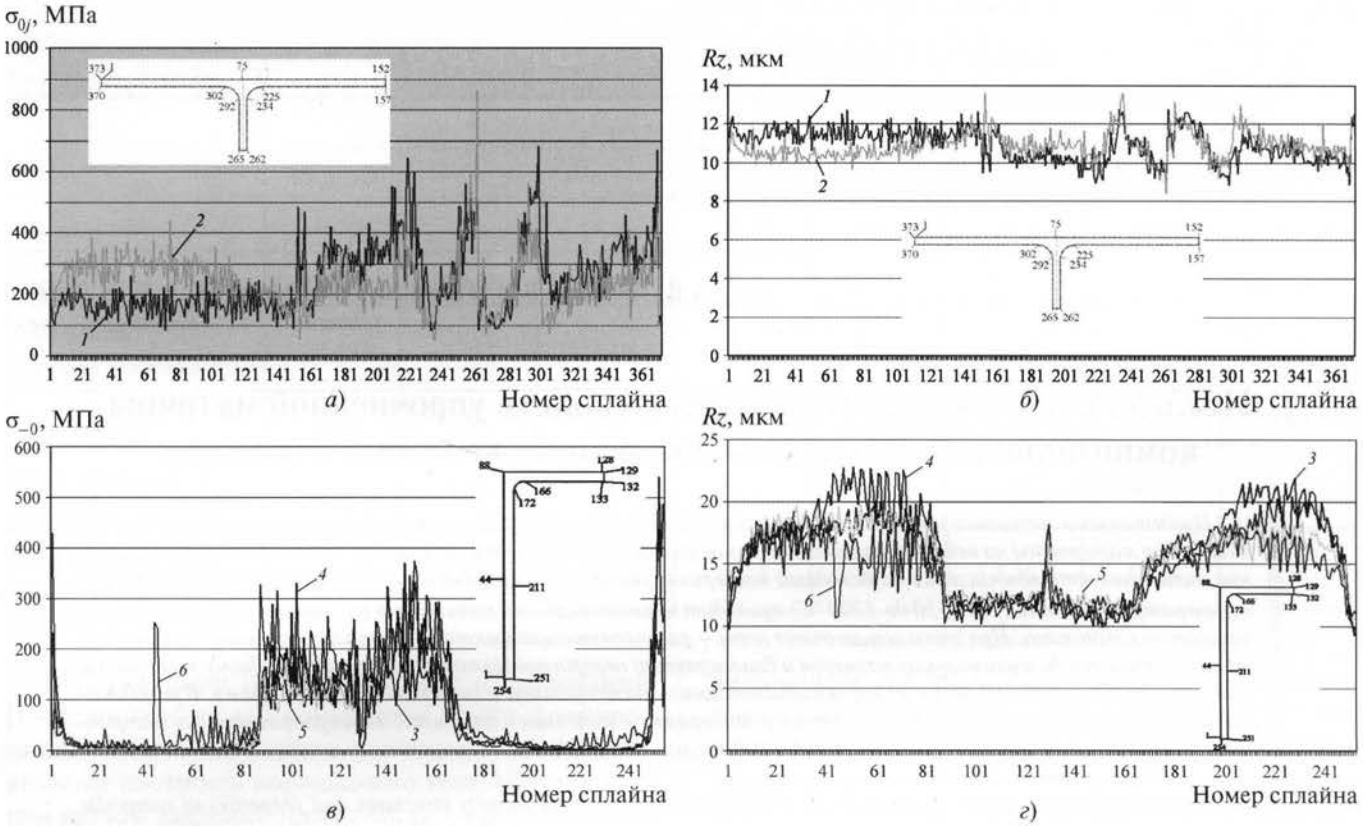


Рис. 2. График равномерности формирования остаточных напряжений первого рода σ_{0j} и σ_{-0} и среднеарифметической высоты микронеровностей Rz_j в сечениях параллельно плоскости *XOY* (*а*, *б*) (V-образный профиль детали условно не показан) и плоскости *XOZ* (*в*, *г*) силового кронштейна при круговой траектории колебаний, расположенной в плоскости *XOY*:
1 – без экрана; *2* – с экраном; *3–5* – при $h_{ис}$ = 50, 75 и 100 мм соответственно; *6* – в контейнере U-образной формы

ем концентраторов в виде перепадов остаточных напряжений и шероховатости.

Необходимо отметить хорошее совпадение результатов математического моделирования с натурным экспериментом, который подтвердил расположение и координаты участков детали, расположенных вдоль траектории колебаний, с низкой интенсивностью упрочнения.

На рис. 2, *в*, *г* представлены графические зависимости изменения остаточных напряжений и шероховатости для виброударного упрочнения в эквидистантном по форме детали контейнере с различной толщиной слоя вибрирующей инструментальной среды $h_{ис}$: 50, 75, 100 мм и в контейнере U-образной формы. Контейнер U-образной формы не дает заметных преимуществ в достижении технологических параметров качества поверхностного слоя, однако имеет в 1,5...2 раза бóльшую конструктивную массу и в 2...3 раза бóльшую массу инструментальной среды.

Для повышения интенсивности и равномерности упрочнения на проблемных участках при жестком закреплении детали в контейнере использовали установку силовых экранов на расстоянии 10–15 диаметров частиц инструментальной среды. Пассивные экраны повышают равномерность указанных параметров не более чем на 20...25 %. Активные вибрирующие экраны с направлением колебаний на проблемные участки детали повышают равномерность и интенсивность упрочнения до 40...47 %. Равномерное вращение с реверсом деталей в интенсивно вибрирующей инструментальной среде максимально повышает равномерность упрочнения до 60...80 %. Однако длинномерные детали (лонжероны и нервюры крыла, балки шасси и шпангоуты фюзеляжа, рельсы закрылков) вращать в процессе виброударного упрочнения невозможно.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов виброударного упрочнения силового кронштейна показывает, что расхождение не превышает 40...50 %. Ранее разработанные расчетные методы даже для деталей более простых форм имеют более значительное расхождение – до 140...200 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: ВГИМВД, 1999. 386 с.

2. **Копылов А.Ю.** Численное моделирование погрешностей виброударного упрочнения деталей // Техника машиностроения. 2004. № 5. С. 16–19.

УДК 519.6:621.762.5

А.В. Люлько, В.В. Гриценко, Чан Мань Тунг, В.Г. Люлько
(Донской ГТУ, Ростов-на-Дону)

Исследование поровой структуры и свойств упрочненной матрицы композиционных материалов на основе железных порошков

Представлены методика и результаты анализа условий формирования поровой структуры и свойств композиционных материалов на основе железных порошков разного производства. Показано, что постепенное повышение интенсивности воздействия на исходный материал (увеличение давления прессования от 250 до 700 МПа и температуры спекания от 1150 до 1200 °С) приводит к закономерному повышению плотности и прочности порошкового композита. При этом остаточные поры – разупрочняющий фактор – не только уменьшаются в объеме, но и дробятся до минимальных размеров и благоприятно перераспределяются по сечению и объему материала, что оценивают статистическими характеристиками – гистограммой и численными параметрами. В результате повышаются конечные свойства спеченного материала – конечная плотность, электропроводность матричного материала и материала с легирующими добавками меди 1,5...5,0 %.

The technique and results of the analysis of conditions of formation porosity structures and properties of composite materials on the different manufacture iron powders basis is submitted. It is shown, that gradual increase of intensity of influence on an initial material as increase of level pressing from 250 up to 700 MPa and from 1150 up to 1200 °C results temperatures of sintering in natural increase of density and durability of powder composite. Thus residual time – softening factor – undergo not only corresponding volumetric reduction of their share, but also occurs their crushing till the minimal sizes and their favorable redistribution on section and volume of the material, estimated by statistical characteristics – the histogram and numerical parameters. It is poured out in increase of final properties sintered material – final density, electric conductivity as matrix material, including with alloying additives of copper of 1,5...5,0 %.

Введение, задача

Композиционные порошковые материалы находят все большее применение для различных отраслей [1, 2]. Относительно новой тенденцией их проектирования и использования является создание некоторой матрицы – универсальной основы, базиса, матричного материала – для последующего модифицирования и придания требуемых функциональных свойств путем упрочнения, легирования, термообработки с введением и фиксированием мезо-, микро- и наноструктурных подкомпонентов [3, 4]. В связи с этим интерес представляют условия формирования и достигаемый уровень свойств порошковой матрицы при планомерном воздействии технологическими параметрами (в рассматриваемом случае давлением прессования и температурой спекания, а также качеством выбранных исходных железных порошков).

Определение влияния параметров прессования и спекания на формирование поровой структуры и свойств материала явилось задачей настоящего исследования, направленного на получение универсального матричного материала на основе железных порошков как основы конструкционных, антифрикционных, электротехнических и других изделий.

Методика

При изготовлении порошковых материалов по технологии однократного прессования-спекания применяли высококачественные российские и шведские железные порошки: порошок ПЖВ2.160.26, восстановленный на Сулинском металлургическом заводе (Кр. Сулин, Ростовской обл.) и модифицированный (Донской ГТУ) по технологии вибрирующего слоя, и распыленный порошок ASC100.29 шведской фирмы Hoganas AB. Эти порошки явились базой для последующего получения легированной спеченной стали и функциональных композиционных материалов и изделий. Кроме того, необходимо предусматривать сравнительную характеристику получаемых материалов с известными аналогами [1–3].

Таблица 1

Параметры (средние значения) поровых структур спеченных материалов, полученных в разных условиях

Параметр	Микроструктура							
	Рис. 1, *а*	Рис. 1, *б*	Рис. 2, *а*	Рис. 2, *б*	Рис. 2, *в*	Рис. 2, *г*	Рис. 3, *а*	Рис. 3, *б*
Площадь поры, мкм^2	1467,5	95,4	54,16	110,22	51,51	42,1	89,55	23,4
Периметр поры, мкм	210,95	38,12	26,64	38,29	27,47	23,11	34,8	15,36
Угол ориентации большой оси поры, °	63,33	72,57	78,19	70,43	80,52	64,92	67,86	64,97
Число Эйлера	–0,26	0,97	0,98	0,99	0,97	0,99	0,98	0,99
Диаметр вписанной окружности, мкм	13,66	7,73	6	9,54	6,03	5,43	8,71	3,83
Диаметр описанной окружности, мкм	67,15	12,13	8,48	12,19	8,74	7,36	11,08	4,89

Как уже было отмечено в ряде исследований [1–3], универсальным показателем этапов формирования и изменения свойств порошковых композитов является плотность порошкового тела, полученного при разном давлении прессования (характеризуется уплотняемостью в соответствии с ГОСТ и Евростандартом ASTM), и плотность после спекания, что также дает возможность оценить изменение размеров (усадку или рост композита), степень воздействия температуры и времени спекания на структуру, свойства, а также скорректировать их (желательно уменьшить значения).

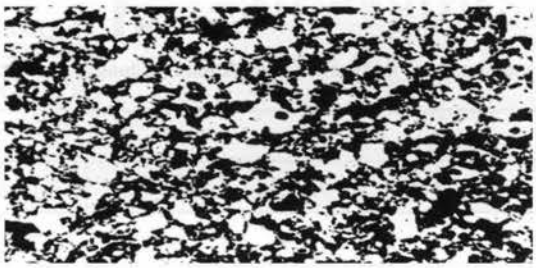
Исследования в соответствии с известными методиками [1] проводили на образцах диаметром 11,28×10 и размером 100×8×6 мм, полученных прессованием композитов из указанных порошков: ASC100.29+0,8HWC (чистое железо+пластификатор "Hoch wax" (Германия), улучшающий прессование и выгорающий при спекании). Проводили сравнение с результатами экспериментальных порошков ПЖВ2.160.26 (производства ЗАО "СтаКС" и ДГТУ) и серийного ПЖ3.160.26 с 0,8 % пластификатора (стеарата цинка), а также устанавливали корреляцию с легированным медью материалом ASC100.29+5 % CuFM+0,5 % HWC и ПЖВ2.160.26+(1,5...5,0) % Cu.

Статистические характеристики поровой структуры по сечению материала (микрошлифам) снимали по принципиальным основам методики стереометрической металлографии по С.А. Салтыкову [5] и квантометрического анализа, но в автоматическом режиме компьютерной обработки. Цифровые фотоизображения шлифов получали на металлографическом микроскопе LEITZ WETZLAR MM6 с электронной видеоприставкой MicroMotion, и оригинальным программным обеспечением PROIMAGE. При этом микроскопическое изображение предварительно оцифровывали при фиксированном увеличении, а видеостатобработку снимков проводили с помощью современного программного пакета математической обработки и анализа ImageC5.00 (IMTRONIC GmbH, AQUINTO AG) в Венском техническом университете (Австрия). Определяли параметры зерен: номер зерна по ASTM-классификатору, размер зерна, площадь зерна и другие статистические характеристики.

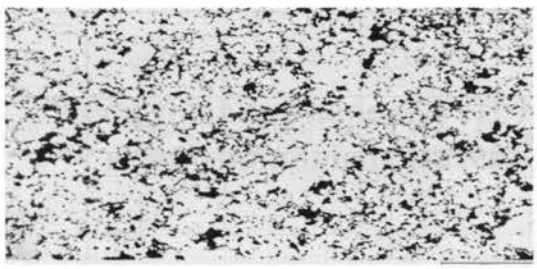
Результаты

Динамика формирования поровой структуры и ее статистические характеристики у спеченных материалов на основе железных порошков ASC100.29 и ПЖВ2.160.26, спрессованных при разном давлении прессования (250...700 МПа) и спеченных при температурах 1120, 1250 и 1300 °С представлены на рис. 1–3 и в табл. 1. Результаты изменения плотности и удельного электросопротивления матричного материала после спекания представлены на рис. 4 и в табл. 2 дискретных значений.

Высокотехнологичные исходные железные порошки, каковыми являются российские и шведские железные порошки типа ПЖВ2.160.26 и ASC100.29, в процессе подготовки к формованию неизбежно претерпевают не всегда благоприятные изменения. Если введение порошкообразного пластификатора – стеарата цинка, "Hoch wax", "Kenolube P1" и других [2] – по определению призваны повысить уплотняемость (хотя может ухудшиться текучесть шихты), то легиро-



а)



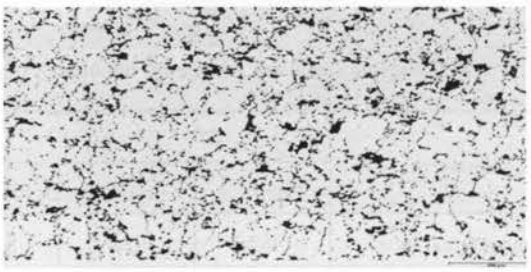
б)

Рис. 1. Поровая структура спеченных материалов на основе порошка ASC100.29 при давлении прессования 250 (*а*) и 400 МПа (*б*), температура спекания 1120 °С, время спекания 1 ч, среда спекания – H_2

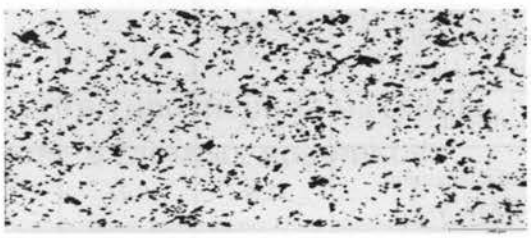
вание снижает уплотняемость, причем обратно пропорционально доле присадки. Поэтому чрезмерное и в виде грубодисперсных присадок легирование может затруднить формоизменение порошкового композита, особенно на конечных стадиях уплотнения (пористость менее 10 %) с соответствующим формированием макро- и микроструктуры. И в этом контексте необходимо выявить конечную поровую структуру матричного композита, чтобы в дальнейшем рационально, например, на основе геометрического подобия пор и частиц присадок, разместить в ней легирующие элементы.

Однокомпонентные порошки с пластификатором в соответствии с известной моделью формования Р. Зеелига [6] образуют в спрессованном виде двухфазные композиты – металл и поры. Объем и вид последних (см. рис. 1–3) в данном варианте композиции являются определяющими, что можно проследить по изменению свойств сырых и спеченных материалов. А именно, плотность прессованных композитов закономерно растет с увеличением прикладываемого давления прессования (пористость альтернативно снижается).

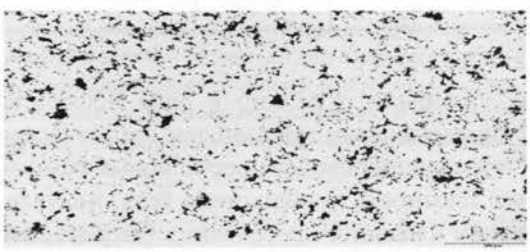
Уплотняемость композиции составляет 7,25 г/см^3 при давлении прессования 700 МПа и является максимальной и достаточной для рассматриваемого матричного материала, что можно считать весьма благоприятным условием для получения в дальнейшем



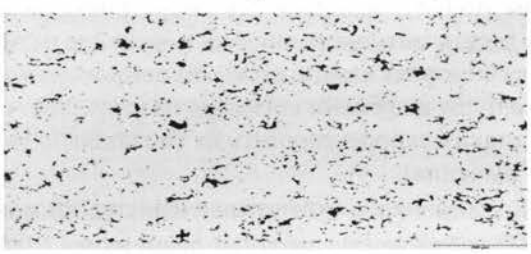
а)



б)



в)

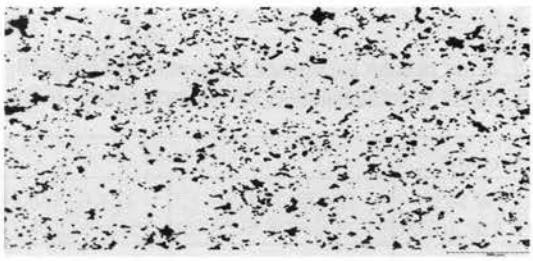


г)

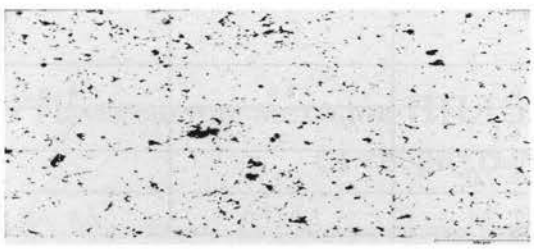
Рис. 2. Поровая структура при разных температурах спекания и одинаковом (*а*, *б*) и различном (*в*, *г*) давлении прессования материалов на основе порошка ASC100.29, время спекания 1 ч, среда спекания H_2:
а – 1120 °С, 500 МПа; *б* – 1250 °С, 500 МПа; *г* – 1120 °С, 600 МПа; *в* – 1250 °С, 700 МПа

конструкционных и функциональных материалов с легирующими элементами повышенной плотности.

Размер обособленных пор уменьшается от 6 до 3 мкм в рассмотренном диапазоне давления. Интересен также фактор изменения ориентации большой оси каждой поры по отношению к направлению давления прессования. При малом давлении (250 и 400 МПа) угол ориентации составляет 50...60°, а при повышенном давлении – 75...90°, т.е. возможно расположение пор почти поперек направления прессо-



а)



б)

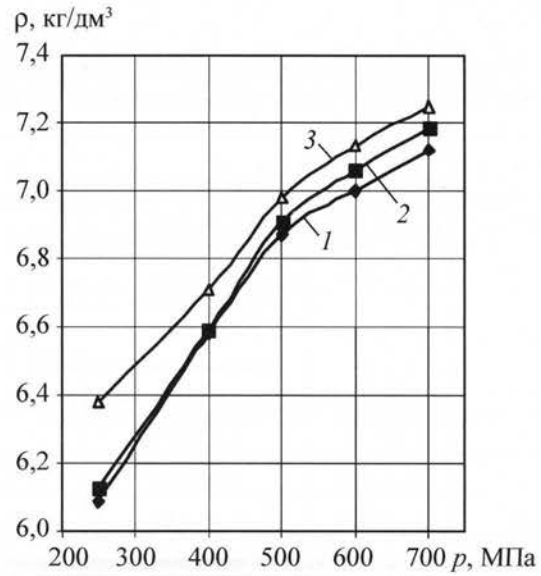
Рис. 3. Поровая структура при температурах спекания 1120 (*а*) и 1250 °С (*б*) и давлении прессования 400 (*а*) и 700 МПа (*б*) материалов на основе порошка ПЖ2.160.26, время спекания 1 ч, среда спекания H_2

вания, их вытягивание и дробление на более мелкие и закрытые, что в полной мере соответствует выдвинутой гипотезе. Наличие мелких, округлых и обособленных пор как в сыром, так и в спеченном материале является характеристикой достижения требуемого уровня консолидации и упрочнения материала матрицы.

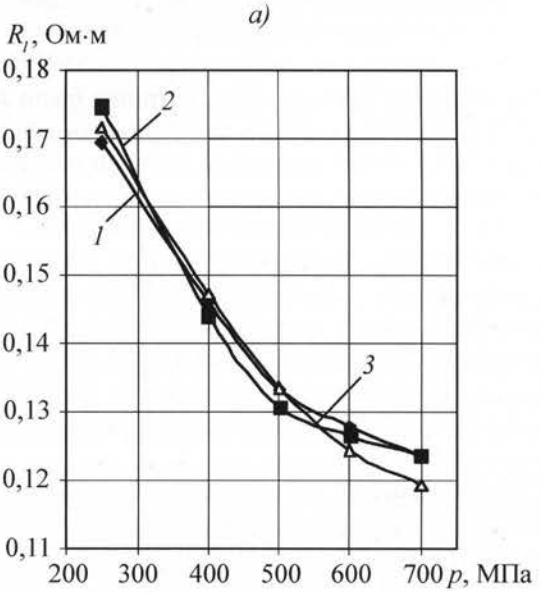
Изменяются также вид пор и характер их распределения по сечению. Влияние повышения температуры спекания также является благоприятным с точки зрения уменьшения общей пористости и конфигурации пор. Поры становятся меньше по размеру (до 2 мкм) и, судя по углу ориентации, равному ≈60°, (т.е. поры стали ближе к сферическим) не имеют преимущественной ориентации.

Аналогичные закономерности формирования проявляет композит на основе железного порошка ПЖВ2.160.26 (рис. 3), но отличие состоит в несколько бóльших порах, что связано с худшей уплотняемостью и наличием внутричастичной пористости, характерной для восстановленных порошков с губчатой структурой частиц.

Очевидным фактором для обоих типов железных порошков является уменьшение не только общей пористости с ростом давления прессования, но и дробление протяженных пор на более мелкие, округлые и уменьшение среднего размера пор вплоть до минимально различимых – порядка 1 мкм для порошка ASC100.29. Порошок ПЖВ2.160.26 из-за наличия не-



а)



б)

Рис. 4. Зависимости плотности ρ (*а*) и удельного электрического сопротивления R_l (*б*) спеченного композита на основе железа от давления прессования *P* и температуры спекания:
1 – 1120 °С; *2* – 1250 °С; *3* – 1300 °С

сколько большей доли оксидов (содержание кислорода выше в нем на 0,1...0,15 %) и потому более низкой уплотняемости (см. табл. 2) приобретает аналогичные порошку ASC100.29 характеристики структуры при более высоком (на один порядок) давлении прессования. Например, размер пор 10...12 мкм у композита из порошка ПЖВ2.160.26 наблюдается при давлении 700 МПа (см. рис. 3), а у ASC100.29 – при 600 МПа. Это хорошо подтверждается статистическими данными по поровой структуре (см. табл. 1).

Таблица 2

Изменение плотности (кг/дм^3) после спекания порошковых композитов на основе железных порошков (ASC100.29; ПЖВ2.160.26+0,8 % Zn–St), спрессованных при давлении 150...700 МПа и легированных мелкодисперсной медью

Давление прессования, МПа	Плотность композита					
	ASC100.29+ +0,5 % HWC	ASC100.29+5 % Cu+ +0,5 % HWC	ПЖВ2.160.26+ +0,8 % Zn–St	ПЖВ2.160.26+ +1,5Cu+0,8 % Zn–St	ПЖВ2.160.26+ +2,5Cu+0,8 % Zn–St	ПЖВ2.160.26+ +5Cu+0,8 % Zn–St
150	5,87/0,02	5,59/0,02	–	–	–	–
250	6,29/0,02	6,08/0,02	6,1 (при 200 МПа)	–	–	–
400	6,84/0,01	6,61/0,01	6,6...6,8	6,7	6,6	6,4...6,5
500	7,06/0,01	6,81/0,02	–	6,8	–	–
600	7,21/0,01	6,96/0,01	6,9...7,0	6,9...7,0	–	–
700	7,30/0,01	7,05/0,01	7,1...7,2	7,0...7,1	6,9...7,0	6,8...6,9

Примечание. Через косую черту даны среднее значение и стандартное отклонение плотности.

Для создания качественной матрицы были изготовлены легированные медью композиты системы Fe–Cu и Fe/Cu–Cu с введением в состав матричного Fe-материала мелкодисперсной меди марки CuFM 2...8 % (80 % частиц размером менее 10 мкм, т.е. частицы соизмеримы с порами матрицы, полученной при давлении прессования 600...700 МПа) и с осаждением в вибрирующем слое на поверхность индивидуальных частиц исходного порошка ПЖ2.160.26 сверхтонких (1...3 мкм) точечных включений меди [7–9] в количестве 1,5...2,5 % с получением частиц-микрокомпозитов Fe/Cu.

Изготовленные по той же технологии и при тех же параметрах однократного прессования-спекания железомедные композиты проявили хорошие технологические и функциональные свойства – высокую прессуемость, пониженное электросопротивление (см. рис. 4, табл. 1), что указывает на благоприятное формирование межчастичных контактов с соответствующим упрочнением композита, который по своим свойствам не уступает материалам смеси аналогичного состава [1], но более технологичен и экономичен в производстве.

Вывод

Таким образом, полученные результаты указывают на необходимость и возможность целенаправленной проработки матричного материала по критериям его структуры и прочности как эффективного базиса для проектирования и реализации на его основе разнообразных функциональных композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Металлические** порошки и порошковые материалы: справочник / Б.Н. Бабич, Е.В. Вершинина, В.Г. Люлько и др., под ред. проф. Ю.В. Левинского. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 520 с.

2. **Design** and Capabilities of PM Components and Materials // Powder metallurgy: proc. of training courses. Aachen, Germany 3–11 Sept. 2005. EPMA, 2005. 722 P.

3. **Новые** материалы и технологии. Порошковая металлургия, защитные покрытия, сварка // Сб. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. ИПМ НАНБ. Минск, 2006. 320 с.

4. **Левинский Ю.В.** Внутреннеокисленные и внутреннеазотированные наноматериалы. М.: Экомет, 2007. 400 с.

5. **Салтыков С.А.** Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1975. 273 с.

6. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. М.: МИСиС, 2001. Т. 1. 368 с.

7. **Развитие** метода термосинтеза в вибрирующем слое композиционных порошков с наноразмерными эффектами / В.Г. Люлько, А.Г. Краснобаев, А.В. Люлько и др. // Сб. докл. науч.-техн. конф. ПМ–2005. Минск, 2005. С. 111–116.

8. **Развитие** научных основ и технологии термосинтеза композиционных порошков в вибрирующем слое / В.Г. Люлько, С.А. Хлебунов, Ю.А. Гордин и др. // Вестник ДГТУ. 2003. Т. 3. № 3. С. 362–371.

9. **Thermosynthesis** in vibrating layer of composite powders for maintenance nanodimensions effects in powder materials / V.G. Lyulko, A.H. Krasnobaev et. al. // Powder Metallurgy Congress 2005: Proc. of PM 2005 Congress. Section: Nanotechnology workshop, 2–5 Oct. Prague, 2005. Vol. 3. P. 395–400.

УДК 621.787.4

А.Н. Исаев, Ю.В. Любимов *(Ростовская государственная академия сельскохозяйственного машиностроения)*

Применение методов ППД для формирования составных цилиндров со свернутыми из пластин втулками

Рассмотрены вопросы формирования составных цилиндров со свернутыми из пластин втулками. Обосновано применение методов дорнования и раскатывания отверстий для соединения свернутых втулок с корпусом. Предложены конструкции пластин для свертывания втулок и методика их расчета. Теоретически и экспериментально определена надежность соединения свернутой втулки с корпусом в зависимости от технологических режимов и геометрических параметров соединяемых элементов изделия.

Is given an account of moulding of compound cylinders with bushing formed from rolled up plates. The application of mandrelling methods and rolling out the holes to connect the rolled up bushing with the frame is substantiated. Constructions of plates to roll up bushing and methods of their calculation are suggested. Theoretically and experimentally are determined the reliability of the junction between the rolled up bushing and the frame, which is dependent on technological conditions and geometrical parameters of the composing elements of the unit that are to be connected.

Введение

В машиностроительной практике широко применяют изделия типа цилиндров, работающие в условиях повышенных нагрузок в агрессивных средах. К ним относятся, например, силовые гидродвигатели, применяемые в приводах исполнительных механизмов металлорежущих станков, гидропрессов, сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин. Корпус силового цилиндра обычно изготовляется из бесшовной (монолитной) стальной трубы, толщина стенки которой определяется из условий прочности и жесткости. Обычное увеличение толщины стенки в целях повышения рабочего давления в цилиндре зачастую не может обеспечить необходимую прочность, поэтому для повышения несущей способности подобных изделий в ответственных случаях применяют составные (многослойные) заготовки [1, 2].

Внутренний элемент составного цилиндра (втулка) может быть предварительно выполнен из пластины с заранее нанесенными на поверхность неровностями (макрорельефом). Свернутая из листа, полосы втулка позволяет не только повысить прочность цилиндра, но и придать особые специфические свойства его рабочей поверхности. С помощью тонкой пластины практически без изменения конструкции можно существенно увеличить поверхностную износостойкость, изменить антифрикционные, теплоизолирующие, теплоотводящие, электроизолирующие, антикоррозионные и прочие свойства изделия. Пластина может быть изготовлена из дорогостоящего материала, а корпус – из более дешевого материала, обеспечивающего требуемую прочность изделия.

Соединение свернутой втулки с корпусом наиболее просто может быть осуществлено деформационными методами, основанными на технологиях *поверхностного пластического деформирования* (ППД), например, статическим и ротационным дорнованием (раскатыванием) отверстия. Отдельные части составного цилиндра предварительно совмещают по свободной посадке с зазором, который устраняется в процессе радиального смещения деформируемого материала втулки. Наличие пластической составляющей деформации попутно обеспечивает упрочнение соединяемых материалов, в стенках составного цилиндра образуются внутренние силы (напряжения), способствующие увеличению его несущей способности. Расчеты показывают, что повышение сопротивления составного цилиндра внутреннему давлению за счет образования напряжения в его стенках составляет не менее 15 % [2].

Методы ППД для формообразования составного цилиндра

Образование составного цилиндра производится дорнованием или раскатыванием. Дорнование обес-

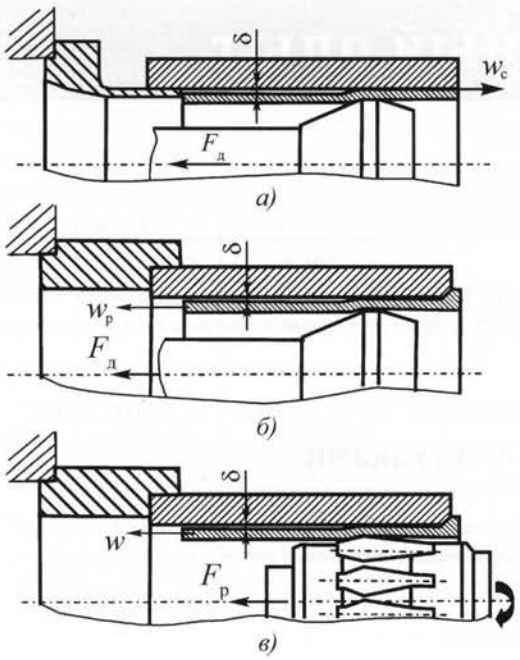


Рис. 1. Формирование составной трубы дорнованием со сжатием (*а*) и растяжением (*б*) и раскатыванием (*в*) отверстия свернутой втулки:
$F_д$ и $F_р$ – силы дорнования и раскатывания

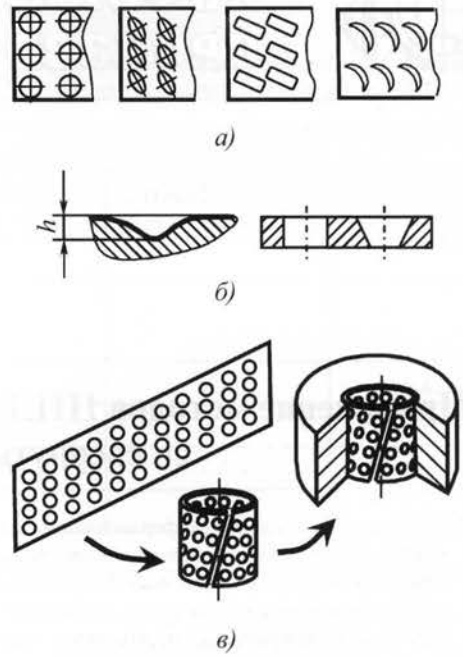


Рис. 2. Типы (*а*) и формы (*б*) смазочных карманов на заготовке и схема установки свернутой втулки в изделие перед дорнованием (*в*)

печивает требуемое качество соединения при сравнительно небольших энергетических затратах на обычных протяжных станках и прессах.

Основные схемы дорнования, используемые для изготовления составных цилиндров, приведены на рис. 1. Свернутая из пластины втулка устанавливается в отверстие корпуса цилиндра с зазором δ. При перемещении через отверстие конусного дорна под действием приложенной к нему силы $F_д$ происходит радиальное смещение материала втулки, увеличиваются ее внутренний и наружный диаметры, утоняется стенка и устраняется радиальный зазор в соединении. Одновременно благодаря тангенциальному течению материала втулки уменьшается и закрывается боковой зазор. После прохода дорна благодаря силам упругости, возникающим во внутреннем и наружном элементах составного цилиндра, обеспечивается необходимая плотность соединения.

Дорнование может быть осуществлено по схемам сжатия (рис. 1, *а*) или растяжения (рис. 1, *б*). В первом случае втулка, базирующаяся на специальном пружинном кольце, подвергается раздаче до соприкосновения с поверхностью отверстия корпуса, причем корпус в процессе дорнования перемещается вместе с деформируемым металлом вставки в направлении w_c. Во втором случае втулка должна иметь специальный буртик, образованный, например, методом развальцовки. В процессе дорнования корпус остается на месте, деформируемый металл втулки свободно перемещается в направлении $w_р$. Предпочтение следует отдавать схеме на рис. 1, *б*, как более технологичной, обеспечивающей меньшие усилия деформирования и, следовательно, минимальные затраты энергии на осуществление процесса.

Тонкостенные втулки толщиной 0,5...1,5 мм целесообразно раскатывать в отверстии корпуса шариковыми или роликовыми (рис. 1, *в*) ротационными дорнами (раскатниками).

Исходные заготовки для свертывания втулок

Заготовки (пластины для сворачивания втулок) могут иметь сквозные отверстия (круглого, прямоугольного или фасонного профиля), пересекающиеся и непересекающиеся пазы, рифления и т.п., масляные карманы, позволяющие существенно повысить износостойкость поверхности (рис. 2).

Для изготовления свернутых втулок применимы любые деформируемые материалы: стали углеродистые качественные марок 10, 20, 30 и 45 (ГОСТ 1050–88); легированные марок 20Х и 40Х (ГОСТ 4543–71); латунь марки ЛС59-1 (ГОСТ 15527–2004); бронза марки БрОЦС4-4-4 (ГОСТ 5017–2006). Исходными заготовками для втулок являются полосовой (листовой) прокат, например, тонколистовая углеродистая качественная (ГОСТ 16523–97) и легированная (ТУ 14-1-4118–86) стали; полоса латунная

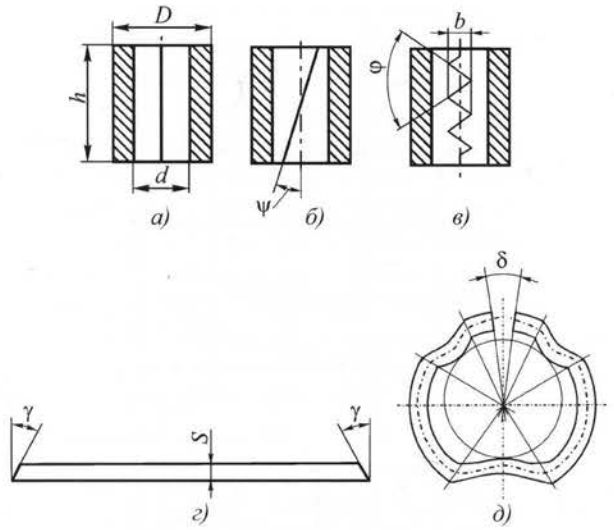


Рис. 3. Типы свернутых втулок со стыком:
а – прямым; *б* – винтообразным; *в* – зубчатым; *г* – развертка заготовки с прямым стыком; *д* – с волновым профилем поперечного сечения; D и d – наружный и внутренний диаметры втулки; ψ – угол наклона стыка; b – высота зубьев стыка; δ – зазор; S – толщина листа (заготовки)

(ГОСТ 931–90), отожженная, холоднокатаная; полоса бронзовая (ГОСТ 1761–92), отожженная и т.п.

Для повышения плотности бокового стыка пластины могут иметь специальную форму стыковых поверхностей, способствующую тангенциальному течению металла в процессе обработки (рис. 3). Втулки выполняют с осевым (по образующей цилиндра) и винтообразным стыками (рис. 3, *а*, *б*). Для компенсации неравномерности деформации по толщине стенки и для повышения плотности стыка после дорнования боковые поверхности заготовки рекомендуется скашивать под углом $\gamma = 5...7°$ (рис. 3, *г*). Наибольшую длину пластины (заготовки) перед свертыванием с учетом скашивания кромок при диаметре отверстия в корпусе d_0 и толщине стенки S можно рассчитать по формуле:

$$L_з = \pi d_0 + S\gamma.$$

Достаточно эффективны свернутые втулки с зубчатыми боковыми поверхностями (рис. 3, *в*), форма которых способствует созданию тангенциального направления течения материала и заполнению промежутка между стенками в боковом стыке деформируемой втулки.

Наиболее плотный боковой стык образуется в случае применения втулки с волнообразной формой поперечного сечения (рис. 4). Развертка заготовки (пластины) такой втулки имеет длину окружности, равную диаметру отверстия охватывающего корпуса. В сжатом состоянии (стыковой зазор $\delta_{бок} = 0$) она свободно поме-

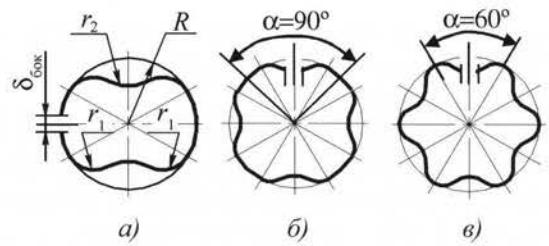


Рис. 4. Формы поперечных сечений свернутых втулок с волнообразным профилем

щается в отверстие охватывающей детали. В процессе раскатывания (или раздачи) фигурный участок, распрямляясь, приобретает цилиндрическую форму, а боковой зазор заполняется избыточным материалом.

Профилирование свернутых втулок с волнообразным профилем удобно производить на заготовке, т.е. до ее свертывания. Геометрия волны представляет собой вогнутую линию радиуса r_2, переходящую в основной наружный контур радиуса R через дуги радиуса r_1 (рис. 4, *а*). В поперечном сечении заготовки предварительно задают угол сектора α, в котором размещается волна, радиусы центральной r_2 и переходных r_1 дуг. Число волн назначают в зависимости от требуемого натяга в образующемся соединении Δi_{min} и диаметра отверстия корпуса $d_к$ по формуле:

$$n = 100\Delta i_{min} / d_к .$$

Боковой зазор, необходимый для установки свернутой втулки в корпус, рассчитывают по формуле

$$\delta_{бок} = 2(r_1 + r_2)\arcsin\left(\frac{R + r_1}{r_1 + r_2}\sin\frac{\alpha}{2}\right) - (R - r_1)\alpha.$$

Для увеличения зазора, позволяющего обеспечить свободную установку втулки в отверстие сопряженной детали, радиусы составляющих волну дуг r_1 и r_2 рекомендуется выбирать минимальными, а центральный угол α – в пределах 30...60°. Число волн на кольцевой заготовке должно быть не более восьми. Плоскости пластины рекомендуется предварительно обработать, доведя точность по толщине до 10–11 квалитета.

Качество бокового стыка

Окружное течение металла изучали на свернутых образцах, у которых стык после установки в корпус был раскрыт. Образцы, изготовленные из круглого проката в виде втулок с наружным диаметром 35 мм, с толщиной стенки 3 мм, разрезали вдоль образующей под углом наклона стыка ψ = 0, 10, 30 и 45°. Обработку образцов вели в корпусе с диаметрами $D_к/d_к$ = 100/35 однозубыми дорнами диаметром 29,30, 29,50, 29,75 и 30,00 мм. В зависимости от порядка

использования зубьев деформации за один проход изменялись в широком диапазоне относительных натягов λ от 0,010 до 0,035.

Окружные деформации в открытом боковом стыке рассчитывали по измеренным средним удлинениям втулок с учетом условия постоянства объема при пластическом деформировании по формуле:

$$\Delta\delta = \pi(d_д + d_2)\frac{(m^2-1)(2+\lambda)/\lambda - 1 - \Delta l_ф / L}{2(1+\Delta l_ф / L)},$$

$d_д$ – диаметр дорна;

d_2 – наружный диаметр втулки;

m – отношение наружного диаметра к внутреннему корпуса (втулки);

$\Delta l_ф$ – фактическое (измеренное) изменение длины L заготовки втулки после дорнования ее отверстия с натягом λ.

В первом эксперименте разрезанные вдоль образующей образцы (угол наклона образующей стыка $\psi = 0$) обрабатывали последовательно всеми зубьями совокупности, т.е. диаметрами: 29,3; 29,5; 29,75 и 30 мм (вариант 1). В последующем из этой совокупности изымали сначала первый (вариант 2), затем первый и второй (вариант 3) и, наконец, первый, второй и третий зубья (вариант 4), что обеспечивало постепенное увеличение натяга дорнования на первый зуб. Результаты исследований отображены на рис. 5.

Наименьшие окружные деформации получены при многозубом дорновании (кривая *1* на рис. 5, *а*). Увеличение радиальной деформации на первый зуб (кривые *2* и *3*) приводит к повышению интенсивности окружного течения металла. Однозубое дорнование (точка *4* на рис. 5, *а*) обусловило наибольшую окружную деформацию, которая тем не менее оказалась невысокой по сравнению с осевой (не более 10 %). Выявлено, что окружные деформации в процессе дорнования свернутых втулок менее интенсивны, чем осевые, что ограничивает возможность получения плотного бокового стыка.

Увеличение угла наклона образующей стыка ($\psi > 0$) способствует истечению металла в боковой зазор. На рис. 5, *б* приведены результаты измерения окружных деформаций, полученные после обработки образцов по первому (линии *1–4*) и третьему (линии *5* и *6*) вариантам. Видно, что с увеличением угла наклона стыка окружная деформация $\Delta\delta_0$ растет. Заметно влияние натяга дорнования (кривые *5* и *6* на рис. 5, *б* расположены выше кривых *1–4*).

Дополнительно выявлено влияние скашивания кромок на качество бокового стыка. Для этого на одну из боковых плоскостей пластины с предварительно скошенными под углом $\gamma = 0$; 3; 6; 9° кромками на инструментальном микроскопе перед свертыванием

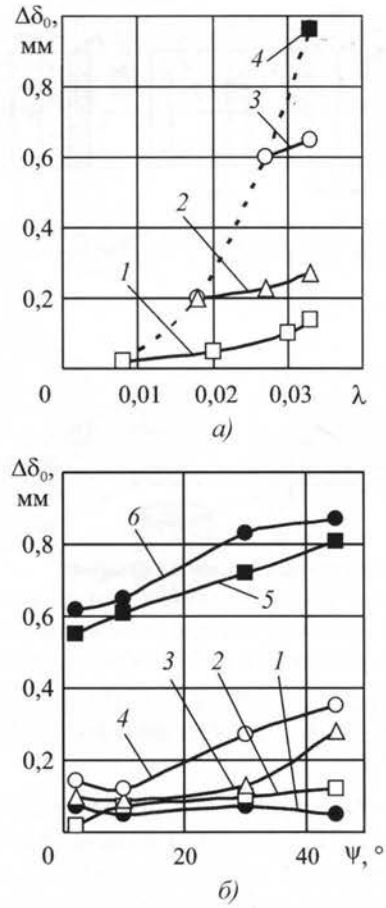


Рис. 5. Зависимость окружной деформации $\Delta\delta_0$ от относительного натяга λ (*а*) и угла наклона стыка ψ (*б*)

была нанесена координатная сетка с базой 0,25 мм. Влияние угла скоса на окружные деформации оценивали отношением площади отпечатка $F_к$ координатной сетки на противоположной площадке к ее полной площади: $K = F_к/SL$.

Отмечена зависимость показателя K в стыке с углом скоса кромок γ и натягом дорнования λ. При увеличении относительного натяга от 0,010 до 0,026 плотность стыка выросла примерно на 30 %. Повышению плотности стыка способствуют специальные формы боковых кромок, в том числе винтовая и зубчатая. Например, у свернутого образца с винтовым стыком под углом $\psi = 45°$ площадь стыка при относительных натягах $\lambda \geq 0{,}02$ мм составляла 0,8...0,9 от максимально возможной. Аналогичные результаты получены при дорновании свернутых втулок с зубчатым стыком и у образцов с волнообразным поперечным профилем, для которых плотность стыка приближалась к максимальному значению при натягах $\lambda = 0{,}008...0{,}012$. Полученные результаты описываются параболическими функциями, принимающими наибольшие значения при $\gamma = 5...6°$.

Надежность сцепления элементов составного цилиндра

Наиболее важным эксплуатационным показателем составного цилиндра со свернутой втулкой является надежность сцепления соединенных деталей. Этот показатель зависит от давления на поверхности контакта, образующегося в процессе упругопластической деформации втулки и упругой разгрузки корпуса. Определить давление в сопряжении можно экспериментально по методике, изложенной в работе [3], или по формуле в зависимости от деформационного натяга соединения $\Delta_к$ [4]:

$$p_к = \Delta_к \Bigg/ \left\{ d_к \left[\frac{(1-\mu)m_1^2 + (1+\mu)}{E(m_1^2 - 1)} + \frac{(1-\mu_к) + (1+\mu_к)m_к}{E_к(m_к^2 - 1)} \right] \right\},$$

где $d_к$ – диаметр отверстия корпуса;

$m_к$, m_1 – значения относительных толщин стенок соответственно корпуса и установленной в него свернутой втулки (m – отношение наружного диаметра к внутреннему);

μ, $\mu_к$, E, $E_к$ – коэффициенты Пуассона и модули продольной упругости материалов втулки и корпуса.

Деформационный натяг $\Delta_к$ в свою очередь связан с приобретенными в процессе соединения деталей свойствами, которые могут различаться при обработке партии деталей в связи с колебаниями размеров отверстий свернутых втулок и натягов дорнования. Для заданных условий этот натяг можно рассчитать по формуле:

$$\Delta_к = \frac{\beta\sigma_s}{E} d_к (1 + k_\sigma) \left(\frac{E}{E_к} F_к + \frac{1}{m} F_з \right),$$

где $F_к$ и $F_з$ – специальные функции параметров инструментов и заготовки;

σ_s – приобретенный в процессе дорнования отверстия предел текучести.

Исходными данными для расчета надежности соединения являются геометрические и физико-механические параметры заготовок свернутых втулок: толщина пластины (толщина стенки свернутой втулки), диаметры и длина деталей соединения, заданные нагрузки и коэффициенты вариации влияющих факторов.

Вероятность безотказной работы соединения можно рассчитать по критерию прочности сцепления в зависимости от квантили нормального распределения:

$$U_р = -(\overline{n}_с - 1) / (\overline{n}_с \nu_{\lim}^2 + \nu_T^2)^{0,5}.$$

Для расчета составляющих, входящих в эту формулу, предложена следующая методика. Используя данные о точности входящих в соединение размеров сопрягаемых деталей (допуски на диаметр отверстия корпуса и толщину стенки свернутой втулки), находим предельные значения давлений на поверхности сцепления $p_{к1} = f(i_{\min})$ и $p_{к2} = f(i_{\max})$, по которым определяем среднее давление $p_{к\,ср} = (p_{к1} + p_{к2})/2$ и коэффициент вариации давления $\nu_p = (p_{к2} - p_{к1})/(6p_{к\,ср})$.

Предельные по прочности сцепления момент $T_{\lim}$ и сила выталкивания $P_{в\,\lim}$, которые может передать соединение диаметром $d_к$ и длиной l при давлении на посадочных поверхностях $p_{к\,ср}$ и коэффициенте трения $\mu_{t\,ср}$, соответственно равны:

$$T_{\lim} = 0{,}0005\pi d_к^2 l p_{к\,ср} \mu_{t\,ср};$$

$$P_{в\,\lim} = \pi d_к l p_{к\,ср} \mu_{t\,ср}.$$

По правилу квадратического сложения коэффициентов вариации и аргументов, входящих в эти выражения в виде произведения, коэффициенты вариации предельного момента и предельной силы равны:

$$\nu_{\lim} = (\nu_P^2 + \nu_{\mu T}^2)^{0,5}.$$

Коэффициенты запаса прочности сцепления рассчитывают по средним значениям моментов и сил:

$$\overline{n}_{cT} = T_{\lim} / \overline{T};$$

$$\overline{n}_{cP} = P_{в\,\lim} / \overline{P}.$$

Прочность сцепления деталей соединения типа втулка–корпус определяли экспериментально путем измерения силы выталкивания $P_в$ и момента сцепления T. Эти параметры зависят, главным образом, от силы запрессовки и размеров соединяемых деталей.

Установлено, что образование качественного соединения возможно при условии, что боковой стык в процессе дорнования не раскрывается. При выполнении экспериментов были зафиксированы отдельные случаи выталкивания втулок из корпуса при достаточно небольших усилиях. Анализ показал, что в этих случаях боковой стык свернутых втулок был недостаточно плотным. Наилучших результатов по прочности достигали при дорновании соединений с относительными натягами в пределах $\lambda = 0{,}008...0{,}020$.

Образцы втулок шлифовали по наружным и внутренним поверхностям (до свертывания) в одинаковых условиях в целях уменьшения интервала естественного разброса исследуемых параметров. Перед запрессовкой втулок в корпус на сопрягаемые поверхности наносили смазывающий материал (MoS_2), благодаря которому повышалась стабильность сил трения, предотвращались такие нежела-

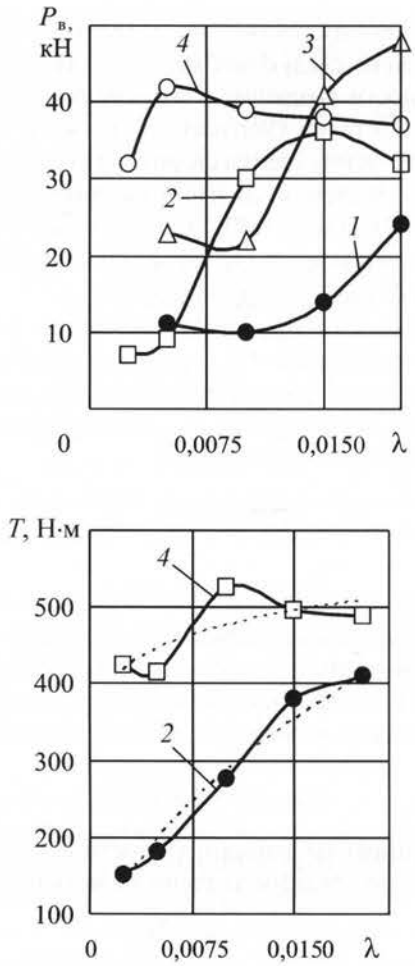


Рис. 6. Зависимости силы распрессовки $P_в$ и момента сцепления T соединения втулка–ступица от относительного натяга λ для втулок из латуни ЛС59-1 (*1*) и стали 45 (*2–4*):
1, *2* – прямой стык; *3* – винтовой стык; *4* – образец с волнообразным профилем поперечного сечения

тельные явления, как схватывание, налипание, задиры и другие негативные эффекты на контактируемых поверхностях. Во всех случаях силы измеряли на этапе установившегося относительного сдвига, что позволяло повысить точность отсчета. Предварительно была найдена область значений коэффициента трения μ_t и его статистические характеристики (таблица). Коэффициент μ_t рассчитывали по экспериментальным и теоретическим данным:

$$\mu_t = P_{в.ф} / (\pi d_к l_с p_к),$$

где $P_{в.ф}$ – фактическая сила выталкивания;
$d_к$, $l_с$ – размеры соединения.

Результаты расчетно-экспериментального определения коэффициента μ_t позволяют с достаточной для практики уверенностью охарактеризовать статистические параметры рассеяния, необходимые для опре-

Коэффициенты трения для расчета сил и моментов сцепления

Экспериментально-расчетные значения коэффициентов	0,0668; 0,0754; 0,0736; 0,0687; 0,0692; 0,0741; 0,0703; 0,0674; 0,0648; 0,0723
Среднее значение	$\mu_t = 0{,}07026$
Среднее квадратичное отклонение	$S_{\mu_t} = 0{,}003496$
Коэффициент вариации	$\nu_{\mu_t} = 0{,}04976$

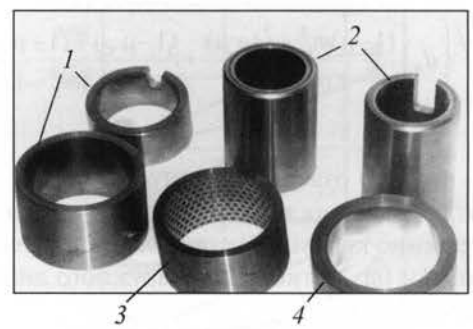


Рис. 7. Многослойные изделия:
1 – с бронзовыми втулками; *2* – с бронзовой втулкой, установленной в выточку обоймы; *3* – с промежуточным бронзовым вкладышем и втулкой с боковыми отверстиями для смазочного материала; *4* – с промежуточным бронзовым вкладышем и стальной втулкой

деления вероятностной прочности и надежности сцепления.

Приобретенные свойства соединений отражены на графиках рис. 6. Силы выталкивания втулки из корпуса увеличиваются с ростом относительного натяга дорнования, их изменение примерно соответствует закономерности упрочнения обрабатываемого материала.

Линия *4* (рис. 6) получена при дорновании втулок с волнообразным профилем. В данном случае даже при малых натягах дорнования сила выталкивания оказалась достаточно большой, что свидетельствует об активной деформации соединения в процессе разгибания волн профиля. Влияние волнообразного профиля втулки в данном случае можно отождествить с принудительным увеличением натяга ее запрессовки в корпус. Аналогичные закономерности относятся и к моментам сцепления.

Методы раскатывания и дорнования эффективны при изготовлении биметаллических и многослойных втулок, некоторые типы которых приведены на рис. 7 и 8.

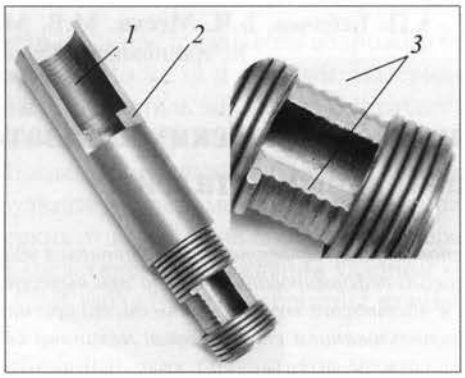


Рис. 8. Трехслойный цилиндр с промежуточным проволочным элементом:
1 – следы деформации внутренней поверхности наружного цилиндра; *2* – промежуток между цилиндрами, заполненный деформированной проволокой; *3* – следы деформации наружной поверхности внутреннего цилиндра

Выводы

1. Применение свернутых втулок в составных цилиндрах позволяет повысить прочность изделия в целом, придать особые специфические свойства рабочим поверхностям.

2. Методы ППД (дорнование и раскатывание отверстий) обеспечивают высокое качество соединения составных цилиндров, создают предпосылки для существенного увеличения нагрузок на изделие.

3. В качестве исходных заготовок для свернутых втулок целесообразно использовать пластины со специальной макрогеометрией рабочей поверхности, имеющей высокие эксплуатационные показатели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Силовой** цилиндр. Свид. на полезную мод. № 25538 / Ю.В. Любимов, А.Н. Исаев. Офиц. бюл. № 28 от 10.10.2002.

2. **Любимов Ю.В., Исаев А.Н.** Исследование прочности корпусов составных гидроцилиндров, изготовленных методом дорнования отверстий // Интеграция отраслевой и вузовской науки: проблемы современного машиностроения: матер. междунар. науч.-техн. конф. Ростов-н/Д: РГАСХМ, 2001. С. 110–111.

3. **Исаев А.Н., Любимов Ю.В., Лебедев А.Р.** Деформации составных корпусов силовых цилиндров, изготовленных методом дорнования отверстия // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 11. С. 12–17.

4. **Исаев А.Н.** Сборка составных цилиндров методами локального пластического деформирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 1. С. 8–16.

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка
на научно-технический и производственный журнал
"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

Журнал входит в Перечень ВАК РФ

Подписные индексы по каталогам:
"Роспечать" – **85159**, "Пресса России" – **39269**, "Почта России" – **60252**.

Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи или непосредственно в издательстве по адресу:

Россия, 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4,
ООО "Издательство Машиностроение",
редакция журнала "Упрочняющие технологии и покрытия".
Тел.: (495) 268-40-77. Факс (495) 269-47-98.
E-mail: utp@mashin.ru. http://www.mashin.ru

А.П. Бабичев, Б.Ч. Месхи, М.В. Медведев, В. Кайнбанда *(Донской ГТУ)*

Снижение шумовых характеристик и улучшение экологических показателей виброударной обработки крупногабаритных деталей

Представлены результаты экспериментальных исследований использования эффекта распространения ударных волн в механических волноводах для поверхностного пластического деформирования детали при вынесении источника ударных импульсов из зоны обработки. Исследована в частности возможность дистанционной передачи ударного импульса на обрабатываемую поверхность с использованием стержневого механического волновода.

The results of experimental investigation on using effect of propagation of shocks in mechanical waveguides for surface-plastic deformation of the detail, when making a source of shock pulses from processing zones are presented. In particular, the ability of remote transmission shock pulse on the work surface was investigated.

На современном этапе развития технологии металлообработки вопросы охраны труда и улучшения экологических показателей приобретают все большую актуальность. Современное машиностроительное производство представляет собой сложный комплекс технологических процессов, использующих различные виды энергетического воздействия, широкий спектр основных и вспомогательных материалов в твердом, жидком или газообразном состоянии, растворы, среды и электролиты различного состава и концентрации и т.п. Для достижения требуемых показателей качества и производительности нередко применяют высокотоксичные материалы и среды, технологическое оборудование и инструменты большой мощности, виброударные устройства с высоким уровнем акустических характеристик (шума, вибраций). В связи с этим значительный интерес представляет разработка методов, снижающих или исключающих влияние неблагоприятных воздействий на обслуживающий персонал и окружающую среду, создание безопасных и экологически чистых технологий [1–3].

В статье представлены результаты исследования возможности снижения акустических характеристик при виброударной упрочняющей обработке крупногабаритных и длинномерных деталей летательных аппаратов (на примере лонжеронов лопасти несущего винта вертолета, изготовляемых из закаленной конструкционной легированной стали и алюминиевого сплава), а также использования низкочастотного спектра колебаний (15...30 Гц) для разработки методов механохимической обработки, исключающих применение высокотоксичных материалов и веществ.

Подвергаемые виброударной упрочняющей обработке детали представляют собой полые тонкостенные конструкции. При воздействии виброударного инструмента возникает высокий уровень шума в помещении, где размещены соответствующие рабочие места и установки. Эффективность средств шумозащиты в помещении за счет подбора звукоизолирующих и звукопоглощающих материалов относительно невысока вследствие больших размеров обрабатываемых деталей (длиной до 10...15 м) и высокого уровня шума. На некоторых предприятиях прибегают к выделению соответствующих помещений (боксы), где сосредоточены стенды для выполнения упомянутых видов операций, а присутствие обслуживающего персонала предусматривается периодически (например, при пуске и останове оборудования) с использованием индивидуальных средств защиты.

Авторами опробован другой путь шумоизоляции, более радикальный. Его сущность состоит в использовании эффекта распространения ударных волн в механических волноводах для поверхностного пластического деформирования детали [4] при вынесении источника ударных импульсов из зоны обработки, размещения его в контейнере ограниченных размеров с высокой степенью звукоизоляции [5–11].

Для проверки возможности реализации предлагаемой схемы обработки проведены исследования возможности дистанционной передачи ударного импульса на обрабатываемую поверхность с использованием стержневого механического волновода. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Сообщение ударного импульса осуществляли пневмоударником в противоположном от обрабатываемой поверхности направлении, что исключало возможность перемещения стержня (волновода) за счет его деформации и зазоров (или недостаточного закрепления) в ударной системе. Плоские образцы изготовляли из стали 30ХГСА, алюминиевого сплава АК-6 и меди (рис. 2).

Фиксировали также момент первичного касания контактного элемента волновода по наличию и размерам пластического отпечатка. Измерение пластических отпечатков осуществляли с помощью бинокулярного микроскопа.

Диаметр и длина стержневого волновода составляли соответственно 8...14 и 1000 мм; материал стержня – отожженная сталь 30ХГСА. Пластические отпечатки наносили в пяти точках и по результатам измерений определяли средний диаметр $d_{ср}$ отпечатков.

В результате эксперимента отмечено образование пластических отпечатков на поверхности образца, что является следствием прохождения ударной волны по волноводу. В табл. 1–4 представлены результаты измерений.

На основании этих результатов можно создавать технологические схемы виброударной обработки *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) с вынесенным из зоны обработки источником ударных импульсов (рис. 3).

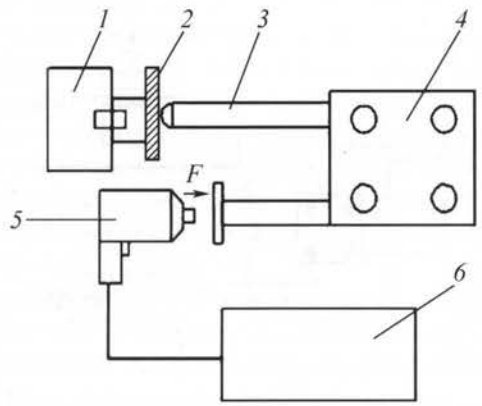


Рис. 1. Передача ударного импульса по стержневому волноводу: *1* – токарный патрон; *2* – образец; *3* – волновод; *4* – резцедержатель; *5* – пневмоударник; *6* – компрессор

Таблица 1

Результаты измерений дюралевого образца при диаметре стержня 8 мм

Размеры пластических отпечатков, мм, при			
касании стержня	ударе пневмоударником в течение, с		
	30	60	120
0,313	0,963	1,188	1,537
0,455	0,966	1,208	1,596
0,429	1,598	1,392	1,420
0,359	1,245	1,560	1,833
0,345	1,557	1,700	2,013
Средний диаметр $d_{ср}$, мм			
0,380	1,265	1,409	1,679

При этом можно применить многоконтактную схему распространения ударного импульса на обработку различных участков поверхности и деталей на соответствующем оборудовании, осуществлять многоинструментальную обработку. Такие источники могут быть эффективно изолированы, что особенно важно вследствие их высоких шумовых характеристик.

Исследована возможность применения низкочастотного спектра колебаний (10...15 Гц) для разработки методов обработки деталей, исключающих использование высокотоксичных веществ и материалов. Например, при производстве подшипников качения изготовляется большое количество деталей: колец, тел качения и сепараторов. Указанные детали проходят термическую обработку, после чего подвергаются химическому травлению в концентрированном водном растворе кислот. Взамен указанного метода предложена виброабразивная обработка деталей

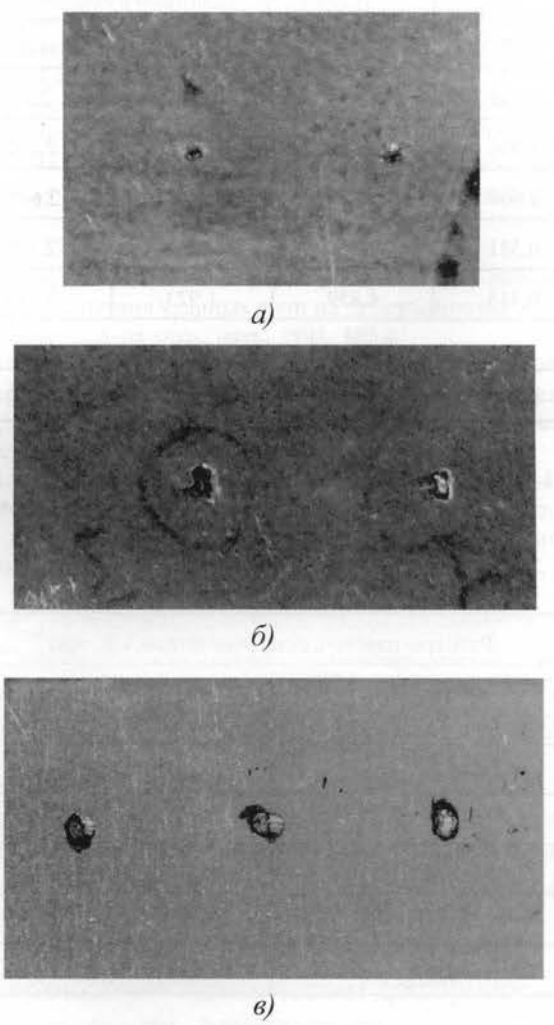


Рис. 2. Отпечатки на стальном (*а*), медном (*б*) и дюралевом (*в*) образцах

с использованием щелочного раствора слабой концентрации. *Вибрационная обработка* (ВИО) характеризуется существенным улучшением условий труда на производственном участке и устраняет необходимость в сборе и нейтрализации больших объемов отработанных кислотных растворов. При этом производительность очистки сохраняется достаточно высокой за счет обработки больших партий деталей. Указанная технология апробирована и на других деталях для очистки от окалины.

В частности, положительный аспект применения виброабразивной очистки деталей от окалины и коррозии получен на предприятии подшипниковой промышленности, на предприятии по изготовлению садового инструмента, медицинских инструментов, бытовых холодильников, автомобильных запчастей и др.

В качестве другого примера рассмотрим замену электрохимического полирования вибрационной от-

Таблица 2

Результаты измерений дюралевого образца при диаметре стержня 14 мм

Размеры пластических отпечатков, мм, при			
касании стержня	удар пневмоударником в течение, с		
	30	60	120
0,159	1,466	1,581	2,53
0,446	1,719	2,325	2,022
0,508	2,250	1,950	2,640
0,521	2,154	2,264	2,336
0,415	1,859	1,923	2,786
Средний диаметр $d_{ср}$, мм			
0,409	1,439	2,008	2,462

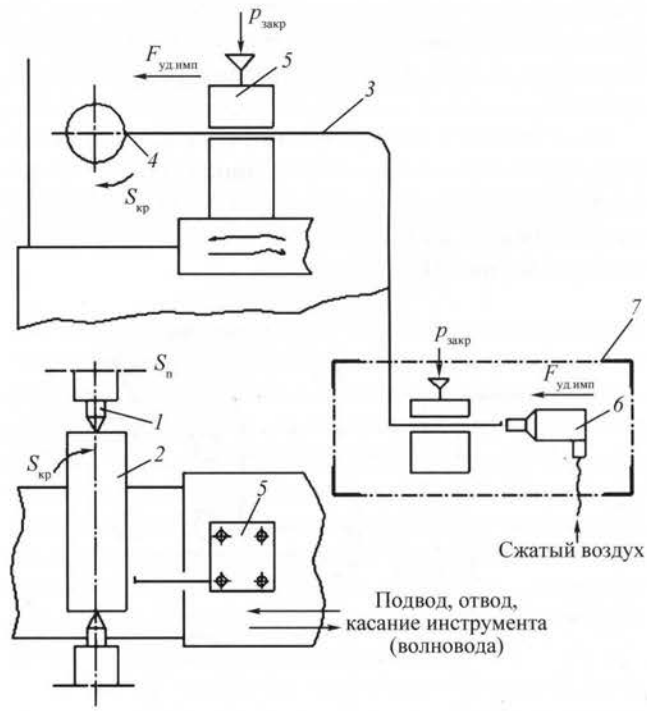


Рис. 3. Схема обработки наружной поверхности вала на токарном станке:
1 – центра; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – волновод; *4* – контактный элемент волновода; *5* – резцедержатель; *6* – пневмоударник; *7* – звукошумоизолирующий кожух

Таблица 3

Результаты измерений стального образца при диаметре стержня 8 мм

Размеры пластических отпечатков, мм, при	
касании стержня	ударе пневмоударником в течение 30 с
0,447	0,981
0,561	0,995
0,402	0,741
0,419	1,088
0,394	1,070
Средний диаметр $d_{ср}$, мм	
0,444	0,975

Таблица 4

Результаты измерений медного образца при диаметре стержня 8 мм

Размеры пластических отпечатков, мм, при	
касании стержня	ударе пневмоударником в течение 30 с
0,424	0,955
0,532	1,035
0,446	1,044
0,397	1,202
0,443	0,968
Средний диаметр $d_{ср}$, мм	
0,448	1,040

делкой. Многие детали медицинской техники и инструменты, изготовляемые из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, некоторые типы деталей из алюминиевых сплавов требуют отделки поверхности с получением зеркального блеска (высокой отражательной способности). Такие требования выполняли с применением метода электрохимического полирования с использованием высококонцентрированных электролитов при включении в состав ортофосфорной кислоты. Вибрационная отделка с использованием мелкозернистых абразивных гранул и мягких полирующих материалов обеспечивает достижение параметра шероховатости $Ra = 0{,}05...0{,}2$ мкм и высокой отражательной способности, исключая при этом применение токсичных сред.

Существенный экологический и экономический эффект достигнут при разработке и применении совмещенных процессов ВИО и механохимического нанесения покрытий. В частности, замена гальванического цинкования вибрационно-механическим существенно снижает объем отходов растворов и содержание в них вредных примесей, обеспечивает более полное использование цинкового порошка и улучшает условия труда на соответствующих производственных участках.

Аналогичные результаты достигнуты и при вибрационном механохимическом оксидировании алюминиевых сплавов. Указанные технологии апробированы в ряде отраслей машиностроения: авиационной, электротехнической, автомобильной, при изготовлении деталей электродвигателей, вертолетов, крепежных изделий, некоторых деталей бытовой техники и др.

Специальное оборудование – вибрационные станки – характеризуются широкой универсальностью, могут применяться после соответствующей наладки как на очистных и полировальных операциях, так и для совмещенных процессов обработки и покрытий. Они имеют достаточно широкий диапазон объемов рабочих камер – от 1...5 до 200...300 дм^3. В зависимости от размеров обрабатываемых деталей, их количества, типа производства выбирают тот или иной тип станка.

Рабочие среды – не дефицитны, изготовляются на отечественных предприятиях, обладают достаточно высокой стойкостью. Сравнительно просты и рекомендуемые составы технологических жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д: ДГТУ, 1999. 621 с.
2. **Баскаков В.А.** Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело: афтореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Чебоксары, 1991. 37 с.
3. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. ДГТУ, Ростов-н/Д, 2003. С. 191.
4. **Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И.** Теория упрочняющегося пластического тела. М.: Наука, 1971. 231 с.
5. **Александров Е.В., Соколянский В.Б.** Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. 200 с.
6. **Нигматулин Р.И.** О полезности ударной волны // Техника молодежи. 1974. № 10. С. 6–7.
7. **Баскаков В.А.** Взаимодействие ударных волн в упругопластической среде с упрочнением // ПМТФ. 1979. № 6.
8. **Палатник Л.С., Равицкая Т.М., Любарский И.М.** О механизме образования вторичных структур при импульсном нагружении // ДАН. 1970. Т. 191. № 3. С. 568–571.
9. **Баскаков В.А.** Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело: дис. ... д-ра техн. наук. 1991. 385 с.
10. **Мурр Л.Е.** Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов после нагружения ударными волнами / Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов // М.: Металлургия, 1984. 512 с.
11. **Бабичев А.П., Пастухов Ф.А., Мотренко П.Д., Чучукалов А.П.** Анализ технологических схем виброударной упрочняющей обработки длинномерных деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 5. С. 3.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Амбросимов С.К. Определение технологических параметров процесса деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием и упругопластическим нагружением зоны резания;

Попов М.Е. Упрочняющая обработка деталей поверхностным пластическим деформированием ударно-импульсным инструментом с пружинным приводом.

УДК 621.99

А.Н. Афонин *(Орловский ГТУ)*

Перспективы производства резьбонакатного оборудования и инструмента в Российской Федерации

Проведен анализ современной ситуации в области производства отечественного резьбонакатного оборудования и инструмента. Сделан вывод о существенном отставании от мирового уровня и угрозе полной утраты данного высокотехнологичного производства.

The analysis of a modern situation in the field of manufacture domestic thread rolling machines and tool is made. It is drawn an output on essential backlog from a world level and threat of full loss of the given hi-tech manufacture.

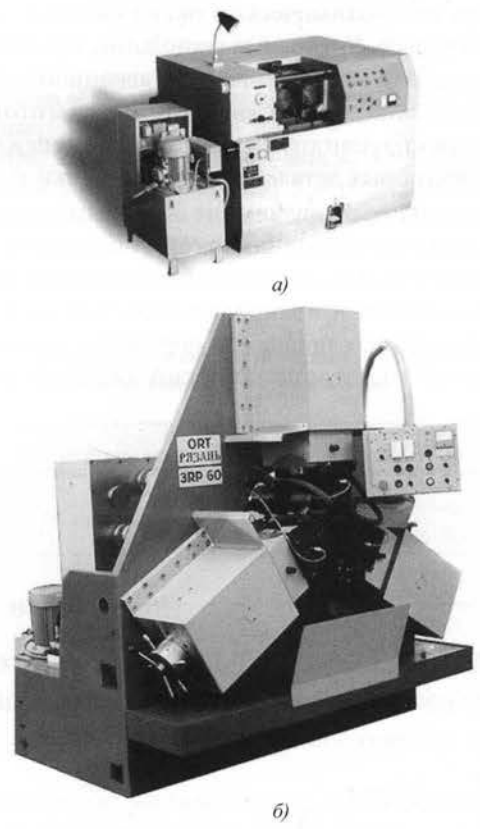
Жесткая конкуренция на современном рынке изделий машино- и приборостроения (метизов и т.п.) вызывает необходимость непрерывного повышения их качества и, следовательно, совершенствования технологии их изготовления. Резьбы являются одним из наиболее распространенных элементов метизов и других деталей машин и приборов. При этом трудоемкость изготовления ответственных резьб составляет до 50 % и более от общей трудоемкости изготовления детали. Таким образом, от эффективности применяемой технологии резьбоформообразования в значительной степени будет зависеть качество и себестоимость изготавливаемых деталей и конкурентоспособность предприятия в целом.

Одной из основных тенденций современного машиностроения в мире является сокращение области применения обработки резанием и частичная замена ее высокоэффективными процессами физико-технической обработки, в том числе ротационными методами обработки давлением. Применительно к обработке резьб таким методом является резьбонакатывание, позволяющее обеспечить высокое качество получаемых резьб при высокой производительности. Резьбонакатывание находит все более широкое применение в промышленно развитых странах [1].

Мировыми лидерами в производстве резьбонакатного оборудования и инструмента являются США, ФРГ, Япония и Италия. Активно осваивают рынок резьбонакатного оборудования и инструмента быстроразвивающиеся компании КНР, Тайваня, Индии и Южной Кореи.

К сожалению, российские предприятия в значительной мере утратили позиции, занимаемые ими до начала 90-х годов XX века в области производства резьбонакатного оборудования и инструмента.

Ситуация с производством в РФ резьбонакатных станков мало чем отличается от ситуации с выпуском других видов металлообрабатывающего оборудования. Старейшим производителем резьбонакатного оборудования в странах СНГ является ОАО "Азовский завод кузнечно-прессовых автоматов" (Азов). Станки производства Азовского завода составляют бóльшую часть парка резьбонакатного оборудования в РФ. Данное предприятие и на сегодняшний день производит широкую гамму автоматов для накатывания резьбы плоскими плашками и роликами-сегментами, профиленакатных полуавтоматов с двумя роликами. Автоматы и полуавтоматы Азовского завода (рис. 1, *а*) имеют относительно низкую стоимость (от



а)

б)

Рис. 1. Профиленакатные двухроликовый мод. А9518Б (*а*) и трехроликовый мод. 3RP60 (*б*) полуавтоматы

600 тыс. руб. и выше), однако их конструкция, восходящая к 70-м годам XX века [2], в значительной степени устарела. В связи со сложным экономическим положением предприятие не может осуществить коренную модернизацию выпускаемого резьбонакатного оборудования.

В качестве положительного момента следует отметить освоение в конце 90-х годов XX века – начале XXI века производства современных профиленакатных полуавтоматов конструкции итальянской компании ORT ОАО "Рязанским станкостроительным заводом" (рис. 1, *б*) и СКБ-ЗТС (Коломна). Данные станки имеют самокомпенсирующие шпиндели для постоянного совмещения роликов по шагу в процессе работы. Быстрая врезная подача и ускоренный возврат с регулировкой давления и подачи обеспечивают повышенную производительность обработки. В двухроликовых станках для быстрого совмещения по шагу винтового профиля роликов предусмотрена электрогидравлическая зубчатая муфта, в трехроликовых – механическая фрикционная муфта. Ввиду высокой стоимости (более миллиона рублей) станки типа ORT производства Рязанского станкостроительного завода и СКБ-ЗТС продаются в РФ в весьма ограниченном количестве (несколько штук в год). В несколько бóльших объемах Рязанский станкостроительный завод поставляет их на экспорт (около 1000 шт за период с 1998 по 2006 г.).

Автоматы резьбонакатные с плоскими плашками для накатывания крупных резьб диаметром 12...24 мм мод. АА255 и А2424С производятся ОАО "Тяжпрессмаш" (Рязань). Для накатывания мелких резьб диаметром 1,5...3 мм ОАО "Савеловский машиностроительный завод" (Кимры) выпускает автомат с роликом и сегментом МНК-02М (рис. 2). Данные автоматы имеют сравнительно устаревшую конструкцию.

Анализ мировых тенденций производства резьбонакатного оборудования показывает, что доля резьбонакатных автоматов с инструментом ролик-сегмент в общем объеме производства резьбонакатного оборудования неуклонно сокращается и их дальнейшее совершенствование очевидно следует признать бесперспективным.

В целом, ситуацию с производством резьбонакатного оборудования в РФ нельзя считать удовлетворительной. Особенно тревожным является то, что бóльшая часть выпускаемого оборудования является морально устаревшей. Производство наиболее современных резьбонакатных станков с ЧПУ отсутствует полностью. В то же время накатывание резьбы на ответственных тяжелонагруженных деталях, изготовленных из труднообрабатываемых или предварительно упрочненных материалов, в большинстве случаев может производиться только на подобном оборудовании, обеспечивающем рациональные законы радиального обжатия заготовок [3].

Еще более тяжелая ситуация на сегодняшний день сложилась в РФ с производством резьбонакатных головок. Основной производитель аксиальных головок типа НП (рис. 3, *а*), НПТ, ВНГН, ВНГТ, РГТВ и тангенциальных головок ТНГН и ТНГС [4] в СССР – инструментальный завод "Фрезер" (Москва) прекратил свое существование в 90-х годах XX века. Наследником этого предприятия, производящим аксиальные резьбонакатные головки и ролики к ним, на сегодняшний день является ОАО "Аркона" (Москва). Однако это предприятие испытывает в настоящее время весьма серьезные экономические трудности, в связи с чем существует реальная угроза полного прекращения производства данных резьбонакатных головок в РФ и СНГ.

Выпускаемые ОАО "Московский инструментальный завод" резьбонакатные головки СТД морально устарели и имеют ограниченную область применения – накатывание резьб на водопроводных трубах на автоматах СТД-129. Для освоения новых типов резьбонакатных головок предприятие не имеет производственных возможностей.

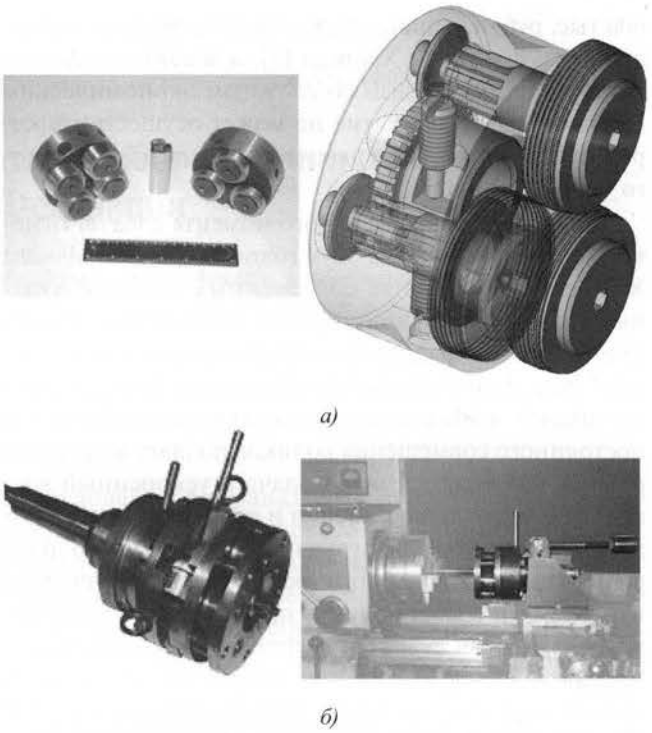
Попытки освоения производства современных аксиальных резьбонакатных головок оригинальной конструкции (например, РНГ (рис. 3, *б*) на ОАО "Пензенское конструкторско-технологическое бюро арматуростроения") или лицензионных (например, Fette на АО "АвтоВАЗ") на непрофильных предприятиях пока следует признать неудачными.

Рис. 2. Резьбонакатной автомат с роликом и сегментом модели МНК-02М

Серийное производство наиболее производительных радиальных резьбонакатных головок так и не было освоено российской промышленностью, несмотря на наличие оригинальных отечественных разработок, например [5]. Лишь производство простейших по конструкции резьбонакатных головок, в частности нераскрывающихся аксиальных головок (плашек) типа НП, освоено некоторыми предприятиями оборонного комплекса (например, ДАО "Ижевский инструментальный завод").

Утеря отечественными предприятиями высокотехнологичного производства современных резьбонакатных головок является серьезной проблемой. Данная оснастка является наиболее перспективной для получения резьб на универсальном оборудовании токарной и сверлильной группы и обрабатывающих центрах в условиях гибкого интеллектуального производства [6], особенно на малых и средних предприятиях, в ремонтном и инструментальном производстве. Головки могут использоваться для накатывания не только резьб, но и других профилей [7]. Практически полное отсутствие на рынке современных отечественных резьбонакатных головок и высокая стоимость импортных аналогов (более 1000 долл. за головки Fette (ФРГ), Landis (США) и т.п.) отрицательно сказывается на технической оснащенности и конкурентоспособности отечественного малого и среднего бизнеса.

Достаточно сложной является ситуация с производством в РФ резьбонакатного инструмента. Данный вид металлообрабатывающего инструмента по сложности изготовления уступает только зубообрабатывающему. Высокие требования, предъявляемые к механическим свойствам материала резьбонакатного инструмента, вызывают повышенные требования к технологии его ковки и термической обработки. Повышенные требования к точности резьб в современном машиностроении вызывают потребность обязательного включения в технологический процесс изготовления резьбонакатного инструмента резьбошлифовальных операций. Реализация вышеперечисленных требований невозможна без применения современного дорогостоящего оборудования, обслуживаемого высококвалифицированным персоналом. В связи с этим общее падение технического уровня производства в Российском машиностроении приводит к постепенному сокращению предприятий, обладающих возможностью самостоятельного изготовления резьбонакатного инструмента, что ведет к росту спроса на него при одновременном сокращении предложения. В некоторых промышленно развитых регионах РФ, например в Орловской области, на сегодняшний день уже отсутствуют предприятия, способные производить работоспособный резьбонакатной инструмент.



а)

б)

Рис. 3. Резьбонакатная головка (плашка) типа НП (*а*) и аксиальная резьбонакатная головка типа РНГ (*б*)

Основными поставщиками роликов к резьбонакатным полуавтоматам на Российском рынке на сегодняшний день являются Московский и Томский инструментальные заводы. В связи с сокращением количества предприятий, имеющих возможность самостоятельного производства резьбонакатного инструмента, и наметившимся в последние годы некоторым оживлением в российском машиностроении эти предприятия перегружены заказами на изготовление роликов. При этом, по мнению потребителей их продукции, качество выпускаемых на этих предприятиях резьбонакатных инструментов неуклонно снижается при одновременном увеличении сроков выполнения заказов (не менее 3–4 месяцев для стандартизованных роликов по ГОСТ 9539–72 и более 6 мес. для нестандартного инструмента). Причиной этого является снижение качества отечественных инструментальных материалов, старение оборудования и отток высококвалифицированного персонала в другие секторы экономики. Другие предприятия, выпускающие резьбонакатные ролики, например Ижевский инструментальный завод, ОАО "КАМАЗспецинструментмаш" (Набережные Челны), ООО "Краснодарский ЗИП", АО "Самарский инструментальный завод" и т.п., занимают незначительные секторы рынка,

обеспечивая, как правило, потребителей только в пределах своих регионов.

Основным производителем инструментов ролик-сегмент (в особенности крупных размеров) в РФ является Московский инструментальный завод. В связи с большей сложностью изготовления внутренней резьбы ситуация с их выпуском является еще более тревожной, чем с производством резьбонакатных роликов.

Плоские резьбонакатные плашки выпускаются Ижевским инструментальным заводом, ООО "Аркона" (Москва) и некоторыми другими предприятиями. Большинство производимых отечественными предприятиями плоских плашек имеют нарезанный профиль резьбы и не позволяют накатывать точные резьбы, что снижает конкурентоспособность отечественного метизного производства.

Бесстружечные метчики выпускаются Самарским и Ижевским инструментальными заводами, НПФ "Робоштамп" (Москва) и некоторыми другими предприятиями. Проблемы с их производством в целом аналогичны проблемам, возникающим при производстве резьбонакатных роликов.

Современное инструментальное производство, позволяющее изготавливать практически любые резьбонакатные инструменты достаточно высокого качества, на сегодняшний день сохранилось в РФ лишь на некоторых метизных предприятиях, связанных в первую очередь с автомобильной промышленностью. К ним можно отнести ОАО "Автонормаль" (Белебей), ОАО "Рославльский автоагрегатный завод" (Рославль) и некоторые другие. Однако в силу ограниченных мощностей инструментального производства данные предприятия изготавливают резьбонакатной инструмент только для собственных потребностей, практически не поставляя его на рынок.

Конструкция абсолютного большинства выпускаемого отечественными предприятиями резьбонакатного инструмента была разработана в 70-х годах XX века. В связи с этим получение с помощью данного инструмента ответственных ходовых и крепежных резьб на заготовках из современных высокопрочных материалов крайне затруднительно или вообще невозможно. В настоящее время отечественные предприятия вынуждены приобретать для подобных целей импортный инструмент производства компаний PEE-WEE (ФРГ), ORT, Precision Tool (Тайвань) и т.д. Для выпуска конкурентоспособного отечественного резьбонакатного инструмента необходимо освоение производства современных прогрессивных конструкций [3].

Анализ современного состояния производства резьбонакатного оборудования и инструмента в РФ показывает, что ситуация является достаточно тревожной. Выпускаемое отечественными предприятиями резьбонакатное оборудование часто является неконкурентоспособным из-за устаревшей конструкции, низкого качества или высокой цены. В связи с этим уровень выпуска резьбонакатных станков остается низким, вызывая дальнейшую стагнацию станкостроительных заводов, еще более ухудшающую ситуацию. Производство современных резьбонакатных головок в РФ практически утрачено. Предприятия, выпускающие резьбонакатной инструмент, не в состоянии удовлетворить растущий спрос на него в силу отсутствия возможностей или желания модернизировать производство. Подобное положение сдерживает дальнейшее развитие всего отечественного машиностроения.

Для выхода из сложившейся ситуации необходимы значительные инвестиции в модернизацию производства резьбонакатного оборудования и инструмента. Поскольку сохранение современных технологий чрезвычайно важно прежде всего для военно-промышленного комплекса и обороноспособности страны, представляется необходимым инвестировать в производство современного резьбонакатного оборудования и инструмента средства государственного бюджета. Перспективным является также создание в РФ филиалов мировых лидеров в производстве резьбонакатного оборудования и инструмента, например компаний PEE-WEE и LMT-Fette.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Greis H.A.** Roll It. // Cutting Tool Engineering. 2004. No 12. P. 50–54.

2. **Миропольский Ю.А., Луговой Э.П.** Накатывание резьб и профилей. М.: Машиностроение, 1976. 175 с.

3. **Киричек А.В., Афонин А.Н.** Перспективы развития резьбонакатывания // Изв. ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2003. № 4. С. 32–34.

4. **Грудов А.А., Комаров П.Н.** Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент. М.: НИИмаш, 1980. 64 с.

5. **Пат. РФ № 2252844(04).** Головка для накатывания внутренних резьб с радиальной подачей резьбонакатных роликов // Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.Н. Афонин и др. Бюл. № 15. 27.05.05.

6. **McBride A.** Thread Rolling on CNC // Cutting Tool Engineering. 1995. No 5. P. 45–51.

7. **Султанов Т.А., Артюхин Л.Л.** Кинетопластика // СТИН. 2004. № 8. С. 31–35.

УДК 621.9.06:628.517

С.А. Шамшура *(ОАО "Росвертол", Ростов-на-Дону)*

Виброакустические характеристики оборудования для виброударного упрочнения труб лонжеронов вертолетов

Проведены исследования шума и вибрации динамического вибростенда для виброударного упрочнения лонжеронов. Результаты исследований позволили выявить особенности процесса шумообразования и определить потребную эффективность системы шумозащиты.

The researches of noise and vibration of dynamic vibrating table for vibroimpact strenghening of longeron are lead. Results of researches have allowed to reveal features of noiseformation process and to define required effectiveness of noise-defense system.

Постановка задачи

Цель исследований – выявление закономерностей процесса шумообразования стенда для виброударного упрочнения, определение превышений по октавам фактических уровней звукового давления над предельным спектром, так как эти данные являются основополагающими для выбора систем шумозащиты.

Методы исследований

Экспериментальные исследования шума и вибрации проводили в *лаборатории динамических испытаний* (ЛДИ) ОАО "Росвертол" прибором ВШВ-003-М2 с применением конденсаторного микрофона и комплекта вибродатчиков. В процессе экспериментов фиксировали уровни шума (дБА), октавные уровни звукового давления и вибрации (дБ).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Объект исследования представляет собой стенд, предназначенный для наклепа наружной и внутренней поверхности лонжеронов виброударным способом с помощью стальных шариков. Стенд состоит из опорной рамы, установленной на фундамент, вибрирующей рамы, опирающейся на опорную через амортизаторы, четырех контейнеров, которые крепятся к ложементам верхней плоскости виброрамы. Колебания виброрамы (частота 14 Гц, амплитуда 5±0,5 мм) передаются от валов вибраторов.

Измерения уровней звука и звукового давления проводили с шагом 1,5 м по периметру (рис. 1) стенда. Результаты показали (таблица), что шумовые характеристики во всех точках измерений различаются не более чем на 3 дБ, что говорит о диффузном характере звукового поля.

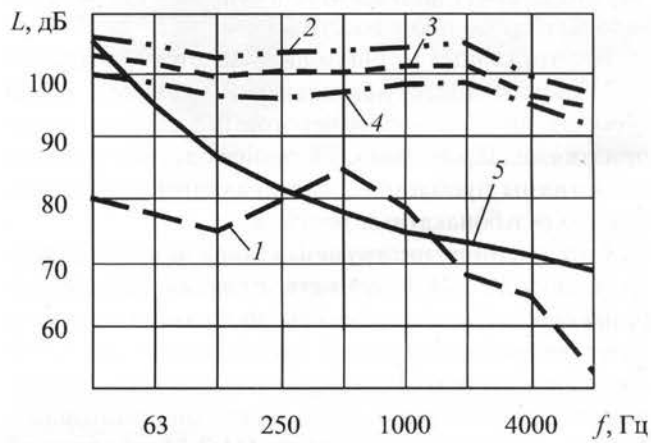


Рис. 1. Спектры шума стенда:
1 – двигатель; *2* – стенд в рабочем режиме; *3* – холостой ход стенда; *4* – рама; *5* – предельный спектр; *L* – уровень звукового давления; *f* – частота

Аналогичные результаты получены при измерении вибраций на вибрирующей раме и контейнерах. Эти результаты вследствие большого количества данных эксперимента в статье не приводятся. Анализ результатов показан для шумовых характеристик на рабочем месте оператора. Необходимо отметить превышение шумовых характеристик в сравнении с санитарными нормами (рис. 2), которое достигает 31 дБА по уровню звука и 33 дБ по уровням звукового давления.

Для данного оборудования характерными особенностями являются: практически равномерная интенсивность составляющих спектра в широкой полосе частот 31,5...2000 Гц (разность уровней не превышает 2 дБ, что сравнимо с точностью измерений); превышение уровней звукового давления наблюдается практически по всему нормируемому частотному диапазону (за исключением первой октавы со среднегеометрической частотой 31,5 Гц); уровни шума холо-

Уровни шума вибростенда в контрольных точках

Номер точки	Уровни звукового давления (дБ) в октавных интервалах частот, Гц									Уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	104	105	103	102	100	103	101	96	94	108
2	105	105	100	103	104	104	104	99	97	109
3	106	104	103	107	104	106	106	99	98	110
4	106	106	103	104	104	105	105	99	97	110
5	106	108	104	105	104	106	106	99	97	111
6	103	108	103	102	100	102	100	98	97	110
7	102	106	102	104	102	102	100	96	94	108
8	102	107	104	102	101	102	102	98	94	109
9	105	105	107	104	104	102	104	99	95	109
10	102	107	107	103	103	104	102	99	95	110
11	102	106	102	105	103	105	103	99	96	111
12	102	105	102	103	103	104	102	99	97	110

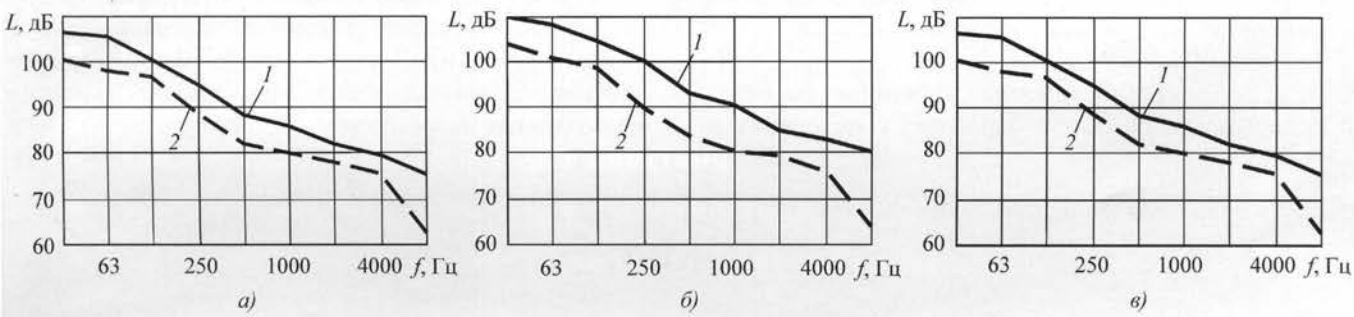


Рис. 2. Спектры вибраций холостого хода (*а*), в рабочем режиме (*б*) и вибрации холостого хода на расстоянии 3 м от ЛДИ со стороны стенда (*в*):
1 – контейнера, *2* – вибрирующей рамы

стого хода, т.е. в режиме, когда измерения проводили без лонжеронов и шариков в контейнерах, также превышает норматив во всем нормируемом диапазоне (за исключением первой октавы).

Уменьшение уровня шума холостого хода в сравнении с рабочим режимом составляет 3...6 дБ в интервале частот 31,5...2000 Гц и 2...3 дБ – в высокочастотной части спектра при 4000...8000 Гц. Таким образом, даже на холостом ходу уровни шума превышают предельно допустимые значения на 10...27 дБ в широком диапазоне частот 25...8000 Гц.

Следует отметить, что шум двигателей, когда со шкивов снимали ремни, уже создает превышение норматива на 2...3 дБ в среднечастотной области спектра 500...1000 Гц. Характер спектров виброскорости на контейнерах и вибрирующей раме идентичен как в рабочем режиме (рис. 2, *б*), так и на холостом ходу (рис. 2, *в*). Увеличение уровней вибрации контейнеров на рабочем режиме в сравнение с холостым ходом составляет 4...7 дБ.

Стенд для виброударного упрочнения создает повышенный шум не только в самом производственном помещении, но и вне его. Результаты измерений на расстоянии 3 м от ЛДИ (со стороны стенда) представлены на рис. 3.

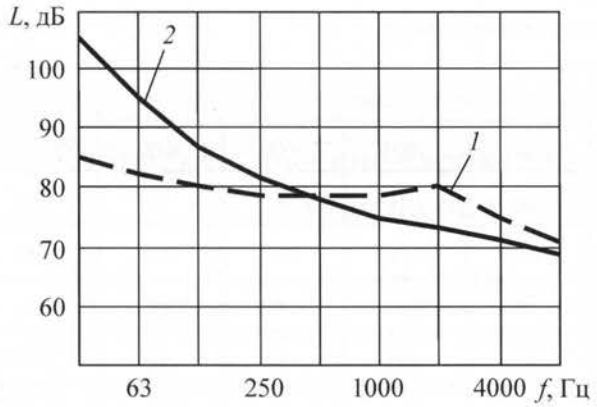


Рис. 3. Спектры шума вне ЛДИ:
1 – спектр шума; *2* – норматив

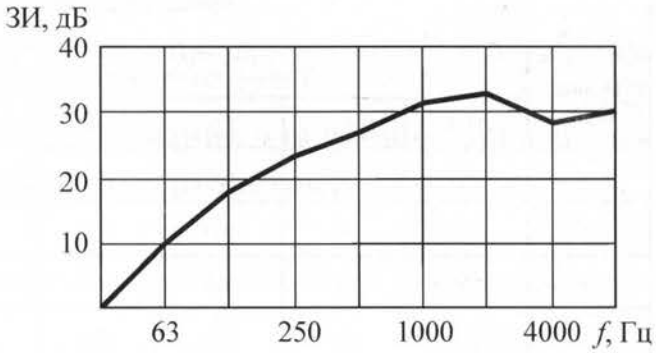


Рис. 4. Потребная звукоизолирующая способность ЗИ системы шумозащиты

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать заключение о достаточно высокой интенсивности процессов вибро- и шумообразования всей несущей системы стенда. Условия возбуждения вибраций и компоновка стенда таковы, что для данного вида оборудования характерен чисто структурный шум. Столь высокие уровни излучаемого шума, большие габаритные размеры излучающих звук поверхностей практически полностью исключают возможность достижения санитарных норм шума путем снижения интенсивности звукового излучения самого стенда методами вибропоглощения. Фактически единственным практически достижимым способом обеспечения норматива являются разработка конструкции и акустический расчет системы шумозащиты, которые должны обеспечить частотно-зависимые параметры звукоизоляции, показанные на рис. 4.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить особенности процесса шумообразования стенда для виброударного упрочнения труб лонжеронов, диапазоны частот и превышение фактических уровней шума относительно предельно допустимых значений, а на этой основе сформулировать требования по акустической эффективности системы шумозащиты операторов.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Николенко С.В., Потапова Н.М., Метлицкая Л.П. Исследование жаростойкости модифицированного поверхностного слоя стали Р6М5 после электроискрового легирования.

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.
Телефоны редакции журнала: (495) 268-40-77, 269-54-96; факс: (495) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Подживотов К.Ю.*
Технический редактор *Тупталов С.Ю.*
Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 28.04.08 г. Подписано в печать 09.06.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,48. Заказ 680. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15