ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 10 (34)
октябрь
2007

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. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Ю.В. ПАНФИЛОВ
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:
Н.А. ФЕТИСОВА
И.В. СИНЦОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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

Отчет о проведении VIII Международной научно-технической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном комплексе" "Технология–2007" 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Деформационное упрочнение управляемыми ударными импульсами 5

Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Ковалева Е.В., Чмыхов Д.В. Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом 9

Амбросимов С.К. Феноменологическая модель обрабатываемости резанием с опережающим пластическим деформированием при протягивании 15

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Друппов В.В. Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива . . . 19

Копылов Ю.Р., Емельянов С.В. Влияние динамики виброабразивной обработки на интенсивность съема металла на различных участках заготовки 24

Давление на поверхность при упрочнении ППД с наклепом 28

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Афонин А.Н., Киричек А.В., Апальков А.Г., Должиков Д.А. Моделирование процесса поверхностно-объемного пластического деформирования 29

Зайдес С.А. Численная модель очага деформации при охватывающем ППД 32

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Моисеенко А.А. Исследование прочности соединений с гарантированным натягом, контактирующих по прерывистой цилиндрической поверхности 37

Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А. Исследование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности при ППД с использованием ультразвукового контроля 40

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Киричек А.В., Тарасов Д.Е. Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД 44

МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Ли Р.И., Жильцов А.П., Ли Р.И., Бочаров А.В. Исследование и разработка технологии восстановления неподвижных соединений подшипников качения герметиком АН-105 48

Мубояджян С.А., Галоян А.Г., Лесников В.П., Кузнецов В.П., Мороз Е.В. Покрытие для защиты внутренней полости лопаток турбины из монокристаллических безуглеродистых жаропрочных сплавов 49

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Бабичев А.П., Падалкин В.В., Гетманский Д.В., Дагин Б.М., Мотренко П.Д. Технологические испытания специального инструмента для хонингования некруглых отверстий 55

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

© Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2007

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 10 (34)
October
2007

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. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
Yu.V. PANFILOV
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
N.A. FETISOVA
I.V. SINTSOVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159**, "Pressa Rossii" **39269**, "Pochta Rossii" **60252**) or in publishing office.

Ph.: (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

The report on carrying out of VIII International scientific and technical conference "Fundamental and applied problems in a machine-building complex" "Technology–2007" . . . 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Kirichek A.V., Solovjev D.L. Surface strain strengthening by operated striking impulse . . . 5

Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Kovalyova E.V., Chmyhov D.V. Adapting the surfaces of friction of the details of the machines to variable condition of the usages by processing SPD by programming way . . . 9

Ambrosimov S.C. Phenomenological cutting treatment model with advanced plastic deformation in broaching process . . . 15

Tamarkin M.A., Tischenko E.E., Druppov V.V. Formation of parameters of quality of surface at centrifugal-rotational processing in the environment of the abrasive . . . 19

Kopylov Yu.R., Emelyanov S.V. Influence of vibroabrasive machining dynamics on intensity of metal-removing on different machine part sections . . . 24

Surface pressure at SPD with cold working . . . 28

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Afonin A.N., Kirichek A.V., Apalkov A.G., Dolgikov D.A. Modelling of process of superficial-volumetric plastic deformation . . . 29

Zaydes S.A. Numerical model of the center of deformation at pot SPD . . . 32

QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

Moiseenko A.A. Investigation of strength of joints with garanteed interference fit on discontinious cylindrical surface . . . 37

Blumenstein V.Yu., Krechetov A.A. Research on deformation accumulation and plasticity resource exhaustion of strengthened metal upon SPD applying the method of acoustic structurescopy . . . 40

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Kirichek A.V., Tarasov D.E. Perspective methods of the combined strengthening on the basis of statics-impulse processing by SPD . . . 44

METHODS OF DEPOSITION OF FUNCTIONAL COATINGS

Lee R.I., Zhiltsov A.P., Lee R.I., Bocharov A.V. Researches and restoration of the unmovable bearing joints by germetic AH-105 . . . 48

Muboyadzhyan S.A., Galoyan A.G., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P., Moroz E.V. Protection coating for internal surface of cooled gas-turbine blade made of single crystal nickel-based superalloy containing no carbon . . . 49

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Babichev A.P., Getmanski D.V., Dagin B.M., Motrenko P.D., Padalkin V.V. Technological tests of special tool for honing not round apertures . . . 55

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", 2007

Отчет о проведении VIII Международной научно-технической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном комплексе" "Технология–2007"

Орловский государственный технический университет, Технологический институт ОрелГТУ, Головной научный совет "Машиностроение", ОАО "Издательство "Машиностроение", Научно-технический Союз Орловской области, Межрегиональная общественная организация специалистов ремонтного производства техники, а также промышленные компании VALTRA, METSO, образовательное учреждение Helsinki university of technology, Международный научно-исследовательский центр VTT creates business from technology и Центр регистрации патентов PATENT – OCH REGISTERSTYRELSEN Финляндии 30 июня–8 июля 2007 г. на базе Технологического института ОрелГТУ провели VIII Международную научно-техническую конференцию "Технология–2007" (Хельсинки, Финляндия).

В работе конференции приняли участие более 80 представителей из вузов, осуществляющих подготовку специалистов технического профиля:

- Брянский государственный технический университет;
- Владимирский государственный университет;
- Воронежский государственный технический университет;
- Липецкий государственный технический университет;
- Орловский государственный аграрный университет;
- Орловский государственный технический университет;
- Орловский государственный университет;
- Пермский государственный технический университет;
- Пятигорский государственный технологический университет;
- Самарский государственный технический университет;
- Тихоокеанский государственный университет;
- Тульский государственный технический университет.

Целью конференции являлось решение научно-технических проблем машиностроительного комплекса по повышению конкурентоспособности выпускаемых изделий и выводу промышленности из кризиса, а также знакомство с опытом организации машиностроительного производства, подготовки технических кадров, работы с информационными базами данных в области технических наук и организации научно-исследовательской деятельности на промышленных предприятиях и в образовательных учреждениях Финляндии. В ходе работы конференции был организован свободный обмен опытом, мнениями, идеями, позволивший ее участникам скоординировать направления деятельности, определить новую тематику исследований, направленных на решение важнейших задач, над которыми в настоящее время ведут работу различные научные школы и коллективы ученых.

На конференции были представлены следующие направления научных исследований:

- технологии, оборудование и инструмент лезвийной и абразивной обработки;
- технологии, оборудование и инструмент упрочняющей и отделочной обработки, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин;
- технологии и оборудование обработки физико-техническими методами;
- технологии ремонта и восстановления деталей машин и инструмента;
- технологии диагностики и контроля качества выпускаемой продукции;
- трение, износ, смазка в машинах и механизмах;
- технологии легкой промышленности;
- ресурсо- и энергосбережение в машиностроительном комплексе;
- технологии организационно-экономического управления производством;
- образовательные технологии в системе многоуровневого университетского политехнического образования.

При проведении пленарного заседания в Helsinki University of Technology к собравшимся с приветствием обратились проректор по научной работе и международным связям Орловского государственного технического университета д-р техн. наук, проф. Ю.С. Степанов, проректор департамента машиностроения Helsinki University of Technology Kalevi Ekman, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" Донского государственного технического университета, директор НИИ "Вибротехнология" д-р техн. наук, проф. А.П. Бабичев, директор Технологического института ОрелГТУ д-р техн. наук, проф. А.В. Киричек, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" Муромского института Владимирского государственного университета канд. техн. наук, проф. Р.Ш. Блурцян.

Большой интерес присутствующих вызвали выступления заведующего кафедрой "Машины и аппараты пищевых производств" Технологического института ОрелГТУ д-ра техн. наук, проф. В.П. Корячкина,

доцента кафедры "Станки и инструменты" Муромского института Владимирского государственного университета д-ра техн. наук Д.Л. Соловьева и преподавателя кафедры "Технология машиностроения" Ливенского филиала ОрелГТУ Е.А. Звягиной.

В ходе дискуссии о перспективных направлениях научных исследований в области технологии машиностроения, инновационном развитии научно-исследовательских и производственных структур выступили проф. А.П. Бабичев (Ростов-на-Дону), проф. Ю.С. Степанов (Орел), доц. Д.Р. Блурцян (Муром Владимирской обл.), доц. А.В. Морозова (Орел).

В процессе проведения конференции были организованы встречи с представителями машиностроительного производства и бизнеса Финляндии, а также знакомство с опытом работы ведущих промышленных предприятий, образовательных учреждений и научно-исследовательских центров Финляндии.

• Промышленная компания VALTRA (Тампере), основанная в 1951 г., является всемирно известным разработчиком, производителем и дистрибьютором сельскохозяйственной техники и оборудования и занимает третье место в мире среди производителей и дистрибьюторов этой техники. Компания имеет нетто-продажи на сумму 869 млн евро и персонал 2300 чел. Дилерская сеть корпорации AGCO промышленной компании VALTRA состоит из 3900 независимых дилеров и дистрибьюторов по всему миру. Известные своей надежностью, многофункциональностью, долговечностью и скандинавскими традициями тракторы VALTRA создаются для каждого заказчика индивидуально, разрабатываются с учетом эксплуатации в суровом климате, с высоким уровнем производительности даже в сложных условиях работы. В промышленной компании VALTRA внедрены стандарты ISO 9001, менеджмент здоровья и безопасности OHSAS 18001, она имеет Финский сертификат качества, сертификат по охране окружающей среды ISO 14001.

• Промышленная компания METSO (Jyvaskyla) – ведущий производитель в области энергетического машиностроения – занимается производством тяжелых редукторов, а также генераторов для ветровых энергетических установок. Участники конференции встретились с вице-президентом этой фирмы Juhani Pylkkänen.

• Helsinki University of Technology (Хельсинки) является всемирно известным университетом науки и технологий, где обучение, исследование и инновации полностью соответствуют современным тенденциям развития промышленности и бизнеса. Полное ежегодное финансирование университета составляет 220 млн евро, из которых 54 % являются государственными вложениями, а 46 % – результатом внешнего финансирования. В университете работают 3500 чел., в том числе 250 профессоров. Проректор департамента машиностроения Kalevi Ekman отметил специфику обучения в университете, которая заключается в том, что инженер, получивший образование, но не имеющий практических навыков, не может быть хорошим специалистом. Процесс подготовки инженера включает выполнение реальных технических проектов, тренинги по формированию умения работать в команде и развитию творческого мышления. Студент в период обучения проходит через своеобразный "бизнес-инкубатор" университета. Так, для выполнения дипломных проектов, направленных на решение конкретной технической задачи, создаются команды из 10–12 студентов, заканчивающих обучение на разных специальностях университета. Команда работает в течение года. Дипломный проект включает весь жизненный цикл изделия – от разработки проекта и системы его инвестиционного обеспечения до выпуска опытного образца. Примерами таких проектов являются NORDRILL (разработка бурящего инструмента, который крепится к небольшому трактору и служит для забора образцов почвы), PROTEOS (разработка нового метода предотвращения засорения каналов вентиляции в бумажном производстве), USVA (разработка душевой установки для дома, с помощью которой можно проводить SPA-процедуры).

• Международный научно-исследовательский центр VTT creates business from technology – самый крупный в скандинавских странах; в нем работают более 2000 исследователей, деятельность которых охватывает большинство отраслей современных знаний в области техники и технологии. По словам вице-президента центра Harri Soininen, VTT объединяет в творческие коллективы ученых разных стран и различных специальностей для решения конкретных производственных проблем.

• Центр регистрации патентов PATENT – OCH REGISTERSTYRELSEN имеет главной задачей обеспечение своих клиентов технической информацией с учетом последних тенденций и инноваций в работе промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций Финляндии и других стран. Центр обеспечивает клиентам бесплатный доступ к своим ресурсам, которые содержат полное описание зарегистрированных во всем мире патентов на изобретения, причем ответ на любой запрос клиент получает в течение всего 5–15 мин.

Участники конференции отметили высокий уровень производственных и образовательных технологий в университетах и промышленных компаниях Финляндии, а также высокую степень взаимопроникновения бизнес-структур, научно-исследовательских организаций и университетов. Кроме того, в ходе встреч приоритетной позицией российских ученых и специалистов промышленных предприятий и образовательных учреждений Финляндии являлась взаимная заинтересованность в более тесном международном сотрудничестве в области образовательной, научной и производственной деятельности, в том числе в области взаимного обмена педагогическими кадрами и студентами-стажерами.

В ходе конференции "Технология–2007" был заключен договор о стратегическом партнерстве между Орловским государственным техническим университетом и консалтинговой фирмой DBD International Development Ltd. (Финляндия), которая занимается подбором стратегических партнеров в области образования и научно-производственной деятельности.

В этом номере журнала опубликованы статьи участников конференции.

А.В. Киричек *(ОрелГТУ),* **Д.Л. Соловьев** *(Муромский институт Владимирского государственного университета)*

Деформационное упрочнение управляемыми ударными импульсами*

Описаны новые схемы деформационного упрочнения с использованием нагружения управляемыми ударными импульсами. Управление формой ударных импульсов должно осуществляться за счет изменения геометрических параметров ударной системы; при этом наиболее эффективно подбирать такие ударные системы, которые позволяют генерировать импульсы прямоугольной или близкой к ней пролонгированной формы. Представлены технологические возможности таких схем деформационного упрочнения.

The described new scheme surface strain hardening, when to load is realized operated striking impulse. The form management striking impulse must be realized to account of the change geometric parameter striking system. Most effectively to select such striking systems, which allow to generate the impulses square-wave or close to her prolonged forms. Presentation technological possibilities of this schemes surface strain hardening.

Для повышения работоспособности и надежности деталей машин в технологии машиностроения успешно применяется операция упрочнения *поверхностным пластическим деформированием* (ППД). На практике широкое распространение получили способы ППД (обработка дробью, выглаживание, накатывание), обеспечивающие глубину наклепанного слоя не более 1,5...2 мм [1, 2]. Однако эффективность упрочнения ППД часто связана именно с созданием глубоко наклепанного слоя. Например известно, что разрушение деталей машин, испытывающих усталостные нагрузки, начинается с зарождения усталостной трещины в некоторой опасной точке, расположенной в поверхностном слое.

Для повышения сопротивления усталости таких деталей необходима глубина упрочнения, перекрывающая опасную точку. Для тяжело нагруженных деталей такая точка часто находится на глубине 3...5 мм и более, что требует создания соответствующей толщины упрочненного слоя. Известно также, что при действии на поверхность деталей высоких контактных нагрузок низкая твердость сердцевины может привести к сильной деформации и разрушению упрочненного слоя малой толщины. В этих случаях повышение контактной выносливости также обеспечивается за счет большой толщины упрочненного слоя.

По характеру нагружения все способы ППД подразделяются на статические (накатывание, выглаживание и др.) и ударные (обработка дробью, центробежная обработка, чеканка и др.). С энергетической точки зрения динамическое воздействие более выгодно по сравнению со статическим, особенно при формировании большой глубины упрочнения, когда необходимо создавать большие давления (более $3\sigma_т$, где $\sigma_т$ – предел текучести обрабатываемого металла) в очаге деформации инструмента и обрабатываемой поверхности. Однако существенным недостатком известных ударных способов является то, что энергия удара расходуется на пластическую деформацию нерационально, и результаты упрочнения плохо предсказуемы. Основной причиной этого является то, что с увеличением скорости нагружения уменьшается время протекания пластической деформации, поэтому ее значение будет зависеть не только от силы удара, т.е. амплитуды ударного импульса, но и от его длительности, что обычно при упрочнении ППД не учитывалось.

Проведенные исследования [2, 3] показали, что форма ударных импульсов в очаге деформации зависит от применяемой ударной системы (рис. 1 и табл. 1). При ударе шаром формируется треугольный импульс с высокой амплитудой, небольшой длительности и с малой энергией. При ударе торцом цилиндрического стержня (бойком) формируется импульс трапецеидальной формы меньшей амплитуды, но большей длительности и с большей энергией. При ударе бойком через предварительно статически поджатое к нагружаемой поверхности промежуточное звено (волновод) генерируется пролонгированный импульс, содержащий головную и хвостовую части. Хвостовая часть импульса формируется за счет отра-

* Исследования выполнены на средства гранта МД-2698.2007.8.

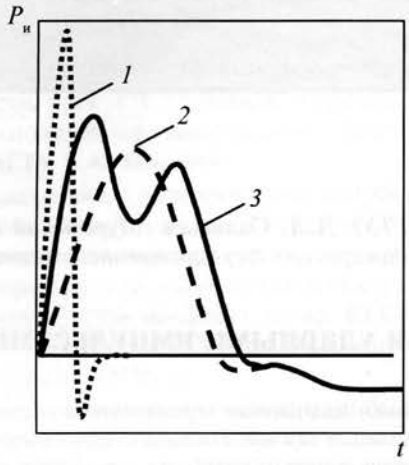


Рис. 1. Форма ударного импульса в зависимости от ударной системы (табл. 1):
$P_и$ – сила, Н; t – длительность импульса; A – энергия ударов; f – частота ударов; $P_{ст}$ – сила статической нагрузки; L – длина инструмента; L_1, L_2 – длина бойка и волновода соответственно

женных волн деформации, образованных в ударной системе при ударе. Пролонгированный ударный импульс отличается наибольшей энергией.

Таким образом, нагружение ударными импульсами прямоугольной или пролонгированной формы позволит наиболее полно использовать энергию удара при упругопластическом деформировании, а управлять формой ударных импульсов можно за счет изменения геометрических параметров ударной системы (при условии, что ее элементы изготовлены из одного материала – обычно из стали).

Авторами предложены следующие рекомендации по ударным системам для деформационного упрочнения.

Для генерирования прямоугольной (трапецеидальной) формы ударных импульсов необходимо использовать ударную систему, состоящую из длинного ($L_1 > 0{,}05...0{,}08$ м) цилиндрического бойка с гладкой поверхностью, при этом его длина и диаметр должны удовлетворять условию $L_1/d_1 > 3$.

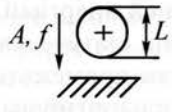
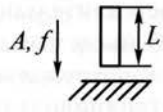
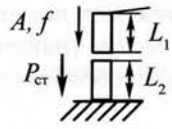
Для формирования ударного импульса, состоящего из головной и хвостовой частей, необходимо использовать ударную систему, состоящую из бойка и волновода, имеющих гладкую цилиндрическую форму. Геометрические соотношения ударной системы: $d_1/d_2 = 1...3$, $L_1/L_2 = 3...5$, $L_2/d_2 > 3$, где L_2 и d_2 – соответственно длина и диаметр волновода, позволяют значительно увеличить КПД процесса, при этом на упругопластическую деформацию может расходоваться до 86 % энергии удара. Основным условием генерирования пролонгированных ударных импульсов является обеспечение неразрывного контакта волновода с упрочняемым металлом во время передачи ударного импульса предварительным статическим поджатием волновода с инструментом на конце к поверхности детали. Поэтому формирование хвостовой части ударного импульса возможно только при статико-импульсном нагружении.

Для использования управляемого импульсного нагружения при ППД разработаны новые схемы, которые основаны на базе известных ударных способов [1].

Одним из таких способов является центробежная обработка (табл. 2, схема I), при которой на упрочняемую поверхность наносят последовательные удары рабочими элементами (шарами или роликами), свободно сидящими в радиальных отверстиях вращающегося диска. Под действием центробежных сил рабочие элементы в радиальных отверстиях занимают крайнее положение, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, при этом отдавая энергию, которую создает центробежная сила. Нагружение происходит ударными импульсами с большой амплитудой и малой длительностью.

Таблица 1

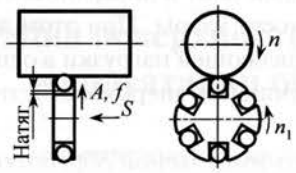
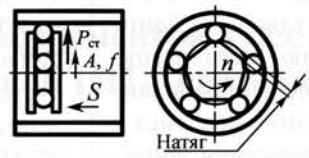
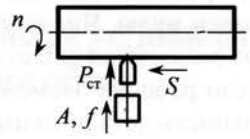
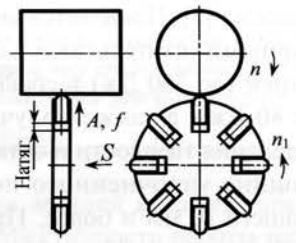
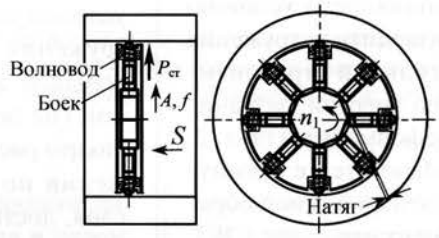
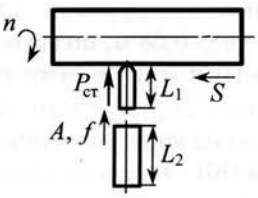
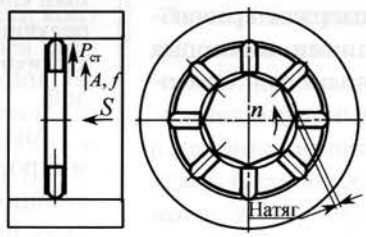
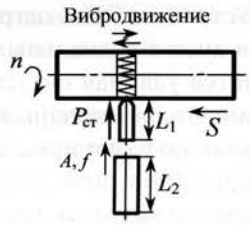
Виды ударных систем

Подвод энергии удара в очаг деформации		
Ударом инструмента		Ударом бойка по волноводу* (рис. 1, кривая *3*)
Шаром (рис. 1, кривая *1*)	Бойком (рис. 1, кривая *2*)	
		

*Инструмент – торец волновода.

Таблица 2

Схемы способов поверхностного пластического деформирования

Известные способы	 I. Центробежная обработка	 II. Ударное раскатывание	 III. Упрочняющая чеканка через статически нагруженный инструмент
Новые способы	 Ia. Центробежная обработка бойковым инструментом	 IIa. Ударное раскатывание бойковым инструментом	 IIIa. Статико-импульсная обработка
	–	 IIб. Статико-импульсное раскатывание	 IIIб. Статико-импульсная обработка с осциллирующим движением инструмента

Обозначения: n, n_1 – частота вращения детали и инструмента соответственно; S – осевая подача инструмента относительно заготовки; $P_{ст}$ – статическая нагрузка; L_1, L_2 – длина бойка и волновода.

Увеличение доли энергии удара, расходуемой на пластическое деформирование, может осуществляться за счет применения ударных импульсов прямоугольной (трапецеидальной) формы. Для этого необходимо в качестве рабочих элементов использовать бойки вытянутой цилиндрической формы (табл. 2, схема Ia), длина которых удовлетворяет условию $L_1 > 0{,}05...0{,}08$ м. При вращении диска с частотой n_1 бойки под действием центробежной силы занимают крайнее положение, нанося удары по обрабатываемой поверхности. Данная схема предполагает также увеличение энергии удара за счет большей массы бойков в сравнении с используемыми ранее шарами или роликами. Если при обычной центробежной обработке глубина упрочнения, как правило, не превышает 1 мм, то предлагаемая схема позволит увеличить глубину упрочненного слоя в 2...3 раза. Недостатком такой схемы является увеличение габаритных размеров вращающегося диска.

При ударном раскатывании (табл. 2, схема II) рабочие элементы (шары или ролики), установленные в сепараторе, вращаются между поверхностями обрабатываемого отверстия и кулачковой оправки, совершая переносное или планетарное движение. Кулачковая оправка представляет собой цилиндр, на котором равномерно по окружности выполнено несколько равных площадок (лысок) или профильных канавок. Обкатывая выступающие участки кулачковой оправки, рабочие элементы совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по обрабатываемой поверхности в момент заклинивания; при этом натяг максимален. При перемещении

рабочего элемента на цилиндрическом участке кулачковой оправки происходит раскатывание. При прохождении рабочим элементом лыски натяг минимален или равен нулю. Число ударных импульсов за один оборот раскатника равно произведению числа лысок на число рабочих элементов. В процессе обработки поверхность детали испытывает двойное воздействие – вследствие раскатывания и приложения динамической нагрузки. При кратковременном приложении нагрузки пластическая деформация не успевает распространиться на значительную глубину. Использование инструмента, удовлетворяющего условию $L_1 > 0{,}05...0{,}08$ м, позволяет производить нагружение ударными импульсами прямоугольной (трапецеидальной) формы, увеличивая долю энергии, затрачиваемой на упругопластическую деформацию (табл. 2, схема IIб). Эта схема имеет в основном те же преимущества и недостатки, что и схема центробежной обработки бойковыми рабочими элементами.

Для генерирования пролонгированных ударных импульсов предложена схема статико-импульсной обработки при ударном раскатывании (табл. 2, схема IIб). Устройство для нагружения содержит вращающийся диск с радиальными отверстиями, в которых находится ударная система боек–волновод. Отверстия имеют две ступени: в первой (меньшего диаметра) свободно размещены боек и частично волновод, а во второй (большего диаметра) – оставшаяся часть волновода и пружина, расположенная между пояском волновода и торцовой частью второй ступени отверстия. При размещении устройства внутри обрабатываемого отверстия волновод упирается в нагружаемую поверхность, сжимая пружину. В результате волновод воздействует на упрочняемую поверхность под действием силы упругости сжатой пружины. Во время работы устройства выступающие участки кулачковой оправки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по статически поджатому волноводу в момент заклинивания.

Такие схемы можно использовать для обработки внутренних отверстий больших диаметров: ударное раскатывание бойковым инструментом – для диаметров более 35 мм, статико-импульсное раскатывание – для диаметров более 50 мм. При этом глубина упрочненного слоя может достигать 2...3 мм и более.

Для создания большой глубины упрочнения (до 10...15 мм) применяют упрочняющую чеканку, когда инструмент под действием динамической нагрузки воздействует на поверхность детали при их заданной относительной подаче. При чеканке через статически нагруженный инструмент (табл. 2, схема III) в отличие от упрочняющей чеканки инструмент сначала статически поджимают к поверхности детали, а затем через него наносят удары. При этом добавление статической составляющей нагрузки в основном используется для улучшения шероховатости упрочненной поверхности.

При статико-импульсной обработке на основе упрочняющей чеканки (табл. 2, схема IIIа) используют специально рассчитанные геометрические соотношения ударной системы боек–волновод для данных условий упрочнения [2]. Появляется возможность нагружения ударными импульсами со значительно большей энергией (до 300 Дж) в сравнении с чеканкой (не более 80 Дж), а также получать требуемые эпюры распределения твердости и остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя, достигающего 10 мм и более. При статико-импульсной обработке можно формировать необходимую равномерность упрочнения [3, 4]; может быть получен как равномерно упрочненный поверхностный слой, так и слой с гетерогенной структурой с чередующимися твердыми и мягкими составляющими, которая увеличивает контактную выносливость деталей.

Аналогично способам, создающим регулярный микрорельеф упрочненной поверхности и использующим для этого осциллирующее движение, может быть предложена кинематическая схема с осциллирующим движением для статико-импульсной обработки на основе упрочняющей чеканки (табл. 2, схема IIIб). Это позволит дополнительно регулировать рисунок гетерогенной структуры, увеличивая ее возможности для повышения контактной выносливости деталей.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Механика** нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов и др. М.: Машиностроение-1, 2005. 149 с.

3. **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.

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

В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалева, Д.В. Чмыхов *(Брянский ГТУ)*

Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом

Показана возможность и предложены принципы адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации финишной отделочно-упрочняющей обработкой программным способом. Отмечены особенности формирования микротопографии и оптических свойств поверхностей. Даны примеры моделирования и реализации микрорельефов поверхностным пластическим деформированием (ППД) в технологических системах с компьютерным управлением.

Principles to adapting the surfaces of the details of the machines to condition of the usages by finish processing by programme way are considered. Particularities of the shaping characteristic surfaces are noted. Examples of modeling and realization of the processing surface plastic deformation (SPD) in technological system with computer management are given.

Соединения деталей машин, определяющие надежность и эффективность работы изделия в целом, эксплуатируются в основном в двух режимах: стационарном и нестационарном. Стационарным режимам эксплуатации технических объектов свойственно постоянство внешних воздействий на поверхности контакта ($\overline{P}$ = const). Однако в большинстве случаев имеют место нестационарные условия эксплуатации, характеризующиеся неравномерным распределением нагрузок, скоростей относительного скольжения и других возмущающих воздействий ($\overline{P}$ = var) как по координатам X контактирующих поверхностей деталей, так и во времени, т.е. в пространственно-временной области. В таких случаях при изотропности параметров *качества поверхностного слоя* (КПС) будет иметь место анизотропность *эксплуатационных свойств* (ЭС) поверхности ($\overline{ЭС}$ = var), проявляющаяся, например, в различных величинах триботехнических параметров и контактной жесткости ее отдельных участков, потере ими требуемой герметичности и т.д. Это отрицательно сказывается на ЭС изделия в целом на определяющем этапе его жизненного цикла, связанного с потребителем.

На графовой модели формирования качества и ЭС поверхностей трибоэлементов (рис. 1) представлены в виде вершин состояния функциональных поверхностей трибоэлемента S_0–S_4 для разных уровней жизненного цикла (*I*–*III*) и дуги переходов U_{ij} из i-й вершины в j-ю, характеризующиеся видом функций от пространственной координаты X (например, длина

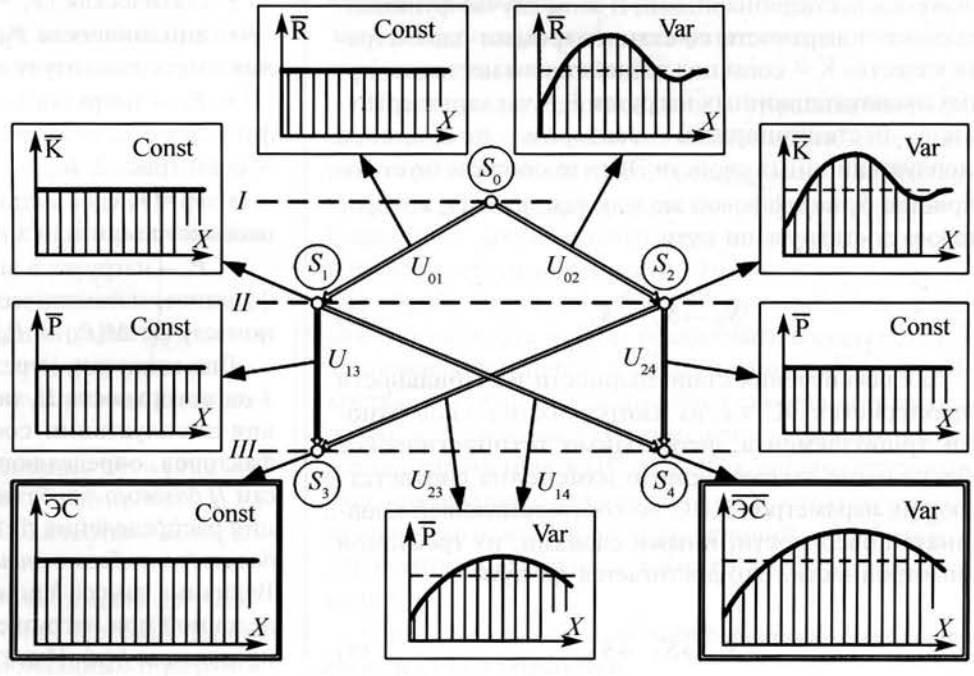


Рис. 1. Графовая модель формирования качества и эксплуатационных свойств функциональных поверхностей трибоэлементов: *I*, *II*, *III* – исходный, технологический и эксплуатационный уровни; $\overline{R}$, $\overline{K}$, $\overline{P}$, $\overline{ЭС}$ – соответственно векторы условий обработки, параметров качества поверхностного слоя, условий эксплуатации и параметров эксплуатационных свойств; X – координата точки приложения воздействий на поверхность трибоэлемента

плоской направляющей трения скольжения) и дополнительными параметрами, характеризующими множества условий обработки $\overline{R}$, параметров КПС $\overline{K}$, условий эксплуатации $\overline{P}$ (нагрузка, скорость относительного скольжения, температура, динамические факторы и др.). Вершины графа S_1 и S_3 соответствуют изотропности, а вершины S_2 и S_4 – анизотропности качества (S_1, S_2) и параметров эксплуатационных свойств (S_3, S_4) функциональных поверхностей трибоэлементов.

Как итог технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин возможны две вершины графовой модели:

1) S_3 – параметры эксплуатационных свойств не являются функцией от X и постоянны;

2) S_4 – параметры эксплуатационных свойств являются функцией от X и переменны.

При требованиях потребителя к качеству продукции наиболее актуальным является состояние S_3. В современных условиях производства оно может быть достигнуто в соответствии с логическим требованием

$$S_3 = (U_{01} \wedge U_{13}) \vee (U_{02} \wedge U_{23}). \quad (1)$$

Традиционным до недавнего времени являлся следующий путь эволюции исходного состояния поверхности S_0, которое постулируется стабильно изотропным, до эксплуатационного состояния S_3:

$$S_0 \overset{U_{01}}{\rightarrow} S_1 \overset{U_{13}}{\rightarrow} S_3. \quad (2)$$

Однако на практике имеют место ситуации, когда условия эксплуатации $\overline{P}$ соединения трибоэлементов являются нестационарными. В этом случае функциональные поверхности со стационарными параметрами качества $\overline{K}$ = const под воздействием нестационарных эксплуатационных нагрузок $\overline{P}$ = var характеризуются нестационарным вектором показателей эксплуатационных свойств $\overline{ЭС}$, что соответствует состоянию S_4 на графовой модели (см. рис. 1), которое можно достигнуть по пути

$$S_0 \overset{U_{01}}{\rightarrow} S_1 \overset{U_{14}}{\rightarrow} S_4. \quad (3)$$

Для обеспечения стационарности и стабильности характеристик ЭС, т.е. их изотропности по поверхности трибоэлемента, необходимо технологическое обеспечение закономерного изменения соответствующих параметров КПС по соответствующей координате поверхности, иными словами, их требуемой анизотропности. Это достигается по пути

$$S_0 \overset{U_{02}}{\rightarrow} S_2 \overset{U_{23}}{\rightarrow} S_3. \quad (4)$$

Реализация этого пути является актуальной проблемой технологии машиностроения в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин. Ее кардинальному решению способствует решение ряда сопутствующих задач, в частности:

1) определение пространственно-временных закономерностей эксплуатационных факторов, действующих на сопряжение ($P_i = f_{i1}(X)$, $P_i = f_{i2}(t)$), характеризующих нестационарность условий эксплуатации;

2) выявление соответствующих закономерностей изменения значений параметров КПС по поверхности трибоэлемента в функции ее координаты $X(K_i = f_i(X))$, способных компенсировать нестационарность условий эксплуатации и обеспечить состояние поверхности S_3, т.е. ее изотропность по параметрам эксплуатационных свойств;

3) формирование гаммы эффективных технологических методов обработки, позволяющих реализовать требуемые закономерности изменения значений параметров качества (наклеп, остаточные напряжения, шероховатость и др.) в функции координат обрабатываемой поверхности ($K_i = f_i(X)$), т.е. реализуется путь U_{02}, решающий задачу достижения вершины S_3 (см. рис. 1), и, следовательно, задачу достижения изотропности поверхности по параметрам эксплуатационных свойств при нестационарных условиях эксплуатации.

Решение задачи 1 целесообразно искать исходя из следующих предпосылок. В процессе эксплуатации пар трения скольжения (рис. 2, *а*) со стороны элемента *1* на поверхность *П* элемента *2* в общем случае могут действовать нагрузки следующих видов:

- статическая ($P_1 = P_0$ = const);
- динамическая P_2, которая в частном случае может иметь амплитуду a_p и период T;
- P_3 – нагрузка в виде стационарной случайной функции с математическим ожиданием $M\{P_3\} = P_0 =$ = const (рис. 2, *б*);
- $P_4 = F(X)$ – закономерно изменяющаяся (имеющая экстремум или монотонная);
- P_5 – нагрузка в виде нестационарной случайной функции, математическое ожидание которой (в данном случае $M\{P_5\} = P_4$) зависит от X (рис. 2, *в*).

Вид нагрузки, передаваемой со стороны элемента *1* на поверхность *П*, не определяет однозначно условия эксплуатации соединения. Одним из важных факторов, определяющих эпюру износа h поверхности *П базового трибоэлемента* (БТЭ) *2* является функция распределения $f(x)$ координаты X положения *мобильного трибоэлемента* (МТЭ) *1* по оси X (рис. 2, *г*). Величина износа h поверхности *П* будет равнораспределенной при нагрузке P_1 и равномерном законе распределения $f_1(x)$. Имеется в виду, что параметры КПС

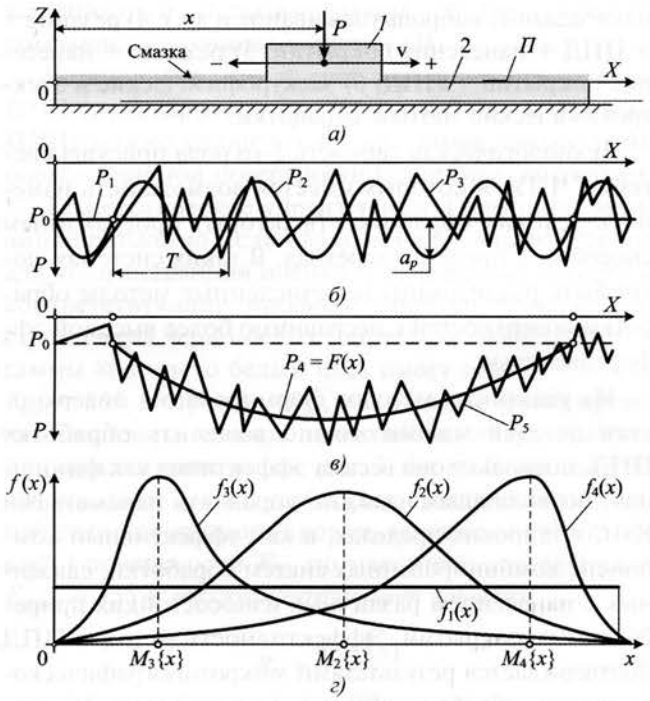


Рис. 2. Модель соединения – пара трения скольжения (*а*), возможные виды действующих нагрузок *P* (*б*, *в*) и законы распределения параметра *x* (*г*)

распределены изотропно по поверхности. При любой стационарной нагрузке (P_1, P_2, P_3), но при распределениях $f_i(x)$, отличных от равномерного $f_1(x)$, величина износа h поверхности $П$ распределяется неравномерно. Это приводит в общем случае к потере точности и выходу из строя оборудования, особенно технологического.

В этом случае худшая ситуация возникает при действующих нагрузках P_4 и P_5 и функции распределения положения f_2 ползуна *1* относительно поверхности $П$. В окрестностях точки $M_2\{x\}$ ($X = M_2\{x\} \pm k\sigma(x)$) при этом будет наблюдаться повышенный износ, величина которого пропорциональна функции $F(X)$. Все это относится и к цилиндрическим направляющим трения скольжения.

Таким образом, стабильность условий эксплуатации соединений трения скольжения характеризуется законом действия нагрузки $P_i = f_i(x)$ и плотностью распределения положения точки ее приложения к поверхности $f_i(x)$.

Решение задач 2 и 3, т.е. реализация пути (4) с позиций системного подхода, должно базироваться на определенных принципах, в качестве которых предлагаются следующие.

1. *Принцип определенности.* Возможность аргументированного назначения на рабочих чертежах детали параметров качества их функциональных поверхностей исходя из реальных будущих условий эксплуатации.

2. *Принцип существования.* Возможность аргументированного выбора наиболее эффективного метода обработки из допустимых, обеспечивающего технические требования. Сущность этого принципа заключается в том, что существуют эффективные технологические методы обработки, которые обеспечивают заданные законы распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали, диктуемые нестационарностью условий эксплуатации.

3. *Принцип управляемости.* Возможность технологического управления заданными параметрами качества поверхности (или эксплуатационных свойств) в регламентируемых пределах варьирования с требуемой надежностью по заданному закону.

4. *Принцип физической реализуемости.* Возможность на данном предприятии реализовать соответствующий технологический процесс или экономически обоснованную возможность воспользоваться услугами других предприятий. Этот принцип важно учитывать для виртуальных предприятий, т.е. в условиях, когда проектирование и изготовление осуществляются в географически удаленных местах, а связь осуществляется компьютерными средствами.

Что касается принципа определенности, то к настоящему времени технологическая наука располагает данными по законам формирования показателей эксплуатационных свойств в зависимости от условий эксплуатации и параметров качества поверхности элементов соединения, а также имеется четкий научно обоснованный набор параметров КПС, технологическое обеспечение которого гарантирует получение заданных показателей эксплуатационных свойств с требуемой надежностью [1].

Принципы существования и управляемости по своей сути требуют наличия возможности изменения режимов обработки при формировании элементарной поверхности, которая является функциональной с заданным законом изменения параметров качества в пространственной области. Это означает, что условия обработки должны быть управляемыми в пределах перехода, что можно реализовать в системах, обладающих достаточно высокой технологической гибкостью, под которой понимается способность *технологической системы* (ТС) обеспечить заданные множества параметров КПС или ЭС в регламентированных интервалах с заданной надежностью путем направленного варьирования условий обработки и управления механизмом технологического наследования.

Существуют два рода *технологической гибкости систем* (ТГС) обработки:

1) технологическая гибкость 1-го рода (ТГС-1), при которой имеется возможность выбора гаммы методов обработки поверхностей (в общем случае различной физической природы) для заключительных операций технологического процесса и группы управляемых факторов каждого из них, постоянных по величине в пределах соответствующего перехода и обеспечивающих изотропность поверхности по регламентируемым значениям параметров КПС в заданных пределах с требуемой надежностью;

2) технологическая гибкость 2-го рода (ТГС-2), при которой имеется возможность выбора нескольких методов обработки поверхностей (в общем случае различной физической природы) для заключительных операций технологического процесса и группы управляемых факторов каждого из них, одним или несколькими из которых можно программным способом управлять в пределах перехода по закону, обеспечивающему в итоге заданную анизотропность распределения параметров КПС или ЭС по обрабатываемой поверхности с требуемой надежностью.

Для систем с технологической гибкостью 2-го рода целесообразно ввести понятия степеней свободы, число которых однозначно соответствует числу факторов режимов обработки, которыми можно программно управлять в пределах перехода, т.е. в процессе обработки одной элементарной поверхности.

Все системы обработки поверхностей, в которых отсутствуют элементы программного управления типа CNC [2], обладают технологической гибкостью 1-го рода. К ним можно отнести следующие методы формирования поверхностей деталей машин на чистовых и финишных стадиях технологического процесса обработки: 1) резание (чистовое и тонкое точение, фрезерование, шлифование, алмазно-абразивная обработка и др.); 2) резание + нанесение покрытий (гальванические, твердые нитридсодержащие, лазерное легирование, ионная имплантация и др.); 3) резание + ППД (накатывание шариками или роликами, дорнование, алмазное выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание и др.); 4) резание + + ППД + нанесение покрытий; 5) резание + нанесение покрытий + ППД; 6) электрофизические и электрохимические методы обработки.

Технологическая гибкость 2-го рода присуща системам ЧПУ, в которых имеется возможность изменять условия обработки (факторы) программным способом в пределах перехода. В таких системах могут быть реализованы перечисленные методы обработки поверхностей с несравнимо более высокой эффективностью.

Из указанных методов формирования поверхностей деталей машин можно выделить обработку ППД, поскольку она весьма эффективна как финишная, позволяющая надежно управлять параметрами КПС в широких пределах, и как эффективный компонент комбинированных систем обработки, связанных с нанесением различных износостойких приработочных покрытий. Эффективность методов ППД подтверждается результатами микротопографического анализа обработанных поверхностей (рис. 3), про-

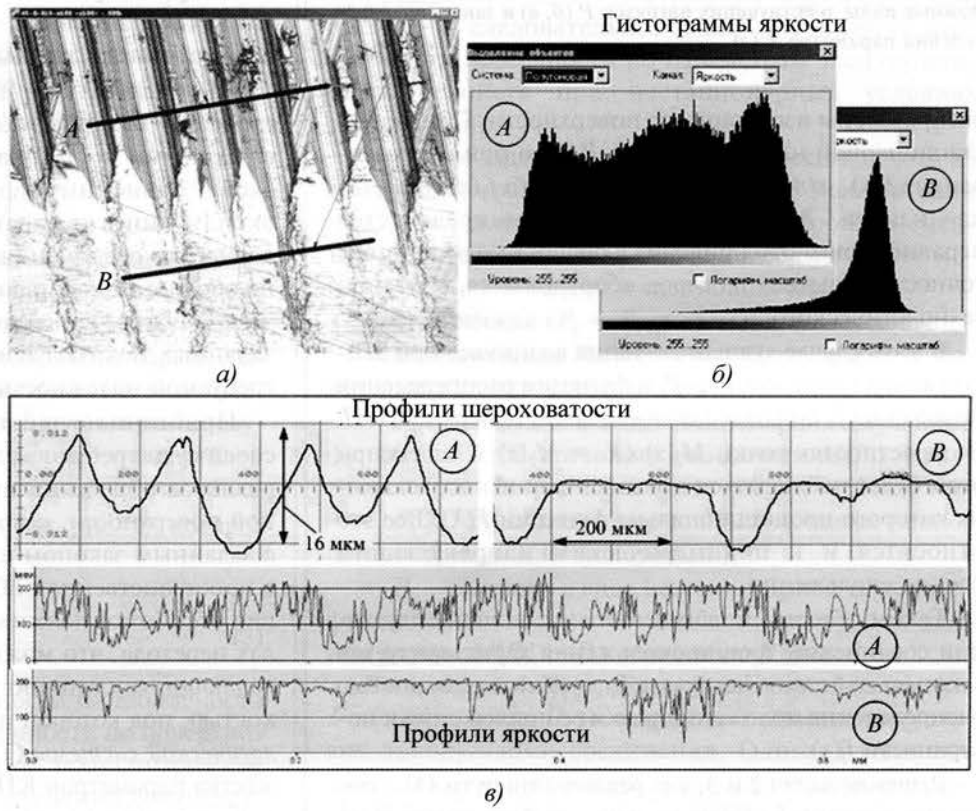


Рис. 3. Результаты микротопографического исследования поверхности образца из стали 45: *а* – микротопография (*A* – торцовое фрезерование: *Ra* = 4,5 мкм, *R*max = 20,8 мкм, *Rp* = = 10,8 мкм; *B* – последующее алмазное выглаживание: *Ra* = 2,3 мкм, *R*max = 12,9 мкм, *Rp* = = 3,5 мкм); *б* – гистограммы яркости; *в* – фрагменты профилограмм шероховатости и профилей яркости

веденного с использованием соответствующих компьютеризированных систем [2].

Установлено, что за счет варьирования условий ППД (предварительная обработка, вид и режимы ППД) можно управлять оптическими параметрами обрабатываемой поверхности (например, яркостью).

Технологическое управление той или иной величиной возможно, если она имеет единицы измерения для количественной оценки. Гистограммы яркости и соответствующие профили яркости поверхности строятся для черно-белых тонов. При шкале цветовой гаммы 8bit чисто белый цвет имеет оценку яркости $E_{max} = 255$, а черный – $E_{min} = 0$. Именно в этих пределах изменяется яркость поверхности на гистограммах и профилях яркости (см. рис. 3, *б* и *в*). Поскольку такая шкала не совсем удобна для практических целей, предлагается пронормировать текущее значение яркости поверхности $E_{тек}$ по максимальной величине $E_{max} = 255$ и ввести *коэффициент яркости*

$$R_E = \frac{E_{тек}(x)}{E_{max}}, \qquad (5)$$

где x – рассматриваемая координата поверхности на трассе измерения (A, B).

Таким образом, получаем график зависимости $R_E = f(x)$, по форме идентичный профилям яркости, но величина R_E теоретически изменяется от 0 до 1: чисто черный цвет – $R_E = 0$; чисто белый цвет – $R_E = 1$. Остановившись на такой оценке яркости поверхности, для величины R_E целесообразно ввести следующие числовые характеристики:

1) максимальное $R_{E\,max}$, минимальное $R_{E\,min}$ значения коэффициента яркости и его максимальный перепад:

$$\Delta(R_E) = R_{E\,max} - R_{E\,min}. \qquad (6)$$

Для идеально однотонной поверхности $\Delta(R_E) = 0$;

2) среднее арифметическое значение коэффициента яркости

$$\overline{R}_E = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_{Ei}, \qquad (7)$$

где R_{Ei} – i-е значение R_E в серии из n измерений.

Величина R_E количественно характеризует среднюю яркость или средний тон поверхности в черно-белых оттенках.

Эти количественные оценки коэффициента яркости ($R_{E\,max}$, $R_{E\,min}$, $\Delta(R_E)$, $\overline{R}_E$) имеют четкий физический смысл, и их может оказаться достаточно для начала исследований по технологическому обеспечению тоновых или яркостных параметров качества обрабатываемых поверхностей.

Широкие возможности по обеспечению изотропности эксплуатационных свойств поверхностей деталей открываются при реализации их обработки методами ППД на станках с *числовым программным управлением* (ЧПУ). Синтез ППД и ЧПУ при применении управления обработкой от *персонального компьютера* (ПК) позволяет реализовать обработку поверхностей деталей машин *поверхностным пластическим деформированием программным способом* (ППДПС), которая применима для обработки как плоских, так и цилиндрических, торцовых, конических и других поверхностей, образующие которых имеют аналитическое описание. При этом решается широкий спектр вопросов инженерии поверхности, включая ее предварительное моделирование, анализ и обработку.

Метод ППДПС позволяет создавать на обрабатываемой поверхности микрорельефы с управляемой структурой и параметрами, что крайне важно для управления трибологическими процессами в эксплуатации.

Гибридизация ТС обработки ППД с системой ЧПУ (в простейшем случае типа NC) позволяет резко расширить ее технологические возможности, осуществлять операции различного технологического назначения: размерная обработка ППД программным способом, нанесение покрытий – и все это при максимальной технологической гибкости, так как имеется и реализуется возможность программного управления режимами обработки в пределах перехода. С учетом возможностей ПК его гибридизация даже с простой системой ЧПУ типа NC порождает систему PCNC – систему с совершенно иными, расширенными функциональными возможностями [3].

Разработанные математическое и программное обеспечение позволяют осуществлять компьютерное моделирование процесса обработки и ее последующую физическую реализацию на заготовке с визуализацией на мониторе ПК. Некоторые результаты моделирования и реализации микрорельефов в системе ППДПС "Контур ПК-NC-01" представлены на рис. 4.

Модели *1–5* получены для реализации на плоских поверхностях типа направляющих скольжения. Они регулярны, но не все (*3*, *4*) синусоидальны. Модель *5* – микрорельеф с амплитудной модуляцией (РАМ-рельеф). Традиционными способами (известные методы Ю.Г. Шнейдера) реализуются в основном только синусоидальные микрорельефы (*1*, *2*). Модели *6–9* получены для реализации на фланцевых поверхностях. Модели *7*, *9* соответствуют обработке ППДПС инструментом с центрально расположенным индентором (ЦИ), а модели *8*, *9* – с периферийным расположением индентора (ПИ). При моделировании в случаях *8*, *9* (см. рис. 4) предусмотрено изменение силы P воздействия индентора на поверхность

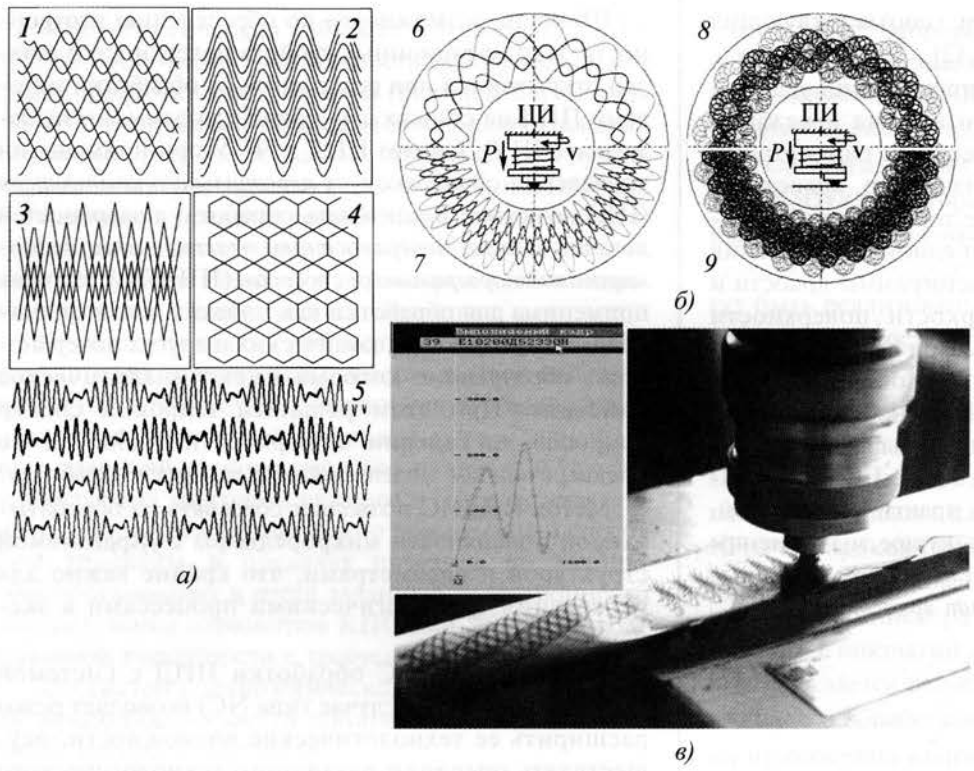


Рис. 4. Моделирование и реализация микрорельефов методом ППДПС:
а – модели для плоских поверхностей типа направляющих скольжения; *б* – модели для торцовых поверхностей; *в* – реализация микрорельефа на детали и визуализация процесса обработки

в процессе обработки программным способом. Темные линии рельефа соответствуют увеличению силы воздействия индентора. Таким образом, темные участки моделей указывают на изменения параметров КПС и ЭС соответствующих участков обработанных реальных поверхностей, т.е. осуществляется программное управление параметрами качества в функции ее координат и реализуется переход U_{02} графовой модели (см. рис. 1).

Технологический процесс ППДПС устройствами упругого действия обладает технологической гибкостью 2-го рода, что позволяет адаптировать поверхность детали к реальным условиям эксплуатации, заданным, например, в виде закона распределения координаты прилагаемой максимальной нагрузки на соединение (см. рис. 2, *в* и *г*), путем программного управления режимами обработки в пределах перехода (сила Q, подача S, скорость v).

На основании изложенного можно сделать следующие **выводы:**

1) для обеспечения высоких эксплуатационных свойств соединений, работающих при нестационарных внешних воздействиях (нагрузка, скорость, динамические явления и др.), необходимо исследование характера нестационарностей, создание и применение технологически гибких процессов обработки функциональных поверхностей трибоэлементов;

2) изотропность обрабатываемой поверхности по показателям эксплуатационных свойств, т.е. ее адаптация к нестационарным внешним воздействиям на соединение, обеспечивается в технологически гибких системах 2-го рода за счет изменения значений доминирующих факторов обработки по заданному закону при соблюдении принципов определенности, существования, управляемости, физической реализуемости;

3) современным системам обработки присуща технологическая гибкость 1-го и 2-го рода: технологически гибкие системы 1-го рода (ТГС-1) обеспечивают эффективную, но жесткую обработку в пределах перехода, а 2-го рода (ТГС-2) – обеспечивают эффективную и управляемую программным способом обработку в пределах перехода;

4) среди ТГС-1 наибольшей эффективностью обладают системы, сочетающие обработку поверхностей методами различной физической природы (обработка резанием, нанесение покрытий, ППД и др.). Гибридизация методов обработки с системами ЧПУ образует класс систем ТГС-2, обладающих наиболее высокой технологической гибкостью. В этом плане перспективно практическое применение ППД программным способом (ППДПС);

5) одним из перспективных технологических приемов адаптации поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации является обработка ППД программным способом и методы обработки, содержащие ее как один из основных компонентов;

6) обработка ППДПС позволяет реализовать на поверхностях трибоэлементов специфические типы микрорельефов, позволяющие решать вопросы повышения герметичности, маслоемкости, формирования

требуемых физических параметров (число Рейнольдса и др.) потока смазочных материалов и др.;

7) установлена возможность технологического обеспечения оптических свойств обрабатываемой поверхности и предложена пробная система характеристик ее яркости.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Сосонкин В.Л.** Принцип построения открытых систем ЧПУ типа PCNC / Конструкторско-технологическая информатика–2000: Тр. IV Междунар. конгр.: В 2 т. Т. 2. М.: Изд-во "Станкин", 2000. С. 170–173.

3. **Федоров В.П., Финатов Д.Н., Хандожко А.В.** Автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) в инженерии поверхностей деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 3. Приложение 3. Инженерия поверхности. С. 18–22.

С.К. Амбросимов *(Липецкий ГТУ)*

Феноменологическая модель обрабатываемости резанием с опережающим пластическим деформированием при протягивании

Представлена модель обрабатываемости резанием с опережающим пластическим деформированием, основанная на теории разрушения. Модель объясняет и подтверждает снижение силы резания при протягивании предварительно механически упрочненных материалов, а также определяет дальнейшие пути снижения энергозатрат при комплексном воздействии на материал.

The cutting treatment model with advanced plastic deformation based on destruction theory is presented. The model explains and proves the cutting force reduction during broaching process of mechanically pre-strengthening materials, as well as the model determines some further ways energy waste reduction with complex action on materials.

Методы деформирующего протягивания широко применяют для обработки гладких цилиндрических отверстий [1]. Однако обработка с большими суммарными натягами приводит к неодинаковой точности отверстия по длине детали, значительно искажает форму профиля в продольном сечении, а также вызывает перенаклеп поверхностного слоя и, как следствие, снижение эксплуатационных свойств обработанных поверхностей.

Устранить эти недостатки, а также объединить преимущества режущего и деформирующего протягивания позволил новый метод *деформирующе-режущего протягивания* (ДРП) с применением инструмента, деформирующий элемент (элементы) которого расположены перед секциями режущих зубьев (рис. 1), т.е. перед каждым циклом резания осуществляется поверхностное пластическое деформирование [2]. Глубина механически упрочненного слоя по толщине стенки втулки достигает 1,5 мм и зависит от натяга деформирующего элемента i, радиальной жесткости втулки D/d, где D и d – наружный и внутренний диаметры соответственно, пластических свойств обрабатываемого материала, угла заборного конуса деформирующего элемента α.

Таким образом, разработанные методы ДРП относятся к методам протягивания с *опережающим пластическим деформированием* (ОПД). Применение ДРП позволяет уменьшить длину протяжки в 2...2,5 раза за счет более эффективного увеличения диаметра отверстия деформирующими зубьями (при натягах 0,4...0,7 мм) в сравнении с режущими и использовать для обработки отверстий более короткие прошивки, соответственно увеличивая производительность процесса. Деформирующие зубья исправляют форму отверстия, что приводит к равномерному распределению припуска по периметру главной режущей кромки. Кроме того, применение ДРП для обработки вязких материалов позволяет значительно снизить шероховатость обработанных поверхностей.

Для надлежащего проектирования протяжек и обеспечения нормальных условий их эксплуатации необходимо определить силы, возникающие в процессе воздействия на обрабатываемую поверхность деформирующих и режущих элементов. Рядом исследователей было установлено, что при срезании с ОПД определенной части упрочненного слоя толщиной a_p = 0,02...0,09 мм, несмотря на повышение твердости, силы резания снижаются на 30...40 %. Экспериментально установлено, что уменьшение сил резания напрямую связано с повышением размерной стойкости режущих зубьев комбинированных протяжек, которая увеличивается более чем в 2 раза в сравнении с режущими протяжками.

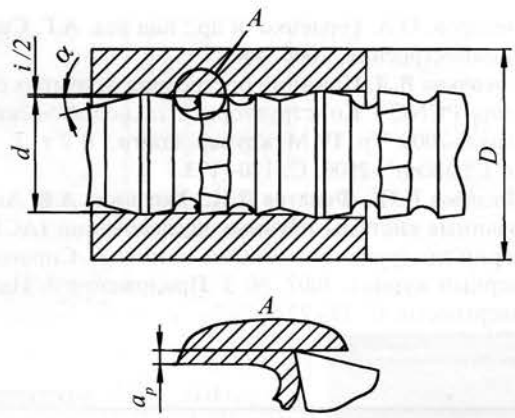


Рис. 1. Схема деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием

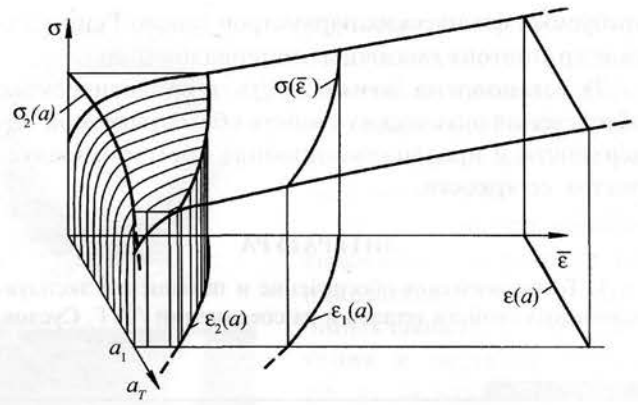


Рис. 2. Схема для определения удельной работы деформации при ОПД зоны обработки резанием

Эффект снижения силы резания пытались объяснить с позиции теории дислокации и оценить с использованием энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию [3]; при этом расчетное значение снижения силы резания превысило экспериментальные данные в 3...4 раза. Вышеупомянутые теоретические модели не позволяют не только рассчитать снижение силы резания, но и более детально прояснить этот феномен при ОПД деформирующе-режущими протяжками, а следовательно, определить дальнейшие пути уменьшения энергоемкости процесса.

Ключ к пониманию этого явления и возможности создания более эффективных методов обработки дает феноменологическая теория разрушения [4].

Удельная работа ρ_1, затрачиваемая на пластическую деформацию стружки, определяется как интеграл от функции кривой упрочнения $\sigma = f(\bar{\varepsilon})$ в пределах от 0 до ε, где ε – интенсивность деформации, которая является мерой накопленной деформации до процесса разрушения, т.е. служит границей окончания процесса деформирования стружки:

$$\rho_1 = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\bar{\varepsilon})\, d\varepsilon. \qquad (1)$$

При этом удельная работа деформации стружки, т.е. работа A, отнесенная к объему V срезаемого материала, эквивалентна удельной осевой составляющей силы резания, отнесенной к единичной площади поперечного сечения срезанного слоя:

$$\rho_1 = \frac{A}{V} = \frac{P_z l}{a_1 b l} = \frac{P_z}{ab}, \qquad (2)$$

где ab – площадь сечения срезаемого слоя;

P_z – осевая составляющая силы резания;

l – длина срезаемого слоя.

При изменении накопленной деформации по толщине срезаемого слоя a_1 согласно закону $\varepsilon = f(a)$ формула (1) принимает вид (рис. 2)

$$\rho_1 = \frac{1}{a_1} \int_0^{a_1} \int_0^{\varepsilon(a)} \sigma(\bar{\varepsilon})\, d\varepsilon\, da. \qquad (3)$$

При деформирующе-режущем способе воздействия деформирующий элемент упрочняет поверхность и тем самым в какой-то мере исчерпывает запас пластичности материала, т.е. в процессе обработки он совершает работу пластической и упругой деформации, увеличивая внутреннюю энергию кристаллической решетки на величину работы накопленной деформации $\Delta\rho$. Деформация, накопленная в срезаемом слое при резании с ОПД, зависит от параметров деформирования:

$$\varepsilon_1(a) = f(a, i, \alpha, D/d). \qquad (4)$$

Поскольку процесс резания рассматривается как накопление деформации до момента макроразрушения λ, при создании модели процесса необходимо учитывать не всю работу накопленной пластической деформации от деформирующего элемента $\sqrt{3}\varepsilon_1(a)$, а лишь работу накопленного пластического разрыхления и соответствующую ей деформацию сдвига (рис. 3):

$$\lambda_2 = \sqrt{3}\varepsilon_2(a) = f(a), \qquad (5)$$

где λ_2 – степень деформации сдвига, которую необходимо было бы сообщить металлу в исходном состоянии при напряженном состоянии, характерном для процесса резания, чтобы поврежденность металла достигла уровня ω_1, соответствующего степени деформации $\lambda_1 = \sqrt{3}\varepsilon_1(a)$, при напряженном состоянии,

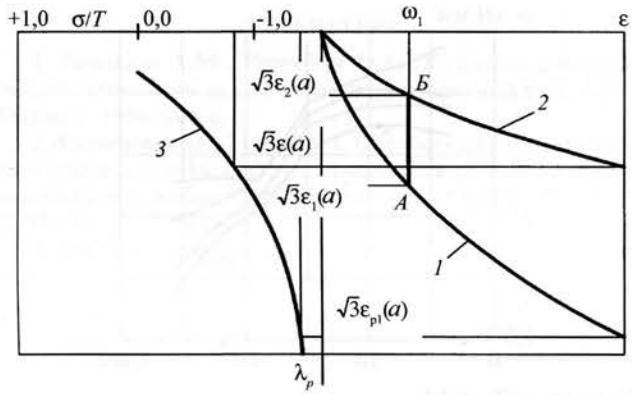


Рис. 3. Схема накопления поврежденности в два этапа при ОПД зоны обработки резанием

характерном для процесса предварительного деформирования.

Степень деформации определяют по формуле

$$\varepsilon_2(a) = \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_{p2}\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{p1}}\right)^{K_1/K_2}, \qquad (6)$$

где $\lambda_{p1} = \sqrt{3}\varepsilon_{p1}(a)$ и $\lambda_{p2} = \sqrt{3}\varepsilon_2(a)$ – степени деформации сдвига, характерные для разрушения материала при деформирующем протягивании и резании соответственно;

K_1, K_2 – коэффициенты, которые зависят от физико-механической природы материала и показателя напряженного состояния. Эти коэффициенты определяют по таблице [4] после соответствующих преобразований с учетом изменения степени деформации по толщине поверхностного слоя:

$$\varepsilon_2(a) = \left[\frac{\int_0^{a_1}\varepsilon_1(a)\,da}{\int_0^{a_1}\varepsilon_{p1}(a)\,da}\right]^{K_1/K_2}, \qquad (7)$$

где ε_{p1}, $\varepsilon_{p2}(a)$ – степени деформации в момент макроразрушения для напряженного состояния, характерные для процесса деформирования и резания соответственно.

В общем виде удельная работа, затраченная на процесс деформирования стружки (без учета работы трения) при опережающем пластическом деформировании с учетом термомеханических параметров процесса, после соответствующих преобразований определяется по формуле

$$P_z = \frac{1}{a_1}\int_0^{a_1}\int_0^{\varepsilon_1(a)} \sigma(\bar{\varepsilon})K_T K_\varepsilon d\varepsilon da - \frac{1}{a_1}\int_0^{a_1}\int_0^{\varepsilon_2(a)} \sigma(\bar{\varepsilon})K_T K_\varepsilon d\varepsilon da, \qquad (8)$$

где K_T – коэффициент, учитывающий температуру в очаге деформации;

K_ε – коэффициент, учитывающий скорость деформации.

Однако при процессах холодного деформирования (t < 300...320 °С), к которым относятся процессы деформирующего протягивания (t < 280...300 °С), а также режущего протягивания ($t \approx$ 270 °С [5]), влияние термомеханических коэффициентов незначительно и взаимоисключается [6].

Таким образом, процесс накопления поврежденности при ОПД сначала идет по кривой *1* (см. рис. 3) до точки *A* при показателе напряженного состояния σ/T (кривая *3*), характерного для предварительного деформирования, при этом накопленная повреждаемость ω_1 переносится на кривую *2* (точка *Б*), которая описывает процесс накопления до момента процесса разрушения, т.е. отделения стружки.

При построении указанной модели были приняты следующие допущения. На основании принятой гипотезы о том, что при процессе резания с ОПД и при резании неупрочненного материала удельная работа трения по передней и задней поверхностям одинакова ввиду того, что: а) материальная точка проходит зону деформации у главной режущей кромки, полностью исчерпав запас пластичности, а уже затем входит в контакт с передней поверхностью резца; б) разрушение материала при процессах с одинаковым напряженным состоянием, но с разной степенью накопленной деформации происходит при равном эффективном напряжении, т.е. при приближении к передней поверхности; и в том и в другом случае материальная точка обладает одинаковыми механическими свойствами.

С учетом этого ввиду сложности теоретических расчетов работы трения можно использовать следующую формулу для определения абсолютного значения снижения силы резания:

$$\Delta\rho = \frac{1}{a_1}\int_0^{a_1}\int_0^{\varepsilon_2(a)} \sigma(\bar{\varepsilon})K_T K_\varepsilon d\varepsilon da. \qquad (9)$$

На адекватность модель проверяли на образцах из стали 45, которые проходили испытания на осадку при разной степени деформации; при этом были построены кривые упрочнения и соответствующие им кривые изменения микротвердости. Образцы, выполненные в форме осесимметричных втулок, подверга-

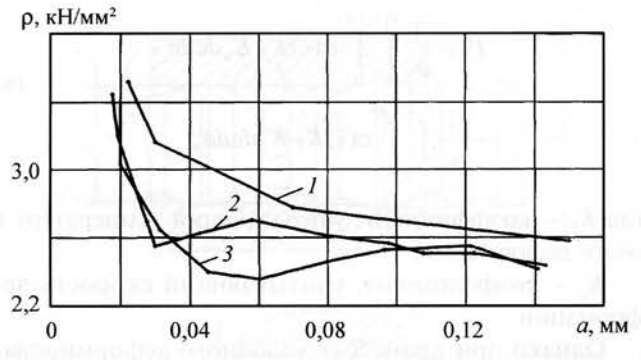


Рис. 4. Влияние толщины срезаемого слоя *a* на удельную осевую составляющую силы резания (сталь 45, $D/d = 2{,}0$, $\gamma = 14°$, задний угол режущего зуба $\alpha_p = 2°$) при резании:
1 – по механически неупрочненному слою; *2* – по предварительно деформированному слою ($i = 0{,}68$ мм, $\alpha = 4°$); *3* – по предварительно деформированному слою ($i = 0{,}68$ мм, $\alpha = 17°$)

ли деформирующему протягиванию и методом измерения микротвердости по поверхностному слою устанавливали распределения сдвиговой деформации по глубине слоя. Диаграммы пластичности, используемые для расчетов, получены с использованием оборудования Уральского политехнического института [4, 7]. Для определения показателя напряженного состояния использовали метод делительных сеток.

Экспериментально установленное снижение силы резания при натягах на деформирующий элемент $i = 0{,}3...0{,}7$ мм, радиальной жесткости заготовки $D/d = 1{,}6$, толщине срезаемого слоя $a_1 = 0{,}02...0{,}05$ мм для стали 20 и стали 45 составило от 15 до 40 % (рис. 4), что согласуется с данными, полученными на основании представленной модели.

Анализ полученных формул (8) и (9) позволяет заключить, что:

• снижение удельной работы резания зависит от степени деформации сдвига λ_2, с увеличением которой абсолютное значение снижения работы резания

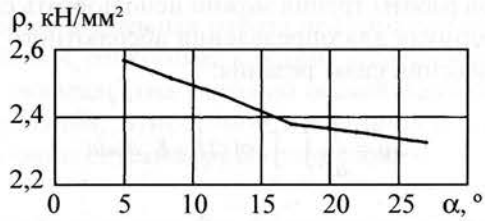


Рис. 5. Влияние угла заборного конуса деформирующего элемента α при опережающем деформировании на удельную осевую составляющую силы резания ρ (сталь 45, $D/d = 2{,}0$, $\gamma = 14°$, $\alpha_p = 2°$, средняя толщина срезаемого слоя $a_{p.ср} = 0{,}425$ мм)

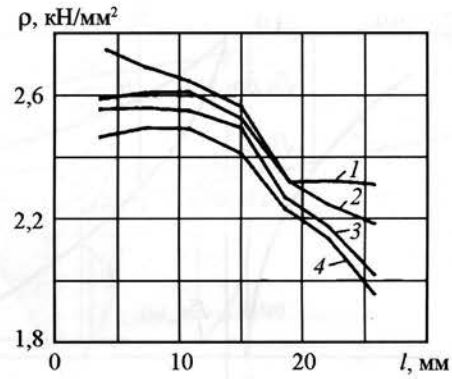


Рис. 6. Изменение удельной составляющей силы резания ρ по длине образующей отверстия *l* при разных углах заборного конуса деформирующего элемента (сталь 45, $D/d = 2{,}0$, $\gamma = 14°$, $\alpha_p = 2°$):
1 – $\alpha = 8°$; *2* – $\alpha = 12°$; *3* – $\alpha = 17°$; *4* – $\alpha = 27°$

возрастает (это подтверждают исследования ДРП с деформирующими элементами, обеспечивающими более высокую степень деформации сдвига за счет увеличения углов заборного конуса $a = 4...27°$ (рис. 5), причем удельная сила резания снижается к опорному торцу (рис. 6), так как степень деформации сдвига в этом направлении увеличивается из-за защемления торца силами трения);

• с уменьшением $\varepsilon_{pl}(a)$ степени деформации сдвига, соответствующей моменту макроразрушения при деформирующем способе воздействия, т.е. с повышением показателя напряженного состояния σ/T в зоне деформирования также снижается удельная работа резания (удельная осевая составляющая силы резания).

Из формулы (8) следует, что снижение степени деформации, соответствующей моменту макроразрушения при резании $\varepsilon(a)$ и зависящей от показателя напряженного состояния зоны резания σ/T, также уменьшает работу резания.

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

1) разработанная модель ДРП позволяет оценить снижение сил резания при опережающем пластическом деформировании;

2) определены пути и способы дальнейшего повышения эффективности при сочетании двух способов воздействия резания и деформирования за счет увеличения сдвиговых деформаций, применения более жесткой схемы напряженного состояния при ОПД, уменьшения показателя напряженного состояния в зоне резания σ/T ее дополнительным упругопластическим нагружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Розенберг А.М., Розенберг О.А.** Обработка отверстий твердосплавными выглаживающими протяжками. Киев: Техника, 1966. 206 с.

2. **Кузнецов А.М., Марин А.З.** Обработка комбинированным протягиванием круглых отверстий в деталях из вязких материалов // Автомобильная промышленность. 1970. № 4. С. 33–35.

3. **Русские ученые,** основоположники науки о резании металлов / под ред. К.П. Панченко. М.: Машгиз, 1952. 480 с.

4. **Богатов А.А., Мижирицкий О.Н., Смирнов С.В.** Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.

5. **Маргулис Д.К.** Протяжки переменного резания. М. – Свердловск: Машгиз, 1962. 269 с.

6. **Третьяков А.В., Зюзин В.И.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

7. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.В. Друппов *(Донской ГТУ, Ростов-на-Дону)*

Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива

Исследован процесс центробежно-ротационной обработки в среде абразива, описана сущность метода. Приведены зависимости для расчета среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, съема металла с поверхности обрабатываемой детали, времени обработки. Полученные зависимости прошли экспериментальную проверку и положены в основу методики оптимизации технологических процессов.

The process of centrifugal-rotational processing in the environment of an abrasive is researched, the essence of a method is described. Dependences for definition of an average arithmetic deviation of a structure of the established roughness, removed metal from a surface of a processable detail, time of processing are resulted. The received dependences have passed experimental check and are put in a basis of a technique of optimization of technological processes.

В условиях современного производства основное влияние на качество поверхности и эксплуатационные характеристики деталей машин и приборов оказывают финишные операции, среди которых ведущее место занимают методы обработки в абразивной среде. Абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество поверхности деталей при высокой производительности, а также высокую надежность и долговечность деталей машин в процессе эксплуатации.

Методы обработки свободными абразивами позволяют осуществлять обработку деталей сложной конфигурации в больших размерных диапазонах из различных материалов, при этом используют сравнительно простое и надежное в эксплуатации оборудование. По сравнению со шлифованием значительно снижается температурный режим процесса, так как скорости резания меньше, а зоны микрорезания обильно омываются *технологической жидкостью* (ТЖ). При обработке свободными абразивами более полно используются режущие способности зерен, так как происходят их переориентация и перемещение в процессе обработки, равномерное распределение их режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений.

Центробежно-ротационная обработка (ЦРО) в среде абразива является одной из разновидностей обработки деталей свободными абразивами. Сущность метода ЦРО состоит в том, что абразивные частицы *3* и обрабатываемые детали *4* (рис. 1) загружают в рабочую камеру и приводят во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора [1, 2], в котором частицы движутся по спиральным траекториям. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка, состоящей из неподвижной цилиндрической обечайки *1* и примыкающего к ней вращающегося дна (ротора) *2*, который имеет в распространенном варианте форму тарели. Детали загружают в рабочую камеру внавал вместе с абразивными частицами. Для уменьшения износа внут-

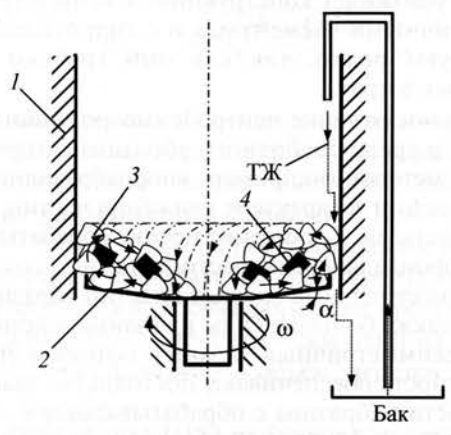


Рис. 1. Схема центробежно-ротационной обработки в среде абразива

ренние поверхности дна и неподвижной части рабочей камеры покрывают износостойким материалом (чаще всего используют резиновые или полиуретановые покрытия).

Детали, обрабатываемые на станке для ЦРО, могут находиться в свободном и закрепленном состоянии. При обработке мелких маложестких деталей они помещаются в специальные емкости вместе с абразивными частицами, которые затем загружают внавал в рабочую камеру. Вращение дна станка обычно обеспечивается реверсивным электро- или гидродвигателем. В процессе обработки детали занимают различные положения в рабочей среде, что обусловливает достаточно равномерную обработку всех поверхностей. Обработку осуществляют с непрерывной подачей технологической жидкости, что необходимо для удаления продуктов износа (частиц металла, абразива) с поверхности деталей и частиц рабочей среды. Таким способом можно обрабатывать детали разной геометрической формы, недеформируемые в тороидально-винтовом потоке. Загрузка рабочей камеры не должна превышать 0,5...0,7 ее объема.

Работоспособность станка для ЦРО в значительной степени определяется надежностью соединения вращающейся и неподвижной частей рабочей камеры, которое реализуют по нескольким схемам: с зазором, с использованием уплотняющих устройств, с трущимися эластичными элементами или с помощью гидроуплотнений. Соединение вращающейся и неподвижной частей рабочей камеры с зазором является простым по конструкции, однако требует точного относительного базирования этих частей, а также точного изготовления и установки кольцевых сменных элементов. Использование соединения с зазором не допускает обработку мелких деталей и мелкого абразивного наполнителя, так как это может привести к заклиниванию ротора. Центробежно-ротационные станки с уплотнением ротора и обечайки позволяют вести обработку с более мелким абразивом в сравнении с описанным выше, однако имеют невысокую долговечность уплотняющих элементов. Смазывание уплотнения увеличивает их долговечность, но несколько усложняет конструкцию. Схемы с трущимися эластичными элементами и с гидроуплотнением используют редко, так как они требуют дополнительных затрат.

Основное отличие центробежно-ротационной обработки в среде свободного абразива от других известных методов (например, виброабразивной обработки) состоит в характере движения частиц рабочей среды и деталей. Сообщение потоку обрабатывающей среды тороидально-винтового движения создает высокие относительные скорости частиц абразива и деталей, а также большие силы их взаимодействия. При этом осесимметричный характер потока и его высокая плотность обеспечивают постоянство взаимодействия частиц абразива с обрабатываемыми деталями во всем объеме загрузки. Вследствие этого метод ЦРО отличается повышенным износом рабочей среды в сравнении с другими методами, что в свою очередь накладывает определенные ограничения на выбор абразивных частиц.

В качестве обрабатывающей среды применяют абразивные частицы разной конфигурации: фарфоровые шары, трехгранные призмы, абразивные конусы и другие на керамической и полимерной связках, а также абразив естественного происхождения (байкалит, кварцит, гранит, мрамор).

Метод ЦРО в среде абразива применяют на операциях: отделки заготовок сложной формы, удаления заусенцев, скругления острых кромок, очистки поверхности (от окалины, ржавчины, нагара, накипи и т.д.), подготовки заготовок перед нанесением покрытий (гальванических, лакокрасочных, резиновых, клеевых и др.).

Этот метод обладает широкими технологическими возможностями, но имеет несколько особенностей:

- тороидально-винтовой поток образуется при определенных угловых скоростях вращения ротора, которые определяют экспериментально;
- номенклатура и масса обрабатываемых деталей ограничены. Детали малой жесткости и больших размеров обрабатывать не рекомендуется. Это обусловлено большими скоростями и давлениями в тороидально-винтовом потоке;
- в поверхностном слое обработанной детали создаются остаточные напряжения сжатия;
- может наблюдаться неравномерность обработки участков детали, имеющих различную форму (преимущественное скругление острых кромок, выступов наружных поверхностей).

Можно выделить три группы факторов, влияющих на производительность и качество центробежно-ротационной обработки в среде абразива:

1) технологические факторы (частота вращения ротора, объем загрузки рабочей камеры, объемное соотношение обрабатываемых деталей и частиц абразивного материала, масса детали и др.);

2) параметры рабочей среды (зернистость и размер частиц);

3) конструктивные параметры элементов станка (неподвижной обечайки и вращающегося ротора).

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что наибольшее влияние на производительность и качество ЦРО оказывают угловая скорость вращения ротора, степень заполнения рабочей камеры, размер частиц и зернистость рабочей среды.

Целью работы было исследование параметров качества центробежно-ротационной обработки в среде абразива на основе разработки адекватных теоретических моделей формирования характеристик поверхностного слоя деталей с учетом угловой скорости вращения ротора, характеристик среды, степени загрузки рабочей камеры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- теоретические исследования единичного взаимодействия частиц среды с поверхностью детали;

• разработка модели формирования шероховатости поверхности в зависимости от параметров обработки;

• теоретические и экспериментальные исследования зависимости объема снимаемого металла от технологических параметров процесса;

• установление степени влияния объема загрузки рабочей камеры на производительность и качество обработки;

• расчет времени обработки, необходимого для достижения заданной шероховатости поверхности;

• разработка методики прогнозирования результатов обработки;

• разработка методики оптимизации технологических процессов при решении различных технологических задач.

Проведены теоретические исследования процесса ЦРО в среде абразива. Выполнен анализ единичного взаимодействия частицы обрабатывающей среды с поверхностью детали.

Максимальная глубина внедрения абразивной частицы при единичном взаимодействии

$$h_{\max} = 2k_m^{0,5} v_0 R \sin\beta \sqrt{\frac{\rho_ч}{3k_R c\sigma_s}}. \quad (1)$$

Здесь k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке;

v_0 – скорость внедрения движущейся частицы;

R – условный радиус частицы;

β – угол встречи частицы среды с поверхностью детали (для ЦРО β = 20...40°);

$\rho_ч$ – плотность материала частицы;

c – коэффициент несущей способности контактной поверхности;

σ_s – предел текучести материала детали;

k_R – коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{48\rho_ч}{c\sigma_s}\left[\frac{k_p k_m^{0,5} v_{0з} \sin\beta\chi Y(\alpha)(1-\varepsilon_з)\bar{x}}{\alpha^2(\bar{x}^2+3\sigma^2)}\right]^2}, \quad (2)$$

где χ – доля абразивных частиц в единице объема частицы;

$Y(\alpha)$ – функция, зависящая от коэффициента формы зерен α;

$\varepsilon_з$ – коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке;

$\bar{x}$ – средний размер абразивных зерен;

σ – среднее квадратичное отклонение размера зерен.

Определены характеристики следа единичного взаимодействия. Установлено, что пятно контакта частицы среды с поверхностью обрабатываемой детали представляет собой эллипс, размеры полуосей которого определяются по формулам

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}; \quad a = \frac{\pi}{2}(\operatorname{ctg}\alpha - f)h_{\max} + b, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения абразивной частицы по поверхности детали.

Образование микрорельефа в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов. В результате на поверхности детали образуется новый специфический для ЦРО микрорельеф, который характеризуется однородностью свойств по всем направлениям. Для расчета параметров профиля шероховатости обработанной поверхности использована методика, предложенная проф. А.В. Королевым [3] для описания теоретико-вероятностного процесса формирования профиля шероховатости поверхности детали при абразивной обработке. По аналогии с его работами введен критерий образования профиля обрабатываемой поверхности – условная высота неровностей профиля обрабатываемой поверхности $H_{ус}$. После преобразований для ЦРО получим

$$H_{ус} = 0{,}58\sqrt{\frac{h_{\max} l_{ед}}{z_0}}, \quad (4)$$

где z_0 – номинальное число вершин зерен в объеме рабочего слоя частицы, расположенного над единицей поверхности связки;

$l_{ед}$ – единичная длина.

Используя зависимость $H_{ус}$ и Ra, после преобразований среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости составит

$$Ra_{уст} = 0{,}09\sqrt{\frac{h_{\max} l_{ед}}{z_0}}.$$

При проведении теоретических исследований процесса ЦРО важную роль играет учет максимально возможного числа технологических факторов, влияющих на результаты обработки. Некоторые из них, такие как угловая скорость вращения ротора и характеристики обрабатывающей среды, удалось учесть теоретически. К сожалению, не представляется возможным учесть теоретически один из важных технологических факторов – объем загрузки рабочей камеры.

Этот фактор при ЦРО оказывает существенное влияние на процесс образования тороидально-винтового потока. Варьируя объем загрузки рабочей каме-

ры и не изменяя остальные параметры процесса, можно получить существенно различающиеся значения установившейся шероховатости поверхности и съема металла с поверхности детали. Исходя из этого возникает необходимость учесть объем загрузки рабочей камеры в виде эмпирических коэффициентов k_z^{Ra} и k_z^Q, которые определены при проведении экспериментальных исследований.

Тогда среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости определим как

$$Ra_{уст} = 0{,}09 k_z^{Ra} \sqrt{\frac{h_{max} l_{ед}}{z_0}}. \quad (5)$$

Время, необходимое для достижения установившейся шероховатости поверхности,

$$t_{Ra_{уст}} = \frac{4 k_{пр} Rz_{исх} R^2}{P_1 P_2 \omega V}, \quad (6)$$

где $Rz_{исх}$ – исходная шероховатость обрабатываемой детали;

V – объем металла, удаленного за один удар абразивной частицы;

$k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий вид профиля исходной шероховатости;

R – радиус абразивной частицы;

ω – частота вращения ротора;

P_1 – геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных частиц;

P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию.

Поскольку разрушение поверхностного слоя при ЦРО свободным абразивом происходит преимущественно путем микрорезания, при расчете массы снимаемого металла достаточно учитывать только число взаимодействий, приводящих к микрорезанию. По результатам проведенных исследований получены зависимости для определения съема металла:

$$\begin{aligned} Q &= k_ф k_{ТЖ} k_z^Q P_1 P_2 \omega t q \frac{S_{дет}}{4R^2} \quad \text{при } S_{дет} > 4R^2; \\ Q' &= k_ф k_{ТЖ} k_z^Q P_1' P_2 \omega t q \quad \text{при } S_{дет} < 4R^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $k_ф$ – коэффициент формы детали (сложная форма деталей может затруднять доступ абразивных частиц к обрабатываемой поверхности и уменьшать количество взаимодействий);

$k_{ТЖ}$ – коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости (использование в составе ТЖ добавок химически активных или поверхностно-активных веществ приводит к более интенсивному разрушению при единичном взаимодействии);

k_z^Q – коэффициент влияния объема загрузки рабочей камеры;

t – время обработки;

q – масса снимаемого металла при единичном взаимодействии;

$S_{дет}$ – площадь обрабатываемой детали.

При выборе материалов образцов исследовали универсальность теоретических моделей и возможности широкого применения результатов исследований для обработки деталей из наиболее часто используемых в промышленности, поэтому были выбраны образцы из меди, алюминиевых сплавов и сталей.

Для проведения экспериментальных исследований процесса ЦРО в среде абразива использовали следующие абразивные среды:

- фарфоровые шары диаметром 10 мм по ТУ 25-11-723–71 (зернистость М60);
- формованный абразивный материал типа призмы трехгранные белые ПТ 15×15 Волжского абразивного завода по ТУ 2-036-925–88 (зернистость 25) и ПТ 25×25 Московского абразивного завода по ТУ 2-036-205–73 (зернистость 12);
- конус абразивный бело-зеленый на полимерной связке (зернистость 8);
- конус абразивный желтый (зернистость 16).

Экспериментальные исследования проводили с использованием абразивных сред, тщательно промытых от продуктов загрязнений и износа. Абразивный материал сортировали по размеру зерна с помощью набора сит. После каждого эксперимента отсеивали изношенный абразивный материал и добавляли новый.

В качестве технологической жидкости для непрерывной промывки использовали 1%-ный раствор кальцинированной соды.

Проведены исследования зависимостей шероховатости поверхности (рис. 2) и съема металла (рис. 3) от зернистости абразива $N_з$ при разных объемах загрузки $V_з$. Установлено, что с ростом зернистости абразивных частиц съем металла и установившаяся шероховатость поверхности увеличиваются.

Исследованы зависимости установившейся шероховатости поверхности (рис. 4) и съема металла (рис. 5) от частоты вращения ротора при разных объемах загрузки $V_з$.

Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Установлено, что расхождение не превышает 20 %. Создан банк данных коэффициентов k_z^{Ra} и k_z^Q.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований даны технологические рекомендации

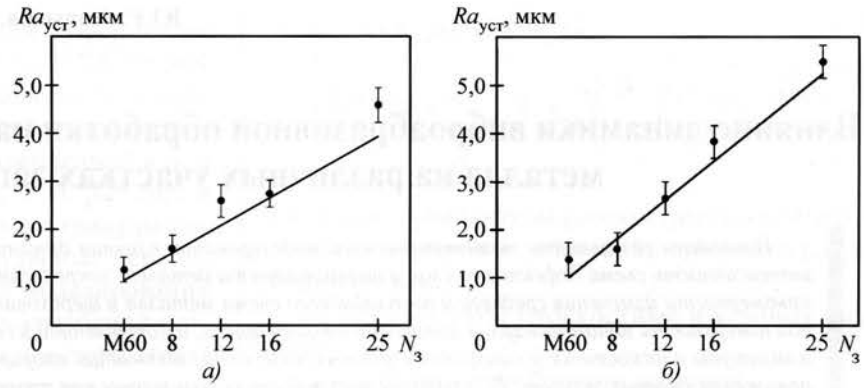


Рис. 2. Зависимость установившейся шероховатости поверхности $Ra_{уст}$ детали из стали 45 (*а*) и сплава Д16Т (*б*) от зернистости абразивных частиц $N_з$ при $\omega = 10$ с$^{-1}$:
а – $V_з = 1{,}5$ дм^3; *б* – $V_з = 2{,}0$ дм^3

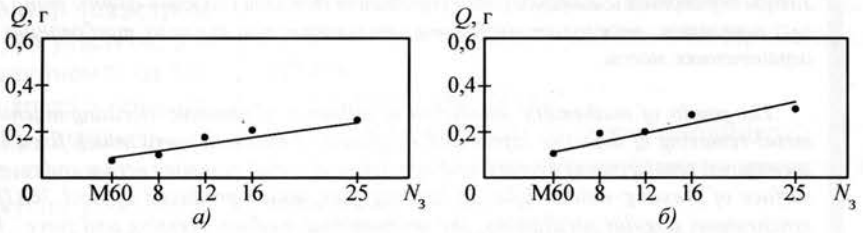


Рис. 3. Зависимость съема металла Q с поверхности детали из стали ХВГ (*а*) и стали 45 (*б*) от зернистости абразивных частиц $N_з$ при $\omega = 10$ с$^{-1}$:
а – $V_з = 1{,}5$ дм^3; *б* – $V_з = 2{,}0$ дм^3

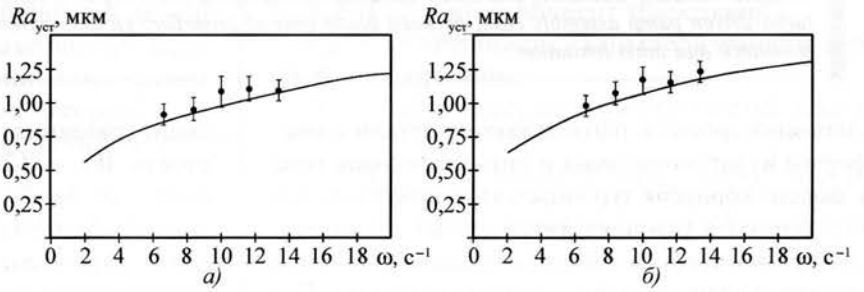


Рис. 4. Зависимость установившейся шероховатости поверхности $Ra_{уст}$ детали из стали ХВГ (*а*) и стали 45 (*б*) от частоты вращения ротора ω при $V_з = 1{,}5$ дм^3 и использовании фарфоровых шаров (*а*) и призм трехгранных ПТ 15×15 (*б*)

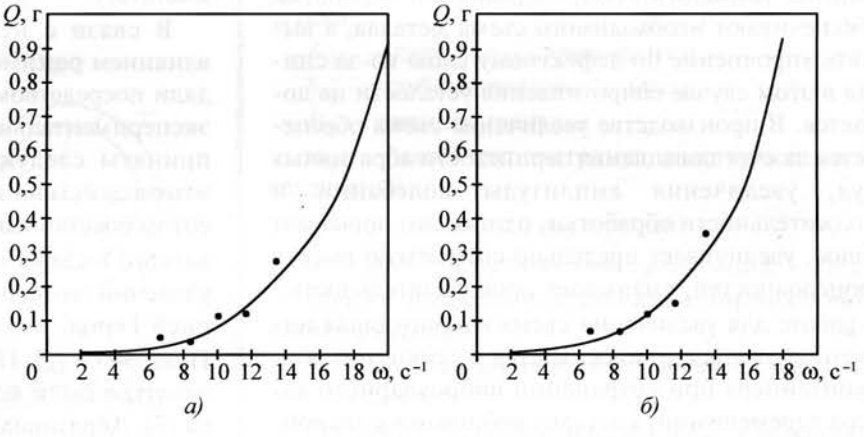


Рис. 5. Зависимость съема металла Q с поверхности детали из стали ХВГ (*а*) и стали 45 (*б*) от частоты вращения ротора ω при $V_з = 1{,}5$ дм^3 и использовании фарфоровых шаров (*а*) и призм трехгранных ПТ 25×25 (*б*)

по повышению эффективности процесса ЦРО. Разработана программа расчета среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обработанной поверхности и съема металла при варьируемых режимах обработки с использованием разных технологических сред. Разработаны рекомендации по выбору времени обработки при решении различных технологических задач и методика оптимизации технологических параметров процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Объемная** центробежно-ротационная обработка деталей / В.О. Трилисский и др. М.: НИИмаш, 1983. 53 с.

2. **Трилисский В.О.** Повышение эффективности отделочно-зачистных операций путем создания теории оборудования и технологии объемной центробежно-ротационной обработки деталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1992. 37 с.

3. **Королев А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.

Ю.Р. Копылов, С.В. Емельянов *(Воронежский ГТУ)*

Влияние динамики виброабразивной обработки на интенсивность съема металла на различных участках заготовки

Приведены результаты математического моделирования влияния динамики виброабразивной обработки на интенсивность съема дефектного слоя и шероховатости деталей, закрепленных в контейнере. Установлены закономерности изменения среднего и посплайнового съема металла и шероховатости на разных участках наружной поверхности штампосварной заготовки стойки шасси, изготовленной из стали 30ХГСНА, в зависимости от амплитуды плоскостных и синхронных угловых колебаний, поджатия вибрирующей инструментальной среды и положения силовых экранов. Результаты могут быть использованы при проектировании технологий виброабразивной обработки и виброударного упрочнения деталей сложной формы типа стоек шасси, корпусов турбонасосных агрегатов, межлопаточной зоны крыльчаток при высоких требованиях к их сопротивлению усталости и ограничениях массы.

The results of mathematic simulation of influence of abrasive-vibrating machining process dynamics on intensity of metal-removing of defective layers and roughness of machine parts, which fixed in container are presented. There are ascertained regularities of average and step-spline of metal-removing action and roughness on different sections of the outer surface of pressing-welded billet of landing gear, which produced of steel 30ХГСНА, according to the flat-bed and synchronous angular oscillations, the instrumental medium pressing and force. The results can be used for design of abrasive-vibrating machining and shock-vibrating strengthening technologies of complex machine parts, like landing gears, turbo-driven pump assembly case, between blade zone of propellers etc., in conditions of strong requirement to fatigue resistance and mass limitation.

В машиностроении изготовляются детали сложной формы из штампованных и литых заготовок типа стоек шасси, корпусов турбонасосных агрегатов, которые работают в условиях интенсивных динамических нагрузок и требуют виброабразивной зачистки и виброударного упрочнения с закреплением [1]. Современные технологии виброабразивной обработки не обеспечивают необходимого съема металла, а выполнять упрочнение по дефектному слою из-за снижения в этом случае сопротивления усталости не допускается. В производстве увеличение съема обеспечивается за счет повышения зернистости абразивных гранул, увеличения амплитуды колебаний и продолжительности обработки, однако это повышает их износ, увеличивает предельно снижаемую высоту микронеровностей, уменьшает производительность.

В работе для увеличения съема вибрирующая инструментальная среда поджимается в замкнутом объеме контейнера при сохранении виброударного характера перемещений, а детали сообщаются синхронные угловые колебания. В результате этого возрастает время соударений за счет повышения усилия прижатия гранул к детали и более интенсивных касательных перемещений, обеспечивается более высокая вероятность микрорезания и увеличивается съем металла [1].

В качестве образца использовали штампосварную заготовку стойки шасси, изготовленную из стали 30ХГСНА. Шероховатость наружной поверхности после пескоструйной, абразивной зачистки и химического травления составляет Rz = 28...32 мкм, волнистость Wz = 120...290 мкм, толщина дефектного слоя – от 40...50 до 100...120 мкм. После виброабразивной обработки Rz = 12...16 мкм, после виброударного упрочнения Rz = 5...8 мкм. Внутренняя поверхность гидроцилиндра обрабатывается по 6-му квалитету.

В связи с нелинейностью и многофакторным влиянием режимов на съем исследования осуществляли посредством математического моделирования с экспериментальной проверкой. При моделировании приняты следующие допущения. Косые ударные взаимодействия гранул характеризуются коэффициентом восстановления R_γ, коэффициентами сухого f и вязкого λ ударного трения. Контактные процессы соударений со скоростью до 150 см/с описываются теорией Герца, модулем упругости E, коэффициентом Пуассона ν [2]. При формировании пластических отпечатков были использованы работы И.В. Кудрявцева [3]. Абразивная гранула моделируется сферой, абразивные зерна – выступающими усеченными конусами; плотность распределения значений угла и радиуса конусов имеет вероятностный характер. Прочность абразивных зерен больше прочности материала заготовки, прочность связки – меньше. Смещения зерен в течение тактов соударений не происходит. Физико-механические свойства материала, масса и диаметр гранул приняты постоянными [4]. Амплитуда колебаний всех сплайнов заготовки и контейнера одинакова.

Инструментальная среда, состоящая из формованных абразивных призматических гранул ПТ-10 зернистостью 16, заполняет 60...90 % свободного объема между контейнером и деталью. Под действием интенсивных колебаний контейнера и закрепленной в нем детали с амплитудой скорости $A_д = A_к = 90...120$ см/с и синхронных угловых колебаний детали гранулы совершают циркуляционные и виброударные перемещения и проводят обработку. Время моделирования не менее 20 периодов стационарных колебаний разбивается на кадры, продолжительность которого равняется $0{,}000001T$, где T – период вынужденных плоскостных колебаний. Наружный контур диаметром 14,0 см в сечении *А–А* разделен на 176 участков, а в сечении *Б–Б* с проушинами и кронштейном – на 431 участок (рис. 1). Инструментальная среда в сечении делится на ячейки $S_я = (3...4)S_{гр}$, где $S_{гр}$ – площадь поперечного сечения гранулы. Длина участка и стороны ячейки $l_{спл} \approx 0{,}25$ см. Начальные и текущие координаты положений гранул и участков в сечениях детали, скорости и фазовые углы виброперемещений детали и контейнера, технологические параметры процесса вычисляются с применением операционных систем Delphi 6, MathCAD 2000, метода Адамса второго порядка, программного комплекса GranMoS и других программ.

Удельный массовый съем металла с j-го участка поперечного сечения заготовки, достигаемый при плоскостных колебаниях детали с контейнером и синхронных угловых колебаниях детали, характеризуется зависимостью

$$C_{м_j} = (A_{д.к}\omega^2 + A_\varphi \omega_\varphi^2)\times$$
$$\times g^{-1} P_\varphi t k_з k_з^{см} k_{ф.д} k_т k_{мр} \left\{ \frac{Э_{\tau ij}\rho_д}{2{,}857\sigma_в} \sqrt{1 + \frac{L_{ск_{ij}}^2}{4h_{o_{ij}} D_{гр}}} \right\},$$

где $A_{д.к}$, A_φ – амплитуды плоскостных колебаний детали с контейнером и угловых бигармонических колебаний детали;

ω, ω_φ – часто́ты плоскостных и угловых колебаний;

g – ускорение свободного падения;

P_φ – вероятность скольжения гранул при косых соударениях поверхности детали с инструментальной средой;

t – время обработки;

$k_з$ – коэффициент загрузки контейнера;

$k_з^{см}$, $k_з^{Rz}$ – коэффициенты влияния зернистости на съем и шероховатость;

$k_{ф.д} = 1...3$ – коэффициент формы детали;

$k_т = 2...3$ – коэффициент траектории;

$k_{мр}$ – коэффициент, характеризующий вероятность микрорезания;

$Э_{\tau ij}$ – энергия соударений j-го участка детали:

$$Э_{\tau ij} = \frac{2m_{гр\,ij}[(A_{д.к_j} + A_{гр\,ij})\omega\cos\varepsilon_{ij}]^2 + 2m_{гр\,ij}(A_\varphi\omega_\varphi\cos\varepsilon_\varphi)^2}{0{,}5 - \dot{\psi}(\omega_\varphi) - \dot{\psi}(0{,}5\omega_\varphi) - 2/(1-R_\gamma^2)};$$

$\rho_д$, $\sigma_{в.д}$ – плотность и предел прочности материала детали;

$L_{ск_{ij}}$ – путь скольжения гранул;

$h_{0_{ij}}$ – глубина внедрения зерен;

$D_{гр}$ – диаметр гранулы;

$m_{гр_{ij}}$ – масса группы гранул, участвующих в такте соударений;

ε_{ij} – фазовый угол соударений;

ε_φ – фазовый угол угловых колебаний;

$\dot{\psi}(\omega_\varphi)$ – функция вибрационной подвижности абразивных гранул;

R_γ – коэффициент восстановления скорости косых соударений.

Средний удельный массовый съем металла $C_м = n^{-1}\sum_1^{j=n} C_{м_j}$, мг/(см²·ч), определяемый на всех n участках, при увеличении A_φ в диапазоне 0,0125...0,2 рад ($A_{дк}$ = const, ω = const) возрастает в 5...6 раз – от 23 до 101,24 мг/(см²·ч) (рис. 2, *а*). Во всех экспериментах коэффициент загрузки обеспечивал оптимальное поджатие инструментальной среды.

Удельный массовый съем на j-х участках детали $C_{м_j}$ при изменении амплитуды A_φ и частоты ω_φ угло-

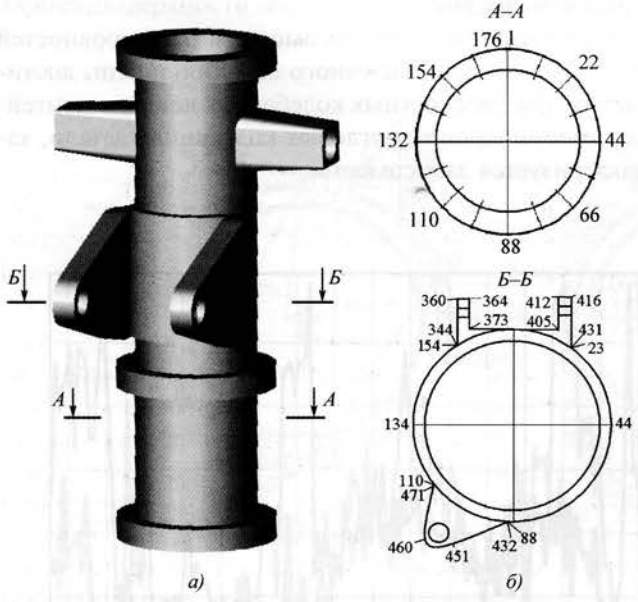


Рис. 1. Общий вид стойки шасси (*а*) и схемы нумерации участков (*б*) в сечениях *А–А* и *Б–Б* (кронштейн на 3D-модели не виден)

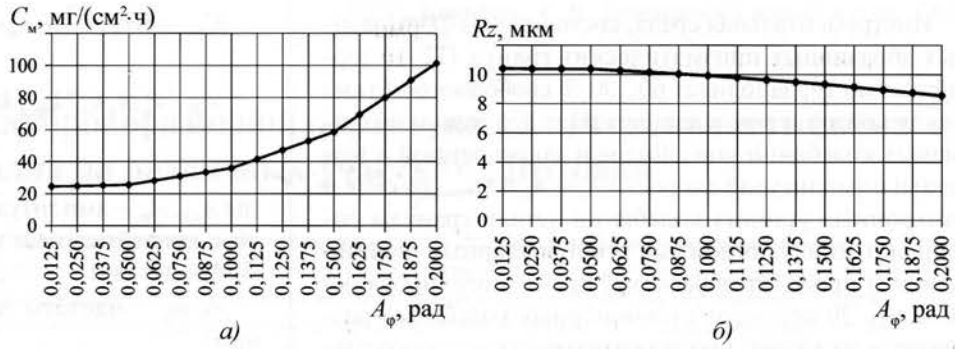


Рис. 2. Зависимости среднего удельного съема $C_м$ (*а*) и среднеарифметической высоты микронеровностей Rz (*б*) от амплитуды угловых колебаний A_φ ($A_д = A_к = 0{,}5$ см; $\omega = 131{,}88$ с$^{-1}$; гранулы ПТ-10 зернистостью 8; материал сталь 30ХГСНА; $Rz_{исх} = 25$ мкм; $k_з = 0{,}75$; $t = 60$ мин)

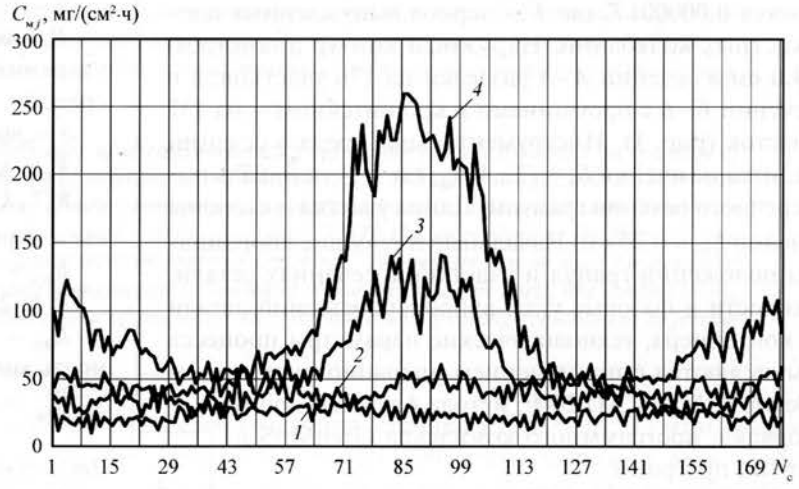


Рис. 3. Изменение $C_{мj}$ на разных участках наружного диаметра в сечении *А–А* в зависимости от амплитуды угловых колебаний ($\omega_\varphi = 314$ с$^{-1}$; $A_д = A_к = 0{,}5$ см; $\omega = 131{,}88$ с$^{-1}$; $k_з = 0{,}75$):
1 – $A_\varphi = 0{,}05$ рад; *2* – $A_\varphi = 0{,}10$ рад; *3* – $A_\varphi = 0{,}15$ рад; *4* – $A_\varphi = 0{,}20$ рад

вых колебаний имеет полиэкстремальный характер (рис. 3). При $A_\varphi \geq 0{,}1$ рад изменения $C_{мj}$ более значительны и наблюдаются на нижних участках детали, минимальные – на боковых участках. Максимальные $C_{мj}$ превышают минимальные значения в 4,6...5,3 раза. При $A_\varphi \leq 0{,}05$ рад зоны расположения максимальных и минимальных значений $C_{мj}$ смещаются (см. рис. 3). Максимальные $C_{мj}$ превышают минимальные в 4,6...5,3 раза. Использование угловых колебаний A_φ повышает $C_{мj}$ на отдельных участках до 10...15 раз.

Зависимость съема $C_{мj}$ на разных участках наружного диаметра в сечении *Б–Б* от режима обработки приведена на рис. 4.

Среднеарифметическая высота микронеровностей для *j*-го участка поперечного сечения детали, достигаемая при плоскостных колебаниях детали с контейнером и синхронных угловых колебаниях детали, характеризуется зависимостью

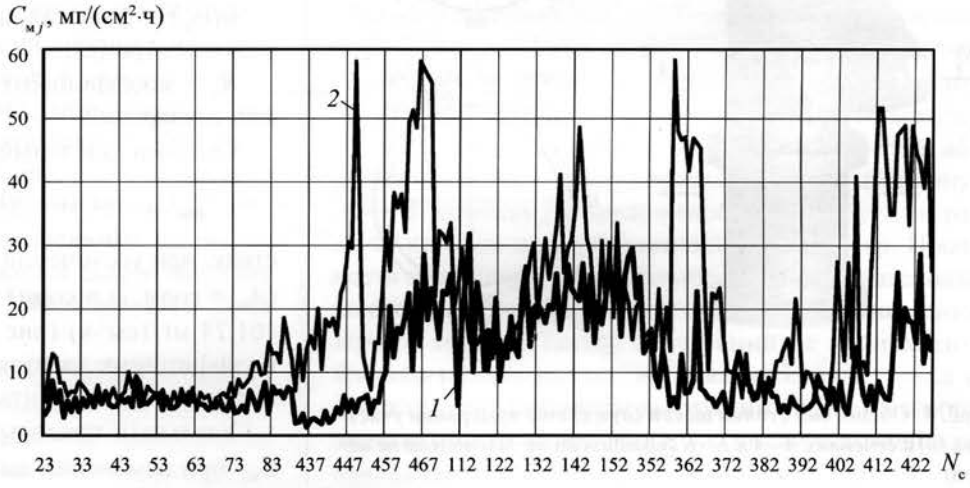


Рис. 4. Изменение $C_{мj}$ на разных участках наружного диаметра в сечении *Б–Б* в зависимости от режима обработки:
1 – $A_д = A_к = 1{,}2$ см, $\omega = 75{,}4$ с$^{-1}$; *2* – $A_\varphi = 0{,}1$ рад, $\omega_\varphi = 150{,}7$ с$^{-1}$

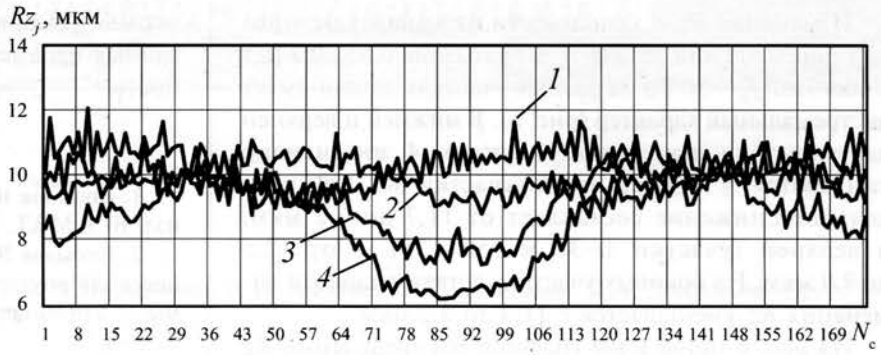


Рис. 5. Изменение Rz_j на разных участках наружного диаметра в сечении *А–А* в зависимости от амплитуды угловых колебаний A_φ (ω_φ = 314 с$^{-1}$; $A_д = A_к$ = 0,5 см; ω = = 131,88 с$^{-1}$; $k_з$ = 0,75):
1–4 – то же, что и на рис. 3

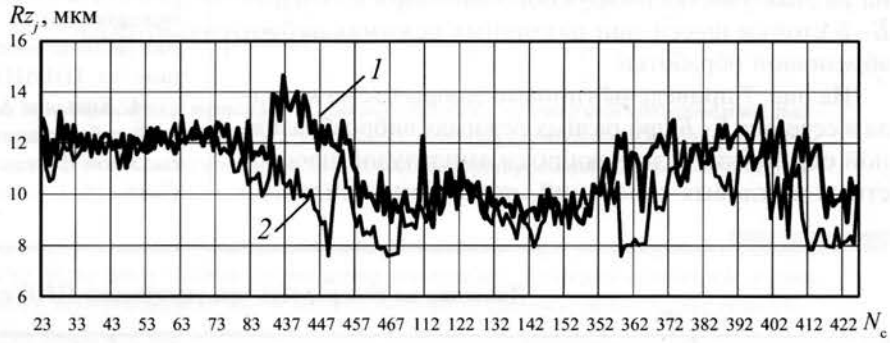


Рис. 6. Изменение Rz_j на разных участках наружного диаметра в сечении *Б–Б* в зависимости от режима обработки:
1 – $A_д = A_к$ = 1,2 см, ω = 75,4 с$^{-1}$; *2* – A_φ = 0,1 рад, ω_φ = 150,7 с$^{-1}$

$$Rz_j = Rz_{исх} - k_{ф.д}\,k_т\,k_з^{Rz}\,\frac{Rz_и\,\sigma_{в.и}}{Rz_{исх}\,\sigma_{в.д}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{m_{гр}\left[\left(\left(A_{д_j} + A_{гр_i}\right)\omega\cos\varepsilon_\tau\right)^2 + \left(A_\varphi\,\omega_\varphi\cos\varepsilon_\varphi\right)\right]^2}{\pi D_{гр}\,\sigma_в\left[\dot{\psi}(\omega_\varphi) - \dot{\psi}(0{,}5\omega_\varphi)\right] - (1 - R_\gamma^2)}},$$

где $Rz_и$ – среднеарифметическая высота микронеровностей поверхности абразивной гранулы;

$\sigma_{в.и}$ – предел прочности материала абразивной гранулы.

На всех участках детали среднее значение $\overline{Rz} = n^{-1}\sum_1^{j=n} Rz_j$, мкм, при увеличении амплитуды угловых колебаний A_φ в диапазоне 0,0125...0,2 рад (ω = = 131,88 с$^{-1}$, A_φ = 0) пропорционально уменьшается с $Rz_{исх}$ = 28...32 до 8,4...10,3 мкм (см. рис. 2, *б*).

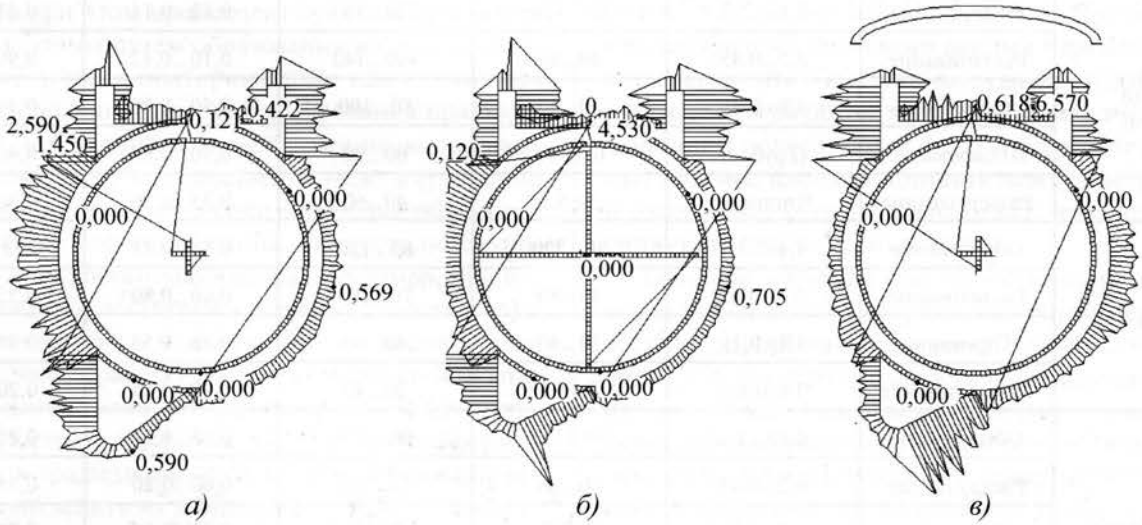


Рис. 7. Эпюры удельного съема $C_{м_j}$:
а – A_φ = 0, $C_м$ = 10,6 мг/(см^2·ч); *б* – A_φ = 0,05 рад, $C_м$ = 19,9 мг/(см^2·ч); *в* – A_φ = 0,05 рад, $C_м$ = 18,7 мг/(см^2·ч), с установкой силового экрана в верхней части детали

Изменение Rz_j в зависимости от амплитуды угловых перемещений детали A_φ в диапазоне 0,05...0,2 рад с частотой f_φ = 50 Гц на разных участках детали имеет экстремальный характер (рис. 5). В нижней и верхней частях детали значения Rz_j с ростом A_φ интенсивно снижаются: в нижней части (участки 60...120) предельное снижение составляет от 11,7 до 6,2 мкм, в верхней (участки 1–30 и 150–176) – от 12,5 до 7,9 мкм. На боковых участках детали диапазон изменения Rz_j уменьшается с 11,3 до 9,2 мкм.

На рис. 6 приведены графики распределения Rz_j на разных участках наружного диаметра в сечении *Б–Б* стойки шасси при различных режимах виброабразивной обработки.

На рис. 7 приведены типовые эпюры съема металла в сечении *Б–Б* при разных режимах виброабразивной обработки, различающихся амплитудой плоскостных и угловых колебаний, положением силового экрана. На эпюрах видно интенсивное влияние указанных параметров на съем металла и его равномерность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: изд. ВГУ МВД, 1999. 386 с.

2. **Копылов Ю.Р.** Математическое моделирование процесса виброударного упрочнения деталей сложной формы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 3–8.

3. **Кудрявцев И.В.** Основы выбора режимов упрочнения поверхностным наклепом ударным способом // Повышение долговечности деталей машин поверхностным наклепом: тр. ЦНИИТМАШ. М., 1965. Вып. 108. С. 3–27.

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

Давление на поверхность при упрочнении ППД с наклепом

Упрочняемый материал	Предварительная обработка поверхности			Давление, ГПа		
	Метод	Подача, мм/об (мм/дв. ход)	Высота неровностей, мкм	При статическом сдавливании неровностей	При обкатывании	
					роликом	шариком
Стали 10, 20, 35	Обтачивание	0,45...1,1	80...320	90...130	0,80...0,11	0,75...0,10
	Растачивание	0,2...0,45	40...80	70...110	0,60...0,80	0,55...0,95
	Строгание	(До 0,2)	10...40	40...70	0,30...0,60	0,25...0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3...10	50...80	0,40...0,70	0,35...0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20...50	0,20...0,45	0,20...0,40
Стали 45, 50Г	Обтачивание	0,45...1,1	80...320	130...160	0,12...0,14	0,11...0,13
	Растачивание	0,2...0,45	40...80	110...140	0,10...0,12	0,90...0,11
	Строгание	(До 0,2)	10...40	80...100	0,50...0,80	0,40...0,70
	Шлифование	(Грубое)	6,3...10	60...90	0,50...0,80	0,40...0,70
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	40...60	0,35...0,50	0,30...0,40
Латунь Л63	Обтачивание	0,45...1,1	80...320	85...120	0,80...0,11	0,75...0,115
	Растачивание	0,2...0,45	40...80	70...100	0,60...0,80	0,55...0,75
	Строгание	(До 0,2)	10...40	40...65	0,35...0,55	0,30...0,55
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20...45	0,20...0,45	0,20...0,40
Чугун СЧ10	Обтачивание	0,45...1,1	80...320	90...125	0,85...0,11	0,80...0,10
	Растачивание	0,2...0,45	40...80	75...110	0,60...0,80	0,55...0,80
	Строгание	(До 0,2)	10...40	45...70	0,30...0,60	0,25...0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3...10	45...65	0,40...0,70	0,35...0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	25...50	0,20...0,45	0,20...0,40

УДК 621.9

А.Н. Афонин, А.В. Киричек, А.Г. Апальков, Д.А. Должиков *(ОрелГТУ)*

Моделирование процесса поверхностно-объемного пластического деформирования

Установлена новая группа процессов обработки металлов в машиностроении – поверхностно-объемное пластическое деформирование. Приведены основные особенности указанных методов обработки. Описаны примеры исследования некоторых способов поверхностно-объемного пластического деформирования с использованием современных методов компьютерного моделирования.

It is defined new group of processes of processing of metals in mechanical engineering – is superficial-volumetric plastic deformation. The basic features of the given methods of processing are resulted. Examples of research of some processes of superficial-volumetric plastic deformation with use of modern methods of computer modeling are resulted.

В современной промышленности нашли широкое применение способы обработки материалов пластическим деформированием, не вписывающиеся ни в одну из групп традиционной классификации и занимающие промежуточное положение между обработкой *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) и объемной обработкой давлением. К ним относятся различные способы накатывания резьб, шлицев, зубьев и т.д. [1–5]. При обработке изделий данными методами пластической деформации подвергается лишь поверхностный слой обрабатываемого тела, однако при этом происходит существенное изменение его формы путем образования на поверхности тела периодически повторяющихся или единичных выступов и впадин. Силы деформирования при обработке деталей указанными методами несколько выше, чем при ППД, но существенно ниже в сравнении с близкими по схеме обработки способами объемного пластического деформирования. Точность поверхностей при этом достаточно высока (например, при накатывании резьб достигается степень точности 4–6) и в большинстве случаев они не требуют последующей механической обработки. В силу невозможности вписать данные широко распространенные в промышленности методы обработки пластическим деформированием в традиционную схему классификации необходимо выделить их в отдельную группу – поверхностно-объемного пластического деформирования.

Важнейшей особенностью поверхностно-объемного пластического деформирования является то, что оно является неравномерным и происходит путем формирования на поверхности заготовки некоторых профилей (резьб, шлицев, зубьев, кольцевых канавок и т.д.), состоящих из чередующихся выступов и впадин. Металл при этом перетекает из одних локальных объемов на поверхности заготовки в другие (из впадин формируемых профилей в выступы), практически не перемещаясь в глубинные области заготовки. В связи с этим деформации и напряжения распространяются только в поверхностном слое заготовки как при ППД. Шаг формируемых профилей при поверхностно-объемном пластическом деформировании не должен превышать 5...10 мм. При накатывании профилей с большими шагами перемещение металла из впадин в выступы затруднено, и деформация охватывает весь объем заготовки. Ввиду того, что деформации подвергаются только небольшие локальные объемы, площадь контакта между инструментом и заготовкой относительно мала, что приводит к снижению сил деформирования.

Большое значение при проектировании инструмента и технологии поверхностно-объемного пластического деформирования имеет выбор схемы обработки, т.е. последовательности перемещения металла из одних локальных объемов в другие. Рациональная схема деформирования позволяет существенно понизить силы деформирования и максимальные значения напряжений и деформаций в инструменте и заготовке.

Наиболее серьезным препятствием на пути более широкого распространения поверхностно-объемного пластического деформирования в промышленности

является его недостаточная изученность. Достаточно сложная кинематика многих видов поверхностно-объемного пластического деформирования и крайне сложный, объемный характер напряженно-деформированного состояния в локальных деформируемых объемах делает весьма затруднительным, а иногда и невозможным, получение аналитических формул, описывающих данные виды обработки. Для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при поверхностно-объемном пластическом деформировании в настоящее время наиболее широко применяется метод линий скольжения. Сравнение формул для расчета сил деформирования при накатывании резьб, полученных методом линий скольжения разными исследователями [1–3], показывает, что вычисленные силы могут различаться в 1,5...2 раза. Такие результаты являются следствием того, что при выведении формул использовали большое количество упрощений, введение которых основывалось на результатах экспериментальных исследований, в связи с чем данные формулы справедливы лишь для некоторого диапазона условий накатывания, рассмотренного каждым исследователем.

Можно сделать вывод о том, что общая теория поверхностно-объемной пластической деформации на сегодняшний день отсутствует. Каждый способ поверхностно-объемного пластического деформирования изучали, как правило, независимо от других, без выявления общих закономерностей. Большинство существующих рекомендаций по технологии накатывания резьб, шлицев, зубьев основаны на эмпирических данных. Ввиду фрагментарности теоретических исследований, высокой их трудоемкости и стоимости экспериментов развитие технологий поверхностно-объемного пластического деформирования происходит достаточно медленно. В связи с этим представляется перспективным использование современных компьютерных методов численного моделирования (в частности, *метода конечных элементов* – МКЭ) с последующим выявлением общих закономерностей протекания процессов поверхностно-объемной пластической деформации [6].

Одним из мировых лидеров в данной области является система DEFORM (разработана компанией Scientific Forming Technologies Corp., США), обладающая возможностью моделирования значительных объемных пластических деформаций и современным, интуитивно понятным графическим интерфейсом.

При некоторых методах поверхностно-объемного пластического деформирования (например, при накатывании зубьев прямозубых колес методом обкатки) напряженно-деформированное состояние заготовки является плоским. Для моделирования данных процессов может быть использован модуль DEFORM 2D. На рис. 1 приведены результаты моделирования накатывания зубьев с модулем 3 мм зубчатого колеса, изготовленного из стали 45. Инструменту, имеющему вид рейки с исходным производящим контуром, сообщается поступательное главное движение, а оправке, на которую посажена заготовка, – вращательное движение круговой подачи.

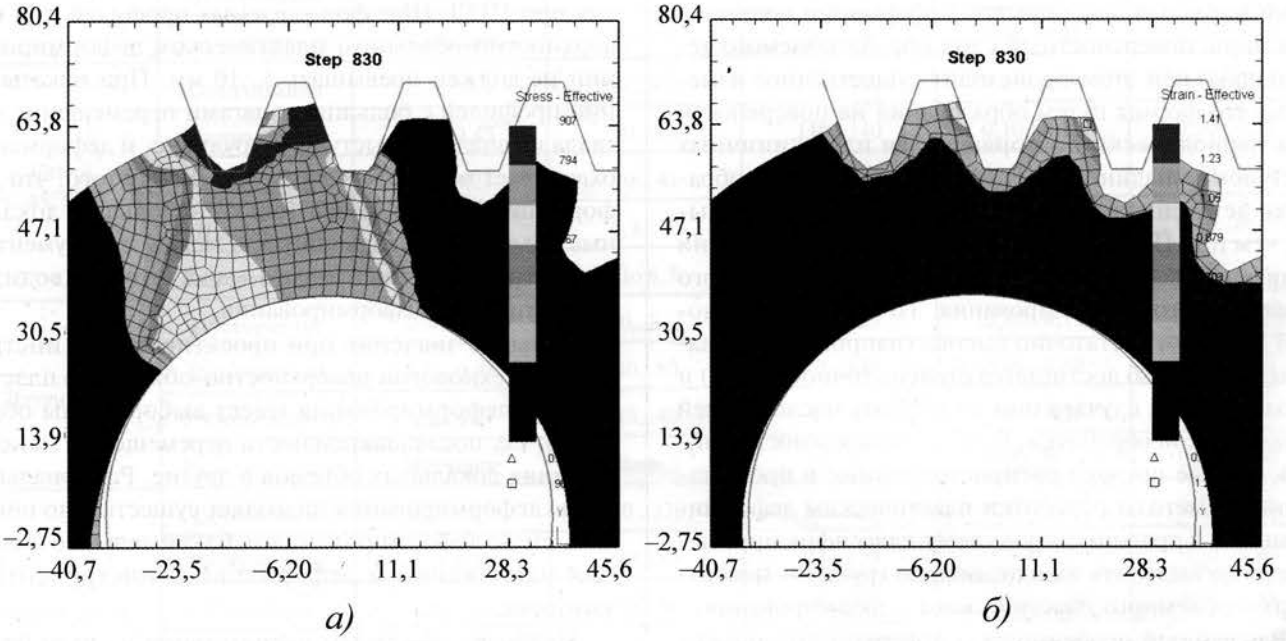


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений (*а*) и деформаций (*б*) по Мизесу в заготовке при накатывании зубьев

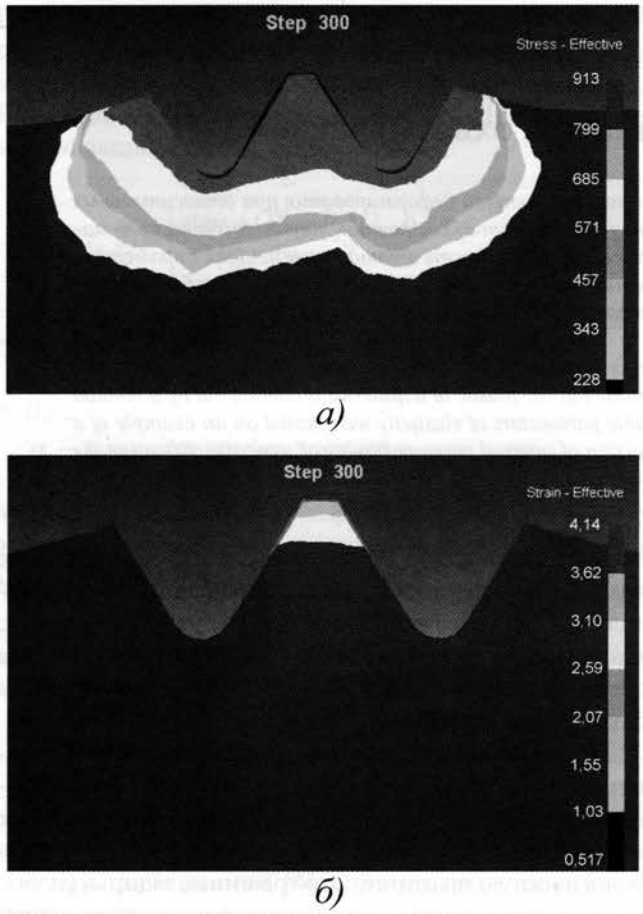


Рис. 2. Эквивалентные напряжения (*а*) и деформации (*б*) в заготовке при накатывании резьбы М20×2 при радиальном обжатии заготовки 0,75 мм

Как было отмечено выше, в большинстве случаев поверхностно-объемного пластического деформирования имеет место объемное напряженно-деформированное состояние заготовки. В связи с этим для исследования данных процессов целесообразно использование модуля DEFORM 3D.

На рис. 2 приведены эквивалентные напряжения и деформации по Мизесу в заготовке при накатывании резьбы М20×2 на заготовках из стали 45 трехроликовой аксиальной резьбонакатной головкой. Полученные поля напряжений и деформаций с удовлетворительной точностью совпадают с результатами экспериментальных исследований [3, 5].

Хорошая сходимость результатов моделирования с помощью МКЭ с результатами экспериментальных исследований говорит о целесообразности использования современных специализированных систем инженерного анализа, например DEFORM 3D, для проектирования инструмента и технологии поверхностно-объемного пластического деформирования. В качестве примера можно привести проектирование профиля заборной части комплекта роликов повышенной стойкости для аксиальных резьбонакатных головок. Сначала моделируют деформирование цилиндрической заготовки первым витком заборной части первого ролика комплекта, затем – деформирование канавки, сформированной первым витком заборной части первого ролика первым витком заборной части второго ролика и т. д. Подбор рациональных значений радиальных обжатий для каждого витка осуществляется таким образом, чтобы обеспечивать минимальные значения эквивалентных напряжений в инструменте. При этом за счет определения рациональных значений радиальных обжатий заготовки и схемы деформирования возможно повысить стойкость резьбонакатного инструмента в 1,5 раза и более, а также обеспечить возможность накатывания резьб на заготовках из труднообрабатываемых или предварительно упрочненных материалов.

Сравнение результатов моделирования различных процессов поверхностно-объемного пластического деформирования позволяет сделать вывод о сходном характере распределения полей напряжений и деформаций. Выявление общих закономерностей протекания этих процессов с использованием современных компьютерных методов проектирования позволит расширить область применения уже существующих способов и разработать новые, замещающие традиционные виды обработки резанием и объемной обработкой давлением.

Применение поверхностно-объемного пластического деформирования позволит значительно повысить качество изделий машиностроительного производства при одновременном снижении себестоимости производства. Совершенствование традиционных и внедрение новых методов поверхностно-объемного пластического деформирования является одним из наиболее перспективных направлений развития современного машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузьменко А.Ф.** Закономерности распределения контактных напряжений при накатывании резьбы // Автомоб. пром-сть. 2004. № 2. С. 25–28.

2. **Лындин В.А.** Инструмент для накатывания зубьев и шлицев повышенной точности. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

3. **Накатывание** резьб, червяков, шлицев и зубьев / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов и др. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. 228 с.

4. **Сравнение** твердости резьбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами / Д.В. Бушенин, А.В. Киричек, А.Н. Афонин и др. // Вестник машиностроения. 1999. № 10. С. 40–43.

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

6. **Афонин А.Н.** Математическое моделирование полей напряжений и деформаций при резьбонакатывании // Изв. ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2005. № 3. С. 75–78.

С.А. Зайдес *(Иркутский ГТУ)*

Численная модель очага деформации при охватывающем ППД*

Рассмотрено математическое моделирование процесса охватывающего деформирования при относительных обжатиях менее 1 %. Решение нелинейной задачи определения напряженного состояния упругопластического материала осуществлено методом последовательных приближений. Сходимость метода переменных параметров упругости тестировалась на примере задачи об упругопластическом состоянии толстостенной трубы под действием внутреннего давления, имеющей при некоторых упрощениях аналитическое решение.

The mathematical modeling of process covering deformation is considered at relative wringing out less than 1 percent. The solution of a non linear task of definition of the intense condition elastic-plastic of a material is carried out by a method of consecutive approximation. Convergence of a method of variable parameters of elasticity were tested on an example of a task about elastic-plastic condition of a thick walled pipe under action of internal pressure having of some symplification the an analytical solution.

В технологии машиностроения бесстружечные способы изготовления деталей машин относятся к весьма прогрессивному и перспективному направлению. В странах Западной Европы процессы, основанные на использовании *обработки металлов давлением* (ОМД), активно вытесняют там, где это возможно, механические процессы резания. Технологические процессы ОМД характеризуются высокой производительностью, экономичностью использования металла и экологичностью, которой в последнее время во всем мире уделяется особое внимание.

Среди продукции машиностроения имеется группа изделий, которые относятся к маложестким. Это длинные тонкие детали типа валов, осей, штанг, направляющих, которые широко используются в горно-рудной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении, в автомобиле-, станко- и приборостроении и других областях техники.

Для производственников обработка маложестких изделий – трудоемкий процесс, при выполнении которого требуются специалисты высокой квалификации. Это объясняется тем, что традиционная схема деформационного упрочнения является локальной. Деталь совершает вращательное движение и обрабатывается инструментом, который может активно способствовать ее искривлению. Для уменьшения искажения формы детали обработку осуществляют на пониженных режимах, что приводит к резкому увеличению продолжительности производственного цикла.

Многие изделия маложесткой формы можно обрабатывать на основе технологии охватывающего деформирования [1–3], при которой изменяются и кинематика технологического процесса, и форма рабочего инструмента. В данном случае заготовка не вращается, а перемещается в направлении своей продольной оси. Деформирующие нагрузки от рабочего инструмента передаются на изделие не локально, а осесимметрично, что благоприятно сказывается на сохранении его прямолинейности.

Несмотря на ряд существенных преимуществ охватывающего деформирования, можно отметить и некоторые недостатки, которые иногда препятствуют более широкому внедрению этого процесса обработки в технологическую практику. Это трещины, задиры, разрывы и другие дефекты, возникающие вследствие неправильно назначенных режимов и параметров процесса деформирования, которые чаще всего подбирают опытным путем. Указанные дефекты вызваны высоким напряженным состоянием деформируемого материала. В данной работе представлено численное моделирование напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании.

Постановка задачи

Рассматриваются малые (< 1 %) относительные обжатия сплошных цилиндрических тел в матрицах, состоящих из кругового конуса и калибрующего пояска. Напряженное состояние не зависит от угловой координаты, т.е. является осесимметричным, и может быть сформулировано в цилиндрической системе координат (r, θ, z). Требуется определить компоненты вектора напряжений $\sigma = [\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}]$ как функции r и z. Дифференциальные уравнения равновесия имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0;$$
$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \qquad (1)$$

* Статья не была представлена на конференции "Технология–2007".

Искомое решение системы (1) должно удовлетворять двум краевым условиям. Первое условие – кинематическое, оно характеризует форму матрицы. В компонентах перемещения $u = [u, w]$ это условие можно записать следующим образом:

$$u(z, d) = \begin{cases} z\mathrm{tg}\alpha + (D_2 - D_1)/2, & 0 \le z \le \dfrac{D_1 - D_2}{\mathrm{tg}\alpha}; \\ (D_2 - D_1)/2, & -l \le z \le 0, \end{cases} \quad (2)$$

где D_1 – начальный диаметр цилиндра;

D_2 – диаметр на выходе из конуса матрицы; $a = D_1/2$;

α – полуугол конуса матрицы.

Второе условие задано в напряжениях и связывает постоянную осевую силу деформирования $F = \mathrm{const}$ с осевым напряжением в произвольном сечении $S = \pi D_1^2/4$ цилиндра:

$$\int_S \sigma_z \, ds = F. \quad (3)$$

Упругопластическое состояние

Решение будем искать в рамках теории малых упругопластических деформаций методом последовательных приближений [4], при котором на каждой итерации решается задача упругости с величинами модуля упругости E^* и коэффициента Пуассона ν^*, зависящими от напряженного состояния в точке, т.е. $E^* = E^*(r, z)$, $\nu^* = \nu^*(r, z)$. В первом приближении материал полагаем упругим ($E_1^* = E$, $\nu_1^* = \nu$) и решаем задачу упругости при краевых условиях (2), (3). При этом можно отдельно рассмотреть задачу (2), а условие (3) заменить более простым случаем растяжения длинного цилиндра, т.е. положить $\sigma_z = F/S = 4F/(\pi D_1^2)$. В силу линейности упругой задачи общее решение получится суммированием полученных значений σ_z при $z \le 0$. В качестве критерия пластичности используем условие Губера–Мизеса

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \\ \times \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + 6\tau_{rz}^2} \ge \sigma_{\text{т}}. \quad (4)$$

Таким образом, результатом первой итерации являются интенсивность напряжений $\sigma^*_{\text{н}(1)}$ в упругом теле и соответствующее значение эквивалентной деформации $\varepsilon_{(1)} = \sigma^*_{\text{н}(1)}/E$. По величине $\varepsilon_{(1)}$ из кривой деформирования [5] определяем величину $\sigma_{\text{н}(1)}$ в пластическом теле и секущий модуль $E_{\text{с}(1)} = \sigma_{\text{н}(1)}/\varepsilon_{(1)}$.

Во втором приближении полагаем (по упрощенным формулам), что

$$E^*_{(2)} = E_{\text{с}(1)}; \; \nu^*_{(2)} = \frac{1}{2} - \frac{1-2\nu}{2}\frac{E_{\text{с}(1)}}{E} \quad (5)$$

и решаем задачу упругости при параметрах (5). Процесс продолжается до достижения требуемой точности.

Упругое состояние

Численное решение упругой задачи находят с помощью метода конечных элементов в форме метода перемещений. Используется кольцевой элемент с треугольным сечением, имеющий шесть степеней свободы. Ось симметрии z совпадает с продольной осью цилиндра. Перемещения внутри элемента аппроксимируются линейной функцией:

$$u(r, z) = a_1 + a_2 r + a_3 z; \\ w(r, z) = a_4 + a_5 r + a_6 z. \quad (6)$$

Если обозначить вектор узловых перемещений через $q = [u_1, u_2, u_3, w_1, w_2, w_3]^{\text{т}}$, а через $r_i, z_i; i = \overline{1, 3}$ – координаты узловых точек, то в матричной форме (6) примет вид $u = [\mathbf{N}]q$,

где $[\mathbf{N}] = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{B}]^{-1}$;

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} 1 & r & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r & z \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{Bmatrix} [\mathbf{B}_1] & 0 \\ 0 & [\mathbf{B}_1] \end{Bmatrix}; \; [\mathbf{B}_1] = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Зависимость между деформациями и перемещениями дается формулами Коши для осесимметричной задачи:

$$\vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial r & 0 \\ 1/r & 0 \\ 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial z & \partial/\partial r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(r, z) \\ w(r, z) \end{bmatrix},$$

или с использованием выражений (7), (8)

$$\varepsilon = [\mathbf{D}]q; \; [\mathbf{D}] = [\mathbf{D}_a] \cdot [\mathbf{B}]^{-1}; \quad (9)$$

где

$$[\mathbf{D}_a]=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0\\1/r&1&z/r&0&0&0\\0&0&0&0&0&1\\0&0&1&0&1&0\end{bmatrix}. \qquad (10)$$

Вектор напряжений определяется из формул закона Гука для изотропного тела и с учетом (9) имеет вид

$$\sigma=[\mathbf{C}_\varepsilon]\varepsilon=[\mathbf{C}_\varepsilon]\cdot[\mathbf{D}]q, \qquad (11)$$

где

$$[\mathbf{C}_\varepsilon]=C_1\begin{bmatrix}1&C_2&C_2&0\\C_2&1&C_2&0\\C_2&C_2&1&0\\0&0&0&C_3\end{bmatrix}=C_1[\mathbf{C}'_\varepsilon];$$

$$C_1=\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)};\ C_2=\frac{\nu}{1-\nu};\ C_3=\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}.$$

В обобщенных координатах $a_1...a_6$ матрица жесткости элемента

$$[\mathbf{K}_a]=\frac{2\pi E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left\{\int_A[\mathbf{D}_a]^{\mathrm{T}}[\mathbf{C}'_\varepsilon]\cdot[\mathbf{D}_a]r\,da\right\}. \qquad (12)$$

Выражение в фигурных скобках в (12) есть матрица

$$\begin{array}{cccccc}a_1&a_2&a_3&a_4&a_5&a_6\\(1-\nu)I_4&&\text{Симметрично}&&&\\I_2&2I_1&&&&\\(1-\nu)I_5&I_3&(1-\nu)I_6+[(1/2)-\nu)I_1]&&&\\0&0&0&0&&\\0&0&((1/2)-\nu)I_1&0&((1/2)-\nu)I_1&\\\nu I_2&2\nu I_1&\nu I_3&0&0&((1/2)-\nu)I_1\end{array}. \qquad (13)$$

Здесь через I_i, $i=\overline{1,6}$ обозначены интегралы

$$I_1=\iint rdrdz;\ I_2=\iint drdz;\ I_3=\iint z\,dr\,dz;$$
$$I_4=\iint\frac{drdz}{r};\ I_5=\iint\frac{z}{4}drdz;\ I_6=\iint\frac{z^2}{r}dr\,dz. \qquad (14)$$

Интегралы берутся по площади элемента. Первые три интеграла не содержат особенности $1/r$, поэтому легко вычисляются для любого расположения элемента относительно осей r и z. Выражения для I_4, I_5, I_6 имеют более громоздкий вид, и их вычисление требует рассмотрения следующих положений треугольника относительно оси z:

- одна вершина треугольника принадлежит оси z;
- одна вершина принадлежит оси z, противоположная сторона не параллельна оси z;
- одна сторона параллельна оси z, противоположная вершина не лежит на оси z;
- одна сторона принадлежит оси z;
- общее положение.

Каждый из перечисленных случаев дает свое значение I_4, I_5, I_6 как функцию узловых перемещений r_1, ..., z_3. Матрица (10) вычисляется в центре треугольника, имеющего следующие координаты:

$$r_c=\frac{1}{3}(r_1+r_2+r_3);$$

$$z_c=\frac{1}{3}(z_1+z_2+z_3).$$

Переход от обобщенных координат a_i к физическим координатам осуществляется по формуле

$$[\mathbf{K}]=[\mathbf{B}^{-1}]^{\mathrm{T}}[\mathbf{K}_a]\cdot[\mathbf{B}^{-1}]. \qquad (15)$$

Краевое условие (2) выполняется при сборке глобальной матрицы жесткости путем задания соответствующих перемещений u_i и пересчета вектора внешней нагрузки, который первоначально считается нулевым.

Тестовый расчет

Упругая задача (1)–(3) с заданным очагом деформации (рис. 1) имеет аналитическое решение [3] с компонентами напряжений

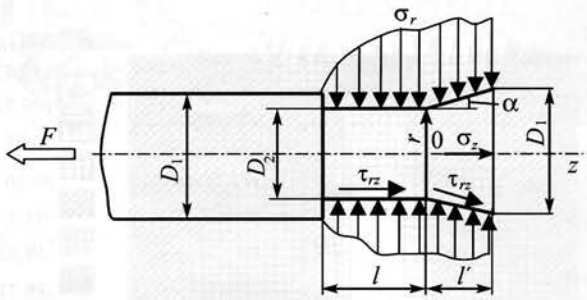


Рис. 1. Модель очага деформации при охватывающем нагружении

$$
\begin{aligned}
\sigma_r &= -\int_0^\infty [(1-2\nu-\rho)I_0(xr) + \\
&+[xr+\rho/(xr)]I_1(xr)]x^3 f(x)\sin xz\,dx; \\
\sigma_\theta &= -\int_0^\infty [(1-2\nu)I_0(xr) - \\
&- [\rho/(xr)]I_1(xr)]x^3 f(x)\sin xz\,dx; \\
\sigma_z &= -\int_0^\infty [(\rho+2\nu-4)I_1(xr)]x^3 f(x)\sin xz\,dx; \\
\tau_{rz} &= \int_0^\infty [(\rho+2\nu-2)I_1(xr) - xrI_0(xr)]x^3 f(x)\cos xz\,dx.
\end{aligned}
\qquad (16)
$$

Здесь I_0 и I_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка; величины ρ и $f(x)$ выбираются из краевых условий. Полученное численное решение сравнивали с решением (16) на различных сетках разбиения; результаты сравнения позволяют говорить о надежности численной модели.

Сходимость метода переменных параметров упругости тестировалась на примере задачи об упругопластическом состоянии толстостенной трубы под действием внутреннего давления, имеющей при некоторых упрощениях аналитическое решение [6]. Труба находится в условиях плоской деформации, поэтому напряженное состояние зависит только от координаты r. Поперечное сечение трубы состоит из двух зон: внутренней пластической, где $a \le r \le r_т$, и наружной упругой, где $r_т \le r \le b$ (a и b – внутренний и наружный радиусы). Если обозначить через $p_т$ давление на границе упругой и пластической зон, то упругое решение имеет вид

$$
\begin{aligned}
\sigma_r &= -\frac{p_т r_т^2}{b^2 - r_т^2}\left(\frac{b^2}{r^2} - 1\right); \\
\sigma_\theta &= \frac{p_т r_т^2}{b^2 - r_т^2}\left(\frac{b^2}{r^2} + 1\right).
\end{aligned}
\qquad (17)
$$

Напряженное состояние в пластической зоне имеет компоненты напряжений

$$
\begin{aligned}
\sigma_r &= -p + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т \ln\frac{r}{a}; \\
\sigma_\theta &= \sigma_r + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т,
\end{aligned}
\qquad (18)
$$

где p – внутреннее давление в трубе;

$\sigma_т$ – предел текучести материала трубы.

Приравнивая правые части выражений (17) и (18) при $r = r_т$, получаем систему двух уравнений для определения значений $r_т$ и $p_т$, решение которой полностью определяет, таким образом, напряженное состояние.

Можно показать, что для данной задачи формулы метода переменных параметров упругости записываются аналитически и дают следующие рекуррентные соотношения величин $r_т$ и $p_т$:

$$
\begin{aligned}
p_{т(i-1)} &= \frac{p(b^2 - r_{т(i-1)}^2)}{b^2 + 2b^2 \ln\dfrac{r_{т(i-1)}}{a} - r_{т(i-1)}^2}; \\
r_{т(i)} &= r_{т(i-1)^b}\left[\frac{\sqrt{3}p_{т(i-1)}}{\sigma_т(b^2 - r_{т(i-1)}^2)}\right].
\end{aligned}
\qquad (19)
$$

При $i = 1$ полагаем $r_{т(0)} = a$. В пределе при $i \to \infty$ получаем точное решение задачи. Данный тест позволил проверить для численной модели быстроту сходимости итераций метода. В среднем можно за пять-шесть шагов получить приемлемую в инженерных расчетах точность результатов.

Пример расчета. На рис. 2 приведены результаты расчета (в виде полос) упругопластической зоны вблизи очага деформации при следующих параметрах: степень обжатия $u = [(D_1^2 - D_2^2)/D_2^2]\cdot 100\,\%$; модуль упругости E = 200 ГПа; коэффициент Пуассона ν = = 0,3; модуль упрочнения $E_Y = 0{,}25E$; предел текучести $\sigma_т$ = 320 МПа; полуугол матрицы $\alpha = 6°$; длина калибрующего пояска l' = 3 мм; сила деформирования F = 5 кН.

Расчет проводился на конечно-элементной сетке, экспоненциально сгущающейся к области контакта заготовки и матрицы, где наиболее велики концентраторы напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зайдес С.А.** Изготовление деталей машин холодным пластическим деформированием // Автоматизация и современные технологии. 1998. № 1. С. 9–11.

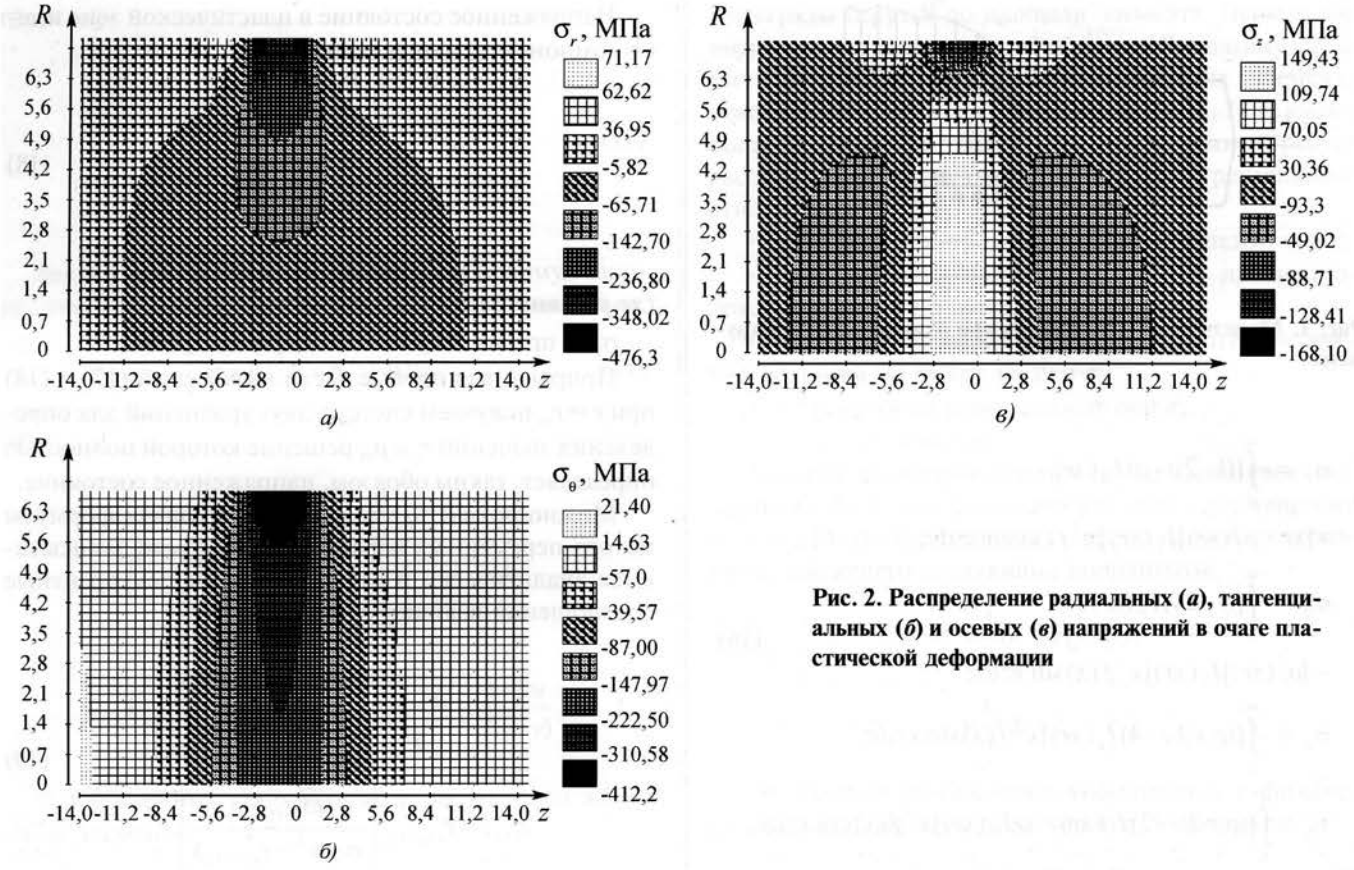


Рис. 2. Распределение радиальных (*а*), тангенциальных (*б*) и осевых (*в*) напряжений в очаге пластической деформации

2. **Зайдес С.А.** Напряженно-деформированное состояние при охватывающем поверхностном пластическом деформировании // Вестн. машиностроения. 2001. № 7. С. 60–64.

3. **Зайдес С.А.** Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркутск гос. ун-та, 1992. 200 с.

4. **Биргер И.А.** Общие алгоритмы решения задач упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 61–73.

5. **Кроха В.А.** Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. М.: Машиностроение, 1980. 155 с.

6. **Самуль В.И.** Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1982. 288 с.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Сухочева Е.Г., Коденцев С.Н. Технология комбинированной обработки каналов малого сечения с обеспечением эксплуатационных показателей.

УДК 539

А.А. Моисеенко *(ОрелГТУ)*

Исследование прочности соединений с гарантированным натягом, контактирующих по прерывистой цилиндрической поверхности

Представлена математическая модель напряженно-деформированного состояния соединения с гарантированным натягом по прерывистой цилиндрической поверхности. В качестве универсальной модели принято соединение полого зубчатого вала со ступицей. Расчеты показали достаточную прочность такого соединения – снижение контактной прочности происходит гораздо медленнее, чем уменьшение площади контакта.

The mathematical model of stressed-deformed condition with guaranteed interference fit on the discontinuous cylindrical surface is submitted. As universal model is accepted the connection of the cored toothed shaft with a hub. The calculations have shown viability and sufficient strength of such connection – easing of contact strength is rather slower then decrease of contact area.

В современном машиностроении в конструкциях машин и механизмов соединения с гарантированным натягом широко распространены и применяются в качестве неподвижных. При посадке охватывающей детали (ступицы) с меньшим диаметром отверстия на охватываемую деталь (вал) возникает плоское *напряженно-деформированное состояние* (НДС) соединения (решение Ляме [1]), которое подробно изучено.

Как известно, большие трудности возникают при проектировании тяжелых многоступенчатых зубчатых редукторов с шевронными зубчатыми колесами. При центральной посадке с гарантированным натягом колеса предыдущей ступени на шевронной вал-шестерне последующей ступени выход червячной фрезы имеет значительную длину l, что при условии посадки колеса на непрорезанную поверхность (рис. 1, *а*) значительно увеличивает расстояние L между опорами (подшипниками) вала-шестерни и общую ширину редуктора. Стремление сократить этот размер приводит к необходимости обеспечить выход червячной фрезы на посадочную поверхность с двух сторон (рис. 1, *б*). Однако в этом случае неполнота контакта не превышает, как правило, 15...25 %.

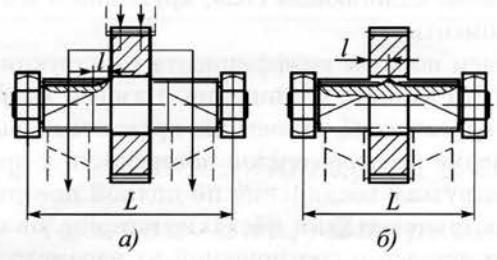


Рис. 1. Центральное расположение зубчатого колеса между полушевронами вала-шестерни

Указанная проблема возникла при проектировании вертикального кранового редуктора ВКУ-965П в машиностроительной фирме "СПИН" (Орел). Было принято и реализовано решение о посадке зубчатого колеса предыдущей ступени на частично прорезанную (прерывистую) цилиндрическую поверхность вал-шестерни последующей ступени. Неполнота контакта составила в этом случае 60...70 %. Новизна такого радикального конструктивного решения, с одной стороны, и отсутствие разработанных современных методов расчета соединений с натягом с макропрерывистым контактом, с другой – вызвали необходимость настоящего исследования.

Применение посадки по прерывистым цилиндрическим поверхностям может дать компоновочные преимущества и общий положительный эффект и в других конструкциях.

На рис. 2 изображено нормальное сечение соединения с гарантированным натягом полого зубчатого вала со ступицей, принятого в качестве универсальной расчетной модели.

Сформулируем граничные условия для вала и ступицы: на контуре вала и ступицы вне контакта напряжения равны нулю, а в контакте напряжения на контуре вала и ступицы равны; касательные перемеще-

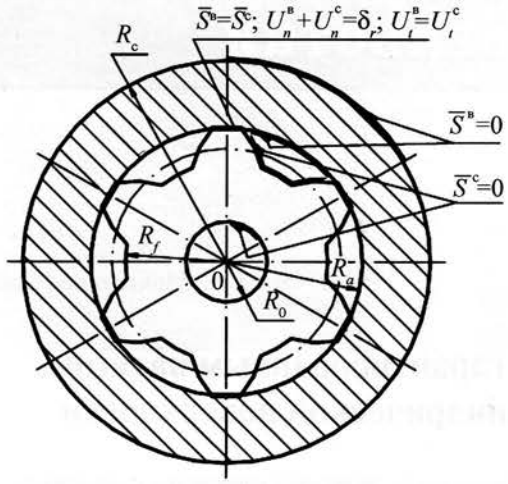


Рис. 2. Соединение с гарантированным натягом полого зубчатого вала со ступицей

ния равны по величине и направлению, а сумма нормальных перемещений равна радиальному натягу.

Определим условия на границах вала и ступицы в общей форме – в граничных интегральных уравнениях. Обозначим: $\bar{S}_j^{в}(\bar{S}_\eta^{с})$ – вектор напряжения в произвольной (в том числе и на контуре отверстия) точке $j(\eta)$ на контуре вала (ступицы); $\bar{U}_j^{в}(\bar{U}_\eta^{с})$ – вектор перемещения в произвольной точке $j(\eta)$ на контуре вала (ступицы). Тогда

$$\bar{S}_j^{в} = \int_{L_в} \bar{s}_{ji}\bar{f}_i\,dl_i; \qquad (1)$$

$$\bar{S}_\eta^{с} = \int_{L_с} \bar{s}_{\eta\xi}\bar{f}_\xi\,dl_\xi; \qquad (2)$$

$$\bar{U}_j^{в} = \int_{L_в} \bar{u}_{ji}\bar{f}_i\,dl_i; \qquad (3)$$

$$\bar{U}_\eta^{с} = \int_{L_с} \bar{u}_{\eta\xi}\bar{f}_\xi\,dl_\xi, \qquad (4)$$

где $L_в$ – длина контура (границы) вала, включая отверстие;

$L_с$ – длина контура (границы) ступицы, внутреннего и внешнего;

$i(\xi)$ – индекс текущей точки вала (ступицы), в которой приложена распределенная фиктивная нагрузка $\bar{f}_i(\bar{f}_\xi)$ на элементе $dl_i(dl_\xi)$;

$j(\eta)$ – индекс фиксированной точки вала (ступицы), в которой определяют напряжения и перемещения от $\bar{f}_i(\bar{f}_\xi)$; $\bar{s}_{ji}(\bar{s}_{\eta\xi})$ – функция влияния, равная по величине и направлению напряжению в точке $j(\eta)$ от приложенной единичной силы в точке $i(\xi)$;

$\bar{u}_{ji}(\bar{u}_{\eta\xi})$ – функция влияния, равная по величине и направлению перемещению в точке $j(\eta)$ от приложенной единичной силы в точке $i(\xi)$.

С учетом введенных обозначений граничные условия примут следующий вид:

вне контакта

$$\bar{S}_j^{в} = 0; \qquad (5)$$

$$\bar{S}_\eta^{с} = 0, \qquad (6)$$

в контакте

$$\bar{S}_j^{в} - \bar{S}_\eta^{с} = 0; \qquad (7)$$

$$U_{ji}^{в} + U_{\eta t}^{с} = 0; \qquad (8)$$

$$U_{jn}^{в} + U_{\eta n}^{с} = -\delta_r, \qquad (9)$$

где $U_{jn}^{в}$ – нормальное перемещение в точке вала j;

$U_{\eta n}^{с}$ – то же в точке ступицы η;

δ_r – радиальный натяг;

j – текущая точка на контактной границе вала;

η – совпадающая с ней точка на контактной границе ступицы.

Таким образом, напряжения и перемещения на границах вала и ступицы связаны граничными интегральными уравнениями (5)–(9). Решив систему (5)–(9), можно определить напряжения и деформации на границе вала и ступицы (а в общем случае – параметры напряженно-деформированного состояния в любой точке вала и ступицы).

За условное разрушение соединения с гарантированным натягом примем недопустимое изменение взаимного положения соединенных деталей после его нагружения. Тогда конструкционная прочность соединения с гарантированным натягом есть способность противостоять разрушению при действии заданной нагрузки в течение заданного времени. Показателями конструкционной прочности соединения вал–ступица (ступица закреплена на валу) являются предельные сдвигающая сила, крутящий и изгибающий моменты.

Введем понятие коэффициента конструкционной прочности данного соединения. Назовем *коэффициентом прочности* C_0 отношение предельных нагрузок соединения по прерывистой поверхности к предельным нагрузкам соединения по полной поверхности при постоянстве длин посадки, материалов соединенных деталей и соотношений их параметров (см. рис. 2) $\frac{\delta_r}{R_a}$, $\frac{R_0}{R_a}$ и $\frac{R_c}{R_a}$,

$$C_0 = \frac{F'_{\text{пр}}}{F^0_{\text{пр}}} = \frac{M'_{\text{к пр}}}{M^0_{\text{к пр}}}, \qquad (10)$$

где $F'_{\text{пр}}$ и $M'_{\text{к пр}}$ – соответственно предельные сдвигающие сила и момент по прерывистой поверхности, а $F^0_{\text{пр}}$ и $M^0_{\text{к пр}}$ – то же по полной поверхности.

Обозначим коэффициент полноты контакта $C_l = \frac{S'}{S}$, где S и S' – площади полной и прерывистой поверхностей контакта.

Следовало ожидать, что прочность соединения зубчатого вала ($h^*_з \neq 0$ – отношение высоты зуба к модулю) со ступицей по сравнению с прочностью соединения по полной поверхности будет ниже (C_0 уменьшится) при прочих равных условиях. Основная причина этого – дополнительная упругая деформация зубьев как стержней. Расчеты с использованием программы PRESS подтвердили эти ожидания (предположения). Были исследованы соединения с зубчатыми валами, зубья которых образованы следующими исходными контурами (нумерация проведена по возрастанию высоты зуба):

1) эвольвентные шлицы – $h^*_з = 1{,}1$, ГОСТ 6033–80;

2) зацепление Новикова – $h^*_з = 1{,}65$;

3) зацепление Новикова – $h^*_з = 1{,}95$;

4) эвольвентное зацепление – $h^*_з = 2{,}25$, ГОСТ 13755–81.

На рис. 3 кружками обозначены результаты расчетов для контуров зубьев *1–4* при $z = 12$, $\frac{R_c}{R_a} = 1{,}6$; точка (1; 1) соответствует контакту по полной поверхности. Сплошная линия относится к соединению с гладким валом для тех же параметров z, R_0 и $\frac{R_c}{R_a}$; здесь z – число зубьев вала, R_0, R_a, R_c – параметры соединения (см. рис. 2).

По рис. 3 видно, что коэффициент прочности C_0 данного соединения тем ниже, чем больше высота зубьев.

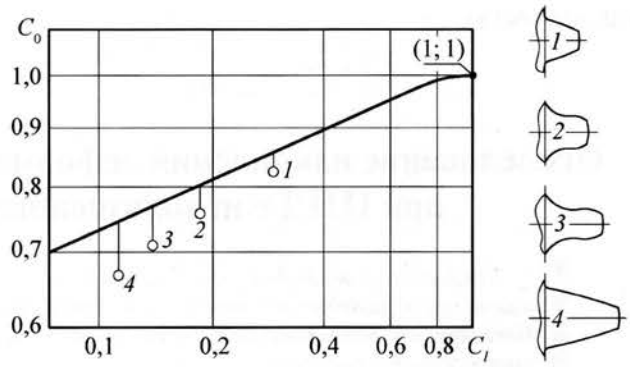


Рис. 3. Влияние высоты зуба $h^*_з$ на коэффициент прочности C_0 ($z = 12$, $R_0 = 0$, $\frac{R_c}{R_a} = 1{,}6$)

Расчеты показали, что коэффициент прочности C_0 значительно выше коэффициента полноты контакта C_l, т.е. снижение прочности соединения происходит медленнее снижения площади контакта в соединении; так $C_l = 0{,}1...0{,}25$ соответствует $C_0 = 0{,}67...0{,}78$. Следовательно, в связи с высокой конструкционной прочностью классических (непрерывных) соединений с натягом этот показатель для соединения с прерывистым контактом остается достаточно высоким.

Результаты проведенных исследований – программа PRESS и инженерный метод расчета – внедрены в производство машиностроительной фирмой ООО "СПИН" (Орел), поставившей в эксплуатацию на металлургические комбинаты России ("ММК", "НЛМК", "НТМК" и "Северсталь") 50 тяжелых крановых редукторов ВКУ-965П. В редукторах произведена бесшпоночная посадка зубчатого колеса на центральную часть шевронного вала-шестерни, прорезанную впадинами зубьев. Результаты исследований приняты к использованию на Майкопском и Ижевском редукторных заводах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тимошенко С.П.** Сопротивление материалов. Т. 2. М., 1965.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В., Чихранов А.В.

Механические свойства ионно-плазменных износостойких покрытий.

УДК 621.7.003.12

В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов *(КузГТУ, Кемерово)*

Исследование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности при ППД с использованием ультразвукового контроля*

Приведены результаты исследования формирования механического состояния поверхностного слоя деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием с учетом технологического наследования. Показано, что накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности металла коррелируют с параметрами ультразвуковых сигналов.

To measure accumulated deformation and the degree of plasticity resource exhaustion during the operational fatigue loading of metal the method of acoustic structurescopy was used. As a result, the transformation regularities of the mechanical state of strengthened machine components blanket at the cyclic durability stage have been determined.

Использование ультразвукового контроля для оценки показателей механического состояния упрочненного металла

Одним из перспективных направлений технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин является механика технологического наследования. В рамках этого направления формирование и трансформация состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки и эксплуатационного усталостного нагружения рассматриваются как единый процесс непрерывного накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя, протекающий под действием характерных для каждой стадии программ нагружения.

Накопленная деформация характеризуется накопленной степенью деформации сдвига Λ, накопленная поврежденность металла поверхностного слоя – степенью исчерпания запаса пластичности Ψ [1]. В ряде случаев аналитическая оценка этих показателей затруднена вследствие неоднородности свойств материала, сложности геометрии и схем нагружения реальных деталей машин в процессах обработки и т.д. Непосредственное измерение показателей механического состояния поверхностного слоя возможно с использованием физических методов, в том числе ультразвукового контроля.

Анализ существующих работ показывает, что скорость распространения продольных и сдвиговых объемных волн, поляризованных вдоль или поперек текстуры, а также рэлеевских волн зависит от трещиностойкости, твердости, предела текучести, временного сопротивления разрыву, ударной вязкости и других показателей физико-механического состояния материала. Однако изменение скорости ультразвука при существенном различии между значениями контролируемых параметров весьма мало. Так, рост ударной вязкости в 3,7 раза вызывает увеличение скорости ультразвука в материале всего лишь в 1,003 раза при использовании сдвиговой объемной волны. В связи с этим при отсутствии макродефектов, размеры которых сопоставимы с длиной волны, использование в качестве контролируемого параметра скорости распространения ультразвуковых колебаний малоэффективно.

Результаты специальных экспериментальных исследований показывают, что для оценки параметров механического состояния материала до появления макродефектов может быть использована амплитуда затухающих колебаний [2, 3]. Исследования позволили выполнить тарировку ультразвуковых сигналов относительно параметров напряженно-деформированного состояния металла и оценить роль истории нагружения при сжатии на характер ультразвуковых колебаний.

Постановка задачи

В рамках данной работы проводили экспериментальные исследования накопления деформации и исчерпания запаса пластичности при *поверхностном пластическом деформировании* (ППД) в наследственной постановке с использованием ультразвукового контроля. Также проводили сопоставление расчетных и экспериментальных значений Λ и Ψ.

Образцы диаметром $41{,}5_{-0{,}5}$ мм из стали 45 ГОСТ 1050–88 (160...180 HV) обкатывались роликом на разных режимах в несколько рабочих ходов вплоть до начала разрушения поверхностного слоя. Обкатывание проводили с использованием однороликовой установки при следующем режиме: диаметр ролика $D_р$ = 95 мм; подача S = 0,07 мм/об; частота

* Статья не была представлена на конференции "Технология–2007".

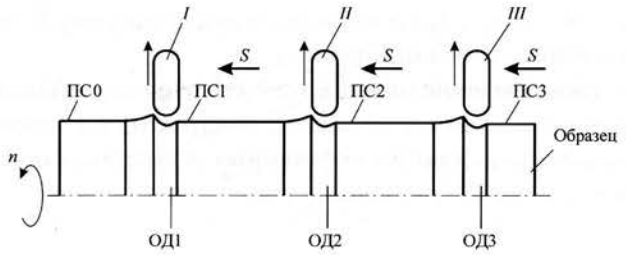


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований технологического наследования на стадии ППД:
I, *II*, *III* – места фиксации ОД на первом, втором и третьем рабочих ходах; ПС0, ПС1, ПС2, ПС3 – поверхностный слой в исходном состоянии, после первого, после первого и второго, после первого, второго и третьего рабочих ходов соответственно; ОД1, ОД2, ОД3 – очаг деформации на первом, втором и третьем рабочих ходах соответственно

n = 630 мин$^{-1}$; профильный радиус ролика $R_{пр}$ = = 2,5 мм; усилие обкатывания P = 2500 Н.

Предварительно образцы подвергали токарной обработке с уменьшающимся припуском в целях удаления упрочненного слоя.

Обкатывание на первом рабочем ходу осуществлялось почти на полную длину образца с фиксацией очага деформации путем быстрого отвода ("отстрела") деформирующего инструмента. Вторым рабочим ходом проводили обкатывание уже обработанной поверхности до получения стационарного *очага деформации* (ОД) и с его фиксацией (рис. 1). Затем выполняли обкатывание этой же поверхности третьим рабочим ходом вплоть до полного разрушения *поверхностного слоя* (ПС) и появления следов шелушения. Начало разрушения означало накопление предельных деформаций и полное исчерпание запаса пластичности материалом поверхностного слоя детали (Ψ = 1). После механической обработки ППД проводили профилографирование и запись геометрии очагов деформации на профилографе-профилометре мод. "Талисерф-5М120", измерение твердости упрочненного поверхностного слоя с оценкой глубины и степени упрочнения [4].

Механические свойства материала, профили очагов деформации, результаты измерения твердости и других параметров состояния поверхностного слоя служили исходными данными при формировании начальных и граничных условий. *Методом конечных элементов* (МКЭ) проводили расчет параметров напряженно-деформированного состояния очагов деформации в наследственной постановке в категориях тензоров напряжений и относительных деформаций. Задачи расчета напряженно-деформированного состояния МКЭ решались в упругопластической постановке [5].

Перед первым рабочим ходом материал не упрочнен и его свойства соответствуют исходным. Перед каждым новым рабочим ходом выполнялось МКЭ-моделирование упрочнения после предшествующего рабочего хода, которое задавали по результатам измерения твердости и использования взаимосвязи между твердостью и интенсивностью напряжений и деформаций.

Параметры механического состояния упрочненного поверхностного слоя после первого рабочего хода служили начальными условиями при решении задач механики при нагружении вторым рабочим ходом. В свою очередь, третье нагружение (обкатывание третьим рабочим ходом) предполагало использование параметров механического состояния, достигнутых после второго рабочего хода вплоть до полного исчерпания запаса пластичности материалом поверхностного слоя.

После каждого рабочего хода проводился *ультразвуковой* (УЗ) контроль состояния упрочненного материала по глубине поверхностного слоя. Для этого на образце выполняли лыску, на которую устанавливали датчик, и записывали осциллограмму УЗ-сигнала. Далее существующую лыску растачивали, тем самым увеличивая глубину исследуемого слоя.

Исходными данными являлись осциллограммы, представляющие собой значения амплитуд УЗ-сигнала, следующие через 10 нс (рис. 2). Из осциллограммы выделяли принятый системой УЗ-сигнал, время

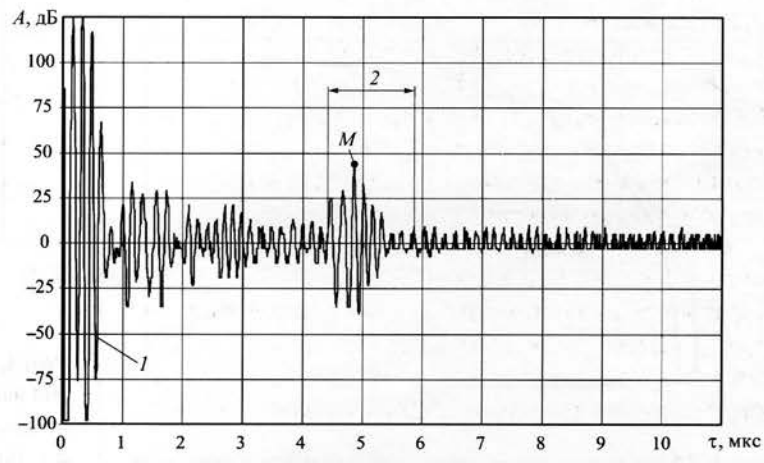


Рис. 2. Полная осциллограмма УЗ-сигнала:
1 – излучаемый сигнал; *2* – принятый сигнал

начала которого соответствовало времени появления сигнала с максимальным значением амплитуды принятого импульса (точка *M*), а время окончания соответствовало моменту затухания сигнала.

Для принятых УЗ-сигналов определяли координаты точек с указанной выше дискретностью, включая характерные максимумы и минимумы. Для обработки УЗ-сигналов использовали методы математической статистики и математический аппарат теории затухающих колебаний.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3, *а* показаны расчетные значения степени деформации сдвига, накопленной в очагах деформации 1, 2, 3; на рис. 3, *б* – расчетные значения накопленной степени исчерпания запаса пластичности. На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения суммарной накопленной степени деформации сдвига. Экспериментальные значения были получены с помощью УЗ-контроля, при этом в качестве контрольного параметра использовали амплитуду затухающих колебаний [6].

Распределение накопленной степени деформации сдвига в поверхностном слое, построенное с помощью аппроксимации полученных экспериментальных значений, показано на рис. 5.

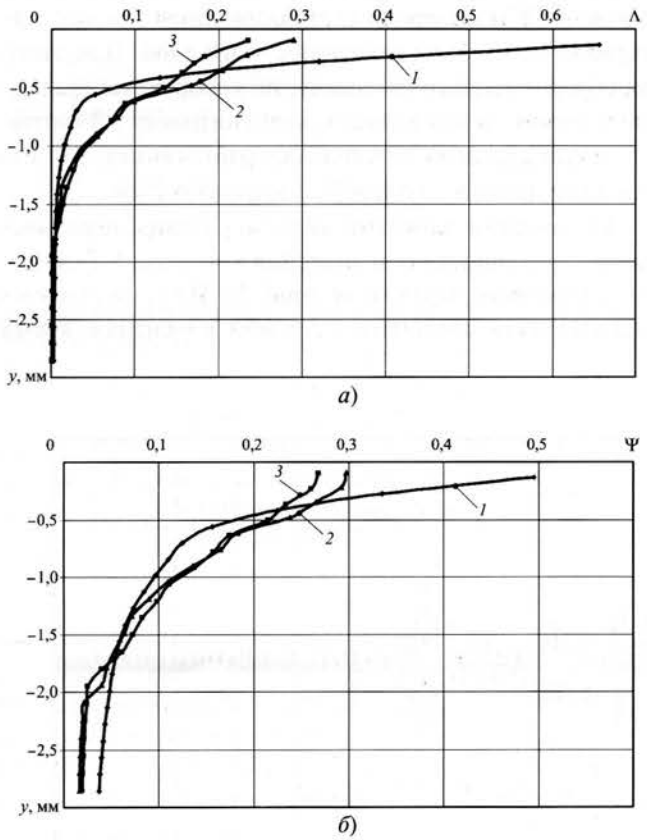


Рис. 3. Расчетные значения накопленной степени деформации сдвига (*а*) и степени исчерпания запаса пластичности (*б*) в очагах деформации ОД1 (*1*), ОД2 (*2*), ОД3 (*3*)

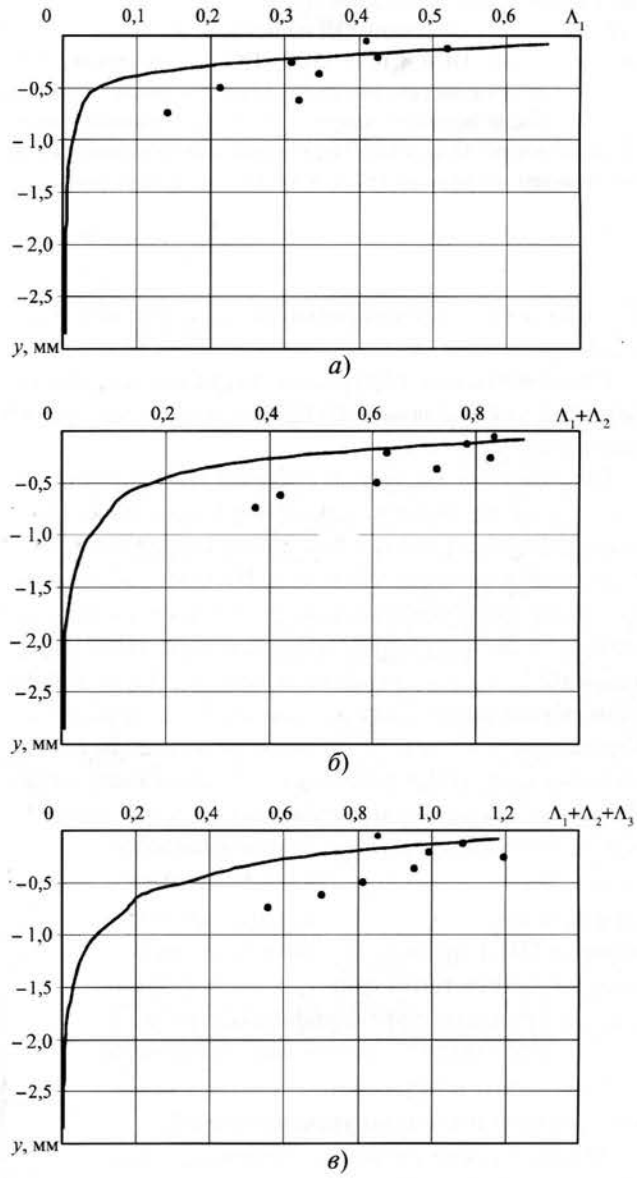


Рис. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) значения накопленной степени деформации по глубине поверхностного слоя сдвига:

а – после первого рабочего хода (Λ_1); *б* – суммарная после второго рабочего хода ($\Lambda_1 + \Lambda_2$); *в* – суммарная после третьего рабочего хода ($\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3$)

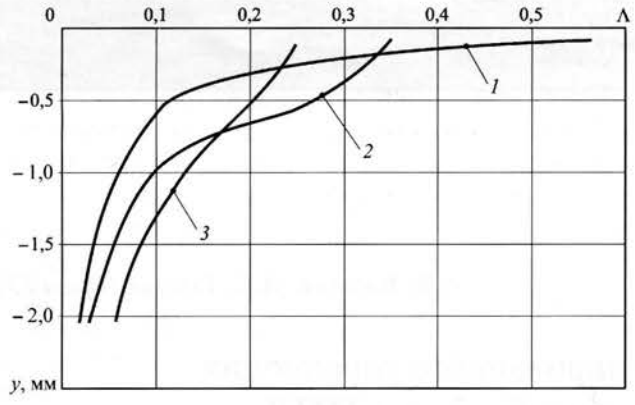


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных значений накопленной степени деформации сдвига Λ в поверхностном слое после первого (*1*), второго (*2*) и третьего (*3*) рабочих ходов

Обсуждение и анализ результатов

Анализ полученных результатов показал, что интенсивность накопления деформации и исчерпания запаса пластичности с увеличением предварительной деформации снижается. Это обусловлено повышением сопротивления пластической деформации упрочненного на предшествующих рабочих ходах металла.

Качественная картина влияния истории нагружения на накопление степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя, полученная на основе экспериментальных значений, является адекватной аналитическим результатам накопления степени деформации на стадии ППД с учетом стадии резания. Влияние истории нагружения выражается в изменении закономерности накопления деформации по глубине поверхностного слоя. Для первого рабочего хода характерно интенсивное накопление деформации в приповерхностном слое и незначительное – в глубине поверхностного слоя. При обкатывании на последующих рабочих ходах уже упрочненного материала различие в накоплении деформации на разных глубинах поверхностного слоя уменьшается и является минимальным для третьего рабочего хода.

Расчетные значения накопленной степени деформации сдвига хорошо соотносятся со значениями, определенными экспериментально с помощью УЗ-контроля. Минимальное значение коэффициента корреляции составляет $R = 0{,}885$, максимальное значение среднего квадратического отклонения $\sigma = 0{,}137$. Это свидетельствует о корректности разработанной методики расчета параметров механического состояния на стадии ППД с учетом технологического наследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю.** Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. Функциональная модель механики технологического наследования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 14–23.

2. **Блюменштейн В.Ю.** Влияние истории нагружения поверхностного слоя на параметры ультразвуковых сигналов: материалы 49-й Междунар. науч.-техн. конф. ААИ "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров". Секция 9. Конструкционные материалы, упрочняющие технологии и покрытия. М.: МГТУ "МАМИ", 2005. С. 21–24.

3. **Блюменштейн В.Ю.** Механика технологического наследования. Оценка наследуемого механического состояния металла методом акустической структуроскопии // Автомоб. пром-сть. 2007. № 5. С. 29–34.

4. **Блюменштейн В.Ю., Антонов Ю.А., Гергал И.Н.** Методика и устройства контроля геометрических параметров очага деформации при обкатывании и выглаживании деталей горных машин // Вестник КузГТУ. 2001. № 3. С. 26–27.

5. **Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А.** Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин: свид-во об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2002610758. Заявка № 2002610463, дата поступления 29 марта 2002 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2002 г.

6. **Использование** УЗ-сигналов для идентификации НДС / А.Н. Смирнов, В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов и др. // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 3. С. 32–35.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Кусков В.Н., Горбунов О.Н. Структура и свойства поверхностных слоев, полученных электроконтактной приваркой порошковой ленты.

УДК 621.785.52

А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов *(ОрелГТУ)*

Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД

В современном машиностроении широко распространены различные виды упрочняющих технологий, повышающих эксплуатационные характеристики поверхностного слоя деталей машин. Показана перспективность применения комбинированных методов упрочнения с включением статико-импульсной обработки в технологическую цепь.

In modern mechanical engineering various kinds of the strengthening technologies raising operational characteristics of a superficial layer of details of machines are widely widespread. Application of the combined methods of hardening with inclusion statics-impulse processing in a technological circuit is perspective.

С развитием современного машиностроения и промышленного рынка возросли требования к выпускаемой номенклатуре товаров и изделий. Одной из основных задач является повышение надежности тяжело нагруженных деталей. Ее решение сводится к нахождению оптимальных методов по созданию благоприятной технологической наследственности, обеспечивающих необходимые параметры качества поверхностного слоя и дающих возможность получить нужную совокупность эксплуатационных свойств. Перспективна разработка любых новых методов обработки, направленных на повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств выпускаемой продукции.

В существующих технологических процессах промышленных предприятий широко используются различные методы повышения эксплуатационных свойств деталей машин за счет упрочняющих технологий, наиболее эффективными из которых являются нанесение покрытий, термическая и химико-термическая обработка, поверхностное пластическое деформирование и т.д. В результате получается слой с необходимыми эксплуатационными параметрами: твердостью; шероховатостью; глубиной упрочнения; наличием остаточных напряжений, знак которых зависит от вида упрочняющей технологии. Изменяются износостойкость, статическая прочность, сопротивление усталости, контактная выносливость (прочность).

Изучению процессов повышения качества поверхностного слоя уделяли внимание многие ученые. Получены огромный базис знаний (теоретических и практических) и систематизаций, опубликованных в различных научных статьях и монографиях, так необходимых на производстве.

Одним из наиболее прогрессивных видов обработки в технологии машиностроения является *поверхностное пластическое деформирование* (ППД). В результате обработки ППД снижается шероховатость и создается поверхностный наклепанный слой со сжимающими остаточными напряжениями и повышенной твердостью. Несомненным преимуществом ППД является возможность создания упрочненного поверхностного слоя, в котором обеспечивается плавность перехода от упрочненного к неупрочненному материалу, что исключает его отслаивание. Качество обрабатываемой поверхности и технологии обработки поверхностным пластическим деформированием исследовали [1] А.Ю. Албагачиев, П.Г. Алексеев, А.И. Андрианов, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, М.А. Балтер, В.А. Белов, А.Г. Бойцов, В.М. Браславский, М.С. Дрозд, М.М. Жасимов, Е.Г. Коновалов, И.В. Кудрявцев, Н.Д. Кузнецов, А.А. Маталин, А.А. Михайлов, Л.Г. Одинцов, Н.В. Олейник, Д.Д. Папшев, Е.В. Перепичка, В.В. Петросов, В.В. Плешаков, В.П. Пономарев, Ю.Г. Проскуряков, В.И. Серебряков, В.А. Сидоренко, В.М. Смелянский, В.М. Торбило, Л.А. Хворостухин, В.И. Цейтлин, Л.М. Школьник, Ю.Г. Шнейдер, Д.Л. Юдин, А.И. Якуев, В.К. Яценко и др.

В промышленности широко применяют различные способы ППД: обкатывание роликами или ша-

риками, дорнование отверстий, волочение, чеканку сферическими бойками, дробеструйную, гидродробеструйную и пневмогидродробеструйную обработку, инерционно-динамическое упрочнение роликами или шариками, виброгалтовку и гидрогалтовку дробью, алмазное выглаживание, виброабразивную обработку и т. д.

Все известные способы обработки ППД подразделяют на статические и динамические [1]. Статические способы ППД (обкатывание, раскатывание, выглаживание и др.) предполагают воздействие на зону деформации неизменным во времени потоком энергии в условиях непрерывного контакта инструмента с деталью. Статические способы обработки ППД наиболее изучены. При реализации динамических способов ППД (центробежной, дробеструйной, гидродробеструйной обработки, чеканки, обработки микрошариками и вращающимися металлическими щетками) осуществляется ударное деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность рабочих тел или инструмента в условиях прерывистого контакта. Среди динамических способов ППД наиболее изучены и широко применяются методы дробеструйной обработки.

Технология ППД характеризуется малой энергоемкостью, позволяет экономить дорогостоящие и дефицитные металлы, используемые для нанесения покрытий и легирования, отличается достаточно высокой точностью, стабильностью размеров и свойств. После обработки на оптимальных режимах остаточные напряжения и микротвердость плавно изменяются по глубине слоя. Микротвердость увеличивается в среднем на 50 %. Глубина залегания сжимающих остаточных напряжений на 10...50 % превышает толщину наклепанного слоя, максимум напряжений располагается на некоторой глубине. Каждый из известных способов обладает преимуществами и недостатками, определяющими область их производственного применения. Основными недостатками рассмотренных методов являются ограниченные возможности варьирования глубины и степени упрочнения поверхностного слоя.

Более полное и широкое использование динамической энергии при упрочнении ППД сдерживается сложностью волновых процессов, происходящих при ударе.

В практике изготовления многих деталей широко применяется *химико-термическая обработка* (ХТО), в частности цементация поверхности. Традиционный технологический процесс в этом случае состоит из токарных операций, ХТО и шлифования. Предусмотренная в этой схеме ХТО предназначена для повышения работоспособности (износостойкости, контактной выносливости) поверхностного слоя, а шлифование – для достижения необходимых точности и шероховатости поверхности. Однако после шлифования работоспособность цементованного слоя обычно снижается, что обусловлено дефектами шлифования; особенно опасно образование прижогов, структурной неоднородности материала, остаточных растягивающих напряжений [2]. Кроме того, отмечено, что при цементации наиболее износостойкий слой образуется на глубине 0,1 мм от поверхности детали, тогда как припуск на шлифование во многих случаях достигает 0,5 мм, вследствие чего снижается эффективность цементации. Применение шлифования после ХТО имеет недостатки, *касающиеся непосредственно и производственной сферы*. Так, для обеспечения требуемой толщины цементованного слоя в обработанной детали необходимо проводить цементацию заведомо на бóльшую глубину (учитывая припуск на шлифование).

Увеличение толщины цементованного слоя при средней скорости цементации 0,1 мм/ч вызывает необходимость повышения длительности цементации на 3...5 ч и обусловливает возрастание затрат, в первую очередь энергетических. Сюда следует отнести и затраты, связанные с организационно-техническим обслуживанием операции шлифования (затраты на инструмент, его правку, установку, наладку и т.п.). Следовательно, технологическая цепочка, в ходе которой формируется цементованная поверхность, должна обеспечивать структурное состояние, обеспечивающее наибольшую износостойкость и контактную выносливость, и исключать необходимость шлифования (или оставлять минимальный припуск).

Зачастую для получения поверхностного слоя с требуемыми эксплуатационными характеристиками недостаточно применения только одного способа упрочнения. Возникает необходимость применения комбинированных методов увеличения показателей эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей машин. Это оправдано, если исходить из понятия о технологической наследственности. Разработкой комбинированных методов упрочнения, а также изучением процессов, происходящих при этом, занимались многие ученые; выявлено большое количество преимуществ и недостатков конкретных технологий. Разработана иерархическая таблица, систематизирующая различные виды комбинированного упрочнения [1].

По данным [2] видно, что применение в технологической цепочке ППД перед ХТО имеет очевидное преимущество в сравнении с технологическими процессами без предварительной обработки ППД. Можно отметить, что образующиеся при цементации структурные элементы, их количество и характер расположения зависят, в частности, и от исходного

структурного состояния поверхностного слоя, а точнее, от энергетического состояния атомов. Причем в слое значительной толщины оно может быть изменено обработкой методами ППД. Так, плотность дислокаций в стали 45 после обкатывания шаром возрастает от $1 \cdot 10^6$ до $11{,}6 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$. После ППД число таких активированных областей, обладающих повышенной потенциальной энергией, в металле существенно возрастает. Это позволяет предположить, что процесс карбидообразования при ХТО происходит в большем числе микрообластей тела, обеспечивая высокую плотность карбидных частиц и их мелкодисперсность.

Обработка ППД способствует диффузии в металлах и сплавах [3]. Использование ППД перед ХТО интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет получить более высокую концентрацию углерода в диффузионной зоне [6]. Установлено, что поверхностный слой после ППД и ХТО имеет в 2–3 раза меньшее содержание остаточного аустенита и более равномерную структуру скрытоигольчатого мартенсита в отличие от мелкоигольчатой структуры, получаемой после ХТО без ППД. В результате экспериментальных исследований большого количества вариантов комбинирования точения, ППД, ХТО и шлифования выявлено, что ресурс образцов, последовательно обработанных точением, ППД и ХТО в 25 раз выше в сравнении с образцами, обработанными по той же схеме без ППД.

При обработке по схеме точение + ППД + ХТО + + ППД получено 15-кратное увеличение ресурса образцов в условиях контактного циклического нагружения по сравнению с традиционной технологией, при обработке по схемам: точение + ППД + ХТО + + шлифование и точение + ХТО + ППД ресурс увеличился соответственно в 5 и 4,5 раза. Полученные результаты объясняются различием качества поверхности испытуемых образцов, прежде всего расположением карбидной сетки. У образцов, обработанных последовательно точением, ППД и ХТО, она характеризуется более высокими плотностью и дисперсностью карбидных частиц, повышающими эксплуатационные свойства поверхностного слоя.

Наибольший эффект упрочнения получили при сочетаниях режимов ППД и ХТО, обеспечивающих примерно равную толщину слоев – упрочненного при ППД (усилие накатывания 1500 Н) и диффузионного при ХТО (цементация в течение 16 ч) [2].

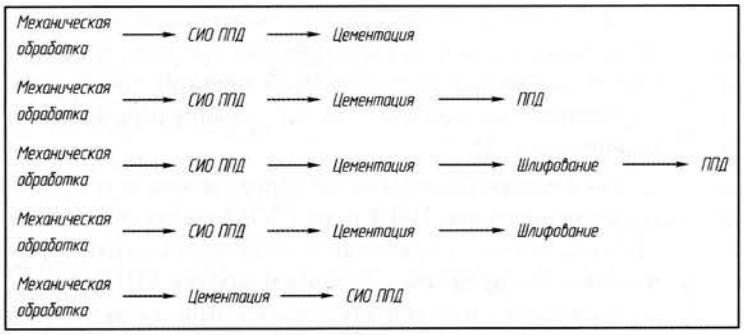
Также исследовали влияние ППД на изменение линейных размеров после ХТО. Наименьшее изменение имели те образцы, для которых характерно равенство толщин предварительно упрочненного и диффузионного слоев. Ранее для них было отмечено максимальное упрочнение поверхности. Наибольшее изменение размеров после ХТО обнаружили образцы, не подвергавшиеся ППД.

Для повышения износостойкости при трении и циклических контактных нагрузках в технологическую цепочку после ХТО введена операция ППД, обеспечивающая получение поверхностного слоя с чередующимися участками высокой и низкой твердости – гетерогенной структурой. Преимуществом материалов с такой структурой при действии на них циклических нагрузок является торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. При абразивном изнашивании выступающие единичные элементы повышенной твердости затрудняют контакт абразивных частиц с материалом основы и позволяют до 15 раз увеличить износостойкость в сравнении с термической обработкой [2].

Необходимо отметить, что для отдельных видов деталей машин с концентраторами напряжений (шлицевых валиков, образцов с острым и глубоким надрезом, зубчатых образцов с малым модулем и малым радиусом у основания зуба) выявлена низкая эффективность или даже отрицательное влияние ХТО на усталостную прочность [7]. При этом проведение после ХТО операции поверхностного наклепа приводит к восстановлению выносливости до исходных значений или вызывает ее повышение. Такие результаты объясняются доминирующим влиянием на это свойство характера распределения остаточных напряжений в опасной зоне, который при поверхностном наклепе оказывается благоприятным для многих типов концентраторов.

Разработан новый способ обработки ППД – *статико-импульсная обработка* (СИО), отличающийся более широкими возможностями варьирования глубины и степени упрочнения [4–6].

При СИО основным деформирующим воздействием является динамическое (импульсное). Возможности технологических и конструктивно-технологических параметров СИО таковы,



Технологические процессы поэтапного совмещения СИО и ХТО

что позволяют более эффективно и точно управлять энергией удара за счет изменения формы ударных импульсов. В результате СИО нагружение упрочняемого материала происходит ударными импульсами такой формы, при которой энергия, расходуемая на пластическую деформацию, максимальна. Высокая эффективность при использовании энергии ударов позволяет воздействовать ударными импульсами с энергией до 300 Дж и выше в отличие от известных процессов ППД (например, чеканки, когда энергия удара не превышает 80 Дж). В результате появляется возможность создавать и низкое, менее $3\sigma_т$ (где $\sigma_т$ – предел текучести обрабатываемого металла), и очень высокое давление в очаге деформации, более $3\sigma_т$, следовательно, регулировать показатели качества поверхностного слоя в более широком диапазоне, чем при использовании существующих способов ППД, а также регулировать равномерность упрочненной поверхности и формировать поверхностный слой с регулярно изменяющейся твердостью (пятнистой поверхностью), аналогичной по свойствам гетерогенному композиционному материалу с мягкой матрицей и твердыми включениями.

В зависимости от глубины упрочнения при СИО могут быть получены:

• наклепанный поверхностный слой с глубиной упрочнения до 8...10 мм; при этом для обеспечения заданной точности и снижения шероховатости может быть использована последующая чистовая механическая обработка (тонкое или чистовое точение, фрезерование, абразивная обработка, отделочно-упрочняющая обработка ППД); большая глубина упрочненного СИО слоя позволяет выбирать припуск на механическую обработку для "сырых" сталей до 1...2 мм, а термообработанных – до 0,5 мм;

• наклепанный поверхностный слой с твердостью до 650 HV, глубиной до 2...3 мм и низкой шероховатостью поверхности, достигающей Ra = 0,08...0,1 мкм.

В зависимости от равномерности упрочнения можно сформировать:

• полностью неравномерно упрочненный поверхностный слой;

• тонкий верхний равномерно упрочненный слой (до 1...1,5 мм) и ниже расположенный неравномерно упрочненный слой;

• толстый верхний равномерно упрочненный слой (1,5...3 мм) и ниже расположенный неравномерно упрочненный слой;

• полностью равномерно упрочненный поверхностный слой.

На основе приведенных данных можно сделать вывод о том, что замена ППД в ранее рассматриваемых технологических схемах комбинированного упрочнения с использованием ППД и ХТО на СИО может привести к получению поверхностного слоя со значительно улучшенными эксплуатационными свойствами. В частности, возможно получение упрочненного поверхностного слоя большой толщины, так необходимого для деталей, работающих в сложных условиях эксплуатации, когда рабочая поверхность подвергается одновременно различным видам изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.

2. **Папшев Д.Д., Пронин А.М., Кубышкин А.Б.** Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестн. машиностроения. 1990. № 8. С. 61–64.

3. **Безъязычный В.Ф., Драпкин Б.М., Тимофеев М.А.** Проблемные вопросы упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов при пластической деформации и представление о наклепе // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 3–6.

4. **Пат. 2090342 РФ.**

5. **Пат. 2098259 РФ.**

6. **Соловьев Д.Л., Поляков А.В., Голенцова А.В.** Технологические возможности статико-импульсной обработки в создании износостойкого поверхностного слоя // Тр. Междунар. науч. симп. "Гидродинамическая теория смазки – 120 лет". Т. 2. Орел: Орел ГТУ, 2006. С. 233–238.

7. **Балтер М.А.** Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1968. 196 с.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Гореликов В.Н., Сухочев Г.А. Технологические показатели комбинированного магнитоимпульсного упрочнения винтовых поверхностей.

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02

Р.И. Ли, А.П. Жильцов, Р.И. Ли, А.В. Бочаров *(Липецкий ГТУ)*

Исследование и разработка технологии восстановления неподвижных соединений подшипников качения герметиком АН-105

Приведены результаты экспериментальных исследований перспективного полимерного материала АН-105 и разработанная технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения.

The results of perspective polymeric material AH-105 experimental researches and the developed technology of unmovable bearings joints restoration are described.

Отечественная химическая промышленность постоянно выпускает новые полимерные материалы, выгодно отличающиеся широким спектром потребительских свойств. Практический интерес представляет исследование потребительских свойств акрилового адгезива АН-105 в целях его применения при восстановлении неподвижных соединений подшипников качения.

Сначала методом диэлькометрии исследовали процесс полимеризации герметика АН-105. Исследования показали, что акриловый адгезив АН-105 отличается от известных анаэробных герметиков марок "Анатерм" и "Унигерм" более высокой скоростью полимеризации, а время отверждения, при котором образуется сшитый полимер, составляет 4, 3,5 и 3 ч при температурах 20, 30 и 40 °С соответственно.

На следующем этапе эксперимента исследовали прочность клеевых соединений при аксиальном сдвиге, которая зависит от толщины клеевого шва и составляет 16,3, 14,75 и 14,2 МПа при толщине клеевого шва 0,05, 0,075 и 0,1 мм соответственно.

Адгезив АН-105 отличается более высокой скоростью отверждения и меньшим временем набора прочности в сравнении с указанными герметиками. Через 0,5 ч при температуре отверждения 20 °С клеевые соединения имеют прочность 1,2 МПа, что вполне достаточно для их транспортировки.

В полимерных материалах при периодическом деформировании часть энергии деформации рассеивается в виде теплоты, которую называют гистерезисными потерями. В полимерных материалах с низкой эластичностью в связи со значительной диссипацией энергии при периодическом деформировании возникает проблема повышения температуры. При определенных условиях циклического нагружения вследствие совместного воздействия напряжения и теплоты может произойти не обычное, а термическое усталостное разрушение клеевого шва. Кроме того, повышение температуры клеевого шва может привести к повышению температуры подшипника, что также нежелательно.

Были проведены исследования зависимости температуры клеевого шва от циклической нагрузки и времени нагружения. Установлено, что температура клеевого шва повышается с наибольшей скоростью в первые 15 мин от 23 до 44, 48 и 52 °С при циклической нагрузке соответственно $P = 9{,}9$, 15,8 и 20,0 кН. Затем температура повышается с постоянной скоростью и стабилизируется после 120 мин работы вибростенда. С увеличением циклической нагрузки температура клеевого шва повышается. При циклической нагрузке $P = 9{,}9$, 15,8 и 20,0 кН и времени нагружения 120 мин температура клеевого шва составила 51,67, 52,33 и 60,33 °С соответственно. Таким образом, исследования показали, что наличие клеевого шва герметика АН-105 не влияет отрицательно на температурный режим подшипникового узла.

Исследования долговечности неподвижных соединений подшипников, восстановленных герметиком АН-105, показали, что она зависит от радиальной циклической нагрузки и толщины клеевого шва. Определена максимально допустимая толщина клеевого шва герметика АН-105, при которой обеспечивается высокая долговечность подшипникового узла.

После обобщения результатов экспериментальных исследований разработана технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения, которая включает следующие операции:

1) зачистка до металлического блеска и двукратное обезжиривание поверхностей, подлежащих склеиванию;

2) нанесение компонента *А* герметика АН-105 на поверхность охватывающей и компонента *Б* на поверхность охватываемой деталей соединения;

3) сборка деталей в центрирующем приспособлении и вращение одной детали относительно сопрягаемой на один оборот в одну, затем в другую сторону (при этом обеспечивается перемешивание компонентов *А* и *Б*);

4) отверждение клеевого соединения в течение 4 ч при температуре 20 °С (через 1 ч можно разобрать центрирующее приспособление, так как клеевое соединение достигает транспортировочной прочности).

С.А. Мубояджян, А.Г. Галоян *(ФГУП "ВИАМ", Москва)*
В.П. Лесников, В.П. Кузнецов, Е.В. Мороз *(ООО "Турбомет", Екатеринбург)*

Покрытие для защиты внутренней полости лопаток турбины из монокристаллических безуглеродистых жаропрочных сплавов*

Рассмотрены методы защиты поверхности внутренней полости охлаждаемых лопаток турбины из безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов, содержащих тугоплавкие элементы: рений, вольфрам, тантал, хром. Показано, что насыщение углеродом указанной поверхности перед стадией алитирования или хромоалитирования способствует формированию характерной переходной диффузионной зоны под алюминидным покрытием, содержащей карбиды тугоплавких металлов, входящих в состав сплава. Переходная зона на основе NiAl (β-фаза), Ni_3Al (γ'-фаза) и карбидов ($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, NbC, TiC) препятствует диффузии элементов покрытия в жаропрочный сплав и образованию вторичной реакционной зоны под алитированным слоем, состоящей из хрупких топологически плотноупакованных фаз, что способствует существенному повышению ресурса лопаток турбины ГТД.

The methods of protecting internal surface of nickel-based superalloy article, such as modern turbine blade of a gas turbine engine having an external surface and an internal cooling cavity having an internal surface, connected to the external surface by cooling holes, containing topologically close packed phase forming elements such as rhenium, chromium, tantalum and tungsten, and not containing carbon, against secondary reaction zone formation, when overlaid by a diffusion aluminide coating, discussed in this article. A carbide precipitate-containing region is formed within the substrate by depositing carbon on the surface of the substrate and diffusing the carbon into the substrate. The carbon is causes carbide formation ($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, NbC, TiC). The presence of the carbide precipitates inhibits the formation of the deleterious TCP-phase.

Проблемы повышения мощности, надежности и долговечности *газотурбинных двигателей* (ГТД) неотъемлемо связаны с работоспособностью сопловых и рабочих лопаток турбины высокого давления.

Создание современных авиационных ГТД 5-го и 6-го поколений требует разработки новых жаропрочных сплавов и ряда защитных и упрочняющих покрытий, предназначенных для обеспечения работоспособности и ресурса лопаток и деталей турбины ГТД. Вследствие значительного повышения температуры газа на входе в турбину намечается рост рабочей температуры лопаток турбины на 50 °С и более. Поэтому создание двигателей 5-го поколения возможно при использовании для рабочих лопаток турбины высокого давления новых монокристаллических никелевых *безуглеродистых жаропрочных сплавов* (БЖС) с повышенным содержанием Re, Ta, W, Ru. Эти сплавы обладают низкой жаростойкостью, поэтому лопатки турбины из них могут использоваться при условии эффективной защиты их поверхности от воздействия высоких температур газового потока в двигателе.

Ресурс, надежность и технико-экономические показатели ГТД связаны с износом и изменением физико-химических свойств поверхности их наиболее ответственных деталей. Одной из главных причин изменения физико-химических свойств поверхности является высокотемпературная газовая коррозия трактовой поверхности лопаток турбины ГТД, которая во многих случаях приводит к досрочному съему и ремонту двигателей. Поэтому в настоящее время большинство деталей двигателей имеют защитные или упрочняющие покрытия, которые в значительной мере определяют ресурс и надежность ГТД.

Тип защитного покрытия выбирают исходя из условий работы лопаток турбины и состава никелевого *жаропрочного сплава* (ЖС). При этом необходимо учитывать, что требования к покрытию для защиты поверхности внутренней полости охлаждаемой лопатки турбины ГТД значительно отличаются от требований к защитному покрытию наружной трактовой поверхности лопатки. Это связано со значительной разностью рабочих температур на этих поверхностях и с различиями в составе газовой среды, взаимодействующей с ними. Температура внешней и внутренней поверхностей лопаток турбин при современном уровне тепловых потоков в ГТД различается на 100...150 °С. Наружная трактовая поверхность лопаток турбин современных ГТД работает при температурах 1100...1150 °С в агрессивной среде продуктов сгорания авиационного топлива, а поверхность внутренней полости – при более благоприятных температурных условиях и в значительно менее агрессивной воздушной среде.

В большинстве случаев разрушение лопаток турбины начинается с зарождения микротрещин на поверхности внутренней полости лопатки. Для защиты этой поверхности обычно используют алюминидные

* Статья не была представлена на конференции "Технология–2007".

диффузионные покрытия на основе NiAl (β-фаза) и Ni_3Al (γ′-фаза) с невысоким (не более 22...24 %) содержанием алюминия.

В промышленности для защиты внутренней полости охлаждаемых лопаток турбины применяют два процесса: хромоалитирование из смеси порошков (разработка Академии им. Н.Е. Жуковского) и *газовое циркуляционное алитирование* (ГЦА) или хромоалитирование (процесс и покрытия разработаны ООО "Турбомет").

Однако непосредственно использовать известные процессы для защиты внутренней полости лопаток из современных БЖС невозможно. Из-за отсутствия углерода в этих сплавах сформированный на их поверхности диффузионный алюминидный слой не имеет переходной зоны, состоящей преимущественно из карбидов тугоплавких металлов. Переходная зона, характерная для диффузионного покрытия на обычных, углеродсодержащих ЖС, препятствует при высокотемпературной эксплуатации диффузии алюминия и хрома из покрытия в сплав. Отсутствие переходной зоны в диффузионном алюминидном покрытии приводит в процессе работы лопатки к быстрому снижению концентрации легирующих элементов в покрытии за счет их диффузии в поверхностный слой материала лопатки. При этом в поверхностном слое образуется *вторичная реакционная зона* (ВРЗ), имеющая глубину, значительно превышающую толщину покрытия, и состоящая из хрупких, топологически плотноупакованных пластинчатых фаз (ТПУ-фаз) (рис. 1), которые снижают прочностные характеристики БЖС (длительную жаропрочность, предел выносливости, термостойкость).

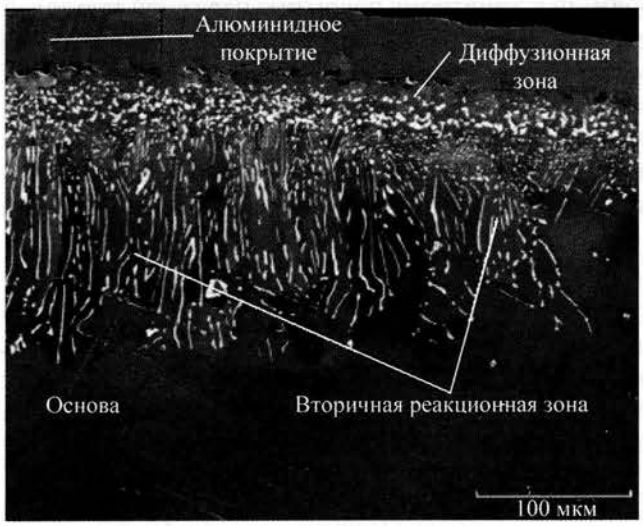


Рис. 1. Вторичная реакционная зона с ТПУ-фазами

Одновременно с этим диффузия легирующих элементов из покрытия в ЖС приводит к резкому снижению жаростойкости покрытия [1].

ТПУ-фазы являются хрупкими электронными соединениями переходных элементов. Они выделяются в форме пластин из γ-твердого раствора при его перелегировании хромом, вольфрамом, рением. Эти фазы служат источником преждевременного зарождения и распространения трещин, ведущих к хрупкому разрушению. Кроме того, они, связывая значительное количество основных легирующих элементов (хром, вольфрам, рений), обедняют γ-фазу, снижая эффективность твердорастворного упрочнения.

В ренийсодержащих сплавах 2-го и 3-го поколений могут образовываться ТПУ-фазы трех типов [2]: ромбоэдрическая μ-фаза, тетрагональная σ-фаза и орторомбическая Р-фаза.

В работе [3] сообщается, что при исследовании жаропрочных никелевых сплавов 3-го поколения (Rene N6, CMSX-10) в диффузионном слое под алюминидным покрытием обнаружен новый тип фазовой нестабильности – вторичная реакционная зона (secondary reaction zone – SRZ). Эта зона состоит из ТПУ-фаз с содержанием рения 50 %. В результате встречной диффузии между покрытием и основой в поверхностном слое сплава нарушается равновесие между γ- и γ′-фазами.

В результате исследований [3, 4] было выявлено, что основными факторами, способствующими появлению ВРЗ в жаропрочном сплаве под алюминидным покрытием, являются активность алюминия покрытия и остаточные напряжения в поверхности.

Таким образом, использование известных процессов для защиты поверхности внутренней полости лопаток турбин из современных БЖС алитированием или хромоалитированием не обеспечивает требуемого ресурса покрытия, и эти процессы могут быть непосредственно использованы только при очень ограниченном сроке эксплуатации лопатки – не более 100 ч (ресурс лопаток турбин современных ГТД составляет 1000 ч и более).

Решить проблему образования ВРЗ на поверхности ЖС под покрытием можно путем модификации поверхности перед нанесением алюминидного слоя. Для этого поверхность жаропрочного сплава насыщают рядом элементов (Co, Cr, C и т.д) [3–7]. Согласно работе [7] насыщение поверхности ЖС хромом или кобальтом непосредственно перед алитированием тормозит образование ВРЗ под алюминидным покрытием. Насыщение поверхности жаропрочного сплава углеродом перед алитированием предотвращает появление ВРЗ под алитированным слоем [3–6]. Применение модификации поверхности позволяет

использовать жаропрочные сплавы любого состава и даже с повышенным содержанием рения, вольфрама и тантала. Углерод связывает ТПУ-образующие элементы – тантал и вольфрам – в карбиды, препятствующие диффузии элементов покрытия в основу, и наоборот. Во всех приведенных работах для цементации поверхности безуглеродистого ЖС используется метод газовой цементации [3–6].

Остаточные напряжения в поверхности ЖС способствуют и ускоряют процесс образования ВРЗ. Поэтому в целях устранения поверхностных напряжений перед нанесением алюминидного покрытия необходимо детали из БЖС подвергнуть вакуумной термообработке [3, 4].

В настоящей работе предложен метод защиты внутренней полости охлаждаемых лопаток турбины из БЖС, включающий процесс насыщения углеродом поверхности внутренней полости лопаток перед ее алитированием (хромоалитированием).

Процесс насыщения поверхности БЖС углеродом проводили на монокристаллических образцах и лопатках из сплава ЖС36-ВИ с кристаллографической ориентацией [001], полученных в промышленных условиях на установках типа УВНК-8П [8]. После стандартной термообработки сплава ЖС36-ВИ получена зона с однородной, дисперсной ($\gamma+\gamma'$)-структурой с очень высокой объемной долей упрочняющей γ'-фазы (75 %) толщиной 0,3...0,4 мкм; в межосевых участках размер γ'-частиц достигает 1 мкм; вторичные выделения ТПУ-фаз и карбидов отсутствуют.

Насыщение поверхности БЖС углеродом проводили порошковым способом из мелкодисперсного углеродного порошка (фракция меньше 60 мкм) или из пасты на основе углеродного порошка и дистиллированной воды. Процесс исследовали в области температур 900...1100 °С в течение 2...8 ч. Выбранная фракция порошка углерода обеспечивала легкое заполнение внутренней полости лопатки порошком или пастой на основе углеродного порошка и их легкое удаление. Карбонизация поверхности внутренней полости лопатки из современного БЖС с последующим алитированием или хромоалитированием обеспечивает формирование переходного слоя на основе карбидов, отделяющего жаропрочный сплав от внешнего жаростойкого слоя алюминидного покрытия на основе NiAl (β-фаза). Это обеспечивает многократное снижение диффузии алюминия или алюминия и хрома в поверхность БЖС при рабочей температуре внутренней полости лопатки и соответствующее увеличение ресурса покрытия.

На рис. 2 показано изменение удельного привеса образца из сплава ЖС36-ВИ при насыщении его углеродом в зависимости от температуры при разной длительности процесса.

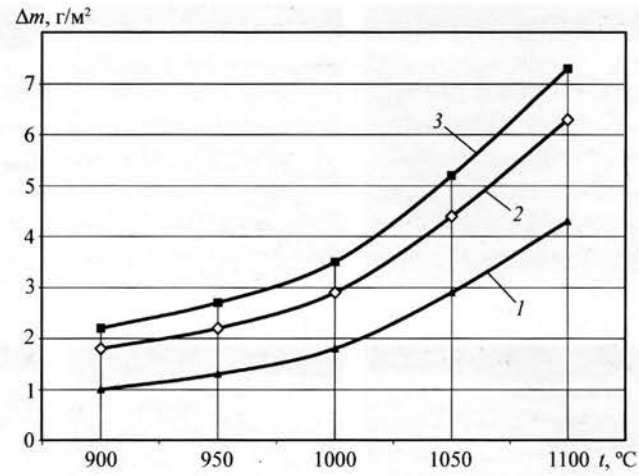


Рис. 2. Кривые изменения удельного привеса образца Δm в зависимости от температуры t и продолжительности насыщения τ, ч:
1 – 1; *2* – 2; *3* – 4

Перед насыщением углеродом поверхности контрольных образцов и внутренней полости лопаток из сплава ЖС36-ВИ проводили поэтапную подготовку этих поверхностей: обезжиривание в щелочном растворе и промывку в проточной горячей воде; гидроабразивную обработку поверхности в водной суспензии, содержащей электрокорунд; промывку водой под давлением для удаления электрокорунда; ультразвуковую промывку образцов и лопаток в дистиллированной воде и сушку сначала на воздухе, а затем в вакуумном термошкафу.

Насыщение углеродом поверхности образцов и лопаток выполняли при температуре $t = 1000$ °С в течение $\tau = 4$ ч. При указанном режиме удельный привес образца из сплава ЖС36-ВИ составлял 3,5 г/м^2, что соответствует расчетной глубине цементации 34 мкм. Расчет проводили исходя из известного процентного содержания карбидообразующих тугоплавких элементов, входящих в состав БЖС, и типа наиболее вероятных образующихся карбидов тугоплавких элементов, входящих в состав сплава. Для этого условно выделяли единичный объем поверхностного слоя сплава. Допуская, что все элементы сплава распределены равномерно, и зная содержание каждого из них в выделенном слое, можно расчетным путем определить максимальное количество углерода, необходимое для его полного насыщения. Соответственно экспериментально полученное значение привеса по углероду позволяет оценить глубину насыщенного углеродом слоя.

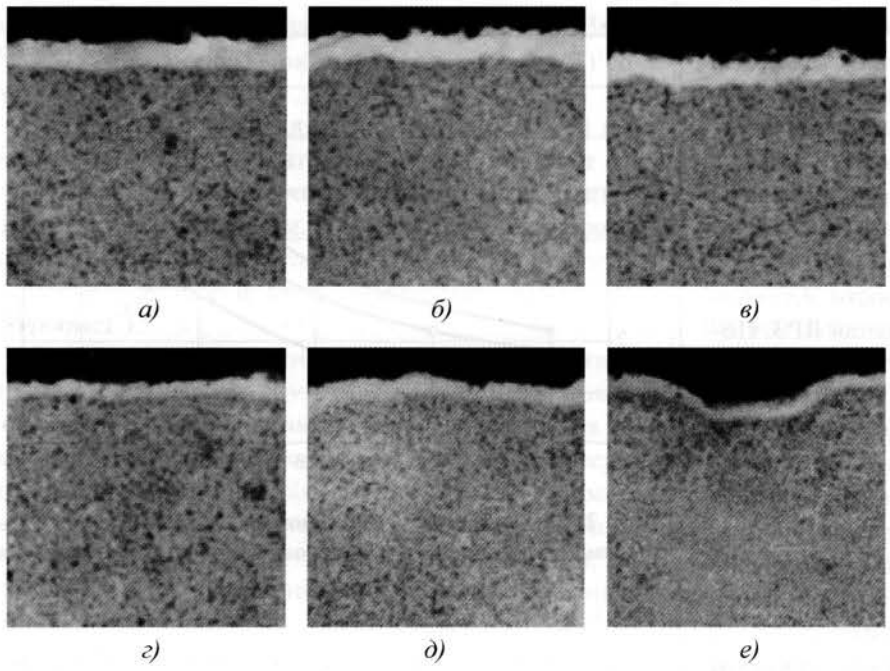


Рис. 3. Микроструктура (×500) по участкам наружной (*а–в*) и внутренней (*г–е*) поверхностей лопатки I ступени ГТД из сплава ЖС36-ВИ после насыщения углеродом: *а*, *г* – входная кромка; *б*, *д* – спинка; *в* – корыто; *е* – перфорационное отверстие

Микроструктура поверхностных слоев на монокристалической рабочей лопатке из сплава ЖС36-ВИ после цементации приведена на рис. 3. Исследование структуры, фазового и химического состава покрытий и сплава проводили с использованием оптического микроскопа Neophot-32 с компьютерной приставкой, рентгеновского микроанализатора Superprobe YCXA-733, растрового электронного микроскопа Philips SEM 535 с приставкой для микроанализа EDAX, рентгеновского дифрактометра DMAX-2500 японской фирмы RIGAKU с монохроматическим Cu_{K_α} -излучением.

При насыщении углеродом сплава ЖС36-ВИ как на наружной, так и на внутренней поверхности рабочей лопатки формируется светлотравящийся равномерный по толщине и однородный по химическому составу слой толщиной 14...16 мкм. Распределение концентрации углерода по толщине слоя показано на рис. 4.

Исследования поверхностного слоя на контрольных образцах и на одной лопатке после насыщения углеродом показали наличие на поверхности диффузионного слоя, содержащего мелкодисперсные карбиды $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, NbC, NbN, TiC, а также углерод (рис. 5).

В результате элементного анализа науглероженного слоя установлены уменьшение в нем содержания Al, Ni, W, Re, Mo и рост содержания Ni в сравнении с матрицей сплава ЖС36-ВИ.

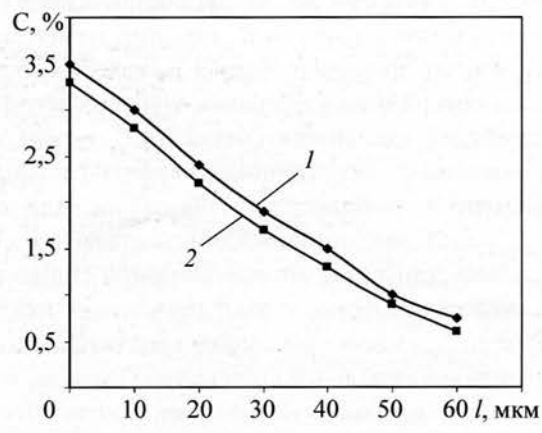


Рис. 4. Распределение концентрации углерода по толщине слоя *l* на наружной (*1*) и внутренней (*2*) поверхностях лопатки

Газоциркуляционное алюминидное покрытие наносили на установке ШГА-1 по технологии ООО "Турбомет" при t = 980 °С, τ = 8 ч и избыточном давлении газовой среды 1,3 МПа [9]. После этого лопатки и образцы были подвергнуты вакуумному отжигу при t = 1050 °С, τ = 3 ч для окончательного формирования защитного алюминидного покрытия.

Были проведены металлографические и рентгеноструктурные исследования полученных защитных покрытий на контрольных образцах и на одной лопатке после газового циркуляционного алитирования.

На поверхности ЖС после алитирования формируется алюминидное диффузионное покрытие с двухзонной структурой: внешний жаростойкий слой на основе фазы NiAl и внутренний мелкодисперсный переходный диффузионный слой, содержащий карбиды тугоплавких карбидообразующих элементов сплава ЖС36-ВИ, что характерно для обычных ЖС с карбидным упрочнением (рис. 6).

На рис. 7 показано распределение элементов в структурных составляющих алюминидного покрытия на науглероженном сплаве ЖС36-ВИ. Внешняя зона покрытия состоит из β-фазы (NiAl), содержащей 22...24 % мас. Al, и в ней практически отсутствуют тугоплавкие элементы сплава. На сплаве формируется диффузионная зона, матрицей которой является

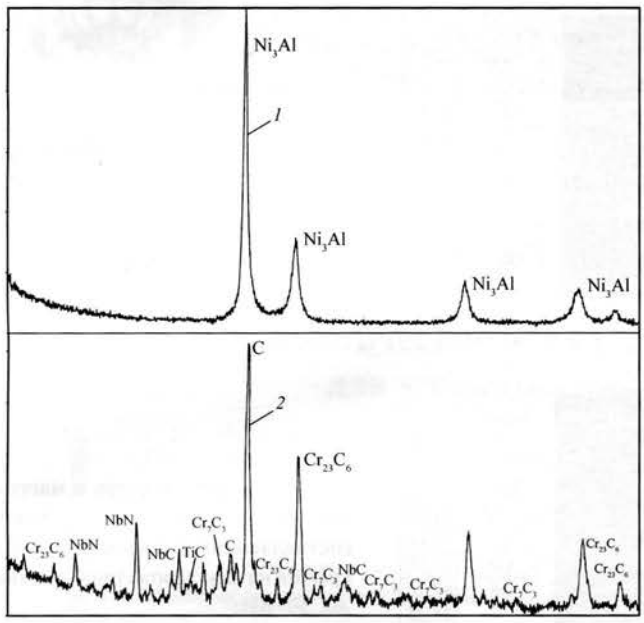


Рис. 5. Рентгенограмма сплава ЖС36-ВИ до цементации (*1*) и после цементации (*2*) при t = 1000 °С, τ = 4 ч (*б*)

β-NiAl с низким содержанием Al, и в ней наблюдаются мелкодисперсные выделения, обогащенные W, Re, Mo, Cr. Следует отметить, что в системах W–Cr, Re–Cr, W–Re наблюдается высокая растворимость этих элементов, а в присутствии С образуются зародыши карбидов сложного состава (MeC, Me_6C, $Me_{23}C_6$, Me_7C_3), что видно по рис. 5. Точная идентификация фаз в переходном диффузионном слое затруднена и требует специальных исследований.

В процессе газового циркуляционного хромоалитирования при осаждении Al из газовой фазы на поверхности сплава ЖС36-ВИ образуется тонкий слой β-фазы (NiAl) с включениями фаз, обогащенными элементами с ОЦК-решеткой (Cr, W, Mo, Re) [9]. Этот слой в дальнейшем служит границей между внешней и диффузионными зонами покрытия. Рост покрытия происходит за счет преимущественной диффузии Ni из сплава через слой β-фазы и взаимодействия атомов Ni с атомами Al в реакционной зоне на поверхности.

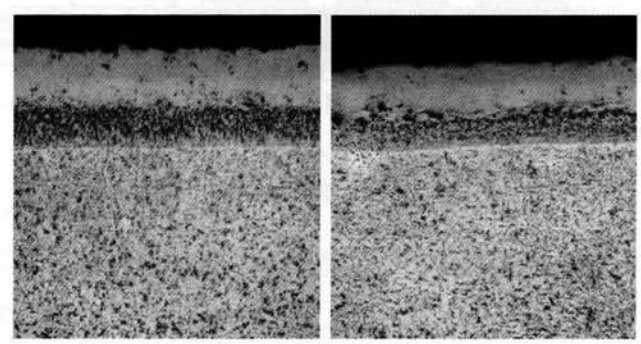
Из-за преимущественной диффузии Ni из сплава через слой NiAl исходная поверхность сплава сдвигается во внутренние части покрытия (эффект Киркендала). В жаропрочном никелевом сплаве эта поверхность обычно располагается почти посредине толщины покрытия и составляет границу раздела внешней и диффузионной зон. В никелевых ЖС, содержащих Al, пористость в диффузионной зоне не наблюдается.

В слое никелевого ЖС, примыкающем к покрытию, из-за уменьшения концентрации Ni в γ- и γ′-фазах происходит обогащение сплава такими элементами, как W, Cr, Mo, Re, а в присутствии углерода идет процесс образования карбидов. По мере роста внешнего слоя покрытия увеличивается и толщина диффузионной зоны. После того как весь углерод, находящийся в диффузионной зоне и поступивший в нее из зоны сплава, примыкающей к покрытию, будет связан в карбиды, остаточное количество элементов с ОЦК-решеткой вместе с Co и Ni образуют ТПУ-фазы (μ, σ) в виде вытянутых столбчатых выделений. Тип и количество карбидов в диффузионной зоне зависят от содержания углерода и карбидообразующих элементов.

Карбиды и другие выделения в диффузионной зоне располагаются в матрице, которая состоит из β-фазы (NiAl) или из смеси фаз β и γ′ (Ni_3Al). За счет диффузии Al из γ′-фазы сплава и частично путем встречной диффузии Al из наружной поверхности покрытия в диффузионной зоне образуется обедненная алюминием β-фаза или смесь фаз β и γ′.

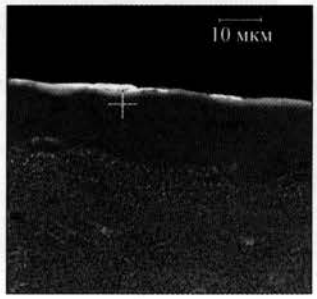
С ростом толщины алюминидного покрытия уменьшается скорость диффузии атомов Ni к поверхности покрытия. Это связано не только с увеличением расстояния для перемещения атомов Ni, но и с формированием в диффузионной зоне карбидов и других выделений фаз, которые являются барьером для перемещения атомов Ni из сплава в покрытие [9].

Были проведены испытания лопаток с покрытиями на воздухе в течение 1000 ч при температуре 950 °С, характерной для эксплуатации внутренней поверхности охлаждаемых лопаток турбин, и повторные металлографические исследования лопаток после испытаний. Исследования показали, что после длительной выдержки на поверхности сплава, примыкающей к покрытию, ТПУ-фазы не образуются, что свидетельствует о минимальной диффузии алюминия и хрома из покрытия в сплав и об эффективности такого способа защиты внутренней полости



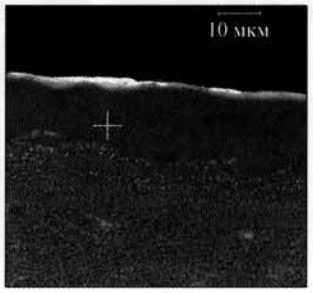
а) *б)*

Рис. 6. Микроструктура (×500) алюминидного покрытия на наружной (*а*) и внутренней (*б*) поверхностях лопатки I ступени после цементации и ГЦА



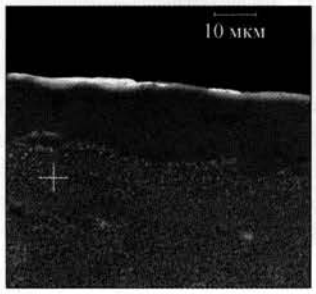
Элемент	W, %
Al	22,89
Nb	00,12
Mo	00,14
Ti	00,14
Cr	01,79
Co	05,04
Ni	62,24
W	00,89
Re	00,29

а)



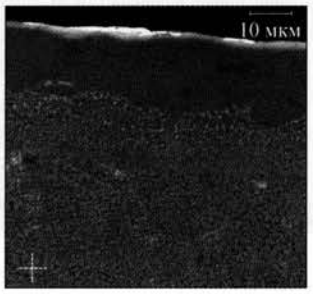
Элемент	W, %
Al	00,21
Nb	00,67
Mo	00,14
Ti	00,43
Cr	02,36
Co	06,69
Ni	62,35
W	01,16
Re	00,54

б)



Элемент	W, %
Al	11,83
Nb	01,53
Mo	02,03
Ti	01,19
Cr	05,33
Co	08,01
Ni	42,51
W	20,25
Re	04,70

в)



Элемент	W, %
Al	05,60
Nb	01,22
Mo	00,81
Ti	01,45
Cr	02,66
Co	07,20
Ni	62,26
W	11,28
Re	02,71

г)

Рис. 7. Микроструктура и массовая доля элементов структурных составляющих алюминидного покрытия на науглероженном сплаве ЖС36-ВИ:
а, б – внешняя зона; *в* – диффузионная зона; *г* – сплав

лопаток из безуглеродистых ЖС от высокотемпературного окисления.

Таким образом, насыщение поверхности жаропрочных сплавов углеродом перед нанесением на эту поверхность алюминидного покрытия обеспечивает длительную защиту внутренней полости охлаждаемой лопатки турбины из БЖС, что может найти применение при освоении этих сплавов в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Защитные** и упрочняющие покрытия лопаток турбин ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский, А.Г. Галоян: тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина "Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение". М.: ВИАМ, 2006. С. 55–65.

2. **Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В.** Материаловедение. 1997. № 5. С. 14–17.

3. **Walston W.S., Schaeffer J.C. and Murphy W.H.** A New Type of Microstructural Instability in Superalloys — SRZ // The Minerals, Metals & Materials Soc. 1996. P. 9–18.

4. **Successful** surface treatments for reducing instabilities in advanced nickel-base superalloys for turbine blades / Locci I.E., MacKay R.A., Garg A., Ritzert F. // NASA/TM–212920. 2004. P. 1–28.

5. **Pat. US 5.334.263.** Substrate stabilization of diffusion aluminide coated nickel-based superalloy // Schaeffer J.C. 1994.

6. **EP 1522607.** Method for fabricating a coated superalloy stabilized against the formation of SRZ / Ramgopal D. 2005.

7. **EP 0821076.** A method of aluminizing a superalloy / Wing R.G. 1998.

8. **Каблов Е.Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия. М.: МИСиС, 2001. 632 с.

9. **Градиентные** комплексные защитные покрытия для монокристальных турбинных лопаток теплонапряженных ГТД / В.П. Кузнецов, В.П. Лесников, С.А. Мубояджян и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 5. С. 41–48.

А.П. Бабичев, В.В. Падалкин *(Донской ГТУ, Ростов-на-Дону),*
Д.В. Гетманский, Б.М. Дагин, П.Д. Мотренко *(ОАО "Росвертол", Ростов-на-Дону)*

Технологические испытания специального инструмента для хонингования некруглых отверстий*

Представлены результаты разработки и технологических исследований конструкции гибкого абразивного инструмента для хонингования некруглых отверстий большой длины и переменного сечения. Дано описание конструкции, условий и результатов испытания инструмента.

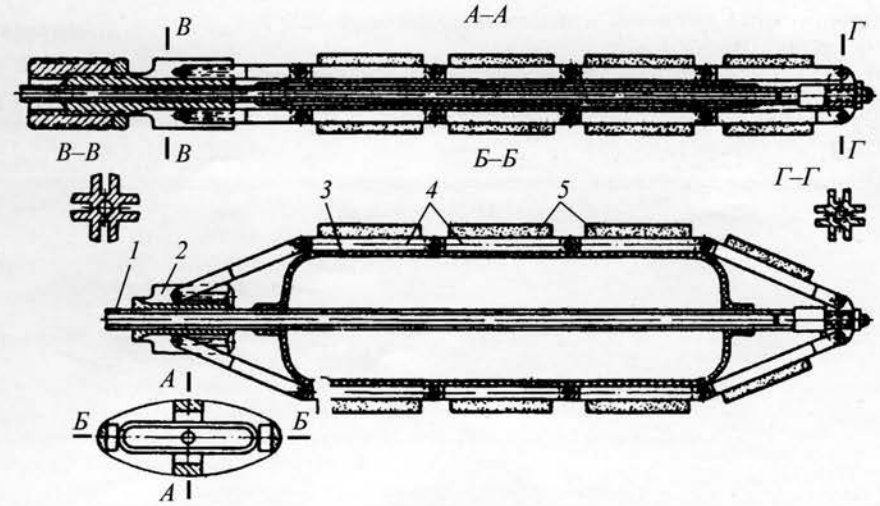
Results of development and technological tests are presented, designs of the flexible abrasive tool for honing of not round holes of the greater length and variable section. The description of design and resaults of test of the tool are given.

В конструкцию некоторых изделий входят детали с отверстиями некруглого сечения, поверхности которых требуют тщательной обработки. Это конусные, эллипсные в сечении отверстия, в том числе с изменяющимся по длине сечением или цилиндрические с отклонением от круглости до 0,5...1 мм. Характерным примером деталей такого типа могут служить лонжероны лопасти несущего винта вертолета, подкосы шасси, вал трансмиссии, некоторые детали силовых устройств и др. Деталь представляет собой длинномерную трубу из закаленной стали с сечением, изменяющимся по длине от круглого до эллипса с большим соотношением осей.

Учитывая преимущества хонингования при чистовой обработке отверстий большой длины, целесообразно использовать его в рассматриваемом случае.

При обработке упомянутых отверстий целью обычно является не получение высокой точности, а равномерное снятие припуска и достижение требуемой шероховатости по параметру Ra = = 0,16...1,25 мкм. В этом случае абразивные бруски должны копировать исходную поверхность, равномерно удаляя припуск. Для этого разжим (прижим к обрабатываемой поверхности) абразивных брусков осуществляется не жестким разжимным конусом (как обычно), а эластичным элементом в виде пневмокамеры. Конструкция инструмента представлена на рисунке.

Инструмент состоит из центральной трубки, на которой с двух сторон расположены специальные гайки и переходник *2*, удерживающие первый и последний башмаки *4* с абразивными брусками *5*. Разжим башмаков с брусками осуществляется с помощью резиновой камеры *3*, заполняемой сжатым воздухом, который поступает по центральной трубке *1*, имеющей выходные поперечные отверстия в зоне расположения пневмокамеры. Необходимая удельная нагрузка 0,5...1 Н/мм^2 абразивных брусков на обрабатываемую поверхность достигается путем регулирования давления сжатого воздуха. Инструмент прикрепляют к полому шпинделю хонинговального станка,



Хонинговальная головка для обработки отверстий некруглого сечения

* Статья не была представлена на конференции "Технология–2007".

сообщающему ему вращательное, возвратно-поступательное и осциллирующее движения.

Технологические испытания проводили с целью проверить работоспособность инструмента на нескольких фиксированных режимах, прежде всего усилия прижима (разжима) абразивных брусков к обрабатываемой поверхности, вращение и возвратно-поступательное движение; отметить при этом величину снимаемого припуска; проверить состояние многозвенных цепочек (конструкционную прочность, отсутствие деформаций и поломок).

Проведены испытания двух вариантов конструкции инструмента: первая четырехрядная (в каждом ряду по четыре звена) с размерами брусков 10×10×100 мм; общее число брусков в контакте с обрабатываемой поверхностью – 8; общая площадь контакта (рабочая поверхность) – 8000 мм^2; зернистость 25; связка керамическая; твердость СТ1. В качестве образцов приняты отрезки толстостенной трубы (заготовки лонжерона лопасти вертолета) из стали 40ХНМА-Ш (40 HRC). Размеры цилиндрического участка: длина $l_д$ = 400 мм, наружный и внутренний диаметры $d_н$ = 138 мм, $d_{вн}$ = 122,8 мм; эллипсного участка: большая ось a = 148 мм, малая ось b = 121 мм. Исходное состояние поверхности – после горячей прокатки.

Второй вариант конструкции инструмента предусматривал увеличение ширины и длины абразивных брусков до 20×20×200 мм. В этом случае площадь рабочей поверхности абразивных брусков составляла 24 000 мм^2. Увеличение размеров рабочей поверхности брусков основывалось на результатах экспериментальных исследований, показавших рост съема металла при увеличении рабочей поверхности брусков (ширины и длины). В качестве СОТС применяли традиционный состав – смесь керосина (80 %), масла индустриального (15 %) и олеиновой кислоты (5 %).

Разжим брусков осуществляли путем ступенчатого наращивания давления в пневмокамере – от 0,05 до 0,2 МПа.

Размеры определяли индикаторным нутромером с точностью 0,01 мм, шероховатость поверхности – профилометром мод. 296.

Анализ и обработка результатов экспериментальных исследований новых конструкций инструмента – "гибких" хонинговальных головок для обработки некруглых отверстий – позволяют сделать следующие **выводы**:

1) апробация конструкции инструмента подтвердила его работоспособность. Отмечены равномерная нагрузка и участие в работе всех звеньев (абразивных брусков) цепочек и, соответственно, равномерное снятие припуска;

2) установлена возможность непрерывного снятия припуска при условии поддержания требуемого давления разжима и самозатачивания рабочей поверхности абразивных брусков. Скорость съема припуска может достигать 0,01...0,06 мм/мин в зависимости от условий обработки;

3) установлена возможность снятия припуска до 1,5...2,0 мм на диаметр (что сравнимо с припуском, снимаемым при ленточном шлифовании) и удаления дефектного слоя и обеспечения требуемого качества поверхности. Полученные результаты являются основанием для замены ленточного шлифования хонингованием, которое наиболее эффективно при обработке отверстий большой длины и переменного (некруглого) сечения;

4) при сравнении затрат на ленточное шлифование и хонингование отмечено их снижение в последнем случае;

5) эффективность и преимущества хонингования могут быть существенно повышены за счет многоинструментной обработки и двусторонней обработки отверстий большой длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабичев А.П.** Хонингование. М.: Машиностроение, 1965. 95 с.

2. **Хонингование:** справ. / С.И. Куленков, В.А. Романчук, Ф.Ф. Ризванов и др. М.: Машиностроение, 1973. 168 с.

3. **Соколов С.П., Кремень З.И.** Обработка деталей абразивными брусками. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1967. 124 с.

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение-1".
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 *Погорелова Т.Н.*
Технический редактор *Жиркина С.А.*
Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 25.07.07 г. Подписано в печать 18.09.07 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,75. Заказ 157. 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