НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 1 (01)

2011

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор
Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н. СУСЛОВ А.Г.

Председатель редакционного совета
чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета
д.т.н. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:
д.т.н. АМОСОВ А.П. (г. Самара)
д.т.н. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)
д.т.н. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)
д.т.н. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)
акад. НАН Беларуси ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск)
д.т.н. ДЁМИН В.А. (г. Москва)
д.т.н. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)
д.т.н. КИРИЧЕК А.В. (г. Орел)
д.т.н. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев)
д.т.н. ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)
д.т.н. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)
д.т.н. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)
д.т.н. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)
д.т.н. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)
д.т.н. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)
д.т.н. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)
д.т.н. ПЕТРОВ В.М. (г. Санкт-Петербург)
д.т.н. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)
д.т.н. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)
д.т.н. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)
д.т.н. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)
д.т.н. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск)
д.т.н. ЯКИМОВИЧ Б.А. (г. Ижевск)

Ответственный секретарь
ДЮБКОВА Н.В.

Редактор
ЦУКАНОВ И.Ю.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: «Роспечать» **79195**, «Пресса России» **39536**, «Почта России» **10808**) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98; realiz@mashin.ru
Тел. редакции: (499) 268-26-87
Факс: (499) 269-48-97
E-mail: naukatm@mashin.ru,
naukatm@yandex.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-43337

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Суслов А.Г. Методология разработки новых наукоёмких технологических методов обработки рабочих поверхностей деталей машин 4

Михайлов А.Н., Михайлова Е.А. Наукоёмкие функционально-ориентированные технологии в машиностроении 8

Панфилов Ю.В. Наукоёмкие технологии модификации. Нанесение износостойких и антифрикционных покрытий 19

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Шатульский А.А., Шаповалова М.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения . . 24

Приходько В.М., Казанцев В.Ф., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Наукоёмкие технологии в машиностроении с применением ультразвука 29

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ППД

Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка деталей нетрадиционных форм и размеров наукоёмких изделий (на примере силовых деталей вертолета) 38

Киричек А.В., Соловьёв Д.Л., Волобуев А.В. Инновационная статико-импульсная обработка 43

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© Издательство «Машиностроение», «Наукоёмкие технологии в машиностроении», 2011

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 1 (01)

2011

Publishes from July 2011

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief
Honoured Scientist and Engineer of Russia
Dr. Tech. Sci. SUSLOV A.G.

Chairman of Editorial Committee
A.M. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant
Dr. Tech. Sci. GRIGOR'YANTS A.G.

Editorial Committee:
Dr. Tech. Sci. AMOSOV A.P. (Samara)
Dr. Tech. Sci. ARTEMOV I.I. (Penza)
Dr. Tech. Sci. BELOV V.D. (Moscow)
Dr. Tech. Sci. BOCHKAREV P.Y. (Saratov)
Acad. NAS of Belarus VITYAZ' P.A. (Minsk)
Dr. Tech. Sci. DEMIN V.A. (Moscow)
Dr. Tech. Sci. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)
Dr. Tech. Sci. KIRICHEK A.V. (Orel)
Dr. Tech. Sci. KLIMENKO S.A. (Kiev)
Dr. Tech. Sci. LYSAK V.I. (Volgograd)
Dr. Tech. Sci. MAKAROV V.F. (Perm')
Dr. Tech. Sci. MALIKOV A.A. (Tula)
Dr. Tech. Sci. MIHAJLOV A.N. (Doneck)
Dr. Tech. Sci. MOROZOV V.V. (Vladimir)
Dr. Tech. Sci. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)
Dr. Tech. Sci. OLEJNIK A.V. (Moscow)
Dr. Tech. Sci. PETROV V.M. (St. Petersburg)
Dr. Tech. Sci. POLETAEV V.A. (Rybinsk)
Dr. Tech. Sci. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)
Dr. Tech. Sci. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)
Dr. Tech. Sci. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)
Dr. Tech. Sci. HEJFETS M.L. (Minsk)
Dr. Tech. Sci. JAKIMOVICH B.A. (Izhevsk)

Executive secretary
DJUBKOVA N.V.

Editor
TSUKANOV I.Yu.

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» **79195**, «Pressa Rosii» **39536**, «Pochta Rossii» **10808**) or in the edition of the journal.
Ph: (499) 269-52-98, E-mail: realiz@mashin.ru
Editorial office Ph: (499) 268-26-87,
Fax: (499) 269-48-97
E-mail: naukatm@mashin.ru,
naukatm@yandex.ru

The Journal is registered in the Ministry for Press, Broadcasting and Mass Communications of Russian Federation. Registration certificate ПИ № ФС77-43337

CONTENTS

FUNCTION-ORIENTED, TECHNOLOGIES AND NANOTECHNOLOGIES

Suslov A.G. Methodology of development of new science intensive machining methods for machine elements functional surfaces 4

Mihajlov A.N., Mihajlova E.A. Science intensive function-oriented technologies in machine building 8

Panfilov Yu.V. Science intensive technologies of modification. Wear-resistant and antifriction coating 19

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND ULTRASONIC PROCESSING

Shatulsky A.A., Shapovalova M.A. Application of prototyping methods for making machine-building products. 24

Prikhod'ko V.M., Kazancev V.F., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Science intensive technologies with ultrasound application 29

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF FINISHING-AND-HARDENING SPD WORKING

Babichev A.P., Motrenko P.D. Vibroimpact finishing-and-hardening working for science intensive products parts with non-traditional shape and size (by way of example force parts of helicopter) 38

Kirichek A.V., Solovyov D.L., Volobuev A.V. Innovation statico-pulse working 43

Reprint is possible only with the reference to the journal «Science intensive technologies in mechanical engineering»

© «Mashinostroenie Publishers», «Science intensive technologies in mechanical engineering», 2011

Уважаемые читатели!

В ваших руках находится первый номер нового журнала «Наукоёмкие технологии в машиностроении».

Необходимость издания такого журнала вызвана следующими обстоятельствами.

Такое крупное государство как Россия не может успешно развиваться без собственного машиностроения, которое в настоящее время нуждается в коренной модернизации. Эта модернизация возможна только на базе новых наукоёмких технологий. Причем не высоких, не низких, не критических, не только нанотехнологий, а именно наукоёмких технологий по всем технологическим переделам изготовления машин, базирующихся на последних достижениях науки и техники.

Это технологии создания новых материалов для машиностроения (наноструктурированных, модифицированных и металлокерамических материалов, металлопластиков, материалов с памятью и др.); новые технологии производства отливок (по выгораемым моделям, в магнитном поле и др.); обработка давлением с учетом мезамеханической теории материалов, с наложением электрического тока и магнитных полей, с комбинированным нагружением очага деформации и др.; новые технологии в сварочном производстве (электронно-лучевая, лазерная и ультразвуковая сварка, сварка взрывом и в вакууме и др.); технологии прототипирования, лазерной, ультразвуковой, ионной, электро-физико-химической и комбинированной обработки; функционально-ориентированная, модульная и нанотехнологии; виброударная, статико-импульсная и центробежно-ударная обработка; модификации поверхностных слоев деталей и др.

Развитие науки и техники привели к значительному совершенствованию традиционных методов изготовления и обработки заготовок. Так, появление систем числового программного управления привело к созданию нового класса технологического оборудования с ЧПУ, дальнейшим развитием которого, с учетом достижений в контрольно-измерительной технике является создание самообучающихся технологических систем с адаптивным управлением качеством. Применение такого оборудования и информационных технологий позволяет создавать наукоёмкие конкурентоспособные технологии и для традиционных методов изготовления и обработки заготовок.

Следует отметить, что большинство этих наукоёмких технологий разрабатывались и разрабатываются учеными нашей страны, но их реализация, по ряду причин, быстро осуществляется на передовых фирмах зарубежных стран. А затем мы наше «добро» в несколько раз дороже покупаем за границей. В России, по различным технологическим переделам при производстве машин: создание материалов, производство заготовок литьем и обработкой давлением, в прокатном и сварочном производстве, обработка заготовок, сборка машин, контроль, ремонт и восстановление существует более 100 научных школ. Эти школы в основном занимаются совершенствованием и созданием новых, в том числе и наукоёмких технологий для машиностроения.

Базой наукоёмких технологий являются фундаментальные и прикладные исследования, а также системный подход, который представляет диалектическую взаимосвязь, взаимодействие всех элементов технологической системы. Это говорит о том, что реализация наукоёмких технологий в машиностроении требует научного сопровождения и высококвалифицированных специалистов (технологов, станочников, программистов, операторов) с высшим техническим образованием (инженеров).

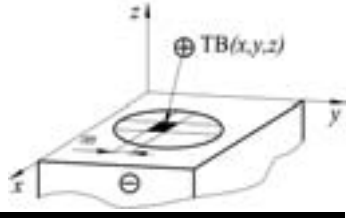
Учитывая эти обстоятельства и желание помочь модернизации отечественного машиностроения, издательством «Машиностроение» и Ассоциацией технологов-машиностроителей принято решение издавать новый журнал «Наукоёмкие технологии в машиностроении».

В редакционный совет журнала вошли ведущие ученые-технологи России, Беларуси и Украины по всем технологическим переделам.

Приглашаем всех отечественных и зарубежных ученых и специалистов, кто занимается разработкой, созданием и реализацией наукоёмких технологий в машиностроении, к тесному сотрудничеству. Это позволит постепенно создать банк знаний по наукоёмким технологиям в машиностроении, а постоянные подписчики журнала станут обладателями этих знаний.

Уверены, что журнал будет способствовать промышленным предприятиям нашей страны в научно обоснованной модернизации на базе реализации наукоёмких конкурентоспособных технологий, теснее взаимодействовать с учеными-технологами, а нашим техническим вузам готовить специалистов под эти технологии.

С уважением,
Главный редактор,
Засл. деятель науки и техники РФ,
д-р. техн. наук, проф. А.Г. Суслов



УДК 621.9

А.Г. Суслов, д-р техн. наук
(Московский государственный индустриальный университет)
E-mail: mootechmash@mail.ru

Методология разработки новых наукоёмких технологических методов обработки рабочих поверхностей деталей машин

Изложена методология разработки новых наукоёмких способов и технологических процессов обработки рабочих поверхностей деталей машин, базирующаяся на объединении процессов их изготовления и эксплуатации.

Ключевые слова: наукоёмкие технологии; изготовление; эксплуатация.

A.G. Suslov, Dr. Tech. Sci
(Moscow State Industrial University)

Methodology of development of new science intensive machining methods for machine elements functional surfaces

The methodology of development of new science intensive methods and technological processes for machine elements functional surfaces machining, based on consolidation of their manufacturing and service processes is stated in this paper.

Keywords: science intensive technologies; manufacturing; service.

Как правило, все разрушения механизмов и машин (износные, усталостные, коррозионные и др.) начинаются с рабочих поверхностей их деталей. Поэтому при разработке технологических процессов изготовления деталей особое внимание следует уделять обработке их рабочих поверхностей.

Предложенная методология разработки новых наукоёмких способов обработки деталей базируется на объединении процессов изготовления и эксплуатации (рис. 1) [1].

Это позволяет научно обоснованно перераспределять, увеличивать или уменьшать силовые, температурные и химические воздействия на обрабатываемые поверхности деталей или отдельные ее участки при изготовлении.

Установлено, что контактные разрушения цилиндрических роликов при их эксплуатации происходят по краям. Это объясняется тем, что согласно теории контактного взаимодействия имеет место параболический закон распределения давления вдоль образующей цилиндрического ролика при его работе. Если этот закон распределения давления из эксплуатации перенести в технологию финишной обработки рабочей поверхности, то можно значительно повысить долговечность роликов.

Такой процесс можно обеспечить, если производить шлифование рабочей цилиндрической поверхности роликов бесконечными эластичными лентами (рис. 2, *а*) с научно обоснованным законом распределения давления вдоль образующей, позволяющим получить оптимальную бочкообразную форму, обеспечивающую равномерность давления при их эксплуатации (рис. 2, *б*). При этом значительно повышается долговечность роликов. Оптимальная бочкообразная форма роликов достигается за счет ширины ленты, ее эластичности, угла охвата и силы ее натяжения.

Следующим примером такой технологии является финишное плосковершинное хонингование цилиндров, предварительно обработанных хона-

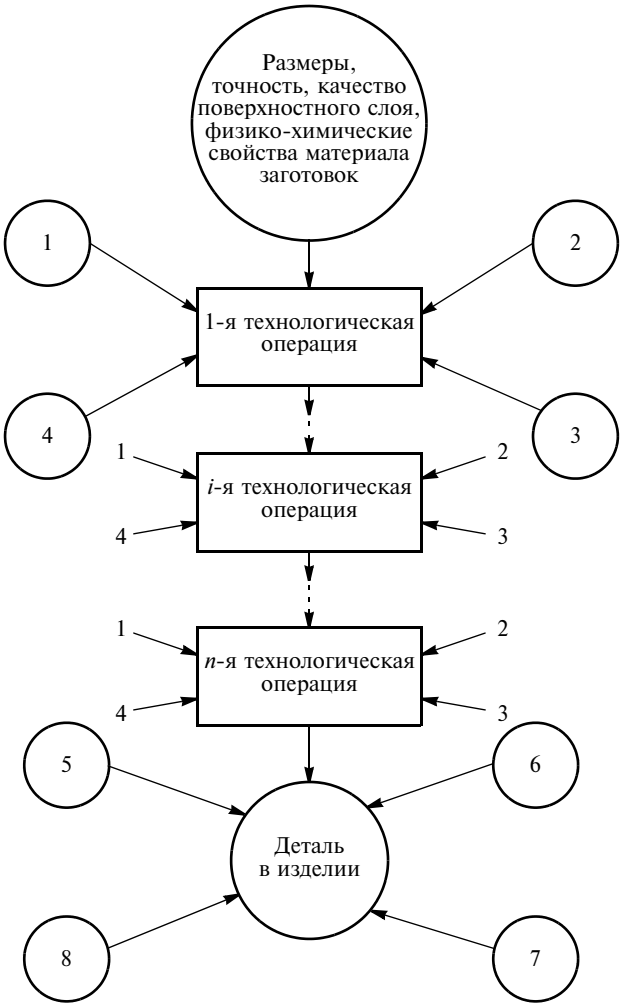


Рис. 1. Структурная схема воздействия различных факторов на заготовку при обработке и на готовую деталь при эксплуатации:

1, 2, 3, 4 и 5, 6, 7, 8 — кинематическое, силовое, температурное, химическое воздействие на обрабатываемую заготовку при изготовлении и готовую деталь при эксплуатации соответственно

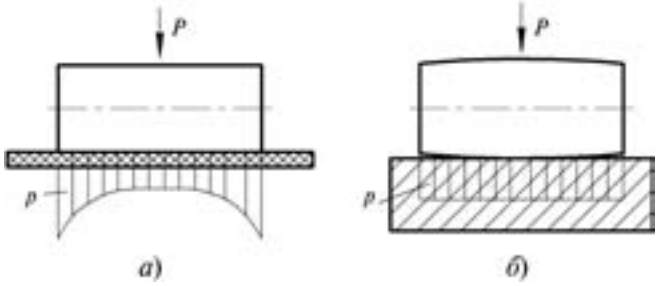


Рис. 2. Распределение рабочего давления вдоль образующей ролика:

а — при контакте цилиндрического ролика со шлифовальной лентой; *б* — при контакте бочкообразного ролика оптимального профиля с поверхностью катания

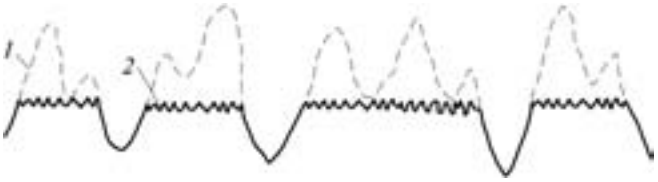


Рис. 3. Микропрофиль рабочей поверхности цилиндра при хонинговании:

1 — черновом; *2* — плосковершинном

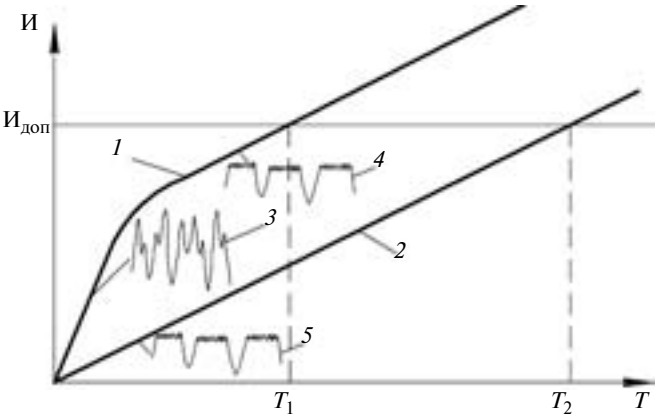


Рис. 4. Классические кривые износа рабочей поверхности цилиндра:

1 — обычная технология хонингования; *2* — наукоёмкая технология плосковершинного хонингования; *3* — исходный профиль шероховатости; *4* — сформировавшийся профиль шероховатости рабочей поверхности цилиндра в процессе приработки; *5* — профиль шероховатости рабочей поверхности цилиндра при плосковершинном хонинговании; $И_{доп}$ — допустимая величина износа; T_1 — долговечность цилиндра при обычной технологии; T_2 — долговечность цилиндра при наукоёмкой технологии плосковершинного хонингования

ми с крупнозернистыми брусками. Научно обоснованная зернистость финишных брусков и их рабочее давление позволяют приблизить эту операцию к процессу приработки и получить приработанную оптимальную форму шероховатости рабочей поверхности цилиндра с микрокарманами для удержания смазки (рис. 3). Это позволяет избежать приработочного износа рабочей поверхности цилиндров и значительно повысить их долговечность (рис. 4).

Поперечный оптимальный профиль рабочей поверхности катания железнодорожного колеса при эксплуатации быстро изменяется из-за неравномерности давлений, скорости качения и проскальзывания. Как известно, на интенсивность изнашивания значительное влияние оказывает поверхностная микротвердость. Придание рабочей поверхности катания железнодорожного

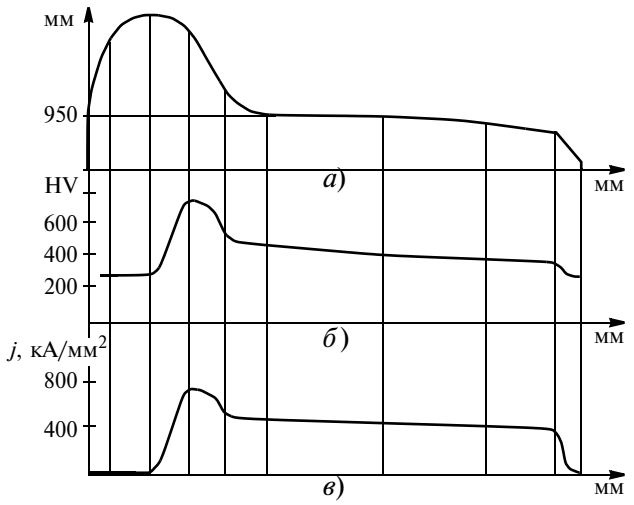


Рис. 5. Расчетные графики:
а — профиль железнодорожного колеса; *б* — микротвердость железнодорожного колеса по профилю; *в* — изменение плотности тока при электромеханической обработке вдоль профиля железнодорожного колеса

колеса закономерного изменения поверхностной микротвердости создает равномерную величину изнашивания по их профилю, а, следовательно, значительно повышает их долговечность. Это обеспечивается импульсной электромеханической обработкой с установленным законом изменения плотности тока, который позволяет получить требуемый закон изменения поверхностной микротвердости по профилю колеса (рис. 5) [2].

Определенный закон изменения плотности тока обеспечивается за счет геометрии рабочего ролика, силы его контакта с рабочей поверхностью колеса и изменения силы тока с помощью специальной установки (рис. 6). Данный метод обработки может быть реализован на всех колесообрабатывающих станках.

Открытое проф. Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским явление избирательного переноса позволило разработать ряд новых наукоёмких технологий, обеспечивающих значительное повышение долговечности пар трения [3].

В процессе эксплуатации машин, имеющих корпуса из алюминиевых сплавов, как правило, происходит ослабление шпилечных и болтовых соединений, что приводит к раскрытию стыков, разгерметизации и возможным авариям. Это совершается за счет уменьшения натяга в резьбовом соединении от нагрузок и вибраций, вызывающих пластические деформации резьбы в корпусе из алюминиевого сплава.

Научный подход, базирующийся на единстве процессов изготовления и эксплуатации, позволил предложить перенести явление пластических деформаций резьбы в корпусе из эксплуатации в изготовление, т.е. обеспечить пластическое насыщение материала в процессе формирования резьбы. Так появилась технология гладкорезьбовых соединений, при которой резьбовая шпилька вворачивается в гладкое цилиндрическое отверстие определенного диаметра. При этом формируется надежное соединение, в котором исчерпаны все пластические деформации. Причем создание такой технологии позволяет автоматизировать весь процесс обработки отверстий и вворачивания шпилек на сверлильных станках с ЧПУ.

Актуальной проблемой для фирм, обслуживающих железные дороги, является поддержание качества поверхности катания рельсов и повышение их долговечности. В процессе эксплуатации на поверхности катания образуются продольная волнистость и микротрещины. Волнистость не позволяет переходить на высокоскоростные подвижные составы, а микротрещины являются причиной разрушения рельсов.

Для борьбы с этими явлениями эксплуатационники железных дорог осуществляют ремонт поверхности катания железнодорожных рельсов в пути, используя рельсошлифовальные комплексы. При этом сформировавшиеся при эксплуатации в процессе приработки различные попереч-

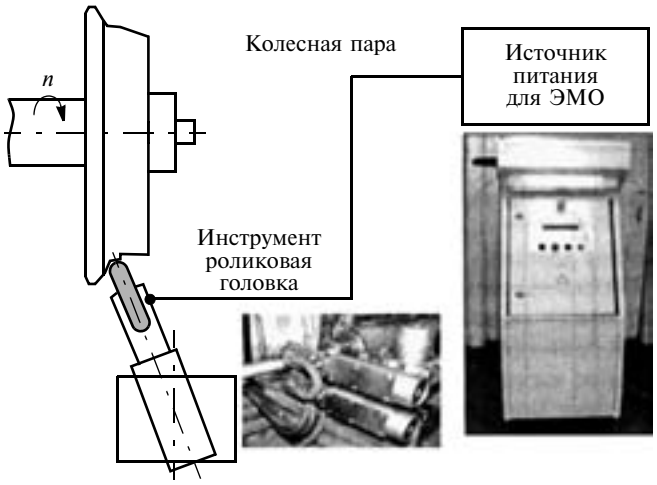


Рис. 6. Схема обработки железнодорожных колес

ные профили рабочей поверхности рельсов возвращаются к исходному состоянию и удаляются микротрещины и образовавшаяся волнистость. Такая технология приводит к необходимости удаления больших припусков (рис. 7), а следовательно, является непроизводительной. Скорость рельсошлифовального комплекса не превышает 12 км/ч.

Однако наука о трении и изнашивании [4] утверждает, что в процессе приработки поперечный профиль рабочей поверхности рельсов в зависимости от места их расположения приобретает оптимальный вид. Если его при ремонте вернуть к исходному профилю, то при эксплуатации после ремонта он опять вернется к оптимальной форме (см. рис. 7). Это убедительно говорит о том, что при ремонте рабочих поверхностей рельсов в пути необходимо не изменять сформировавшийся при эксплуатации их поперечный профиль (см. рис. 7).

Для реализации этого подхода разработан новый наукоёмкий технологический процесс ремонта рабочей поверхности железнодорожных рельсов в пути. Он предусматривает следующее: удаление поверхностного перенаклепанного дефектного слоя с микротрещинами; удаление продольной волнистости; формирование оптимальной шероховатости рабочей поверхности рельсов.

Реализация этих технологических операций осуществляется на едином рельсообрабатывающем комплексе с применением «упругих технологий» [1]. Первая операция по удалению дефектного слоя производится иглофрезерованием; вторая — по удалению волнистости — осуществляется шлифованием брусками с поперечной осцилляцией

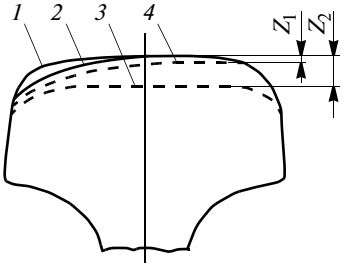


Рис. 7. Формирование поперечного профиля рельса при эксплуатации и ремонте:

1 — исходный профиль рельса; *2* — сформировавшийся профиль рельса при эксплуатации; *3* — восстановленный профиль рельса при старом подходе к рельсовой проблеме; *4* — то же, при новом подходе к рельсовой проблеме; Z_1 — снимаемый припуск при ремонте по-новому; Z_2 — при ремонте по-старому

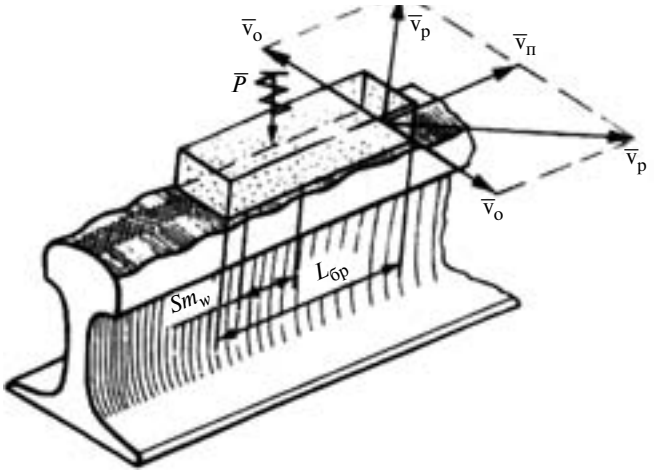


Рис. 8. Схема движений при обработке шлифовальными брусками:

v_o — скорость осцилляции инструмента; $v_п$ — скорость поезда; v_p — результирующая скорость резания; Sm_w — средний шаг волнистости; $L_{бр}$ — длина бруска, $L_{бр} \geqslant Sm_w$; P — сила прижатия инструмента

(рис. 8); третья — по формированию оптимальной шероховатости — лепестковым шлифованием.

Анализ показывает, что данный технологический процесс может быть реализован при скорости движения рельсообрабатывающего комплекса 30...35 км/ч. При этом значительно повышается долговечность рельсов, так как увеличивается количество их дополнительных обработок до достижения предельно допустимой толщины их головки.

Таким образом, предложенная методология позволяет научно обоснованно подходить к разработке новых наукоёмких методов обработки и технологических процессов, базирующихся на последних достижениях науки и техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

2. **Инженерия** поверхности деталей / под. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

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

4. **Крагельский И.В., Добычин М.К., Комбалов В.С.** Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 540 с.

Рецензент д-р техн. наук А.А. Маликов

УДК 621.9

А.Н. Михайлов, д-р техн. наук,
Е.А. Михайлова, канд. техн. наук
(Донецкий национальный технический университет, Украина)
E-mail: mntk21@mail.ru

Наукоёмкие функционально-ориентированные технологии в машиностроении

Рассмотрен принципиально новый подход в синтезе функционально-ориентированных технологий машиностроения. На базе разработанного подхода обеспечивается возможность создания функционально-ориентированных традиционных, макро-, микро- и нанотехнологий.

Ключевые слова: изделия машиностроения; синтез технологий; функционально-ориентированные технологии; свойства.

A.N. Mihajlov, Dr. Tech. Sci.,
E.A. Mihajlova, Candidate
(Doneck National Technical University, Ukraine)

Science intensive function-oriented technologies in machine building

The fundamental new approach in machine building function-oriented technologies synthesis is considered in this paper. On the basis of the developed approach, the possibility of creation traditional, macro-, micro- and nanotechnologies is supported.

Keywords: machine building products; synthesis of technologies; function-oriented technologies; properties.

Функционально-ориентированные технологии [1—5] относятся к новому классу технологий, обеспечивающих при изготовлении качественно новую совокупность свойств изделий. Они позволяют полностью адаптировать изделия при изготовлении к особенностям их эксплуатации в машине или технологической системе, а также обеспечить заданный, требуемый или предельный их эксплуатационный потенциал.

Основная идея создания функционально-ориентированных технологий базируется на следующих положениях [4]:

1. В технологии машиностроения при составлении технологического процесса принято каждое изделие разбивать на исполнительные поверхности [6], и технологический процесс проектировать, основываясь на определенной последовательности обеспечения свойств этих исполнительных поверхностей.

2. Между свойствами каждого функционального элемента изделия, особенностями его эксплуатации в машине и технологическими воздействиями средств обработки на функциональный элемент должны существовать определенные связи. Эти связи в функционально-ориентированных технологиях определяются и формируются на базе ряда разработанных особых принципов.

3. Реализацию технологических воздействий на каждый функциональный элемент изделия необходимо выполнять прецизионно, особо или супер прецизионно на местном уровне. Их производить из условия обеспечения изменения его свойств в пространстве и во времени в зависимости от особенностей эксплуатации каждого функционального элемента изделия в машине или технологической системе, а также в зависимости от заданного, требуемого или предельного эксплуатационного потенциала всего изделия в целом.

Методология их проектирования состоит из двух этапов проектирования (рис. 1): деление изделия на исполнительные поверхности и выполнение их классификации; формирование структуры или маршрута технологического процесса.

Заметим, что методика проектирования этих технологических процессов характеризуется лавинообразным процессом. Во многих компаниях и фирмах такую схему проектирования технологических процессов рассматривают как незыблемую. Однако анализ процесса проектирования технологических процессов в машиностроении

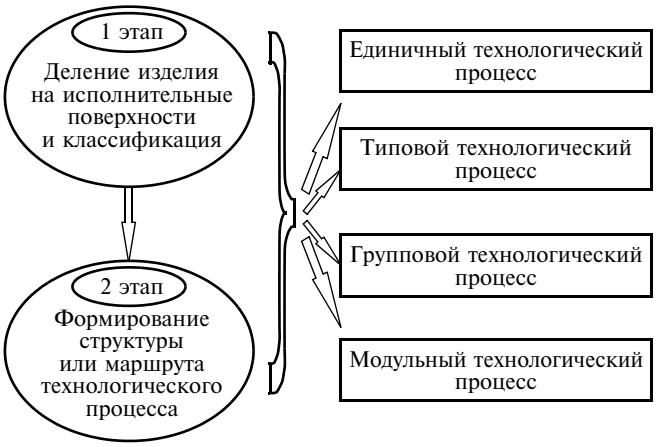


Рис. 1. Основные этапы синтеза традиционных технологических процессов

показывает следующие недостатки этой схемы: непригодность для разработки сложных технологий, состоящих из большого числа подсистем и автономных модулей, образующих сетевые структуры; обязательно последовательное выполнение всех этапов проектирования технологических процессов; несовместимость с эволюционным подходом; несовместимость с перспективными методами управления проектированием технологических процессов.

Поэтому для создания прогрессивных технологических процессов машиностроения, традиционные методы не подходят. На рис. 2 показаны основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов. Методика их проектирования не является отдельным монолитным этапом. Она представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологического процесса. При этом последовательность и методология базируются на замкнутой рекуррентной структуре.

Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов следующие:

1. Анализ эксплуатационных особенностей изделия и составление структуры эксплуатационных функций.

2. Деление изделия на функциональные элементы по уровням «глубины технологии» и их классификация.

3. Формирование структуры или маршрута технологического процесса на базе особых принципов ориентации.

Каждый из этапов методики синтеза функционально-ориентированных технологических процессов имеет определенные особенности проектирования, представленные на рис. 2. А именно: на 1-м этапе методики выполняется анализ особенностей эксплуатации изделия и составляется структура действующих функций; на 2-м этапе производится деление изделия на функциональные элементы по 7 уровням деления или «глубины технологии»; на 3-м этапе формируется структура и маршрут технологического процесса, при этом на базе 8 особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов производится замыкание процесса проектирования (образуется замкнутая форма реализации методики проектирования).

При этом замкнутая форма проектирования функционально-ориентированных технологий дает возможность определять и параметры технологических воздействий, и свойства функциональных элементов изделия в зависимости от действия эксплуатационных функций. Причем обратные связи позволяют корректировать и уточнять параметры технологических воздействий и свойств функциональных элементов изделий по уровням глубины технологии.

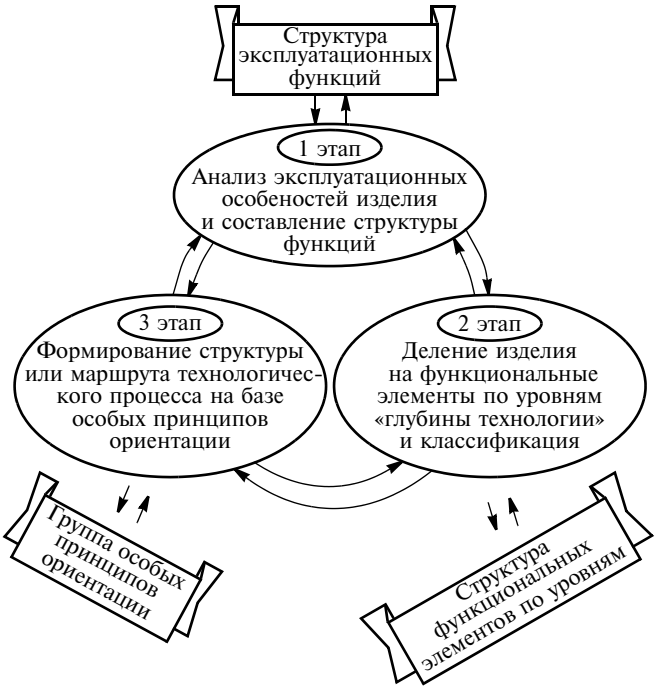


Рис. 2. Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов

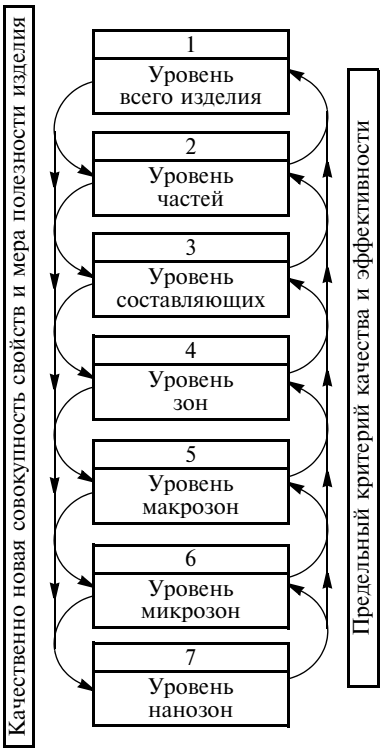


Рис. 3. Уровни глубины технологии или уровни деления изделия, реализации технологических воздействий и обеспечения свойств изделия

Функционально-ориентированная технология — это специальная наукоёмкая технология, базирующаяся на единстве процессов обработки и эксплуатации рабочих поверхностей деталей, а именно технологии обеспечения и повышения непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений [5, 6]. Здесь предусмотрена реализация заданного множества ориентированных местных прецизионных технологических воздействий и свойств изделий в зависимости от особенностей их эксплуатации или заданного, требуемого и предельного эксплуатационного потенциала изделия. При этом технологические воздействия и свойства изделия формируются и реализуются на основе иерархической структуры уровней «глубины технологии» и группы особых принципов их ориентации.

Под уровнями «глубина технологии» понимается процесс деления изделия на функциональные элементы по иерархическим уровням, процесс реализации технологических воздействий и обеспечения свойств изделия на этих уровнях. Иерархическая структура уровней глубины технологии содержит следующие уровни (рис. 3): уровень всего изделия в целом; уровень участков; уровень составляющих; уровень зон; уровень макрозон; уровень микрозон; уровень нанозон.

Верхним уровнем глубины технологии является уровень всего изделия, а нижним уровнем — уровень нанозон.

Следует отметить, что функциональные составляющие третьего уровня деления могут формироваться из следующих элементов [4]: поверхностных и объемных точек; поверхностных и объемных линий; поверхностей и поверхностных слоев; объемных элементов.

После завершения процесса деления изделия на функциональные элементы выполняется объединение функциональных элементов в иерархическую структуру подмножеств в зависимости от уровней объединения, а именно: глубины технологии; особенностей действия эксплуатационных функций, заданного, требуемого, предельного эксплуатационного потенциала изделия; степени необходимости применения особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств изделия; свойств, качества и точности функциональных элементов; пространственной формы функционального элемента; габаритных размеров функционального элемента; схемы технологических воздействий на функциональный элемент; применяемого обеспечения и оборудования; других параметров; применения организационно-технологической формы технологии.

По этим уровням объединения выполняется классификация функциональных элементов до реализации заданной организационно-технологической формы технологии.

Основные признаки функционально-ориентированных технологий заключаются в следующем: обеспечивается возможность реализации заданных, требуемых или предельных свойств изделий и технологических воздействий на следующих местных уровнях глубины технологии: на уровне всего изделия, участков, составляющих, зон, макрозон, микрозон, нанозон; выполняется ориентация технологических воздействий инструментов и средств обработки для обеспечения заданных или требуемых свойств изделия на основе ряда особых принципов.

При этом общая идеология создания функционально-ориентированных технологий основывается на перечисленных далее положениях:

1. Функционально-ориентированные технологии должны строиться с учетом того, что они являются тонкими специальными, прецизионными и наукоёмкими технологиями, в которых технологические воздействия инструментов и средств обработки и обеспечение заданных свойств изделий реализуются на следующих местных уровнях (см. рис. 3).

2. Алгоритм реализации функционально-ориентированных технологий должен выполняться в соответствии со следующей последовательностью: установление особенностей действия эксплуатационных функций на микрозоны, макрозоны и участки изделия; определение параметров микрозон, макрозон и участков изделия, в которых действуют различные эксплуатационные функции; определение необходимых технологических воздействий инструментов и средств обработки на изделие, которые бы соответствовали и были адекватны по результатам действия эксплуатационных функций; ориентация технологических воздействий в микрозоны, макрозоны и участки изделия на базе определенных новых принципов; реализация технологических воздействий в соответствии и адекватно действию эксплуатационных функций; обеспечение заданной совокупности свойств в микрозонах, макрозонах и участках изделия в зависимости от особенностей действия в них эксплуатационных функций.

3. Для выполнения требуемой и качественно новой совокупности свойств изделия необходима реализация следующих видов обеспечения: по свойствам материала; структурное; конструкторское; технологическое; эксплуатационное.

4. Функционально-ориентированные технологии должны реализовываться на всех этапах комплексного технологического процесса изготовления изделия.

5. Функционально-ориентированные свойства изделия должны обеспечиваться на всех этапах его жизненного цикла, а именно: на этапе анализа изделия; проектирования изделия; изготовления изделия; функционирования изделия; совершенствования и модернизации изделия; эволюции изделия; утилизации и ликвидации изделия.

6. Функционально-ориентированные технологии должны обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий, а также специальные нетрадиционные свойства.

При этом заданные, требуемые и предельные свойства изделий обеспечиваются за счет ориентации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на базе следующих восьми особых принципов. На рис. 4 приведена итерационная схема реализации основных принципов ориентации технологических воздействий и свойств.

Итерационный подход дает возможность выполнять синтез функционально-ориентированных технологий посредством реализации приведенных принципов с учетом как последовательных процес-

Рис. 4. Итерационная схема реализации основных принципов ориентации технологических воздействий и свойств

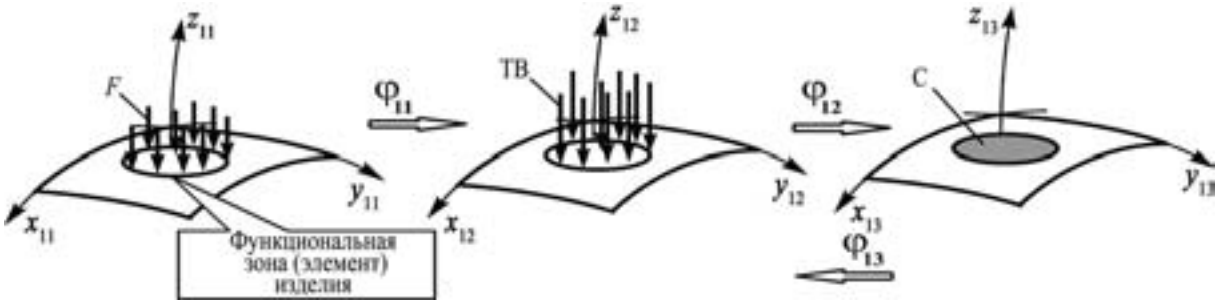


Рис. 5. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию первого принципа ориентации технологических воздействий ТВ и свойств С функционального элемента изделия в зависимости от действия эксплуатационной функции *F*

сов, так и многократных повторяющихся возвратных процессов, выполняемых за счет обратных связей.

Рассмотрим более детально приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств изделия.

На основании *первого принципа* обеспечивается функциональное соответствие особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе изделия (рис. 5) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип отвечает на вопрос: какое технологическое воздействие или свойство изделия нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? Таким образом он обеспечивает заданное свойство функционального элемента в микро-, макрозоне и участке изделия.

Первый принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{11} : F \to \text{ТВ} \\ &\varphi_{12} : \text{ТВ} \to \text{С} \\ &\varphi_{13} : \text{С} \to F \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где φ_{11} — отображение (преобразование) эксплуатационной функции F изделия в технологические воздействия ТВ; φ_{12} — отображение (преобразование) технологических воздействий ТВ в свойства С изделия; φ_{13} — отображение (преобразование) свойств С в технологические воздействия ТВ.

Следует иметь в виду, что представленная система отображений (1) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Также можно отметить, что соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, первый принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

На базе *второго принципа* реализуется выполнение топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента изделия, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на изделие и геометрических параметров элемента обеспечения необходимых свойств (рис. 6) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: куда нужно реализовывать технологические воздействия и где обеспечивать необходимые свойства изделия? Он отвечает за пространственную точность реализации технологических воздействий в заданные функциональные микро-, макрозоны и участки изделия, а также за пространственное расположение в них необходимых свойств изделия. При этом второй принцип ори-

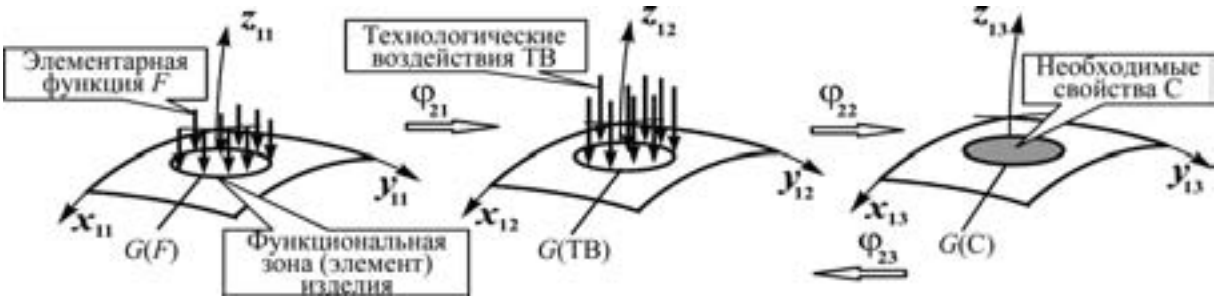


Рис. 6. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию второго принципа ориентации технологических воздействий ТВ и свойств С функционального элемента изделия в зависимости от действия эксплуатационной функции

ентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{21} : G(F) \to G(\text{ТВ}) \\ &\varphi_{22} : G(\text{ТВ}) \to G(\text{С}) \\ &\varphi_{23} : G(\text{С}) \to G(F) \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

где φ_{21} — отображение (преобразование) геометрических параметров зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ изделия в геометрические параметры зоны реализации технологических воздействий G(ТВ); φ_{22} — отображение (преобразование) геометрических параметров зоны реализации технологических воздействий G(ТВ) в геометрические параметры зоны обеспечения свойств G(С) изделия; φ_{23} — отображение (преобразование) геометрических параметров зоны обеспечения свойств G(С) в геометрические параметры зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ изделия.

Здесь также следует иметь в виду, что представленная система отображений (2) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов. А также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, второй принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие геометрических параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Третий принцип ориентации обеспечивает количественное соответствие множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах изделия (рис. 7) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип дает ответ на вопрос: сколько видов, типов или вариантов технологических воздействий нужно применить на изделие в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств? Третий принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделий в зависимости от действующих эксплуата-

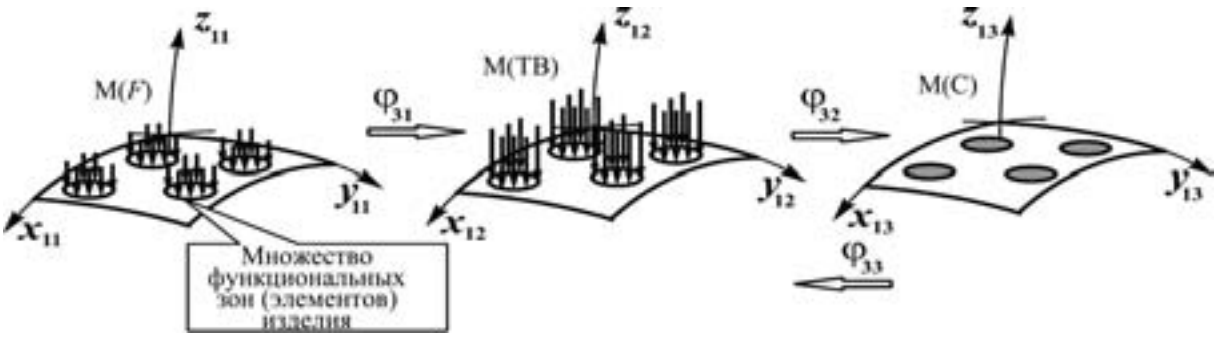


Рис. 7. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию третьего принципа ориентации множества технологических воздействий ТВ и множества свойств С в функциональные элементы изделия в зависимости от действия множества эксплуатационной функции

ционных функций можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{31} : \mathrm{M}(F) \to \mathrm{M}(\mathrm{TB}) \\ &\varphi_{32} : \mathrm{M}(\mathrm{TB}) \to \mathrm{M}(\mathrm{C}) \\ &\varphi_{33} : \mathrm{M}(\mathrm{C}) \to \mathrm{M}(F) \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

где φ_{31} — отображение (преобразование) множества зон действия эксплуатационной функции $\mathrm{M}(F)$ изделия в множество зон реализации технологических воздействий M(TB); φ_{32} — отображение (преобразование) множества зон реализации технологических воздействий M (TB) в множество зон обеспечения свойств M(C) изделия; φ_{33} — отображение (преобразование) множества зон обеспечения свойств M(C) в множество зон действия эксплуатационной функции $\mathrm{M}(F)$ изделия.

В этом случае также следует иметь в виду, что представленная система отображений (3) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, третий принцип может обеспечивать полное или частичное количественное соответствие множеств параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Для *четвертого принципа* ориентации характерно обеспечение адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента изделия (рис. 8) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип отвечает на вопрос: как изменяются свойства в пространстве каждого функционального элемента изделия, и как нужно реализовать технологическое воздействие (постоянное или переменное) на функциональный элемент изделия? Это качественный принцип, но действующий на микроуровне функционального элемента изделия и обеспечивающий возможность изменения функциональных свойств изделия за счет переменных технологических воздействий по заданному закону.

Данный принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции в элементарном объеме материала изделия можно представить следующими отображениями (4):

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{41} : \mathrm{d}F(x, y, z) \to \mathrm{dTB}(x, y, z) \\ &\varphi_{42} : \mathrm{dTB}(x, y, z) \to \mathrm{dC}(x, y, z) \\ &\varphi_{43} : \mathrm{dC}(x, y, z) \to \mathrm{d}F(x, y, z) \end{aligned}\right\}, \qquad (4)$$

где φ_{41} — отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $\mathrm{d}F(x, y, z)$ изделия в элемент технологических воздействий $\mathrm{dTB}(x, y, z)$; φ_{42} — отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $\mathrm{dTB}(x, y, z)$ в элемент свойств $\mathrm{dC}(x, y, z)$ изделия; φ_{43} — отображение (преобразование) элемента свойств

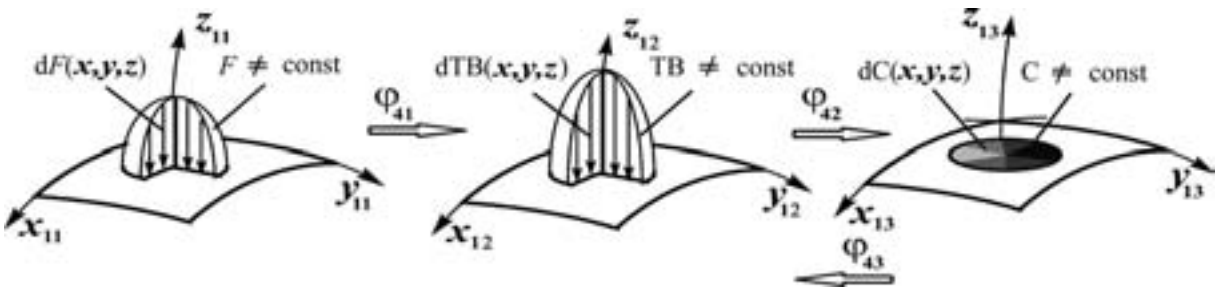


Рис. 8. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию четвертого принципа ориентации переменных технологических воздействий ТВ ≠ const и переменных свойств С ≠ const в функциональный элемент изделия в зависимости от действия переменной эксплуатационной функции *F* ≠ const

$dC(x, y, z)$ в элемент эксплуатационной функции $dF(x, y, z)$ изделия.

При этом четвертый принцип ориентации на уровне всего функционального элемента или зоны может быть описан следующей системой отображений:

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{41} &: \int_V dF(x, y, z) \to \int_V dTB(x, y, z) \\ \varphi_{41} &: \int_V dTB(x, y, z) \to \int_V dC(x, y, z) \\ \varphi_{41} &: \int_V dC(x, y, z) \to \int_V dF(x, y, z) \end{aligned}\right\},$$

где V — объем функционального элемента или зоны изделия.

Можно отметить, что на основании четвертого принципа возможно изменение функциональных свойств микро- или макроэлемента изделия по следующим видам законов: линейное изменение свойств (рис. 9, *а*); поверхностное изменение свойств (рис. 9, *б*); объемное изменение свойств (рис. 9, *в*).

В качестве примера необходимости реализации переменных технологических воздействий по линейному функциональному элементу и обеспечения линейного изменения свойств функционального элемента в зависимости от линейно изменяющейся эксплуатационной функции можно привести резьбовое соединение, в котором по длине резьбы при затяжке элементов обычно действует переменная удельная эксплуатационная нагрузка. Еще одним примером необходимости реализации неравномерных поверхностных свойств можно также привести шаровую опору, в которой действуют по шаровой поверхности различные скорости относительного движения. Для объемного изменения свойств можно привести процесс неравномерного распространения контактных напряжений в объеме материала детали.

Пятый принцип ориентации базируется на адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе изделия (рис. 10) на

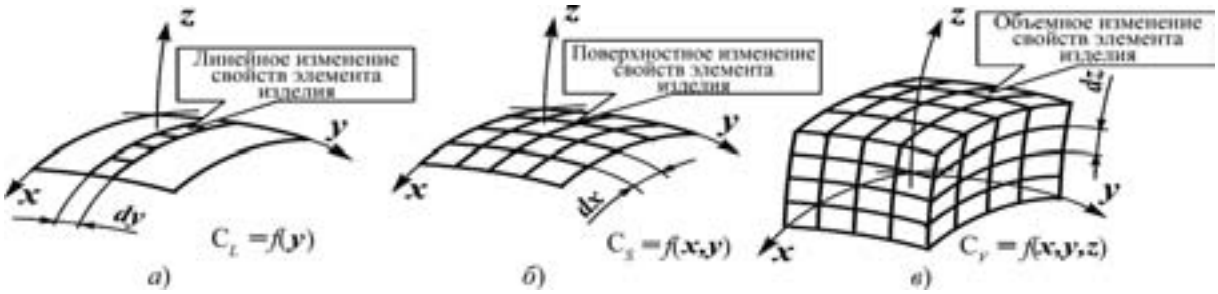


Рис. 9. Гипотетическая схема с вариантами свойств функциональных элементов изделия:
а — линейное изменение свойств, *б* — поверхностное изменение свойств, *в* — объемное изменение свойств

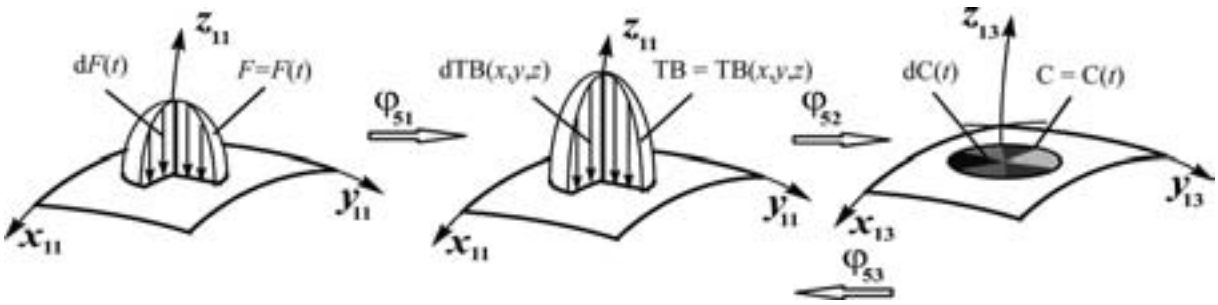


Рис. 10. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию пятого принципа ориентации переменных технологических воздействий ТВ = ТВ(x, y, z) в пространстве и переменных свойств С = С(t) во времени в функциональный элемент изделия в зависимости от действия переменной эксплуатационной функции $F = F(t)$ во времени

каждом уровне глубины технологии. Этот принцип дает ответ на вопрос: как изменяются свойства функционального элемента в пространстве и во времени, и какие технологические воздействия (постоянное или переменное) нужно обеспечить функциональному элементу изделия? Это также качественный принцип, но действующий на микроуровне функционального элемента изделия и обеспечивающий возможность изменения функциональных свойств изделия во времени и в пространстве за счет переменных технологических воздействий по заданному закону.

Пятый принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции в элементарном объеме материала изделия можно представить следующими отображениями (5):

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{511} : \mathrm{d}F(t) \to \mathrm{dTB}(x, y, z) \\ &\varphi_{521} : \mathrm{dTB}(x, y, z) \to \mathrm{dC}(t) \\ &\varphi_{531} : \mathrm{dC}(t) \to \mathrm{d}F(t) \end{aligned}\right\}$$

или (5)

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{512} : \mathrm{d}F(t) \to \mathrm{dTB}(t) \\ &\varphi_{522} : \mathrm{dTB}(t) \to \mathrm{dC}(t) \\ &\varphi_{532} : \mathrm{dC}(t) \to \mathrm{d}F(t) \end{aligned}\right\},$$

где φ_{511} — отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $\mathrm{dF}(t)$ изделия в элемент технологических воздействий $\mathrm{dTB}(x, y, z)$; φ_{521} — отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $\mathrm{dTB}(x, y, z)$ в элемент свойств $\mathrm{dC}(t)$ изделия; φ_{531} — отображение (преобразование) элемента свойств $\mathrm{dC}(t)$ в элемент эксплуатационной функции $\mathrm{d}F(t)$ изделия; φ_{512}— отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $\mathrm{d}F(t)$ изделия в элемент технологических воздействий $\mathrm{dTB}(t)$; φ_{522} — отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $\mathrm{dTB}(t)$ в элемент свойств $\mathrm{dC}(t)$ изделия; φ_{532} — отображение (преобразование) элемента свойств $\mathrm{dC}(t)$ в элемент эксплуатационной функции $\mathrm{d}F(t)$ изделия.

При этом пятый принцип ориентации на уровне всего функционального элемента или зоны может быть описан следующей системой отображений:

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{511} : \int_T \mathrm{d}F(t) \to \int_T \mathrm{dTB}(x, y, z) \\ &\varphi_{511} : \int_T \mathrm{dTB}(x, y, z) \to \int_T \mathrm{dC}(t) \\ &\varphi_{511} : \int_T \mathrm{dC}(t) \to \int_T \mathrm{d}F(t) \end{aligned}\right\} \text{ или}$$

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{512} : \int_T \mathrm{d}F(t) \to \int_T \mathrm{dTB}(t) \\ &\varphi_{512} : \int_T \mathrm{dTB}(t) \to \int_T \mathrm{dC}(t) \\ &\varphi_{512} : \int_T \mathrm{dC}(t) \to \int_T \mathrm{d}F(t) \end{aligned}\right\},$$

где T — длительность изменения параметров в функциональном элементе.

Шестой принцип ориентации обеспечивает структурное соответствие действия множества элементарных функций, реализацию множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего изделия (рис. 11) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип математически можно представить следующей системой отображений:

$$\left.\begin{aligned} &\varphi_{61} : Str\{F, A\} \to Str\{\mathrm{TB}, B\} \\ &\varphi_{62} : Str\{\mathrm{TB}, B\} \to Str\{\mathrm{C}, D\} \\ &\varphi_{63} : Str\{\mathrm{C}, D\} \to Str\{F, A\} \end{aligned}\right\}, \qquad (6)$$

где φ_{61} — отображение (преобразование) структуры множества эксплуатационной функции $F = \{F_1, F_2, F_3, ..., F_m\}$ и множества отношений $A = \{a_1, a_2, a_3, ..., a_n\}$ изделия в структуру множества технологических воздействий $\mathrm{TB} = \{\mathrm{TB}_1, \mathrm{TB}_2, \mathrm{TB}_3, ..., \mathrm{TB}_m\}$ и множества отношений $B = \{b_1, b_2, b_3, ..., b_m\}$; φ_{62} — отображение (преобразование) структуры множества технологических воздейс-

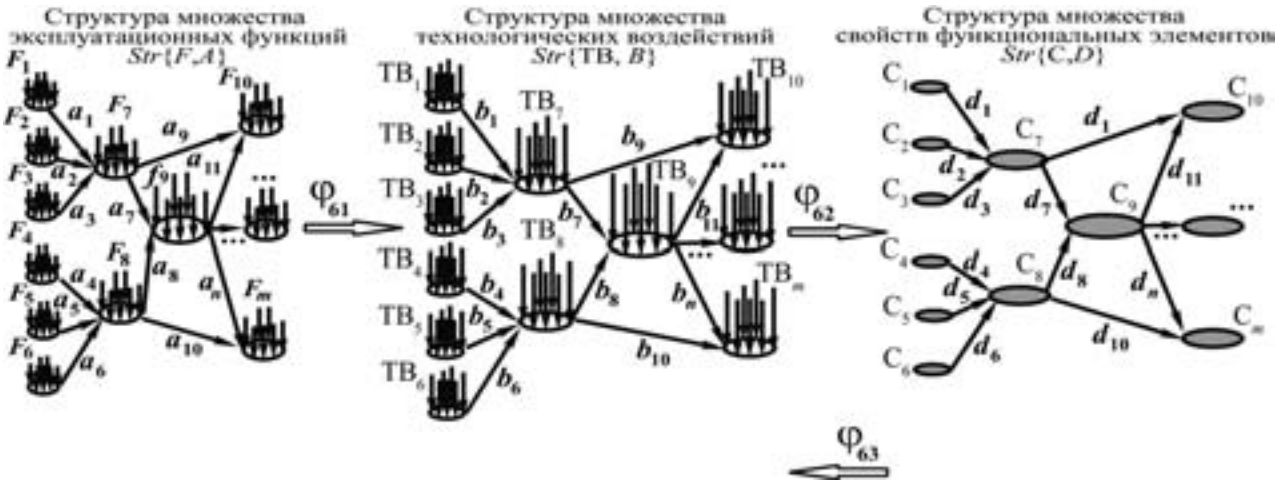


Рис. 11. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию шестого принципа ориентации — структурного соответствия действия множества элементарных функций, множества технологических воздействий и множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств изделия

твий ТВ = {$ТВ_1$, $ТВ_2$, $ТВ_3$, ..., $ТВ_m$} и множества отношений $B = \{b_1, b_2, b_3, ..., b_m\}$ в структуру множества свойств С = {C_1, C_2, C_3, ..., C_m} и множества отношений $D = \{d_1, d_2, d_3, ..., d_m\}$ изделия; φ_{63} — отображение (преобразование) структуры множества свойств С = {C_1, C_2, C_3, ..., C_m} и множества отношений $D = \{d_1, d_2, d_3, ..., d_m\}$ в структуру множества эксплуатационной функции $F = \{F_1, F_2, F_3, ..., F_m\}$ и множества отношений $A = \{a_1, a_2, a_3, ..., a_n\}$ изделия.

Также отметим, что представленная система отображений (6) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом можно отметить, что для шестого принципа ориентации также соответствие является изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, шестой принцип может обеспечивать полное или частичное структурное соответствие множеств параметров ориентации элементарных функций, технологических воздействий и свойств, а также отношений между ними.

Седьмой принцип ориентации дает возможность реализовать процесс адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом (рис. 12) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип можно представить следующим отображением (преобразованием):

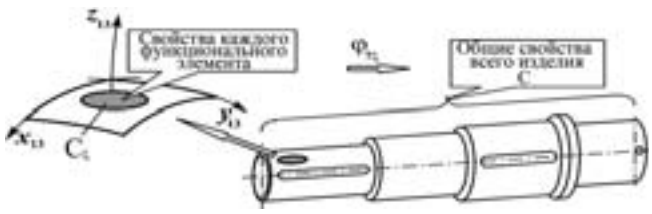


Рис. 12. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию седьмого принципа ориентации — адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом

$$\varphi_{7\xi} : C_\xi \to C, \qquad (7)$$

где $\varphi_{7\xi}$ — функция отображения свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента в предельные или заданные свойства всего изделия в целом; C_ξ — свойство любого ξ-го элемента изделия; С — общие свойства всего изделия в целом.

Можно отметить, что на базе этого принципа ориентации реализуется процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в фун-

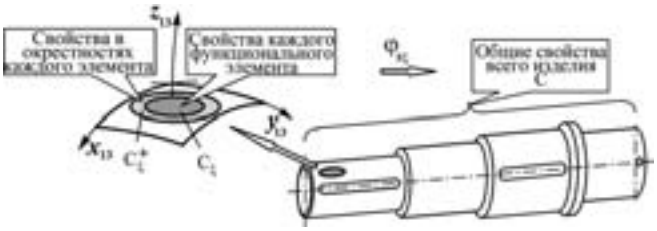


Рис. 13. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию восьмого принципа ориентации — адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом

кциональных зонах и элементах, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.

Последний *восьмой принцип* ориентации дает возможность реализовать процесс адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом (рис. 13) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип можно представить следующим отображением (преобразованием):

$$\varphi_{8\xi} : C_{\xi}^{+} \to C, \qquad (8)$$

где $\varphi_{8\xi}$ — функция отображения свойств в пространстве и во времени в окрестностях каждого функционального элемента в предельные или заданные свойства всего изделия в целом; C_{ξ}^{+} — свойство в окрестности любого ξ-го элемента изделия.

Можно отметить, что на базе этого принципа ориентации реализуется процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в окрестностях функциональных зон и элементов, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.

Приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств изделий дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требуемого или предельного потенциала возможностей изделия при эксплуатации в машине или технологической системе.

Таким образом, приведенные принципы дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств изделия при реализации функционально-ориентированных технологий в зависимости от особенностей эксплуатации изделия. А это позволяет обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий в машине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Михайлов А.Н.** Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2005 г., 12—17 сентября: в 5 т. Т. 2. Донецк: ДонНТУ, 2005. С. 261—275.

2. **Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А.** Методика и основные принципы синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения // Упрочняющие технологии и покрытия. № 7. 2005. С. 3—9.

3. **Michailov Alexsandr, Michailova Elena, Gituni Ahmet.** Conception totale dans la création des technologies fonctionnellement orientés en industries mécaniques // Jhe 32 Internationaly Attendeol Scientific Conference of the Military Technical Academy «Modern Technologits in the 21th Century». Bucharest: MTA, 2007. P. 137—141.

4. **Михайлов А.Н.** Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк: ДонНТУ, 2009. 346 с.

5. **Михайлов А.Н.** Особенности синтеза комбинированных и гибридных функционально-ориентированных макро-, микро- и нанотехнологий // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2010 г., 13—18 сентября: в 5 т. Т. 2. Донецк: ДонНТУ, 2010. С. 189—209.

6. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

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

Рецензент д-р техн. наук В.Ф. Макаров

УДК 621.793

Ю.В. Панфилов, д-р техн. наук
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
E-mail: panfilov@bmstu.ru

Наукоёмкие технологии модификации. Нанесение износостойких и антифрикционных покрытий

Рассмотрены современные наукоёмкие вакуумные технологии модификации и нанесения покрытий, позволяющие значительно повысить износостойкость и антифрикционные свойства поверхностей трения деталей машин и инструментов.

Ключевые слова: твердость; износостойкость; ионно-плазменная обработка; ионно-диффузионная обработка.

Yu.V. Panfilov, Dr. Tech. Sci
(Bauman Moscow State Technical University)

Science intensive technologies of modification. Wear-resistant and antifriction coating

The current science intensive vacuum technologies of modification and coating, allowing to increase wear resistance and antifriction properties of machines elements and tools friction surfaces considerably, is considered in this paper.

Keywords: hardness; wear resistance; ion-plasma surface treatment; ion-diffusion surface treatment.

Требования к поверхностным и объемным свойствам деталей машин и инструментов различны, и в ряде случаев даже антагонистичны. Объемные свойства обеспечивают необходимые прочностные характеристики. Для поверхностей весьма важными являются трибологические свойства: износостойкость, противозадирные свойства, антифрикционность, а также антикоррозионные и антиокислительные свойства. Для повышения первых двух свойств обычно стараются повысить твердость поверхностных слоев. Для достижения этого разработано большое количество уже ставших традиционными технологий, к настоящему времени практически достигших пределов своих возможностей. Значительные дополнительные резервы появились в результате развития наукоёмких технологий, в частности вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев.

Наиболее высокой твердостью из известных элементов обладают алмаз и бор. Большинство веществ с высокой твердостью — химические соединения элементов (рис. 1) металлоподобных соединений девяти α-переходных металлов (титан, вольфрам и др.) с металлоидами (бором, углеродом, азотом, кремнием); некоторые оксиды (алюминия, хрома, циркония и др.); неметаллические соединения (кубическая модификация нитрида бора, карбиды бора и кремния, нитрид кремния), нитрид алюминия. Все эти вещества хрупкие и вследствие этого, а также из-за сложностей получения компактных материалов и их обработки, для изготовления деталей и инструментов применяются редко.

Высокими «врожденными» антифрикционными свойствами обладают материалы со слоистой структурой: дихалькогениды *d*-переходных металлов (дисульфиды молибдена и вольфрама, диселенид ниобия и др.), графит, гексагональная модификация нитрида бора. Из полимерных материалов низкое трение без дополнительных смазочных веществ

III	IV	V	VI	
5 B	6 C	7 N		8 O
13 Al	14 Si			16 S
	22 Ti	23 V	24 Cr	34 Se
	40 Zr	41 Nb	42 Mo	52 Te
	72 Hf	73 Ta	74 W	

Рис. 1. Элементы Периодической таблицы Д.И. Менделеева, перспективные для синтеза износостойких и антифрикционных покрытий

обеспечивают: политетрафторэтилен (фторопласт-4), в меньшей мере другие фторполимеры и сверхмолекулярный полиэтилен. Механические свойства всех этих материалов низкие.

Удовлетворить противоречивым требованиям к поверхностным (высокие износостойкость и твердость, низкие трение и адгезионная активность) и объемным (высокие прочность и ударная вязкость) свойствам можно путем создания композиций с послойным расположением материалов, выполняющих различные функции. В связи с тем, что допустимый износ прецизионных деталей машин и инструментов мал (обычно менее десятых долей миллиметра), толщина поверхностного слоя (или слоев) с заданным комплексом триботехнических свойств может быть очень небольшой.

Весьма эффективны для создания таких поверхностных слоев вакуумные ионно-плазменные технологии. При реализации этих технологий в образовании покрытий и модифицированных слоев участвуют нейтральные и возбужденные частицы (атомы, молекулы и кластеры) с высокой энергией (превышающей в десятки и сотни раз энергию тепловых атомов и молекул) и ионы, энергию которых можно варьировать в широких пределах изменением ускоряющего напряжения. При распылении металлов в активных газовых средах в результате плазмохимических процессов образуются химические соединения. Наибольший интерес для машиностроения представляют соединения *d*-переходных металлов IV—VI групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева с легкими элементами (бором, углеродом, азотом, кремнием, кислородом). При этом можно получать покрытия из металлоподобных соединений, тугоплавких оксидов и неметаллических соединений.

Кроме вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев используют методы химического осаждения из газовой фазы и термовакуумные методы нанесения покрытий.

Методы осаждения из газовой фазы применяются для нанесения твердых покрытий (TiC, Ti(C, N) и др.) на инструменты из твердых сплавов. К их недостаткам относятся необходимость нагрева изделий до высоких температур и выброс в атмосферу вредных продуктов реакций. Последний недостаток можно устранить применяя установки, работающие по замкнутому циклу.

Для образования качественного покрытия при низких температурах деталей необходимо повысить энергию конденсирующихся на них частиц. При соударении с твердой поверхностью частиц с достаточно высокой энергией в микрообъемах происходит образование химических связей без чрезмерного объемного нагрева деталей. Это является основой всех вакуумных ионно-плазменных технологий нанесения покрытий. На рис. 2 приведены характерные режимы ионного воздействия на обрабатываемые поверхности.

В машиностроении применяют четыре группы вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев: ионно-диффузионные, осуществляемые в тлеющем разряде; основанные на катодном распылении в разряде постоянного тока и в высокочастотном разряде; ионное осаждение; ионное легирование (имплантация).

Примером ионно-плазменных методов является ионное азотирование. Ионы азота, образующиеся в тлеющем разряде постоянного тока (в азоте или аммиаке), транспортируются к поверхности деталей, являющихся катодом, и, диффундируя вглубь, образуют азотированный слой. Диффузионные процессы интенсифицируются вследствие повышения температуры при бомбардировке поверхности ионами (обычно до 500...600 °С), а также высокой энергии ударяющихся о поверхность ионов (ускоряющее напряжение — несколько сотен вольт). Ионное азотирование может производиться при более низких температурах и со значительно большей скоростью, чем при традиционных методах азотирования. Кроме азотирования, ионно-диффузионные методы могут быть применены для насыщения поверхностных слоев углеродом, кремнием и другими элементами, а также для получения карбонитридных слоев и т. п.

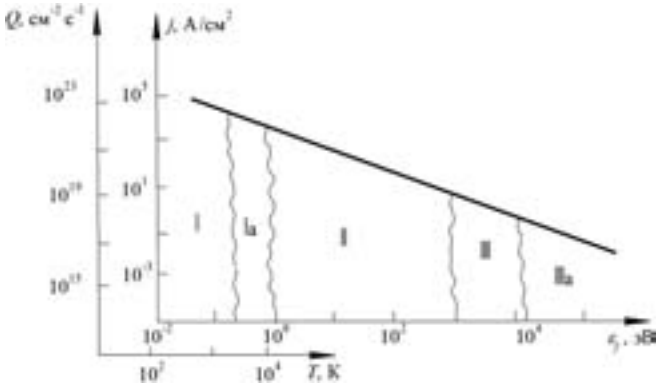


Рис. 2. Характерные режимы взаимодействия плазменных потоков с поверхностью:

I — процессы, имеющие тепловую природу; Ia — низкотемпературные плазменные процессы; II — ионное осаждение (конденсация ионов); III, IIIa — удаление поверхностного слоя обрабатываемого изделия (распыление ионами) и легирование (имплантация) поверхности соответственно

При использовании методов, основанных на явлении катодного распыления, обеспечиваются высокая адгезия покрытия к подложке и качество самого покрытия. В магнетронных распылительных системах высокая эффективность ионизации атомов и молекул рабочих газов (и распыляемых материалов) увеличивает скорость процесса нанесения покрытий (до уровня, характерного для установок с дуговыми испарителями). Термическое воздействие плазмы на обрабатываемый материал небольшое, что дает возможность наносить покрытия на обладающие низкой термостойкостью материалы (например, на полимерные пленки). При встречном расположении в камере двух магнетронов можно наносить практически равномерные по толщине покрытия на неподвижно установленные тела вращения. Это позволяет применять установки магнетронного распыления в машиностроении для нанесения покрытий на детали машин и инструменты.

Системы распыления на постоянном токе используются для нанесения покрытий из токопроводящих материалов, а системы высокочастотного распыления — из диэлектриков. Для повышения качества покрытий их можно наносить с приложением к деталям отрицательного потенциала смещения. Благодаря непрерывной бомбардировке покрытия в процессе его образования ионами инертного газа происходит очистка поверхности от адсорбирующихся атомов и молекул загрязнений.

Применяют методы нанесения покрытий с использованием автономных ионных источников (например, типа Кауфмана).

При применении методов ионного осаждения частицы наносимого материала, приведенного в газообразное состояние, ионизируются и ускоряются в электрическом поле. Энергия ионов при этом возрастает, благодаря чему при их соударении с поверхностью детали, находящейся под отрицательным потенциалом, происходит образование высококачественных покрытий (этому способствует непрерывная самоочистка поверхности бомбардировкой ионами осаждаемого материала). Адгезия и служебные характеристики покрытий повышаются при увеличении (до определенного значения) энергии частиц, задаваемой ускоряющим напряжением.

Ионное легирование или имплантация, основано на том явлении, что при очень больших энергиях ионы проникают в кристаллическую решетку на сравнительно большую глубину, легируя таким образом поверхностный слой детали. Механические свойства и износостойкость модифицированных таким методом поверхностных слоев повысятся также и в результате искажений кристаллической решетки, возникающих при «вбивании» в нее ионов легирующего компонента. Общая толщина упрочненного слоя во много раз больше глубины проникновения имплантируемых ионов. При бомбардировке поверхности, на которую предварительно было нанесено какое-либо тонкое покрытие, происходит «ионное перемешивание». Этот процесс позволяет осуществлять легирование поверхностного слоя практически любым элементом при сохранении преимуществ собственно процесса имплантации.

Комбинированные вакуумные ионно-плазменные технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев совмещают несколько описанных методов.

Все вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий могут включать в себя как физические (состав наносимого материала не изменяется), так и химические процессы (образуются новые соединения). При использовании методов, называемых реактивными, происходят плазмохимические реакции с ионами рабочего газа или специально вводимыми в камеру добавками. Таким образом, можно получать покрытия из разнообразных материалов и в различных комбинациях.

Следует учитывать, что образование покрытий при нанесении реактивными методами происходит в неравновесных условиях. Благодаря этому в тонких слоях могут образовываться химические соединения, по составу, структуре и свойствам сильно отличающиеся от характерных для объемных материалов (получаемых в условиях, близких к равновесным). При определенных режимах нанесения можно получать покрытия в аморфном состоянии.

Покрытия, наносимые ионными методами, имеют следующие отличительные особенности:

— адгезия покрытий к основе высока благодаря интенсивной очистке поверхностей (бомбардировке ионами инертного газа или наносимого материала) и их радиационной активации, а также высокой энергии конденсирующихся частиц;

— для получения высококачественных покрытий нет необходимости повышать температуру основы до высоких значений;

— состав и свойства покрытий можно варьировать в широких пределах, причем можно получать многослойные покрытия как с резким, так и плавным изменением состава от одного слоя к другому;

— покрытия не имеют крупных дефектов и концентраторов напряжений;

— покрытия можно наносить на окончательно обработанные поверхности деталей и инструментов

без существенного изменения геометрических параметров поверхностей.

Основными направлениями улучшения трибологических характеристик покрытий являются следующие: твердо-растворное упрочнение; создание многофазных покрытий, в том числе с дисперсионным упрочнением; нанесение градиентных покрытий с изменением состава и свойств по толщине; формирование многослойных покрытий — модулированных пленочных покрытий, в том числе с периодом модуляции порядка нескольких нанометров, соответствующим максимальному упрочнению покрытий; формирование многослойных покрытий со слоями различного функционального назначения (обеспечивающими высокую износостойкость, низкое трение, защиту от окисления, декоративность); нанесение твердосмазочных покрытий из слоистых веществ, интеркалированных дополнительными компонентами для повышения антифрикционных свойств и долговечности; формирование композиционных антифрикционных материалов с включениями слоистых твердых смазок или мягких металлов.

Для нанесения покрытий на детали машин и инструменты применяются вакуумно-дуговые методы: КИБ (конденсация при ионной бомбардировке) и РЭП (реактивное электронно-плазменное напыление).

В основе КИБ лежит генерация потока вещества из катодных пятен вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда в парах материала катода. Анодом служит корпус установки или специальная деталь (в установках с плазменным ускорителем). Поток частиц (атомов, ионов и мелких капель) конденсируется на поверхности детали, образуя при введении в камеру химически активного газа соответствующее химическое соединение.

РЭП основано на том, что испаряется материал анода, нагреваемый электронами, эмиттируемыми нагретым катодом. Испаряемый металл частично ионизируется, и ионы ускоряются по направлению к обрабатываемым деталям. Капельная фаза отсутствует.

Для создания износостойких покрытий реактивными методами наиболее эффективными базовыми металлами являются титан, алюминий и хром. Из металлоидов, образующих с этими металлами твердые химические соединения, наиболее подходят азот, кислород и углерод (в виде летучих соединений). В качестве легирующих элементов могут применяться *d*-переходные металлы: алюминий, кремний, кобальт и многие другие элементы.

Наиболее широко применяются в качестве износостойких и декоративных покрытий системы Ti—N. Их применение позволило в несколько раз повысить долговечность режущих инструментов из быстрорежущих сталей и деталей штампов. Эти покрытия весьма эффективны для подвижных контактных уплотнений. Детали из легированных сталей и твердых сплавов заменяют деталями из нелегированных сталей с нитридтитановыми покрытиями. Широко применяют декоративные покрытия из нитрида титана. Цветовая гамма таких покрытий не уступает цвету золота, износостойкость — значительно выше.

Кроме покрытий из мононитрида титана (TiN) нашли применение многофазные покрытия, содержащие также твердый раствор азота в титане и нитрид другого состава (Ti_2N). Диапазон свойств расширяется путем легирования нитридтитановых покрытий алюминием, ванадием, углеродом и другими элементами. Легированные покрытия более стабильны во времени и при высоких температурах. Рабочие температуры и стойкость против окисления у покрытий, легированных алюминием, повышается благодаря образованию на поверхности плотной пленки оксида алюминия (Al_2O_3). Покрытия из нитрида титана, легированные алюминием (TiAlN) и углеродом (TiCN), более эффективны для повышения стойкости режущего инструмента.

Для нанесения покрытий из нитрида титана применяют, главным образом, КИБ и магнетронный метод.

Применение покрытий систем Al—N и Al—O, наносимых магнетронным методом, наиболее перспективно для повышения износостойкости и эрозионной стойкости деталей из алюминиевых сплавов. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на технологические процессы нанесения покрытий из соединений алюминия, является парциальное давление реакционноспособного газа. При оптимальном постоянном давлении рабочего газа (аргона) общие для систем Al—N и Al—O зависимости представлены на рис. 3.

При повышении давления реакционноспособного газа при незначительном снижении скорости образования покрытия резко возрастает микротвердость и снижается интенсивность изнашивания. Покрытие состоит из твердого раствора (или псевдораствора) активного элемента в металле и включений соответствующего химического соединения. При определенном давлении активного газа образуется покрытие, представляющее собой химическое соединение стехиометрического состава с максимальными значениями твердости и износостойкости. Скорость осаждения покрытия остается еще достаточно высокой.

Превышение определенного значения парциального давления активного газа приводит к резко-

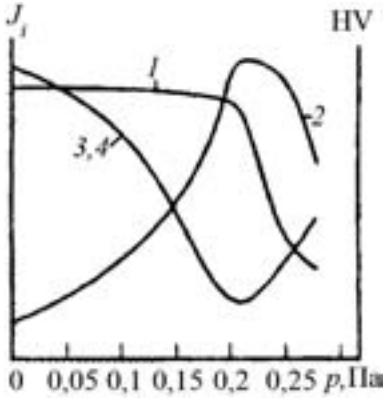


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения покрытия (*1*), микротвердости HV (*2*) и интенсивности линейного (*3*) и массового (*4*) изнашивания покрытий Al—N и Al—O от парциального давления *p* реакционно-способного газа N_2 или O_2

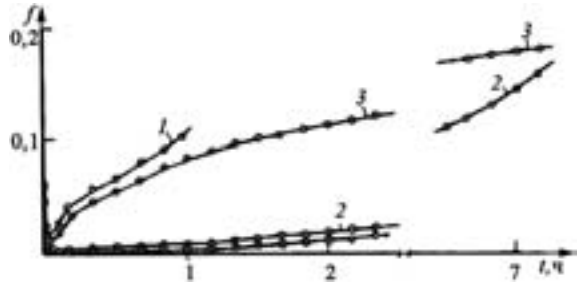


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения *f* покрытий на основе MoS_2 от длительности *t* испытаний:

1 — покрытие MoS_2; *2* — MoS_2D_x; *3* — MoS_2 с подслоем MoN_2 (D_x — дополнительный элемент)

му снижению скорости образования покрытия (вследствие образования на поверхности распыляемой мишени слоя химического соединения алюминия с активным газом), сопровождающемуся снижением твердости и износостойкости. Следовательно, существует область парциальных давлений реакционно-способного газа, при которых с достаточно высокой скоростью образуется плотное покрытие стехиометрического состава с высокими твердостью и износостойкостью.

Вакуумные ионно-плазменные технологии позволяют наносить антифрикционные покрытия из дихалькогенидов (MoS_2, WS_2 и др.) без использования связующих. Обычно при нанесении таких покрытий распыляется ионами инертного газа спрессованная из соответствующих порошков мишень. Предварительная очистка поверхности ионами обеспечивает прочную адгезионную связь покрытия с основой. Такие покрытия перспективны для точных подвижных сопряжений машин, работающих в высоком вакууме, где газовыделение, обычное для покрытий со связующими, недопустимо.

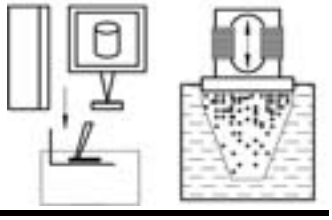
Весьма важным фактором при нанесении покрытий MoS_2 является температура подложки. При температуре ниже 373 К образуется покрытие с квазиаморфной структурой и низкой антифрикционностью. Наиболее высокими триботехническими свойствами обладают покрытия с высокой степенью совершенства кристаллической структуры, наносимые при более высоких температурах. Однако при температуре подложки более 923 К наблюдается прогрессирующая потеря серы, сопровождающаяся потерей антифрикционных свойств. Ионно-плазменная технология позволяет легировать (интеркалировать) дихалькогенидные покрытия и наносить их с износостойким подслоем. Предварительное нанесение износостойкого подслоя увеличивает несущую способность и длительность работы покрытия, а введение в процессе нанесения покрытий некоторых дополнительных элементов позволяет снизить значения коэффициента трения (рис. 4).

Дополнительными резервами повышения долговечности дихалькогенидных покрытий является создание в поверхностном слое детали (или в предварительно нанесенном износостойком подслое) ионным травлением регулярного микрорельефа с последующим заполнением твердой смазкой, а также создание композиционных покрытий металл—твердая смазка.

Значительный интерес для практики представляют фторорганические (фторопластовые) покрытия, наносимые или высокочастотным распылением мишени из фторопласта-4 (политетрафторэтилена), или тлеющим разрядом в парах фторорганических соединений (например, фтор керосина). Такие покрытия обладают прекрасными антиадгезионными и антифрикционными свойствами (практически не уступающим свойствам блочного фторопласта-4).

Вакуумные ионно-плазменные технологии нашли достаточно широкое применение при нанесении покрытий на режущие и деформирующие инструменты, для создания поверхностей трения уплотнений (контактных и газодинамических) и т. п. В будущем применение этих технологий создания поверхностей триботехнического назначения с высокими антикоррозионными свойствами в точном машиностроении, приборостроении и инструментальном производстве будет расширяться благодаря возможности получения поверхностных слоев с уникальными свойствами (недостижимыми при использовании других методов), экологической чистоте и незначительному расходу материалов (как правило, недефицитных).

Рецензент д-р техн. наук В.Ф. Макаров



УДК 669, 535

А.А. Шатульский, д-р техн. наук,
М.А. Шаповалова, канд. техн. наук
(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва)
E-mail: shatulsky@rgata.ru

Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения

Рассмотрены возможности использования методов быстрого прототипирования для изготовления металлических заготовок из промышленных сплавов. Показано, что методы селективного лазерного спекания (SLS) позволяют изготавливать заготовки из титановых сплавов и сталей со свойствами на уровне свойств отливок при значительном сокращении времени технологической подготовки производства.

Ключевые слова: методы быстрого прототипирования; селективное лазерное спекание; литые заготовки.

A.A. Shatulsky, Dr. Tech. Sci,
M.A. Shapovalova, Cand. Tech. Sci
(*Solovjov Rybinsk State Academy of aviation technology*)

Application of prototyping methods for making blanks

The capabilities of rapid prototyping methods for making metal blanks of commercial alloys are considered in this paper. It is shown, that selective laser sintering (SLS) methods allow to produce Ti-alloy and steel blanks with properties similar to properties of castings, with considerable time reduction of process engineering.

Keywords: rapid prototyping methods; selective laser sintering; casting blocks.

Характерной особенностью современного машиностроительного производства является значительное увеличение удельного веса единичных изделий или изделий, выпускаемых мелкими сериями. Естественно, что в этих условиях многократно возрастают требования к срокам и стоимости технологической подготовки производства. Поэтому актуальной является задача внедрения в производство технологий и соответствующего оборудования для оперативного изготовления изделий сложной формы по их компьютерным моделям.

Подобные технологии, получившие название CIM (Compact Intelligent Manufacture) компактного интеллектуального проектирования и новые технологии быстрого прототипирования RP (Rapid Prototyping), или послойный синтез моделей, основанные на использовании компьютеров, технологических лазеров или других мощных источников энергии [1], ведущие промышленные фирмы начали использовать с конца 1980 гг.

Построение прототипа обычно происходит на основе твердотельной модели из CAD-систем или модели с замкнутыми поверхностными контурами. Эта модель разбивается на тонкие слои в поперечном сечении с помощью специальной программы, причем толщина каждого слоя равна разрешающей способности оборудования по Z-координате. Обычно при разбиении сразу задается и припуск на механическую обработку. Построение модели происходит послойно до тех пор, пока не будет получен физический прототип.

Возможность осуществления таких технологий стала реальностью благодаря интеграции последних достижений в области квантовой электроники и нелинейной оптики, информационных

технологий, физики и химии высокомолекулярных соединений, прецизионной механики, появлению высокопроизводительных компьютеров, мощных источников энергии и надежных методов и систем управления процессами.

Сложность реализации процесса (получение модели или заготовки) заключается в том, что приходится в нестационарных условиях (и в режиме реального времени) решать балансовое уравнение, включающее в себя приход энергии от источника и ее расходование на оплавление и спекание материала или протекание какой-либо химической реакции. Поэтому до настоящего времени на стадии отладки процесса широко используются прямые эксперименты. Кроме того, на качество изделия существенное влияние оказывают многие параметры, и, прежде всего, скорость перемещения стола, химическая и размерная однородность используемых материалов, обеспечение стабильности прихода энергии в условиях сложной переменной геометрии прототипа. Поэтому при реализации подобных технологий особое внимание необходимо уделять качеству исходных материалов, точности описания геометрической формы изделия и точности позиционирования рабочего органа установки в пространстве.

В настоящее время существует большое число технологий и методов быстрого прототипирования [1, 2]: лазерная стереолитография — SLA (Stereo Litografi Apparatus), селективное лазерное спекание — SLS (Selective Laser Sinerung), послойное склеивание пленочных материалов — LOM (Laminatet Object Manufacturing), послойное нанесение нитевидного полимера — FDM (Fused Deposition Modeling), нанесение жидкого расплавленного модельного материала или связующего состава с помощью многоструйных головок по типу струйных принтеров — MJM (Multi Jet Modeling), осаждение расплавленного металла — FMD (Fused Metal Deposition) и DMD (Direct Metal Deposition).

В качестве одного из наиболее перспективных методов прямой лазерной фабрикации металлических заготовок в настоящее время рассматривается метод послойного селективного лазерного спекания объемных изделий из порошков [2]. Здесь под селективностью понимается возможность сканирования лазерным лучом свободной поверхности порошкового металлического материала по заданному контуру с учетом дозировки лазерного излучения в каждой точке. При этом объемное изделие создается путем послойного напекания порошка под действием сфокусированного лазерного луча. Специфика такой задачи и ее отличие от известной технологии лазерной наплавки связаны с необходимостью получения как толстых, так и тонких (менее 0,1 мм) спеченных структур с пространственным разрешением по слою 0,1...0,3 мм. Нанесение и оплавление порошка осуществляется послойно по заданному для каждого слоя контуру. Эта схема имеет наиболее широкое применение в существующих экспериментальных и промышленных установках. Данный метод дает возможность получать сложные пространственные фигуры и таким образом изготавливать как готовые заготовки, так и формировать на поверхности изделия объемные элементы (например, при ремонте). Благодаря широкому выбору порошковых материалов можно изготавливать изделия, имеющие требуемые эксплуатационные свойства.

При селективном лазерном спекании по технологии SLS-модуль нанесения слоев представляет собой ролик, совершающий возвратно-поступательные движения над бункером и рабочей зоной для нанесения слоя заданной толщины, и вращательное движение для уплотнения слоя порошка на рабочей поверхности.

Слой порошка наносят на горизонтальную поверхность (рабочую зону), прокатывают подогретым валиком (рис. 1) и лучом лазера спекают контуры слоев трехмерной модели на толщину 0,05...0,20 мм. Далее наносят новый слой порошка и операции повторяют, наращивая деталь по высоте. Таким образом, SLS-технологией можно изготовить деталь произвольной формы.

Процесс построения детали состоит из нескольких этапов:

1. Обработка CAD файлов. Объемная математическая модель (ОММ) детали (рис. 2), выполненная в форматах IGES, STEP, PRT или STL транслирует-

Рис. 1. Схема рабочей зоны установки для изготовления моделей по SLS-технологии (яркое белое пятно в рабочей зоне — пятно лазера, черная область — синтезированный материал):
1 — разравнивающий ролик; *2* — слой порошка над раздаточным бункером; *3* — рабочая зона

ся в специализированную CAD/CAM программу PHENIX PROCESSING, которая предназначена для выполнения следующих функций: ввода и вывода файлов в разных форматах; устранения дефектов и неточностей ОММ; коррекции ОММ в соответствии с требованиями конструктора; внесения изменений, необходимых для обеспечения требуемой точности геометрических размеров готовой детали, например, для тонкостенных деталей строятся элементы поддержки, чтобы избежать коробления (при построении) и поломки (при извлечении и очистке); разбиение детали на участки.

2. Разбиение модели происходит путем разрезания каждого участка модели на слои в соответствии с выбранной осью. Выбирается траектория движения луча лазера.

3. Создание и синтез слоев. Нанесение, выравнивание и уплотнение порошка, как уже отмечалось, производится специальным роликом с получением слоев толщиной порядка 30...60 мкм. Синтез порошка каждого участка детали осуществляется в ходе двухмерного сканирования (перемещения луча лазера в плоскости), в ходе которого происходит спекание (сплавление) верхнего слоя с предыдущим (рис. 3). Точность построения детали составляет 50 мкм. Локальный объем синтезированного материала и соответственно толщина слоя зависят от следующих факторов: мощность лазера, диаметр луча лазера, скорость сканирования, температура печи. Минимальная толщина слоя при построении объекта для металлического порошка составляет 100 мкм, для керамического 30 мкм. Использование печи в рабочей зоне построения позволяет уменьшить температурный градиент при взаимодействии лазера и материала детали и улучшить поглощение энергии материалом, что снижает коробление и уровень внутренних напряжений.

Рис. 2. Объемное трехмерное изображение проектируемой детали

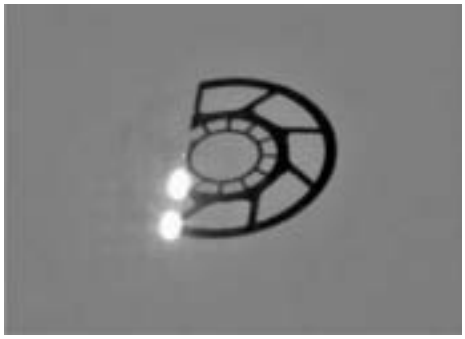


Рис. 3. Процесс лазерного спекания

4. Доводка. После завершения процесса изготовления металлической детали, ее убирают с рабочей платформы, обдувают от остатков порошка и удаляют элементы поддержки. В зависимости от предъявляемых требований заготовка может подвергаться механической и термической обработке. Примеры полученных металлических заготовок показаны на рис. 4 (материал — коррозионно-стойкая сталь, инструментальная сталь, никель; точность — 50 мкм на 120 мм; минимальный размер элемента — 150 мкм; окончательная обработка — полирование) Свойства деталей при этом сравнимы со свойствами деталей, полученными методом литья.

Типичным представителем таких установок является лазерный комплекс Phenix PM100 (рис. 5).

Существует ряд аддитивных технологий DMD и DMF, которые позволяют получать непосредственно металлические изделия, и в ряде случаев являются удачной альтернативой обычным технологиям их изготовления. Анализ литературных данных и результатов промышленного опробования и внедрения показывает, что число этих технологий более десяти, по числу фирм-производителей оборудования. Их условно можно разделить на три группы.

Первая — «*a la 3D Systems*», т.е. выращивание детали на платформе, на которой слой за слоем идет построение модели и в конце процесса построения модель оказывается «зарытой» в массиве порошка.

Вторая группа технологий предполагает использование четырех- или пятиосевого движения для позиционирования (как в промышленных роботах) рабочей головки, через которую подается модельный материал — металлический порошок.

Рис. 4. Примеры изготовленных металлических деталей

Рис. 5. Установка Phenix PM100 для послойного прямого синтеза изделий методом спекания порошка

Третья группа — это группа специальных технологий, не подпадающих под первые две.

Необходимо отметить, что процесс выращивания металлических изделий по технологии *3D Systems* не совсем точно соответствует аббревиатуре DMD, так как сначала из стального порошка строится достаточно хрупкая матрица («грин-модель»), которая затем в специальной печи в инертной атмосфере подвергается операции инфильтрации — в течение 20...30 ч пропитывается специальным расплавом (например расплавленной бронзой), что и придает металлической модели окончательные свойства (состав изделия — 55 % сталь, 45 % бронза).

Установки и технологии получения металлических деталей, относящихся ко второй группе, весьма многочисленны и отличаются типом применяемых лазеров и системой перемещения рабочего стола.

Установка СЛС-80, изготовленная в Институте проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН (рис. 6, *а*) состоит из технологического CO_2-лазера средней мощности излучения (до 2,5 кВт), пятикоординатного стола-манипулятора типа ВИСП-125А, внешнего оптического тракта, дозатора подачи порошка с коаксиальным вводом вещества и системой фокусировки излучения.

Типичным представителем установок SLS-технологии, представленных на мировом рынке, является установка DMD 505 компании Trumpf, показанная на рис. 6, *б*. Установка укомплектована пятикиловаттным CO_2-лазером и оснащена пятикоординатным манипулятором.

Дальнейшим совершенствованием DMD-технологий являются разработки фирмы ARCAM, которые предназначены для непосредственного изготовления металлических деталей с помощью электронно-лучевого сплавления (EBM). Разработки технологии EBM были начаты в 1990 г., первая промышленная установка была поставлена в марте 2003 г., на данный момент насчитывается более 40 установок по Европе, Азии и США.

Схема производства деталей представлена на рис. 7.

Сущность технологии электронно-лучевого сплавления (EBM) заключается в следующем. Электроны испускаются нитью накала, разогретой до 2500 °С; проходя через анод, электроны разгоняются до половины скорости света; пучок электронов фокусируется магнитным полем, еще одним магнитным полем контролируется отклонение пучка; при достижении электронами порошка, кинетическая энергия превращается в тепло, и металлический порошок сплавляется.

Рис. 6. Внешний вид технологического комплекса СЛС-80 ИПЛИТ РАН (*а*) и установки прямого нанесения металла DMD 505 (*б*)

Рис. 7. Схема производства металлических заготовок на установках фирмы ARCAM

Мощность регулируется количеством электронов. Схема процесса представлена на рис. 8.

Данная технология производства готовых металлических деталей отличается высокой экономичностью, высокой точностью (до 0,1 мм) получаемых заготовок (для которых необходимо только окончательное полирование). Так как построение деталей осуществляется при высокой мощности излучения (до 4 кВт), то обеспечивается высокая температура построения, а вследствие того, что сплавление происходит в вакуумной камере, то исключается вероятность образования различных неметаллических включений. Для получения заготовок используются

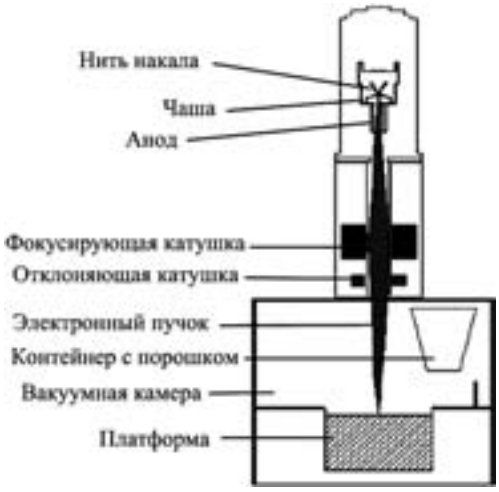


Рис. 8. Схема установки при электронно-лучевом спекании порошка

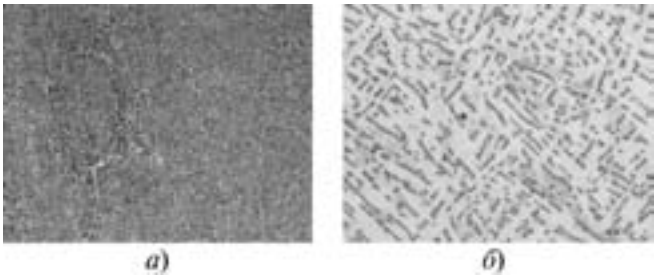


Рис. 9. Микроструктура сплава Ti_6Al_4V:
а — ×200 мкм; *б* — ×20 мкм

чистые по химическому составу, без добавок и связующих порошки.

При построении деталей, благодаря глубокому вакууму $<10^{-4}$ мм рт. ст., маленькому пятну сплавления, быстрому охлаждению из жидкого состояния в твердое и постоянному уровню энергии в пятне удается получить неизменный химический состав по всему объему.

На рис. 9. представлена микроструктура титанового сплава Ti_6Al_4V. Микроскопический анализ показывает, что сплав имеет мелкозернистую микроструктуру, лучшую чем у литейного Ti_6Al_4V, содержащую слоистую α-фазу с большими β-зернами. Как показали механические испытания (таблица), сплав, получаемый методом электронно-лучевого сплавления, обладает свойствами, характерными для сплава после естественного старения.

Механические свойства беспримесного сплава ARCAM Ti6Al4V ELI

Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести σ_{02}, МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость HRC	Выносливость σ_{-1}, МПа	Модуль упругости, ГПа
950...990	910...940	14...16	30...35	600	120

Таким образом, эффект от использования RP-технологий проявляется в значительном сокращении времени и затрат (в десятки раз) на изготовление заготовок, а в некоторых случаях и готовых деталей, а также в повышении качества разработки. Конструктор получает рабочую модель почти так же легко и быстро, как чертеж с принтера или плоттера, что позволяет значительно повысить эффективность его работы, а технолог, минуя затратную по времени и стоимости стадию изготовления технологической оснастки, получает возможность изготовить заготовку из широкой номенклатуры сплавов. Основной причиной, сдерживающей широкое внедрение подобных технологий в реальное машиностроительное производство, является высокая стоимость необходимого оборудования и высокие требования к качеству исходных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панченко В.Я.** Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М.: Физмалит, 2009. 664 с.

2. **Шишковский И.В.** Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физмалит, 2009. 424 с.

Рецензент д-р техн. наук В.В. Морозов

УДК. 621.9.048.6

В.М. Приходько, чл. кор. РАН,
В.Ф. Казанцев, д-р физ.-мат. наук,
Р.И. Нигметзянов, канд. техн. наук,
Д.С. Фатюхин, канд. техн. наук
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет)
E-mail: mitriy2@yandex.ru

Наукоёмкие технологии в машиностроении с применением ультразвука

Изложены научные положения, на которых базируются наукоёмкие ультразвуковые технологии. Приведено описание ультразвукового технологического оборудования. Рассмотрены основные направления применения ультразвуковых технологий в машиностроении.

Ключевые слова: ультразвук; наукоёмкие технологии; машиностроение; колебания; кавитация; акустические потоки.

V.M. Prihod'ko, A.M. RAS,
V.F. Kazancev, Dr. Tech. Sci,
R.I. Nigmetzyanov, Cand. Tech. Sci,
D.S. Fatyukhin, Cand. Tech. Sci
(Moscow State Automobile & Road Technical University)

Science intensive technologies with ultrasound application

The scientific positions on which the science intensive ultrasonic technologies are based, are stated in this paper. The description of ultrasonic process equipment is given. The basic directions of ultrasonic technologies in machine-building application are considered.

Keywords: ultrasound; science intensive technologies; machine-building; vibrations; cavitation; acoustic streams.

Ультразвуковые колебания в технологических процессах широко применяются, охватив практически все процессы, начиная от металлургии и заканчивая машиностроением [1].

Благодаря своим положительным, а иногда и уникальным проявлениям ультразвуковая технология сегодня представлена практически во всех процессах основного и ремонтного производства различной техники, в особенности точного машиностроения и приборостроения. Использование ультразвука в технологических процессах получения и обработки материалов и веществ позволяет снизить себестоимость процесса или продукта, получать новые продукты или повысить качество существующих, интенсифицировать традиционные технологические процессы, уменьшить негативное воздействие применяемых технологий на окружающую среду.

Среди многих возможных применений ультразвука следует выделить основные, использование которых позволяет существенно повысить надежность и долговечность деталей и узлов изделий машиностроения. Это ультразвуковая очистка, размерная обработка, ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование, ультразвуковая сварка, а также ультразвуковая обработка давлением.

Научные положения, на которых базируется ультразвуковая технология. Среди многочисленных технологических процессов, связанных с применением ультразвуковых колебаний, особое место занимают технологические процессы, протекающие в жидкой среде. Это — очистка, дегазация, эмульгирование и др.

Воздействие ультразвуковых колебаний на жидкую среду — это, по существу, действие периодических сжатий и растяжений на любой выделенный объем жидкости. Растягивающие силы настолько велики, что могут привести к образованию каверн, т.е. пузырьков, заполненных паром окружающей их жидкости. Последующая фаза сжатия ведет к тому, что пар в пузырьке конденсируется, а сам пузырек исчезает — схлопывается. Через период картина повторяется. Это явление называется паровой кавитацией.

Установлено, что при малых амплитудах звукового давления P_a пузырек совершает гармонические колебания. С увеличением амплитуды звукового давления характер пульсаций пузырька принципиально изменяется [2]. На рис. 1 приведен

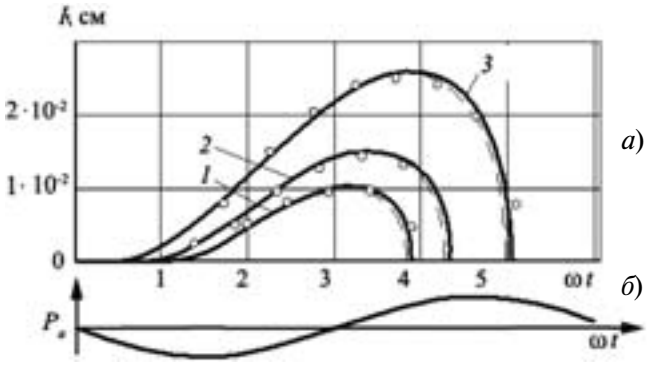


Рис. 1. Сравнение пульсаций экспериментально наблюдаемых (*а*) кавитационных пузырьков с расчетными пульсациями (*б*) при различных амплитудах звукового давления P_m, МПа:
1 — 0,175; *2* — 0,2; *3* — 0,275

расчетный и экспериментальный характер изменения радиуса R кавитационного пузырька (полости) в зависимости от времени при больших амплитудах звукового давления.

Как следует из графика, в полупериод растяжения жидкости (отрицательного звукового давления) наблюдается резкое увеличение радиуса полости, при этом R_{max} в 100—300 раз превышает начальное значение R_0. Эта полость, достигнув максимального значения, резко сокращается — «захлопывается». В момент захлопывания давление и температура парогазовой смеси внутри пузырька резко возрастают и могут достигать: давление — сотен мегапаскалей, а температура — 800...1000 °С. Такие давления вызывают пластическую деформацию или иные повреждения (эрозию) на поверхности твердого тела.

Анализ результатов экспериментальных исследований формирования кавитационной области позволяет сделать следующие выводы: с ростом амплитуды смещения, эрозионное воздействие кавитации увеличивается, при этом зона кавитационной области локализуется у поверхности излучателя; наибольший объем зоны кавитационной области, обладающей способностью к эрозионному воздействию, наблюдается при амплитудах смещения порядка 7...8 мкм; в ближней к излучателю зоне (2...5 мм) эрозионная активность жидкости растет с увеличением амплитуды смещения по закону, близкому к квадратичному.

Формирование сплошной кавитационной зоны у поверхности излучателя при амплитуде смещений ξ_m >10...12 мкм сопровождается сильным

поглощением акустической энергии, затрачиваемой на образование и поддержание кавитации, что приводит к появлению мощных гидродинамических потоков, существенно превышающих по скорости потоки, образующиеся в отсутствие кавитации [1].

Таким образом, в поле мощных ультразвуковых колебаний в жидкости мы сталкиваемся с двумя основными явлениями — это ультразвуковая кавитация и акустические потоки.

Одним из наиболее перспективных направлений в области акустики твердого тела является исследование воздействия ультразвуковых колебаний в процессе пластического деформирования металлов.

Воздействие ультразвука на процессы пластического деформирования обусловлено его влиянием на свойства и структуру деформируемого металла, контактные условия, изменение схемы напряженного состояния и в некоторых случаях дискретным и динамическим характером приложения нагрузки. На рис. 2 показано влияние ультразвуковых колебаний на статическое напряжение σ при растяжении монокристалла цинка.

Включение ультразвука при напряжениях в образце выше предела упругости вызывает снижение статического напряжения примерно на 40 % (штриховая линия на кривой *1*). После выключения колебаний статическое напряжение достигает первоначального значения. Эффект повторяется при повторных включениях. Если растяжение осуществляется при непрерывном воздействии ультразвука (кривая *2*), то кривая «напряжение—деформация» имеет более пологий ход.

Максимальное снижение сил трения наблюдается при коллинеарности вектора колебательной скорости v_m вектору направленного движения v_0.

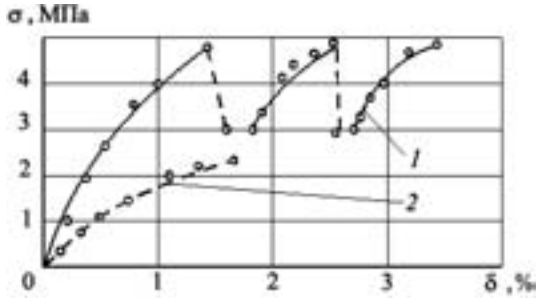


Рис. 2. Снижение статических напряжений под воздействием ультразвуковых деформаций (эффект Блаха—Лангенекера):
1 — при периодическом включении и выключении ультразвуковых колебаний; *2* — при непрерывном воздействии ультразвука

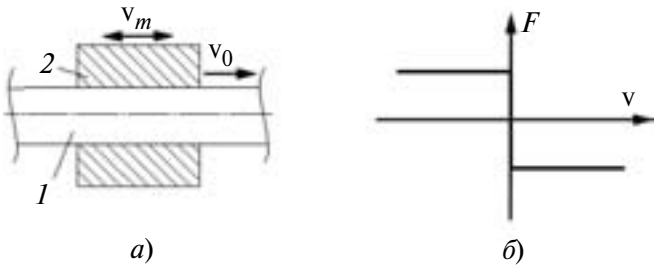


Рис. 3. Взаимодействие двух трущихся деталей при ультразвуковых колебаниях одной из них:
а — схема взаимодействия; *б* — зависимость сил трения от скорости относительного перемещения; *1* — стержень; *2* — втулка

Поясним это на следующем примере (рис. 3). Рассмотрим силы трения на границе стержня *1*, движущегося поступательно со скоростью v_0 и цилиндра *2*, охватывающего этот стержень и совершающего осевые колебания с амплитудой колебательной скорости v_m.

Такая модель описывает процесс волочения, где стержень *1* — это заготовка, а цилиндр *2* — фильера. Сила трения в первом приближении не зависит от величины относительной скорости (рис. 3, *б*) и определяется только величиной нормального давления и коэффициентом трения между материалами.

Теоретический анализ показывает, что средняя за период сила трения зависит от соотношения между постоянной скоростью v_0 и амплитудой колебательной скорости v_m:

$$F_{тр} = F_{т0}\left[1 - \frac{2}{\pi}\arccos\left(\frac{v_0}{v_m}\right)\right].$$

Зависимость относительного изменения силы от отношения $x = v_0/v_m$ представлена на рис. 4.

Эффективность снижения трения под действием ультразвуковых колебаний зависит от угла

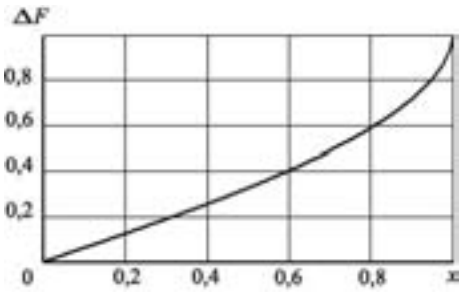


Рис. 4. Зависимость относительного изменения сил трения ΔF от отношения $x = v_0/v_m$

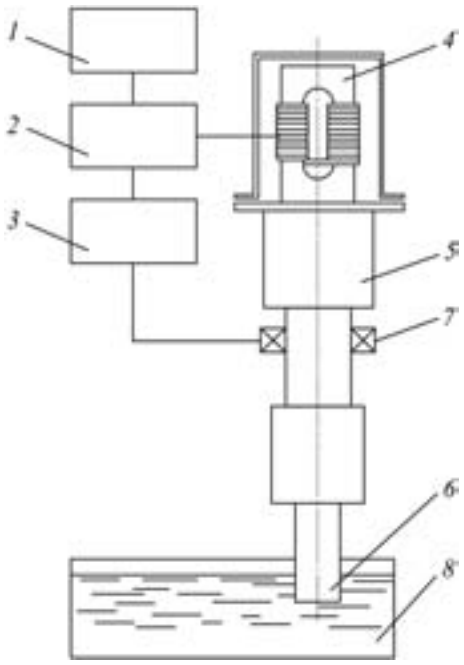


Рис. 5. Общая схема ультразвуковой технологической установки: *1* — устройство подмагничивания; *2* — ультразвуковой генератор; *3* — система поддержания заданного режима; *4* — магнитострикционный преобразователь; *5* — ультразвуковой волновод-концентратор; *6* — ультразвуковой излучатель (инструмент); *7* — датчик акустической обратной связи; *8* — технологическая среда (жидкость при ультразвуковой очистке)

между векторами колебательной скорости и скорости постоянного движения. Уменьшение коэффициента трения максимально при совпадении векторов и минимально при взаимно-перпендикулярной их ориентации.

Ультразвуковое технологическое оборудование. Эффективность ультразвукового технологического процесса определяется применяемым ультразвуковым оборудованием, в которое входят две основные части: электрическая и собственно ультразвуковая (рис. 5).

К электрической части относится оборудование, предназначенное для создания электрических колебаний и управления ими — ультразвуковые генераторы.

Ультразвуковая часть или ультразвуковая колебательная система (УКС) содержит следующие узлы: преобразователь электрических колебаний в упругие; механический трансформатор — колебательную систему, служащую для передачи и трансформации упругих колебаний; излучатель или инструмент; подвеска (крепление УКС в технологическом устройстве).

Для жидкостного технологического процесса, например, ультразвуковой очистки, инструмент выполняет функции излучателя акустической энергии в технологическую среду. В процессах, связанных с обработкой твердых тел, колеблющийся инструмент непосредственно воздействует на поверхность [3].

Для возбуждения ультразвуковых колебаний в жидкости при очистке наиболее эффективным способом остается использование погружного излучателя (рис. 6, *а*), возможно также применение схемы с источником ультразвуковых колебаний в виде изгибно-колеблющихся пластин (рис. 6, *б*), а также установок, использующих цилиндрические колебательные системы (рис. 6, *в*).

При ультразвуковой упрочняющей обработке поверхностное пластическое деформирование детали осуществляется в результате ударного воздействия деформирующего элемента (рис. 7).

Таким образом, для успешного использования ультразвука в технологических процессах получе-

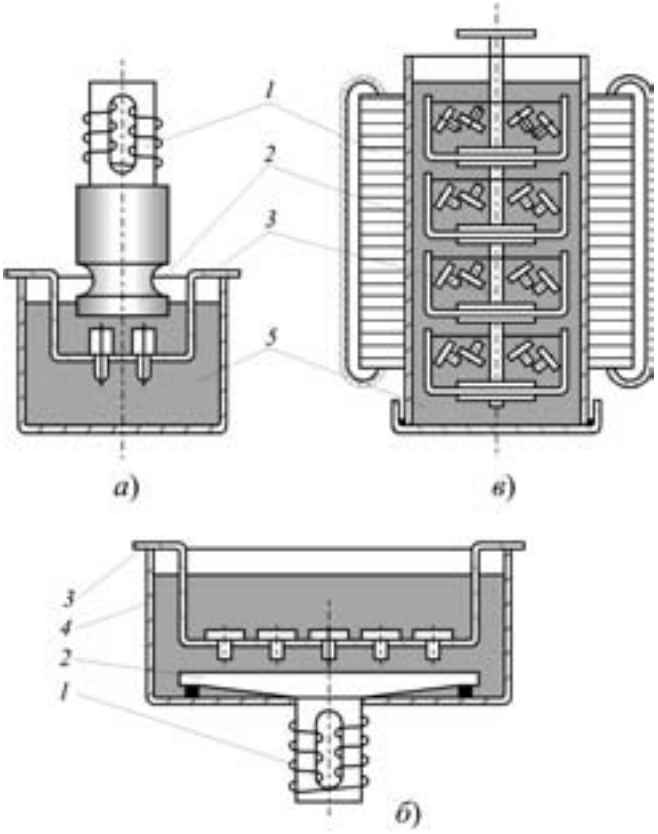


Рис. 6. Схемы ультразвуковых установок:
1 — источник ультразвуковых колебаний (преобразователь); *2* — излучатель; *3* — кассета с деталями; *4* — ванна; *5* — технологическая жидкость

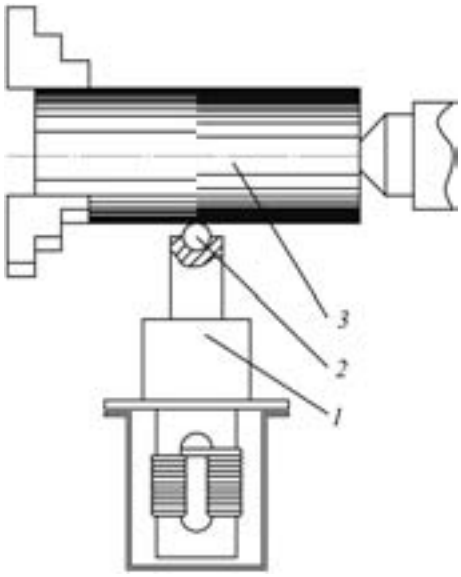


Рис. 7. Схема упрочняющей ультразвуковой обработки:
1 — ультразвуковая колебательная система; *2* — деформирующий элемент; *3* — обрабатываемое изделие

ния и обработки материалов и веществ необходимо создание ультразвукового оборудования, способного обеспечить введение в нагрузку заданной акустической мощности. При этом нагрузка может быть различной природы, объема и геометрической формы.

Основные направления применения ультразвуковых технологий в машиностроении. Эффективность применения ультразвука в процессах обработки материалов давлением (ОМД) определяется двумя основными факторами. Это снижение трения на границе инструмент—заготовка и уменьшение сопротивления пластическому деформированию.

Из теории волочения известно, что усилие волочения F определяется, как

$$F = S\sigma_S(1 + \mu \mathrm{ctg}\alpha)\ln\frac{S}{S_0},$$

где σ_S — напряжение текучести; μ — коэффициент трения; α — угол конусности волоки; S_0 и S — площади поперечного сечения до и после деформирования соответственно.

Анализ приведенной формулы показывает, что при воздействии ультразвуковых колебаний может изменяться как напряжение текучести, так и коэффициент трения. Схема волочения приведена на рис. 8. Волока располагается на конце концентратора продольных колебаний, который возбуждается с помощью магнитострикционных преобразователей. Наряду со снижением усилия, применение ультразвука позволяет улучшить качество поверхности и повысить стойкость инструмента.

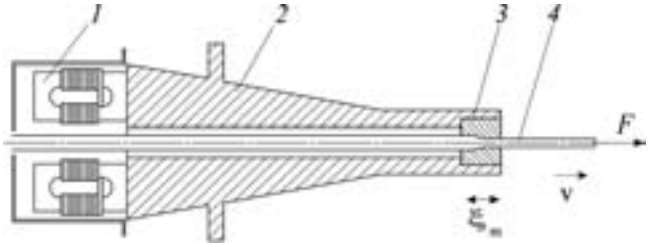


Рис. 8. Схема волочения:
1 — магнитострикционный преобразователь, *2* — концентратор ультразвуковых колебаний, *3* — волока, *4* — обрабатываемый материал (проволока)

В процессе выдавливания с использованием продольных ультразвуковых колебаний основной частью установки является пресс. С помощью фланца, расположенного в узловой плоскости, концентратор крепится к подвижной части пресса (рис. 9). На конце концентратора закрепляется

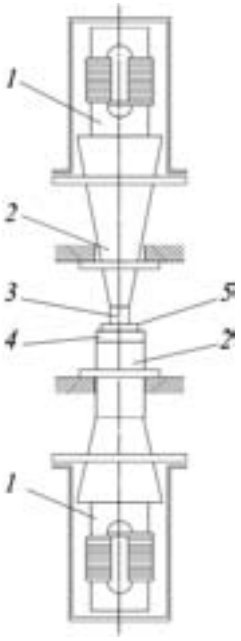


Рис. 9. Схема выдавливания:
1 — магнитострикционный преобразователь; *2* — волновод-концентратор; *3* —пуансон; *4* — матрица; *5* — заготовка

пуансон. Совместно с деформируемой заготовкой обе части образуют единую колебательную систему. Применение ультразвука позволяет снизить усилие деформирования и величину остаточных напряжений, а также улучшить качество получаемых изделий.

Анализ технологических процессов обработки металлов давлением (волочение, прессование, штамповка и т. д.) показывает, что ультразвуковые колебания изменяют характер сил трения между поверхностью заготовки и инструмента и процесс пластического деформирования в очаге деформации.

Исследования влияния ультразвука на процессы точения показали, что наибольший эффект уменьшения сил резания и улучшения качества поверхности наблюдается при возбуждении тангенциальных колебаний резца. На рис. 10 приведена зависимость составляющей силы резания P_z и высоты микронеровностей Rz от величины окружной скорости v при обычном резании и при возбуждении ультразвуковых колебаний.

Влияние ультразвуковых колебаний на процесс развертывания позволяет повысить скорость резания и допустимую величину подачи, что в конечном итоге ведет к сокращению машинного времени. При этом улучшается чистота обработанной поверхности и повышается точность отверстий. Так при обработке стали 20 разбивка отверстий уменьшилась от 0,08 до 0,02 мм, а средняя высота неровностей уменьшилась от Ra = 10 мкм (в обычном режиме) до Ra = 0,5 мкм.

Возбуждение ультразвуковых колебаний на концевой фрезе в процессе обработки позволили существенно снизить силы резания.

При использовании ультразвука для нарезания резьб метчиками отмечено снижение крутящего момента, что создает повышенный ресурс инструмента. Крутящий момент при ввертывании шпильки М12 с возбуждением ультразвуковых колебаний уменьшается в 2—3 раза.

Сопоставление износа метчиков при ультразвуковых колебаниях и в обычных условиях показало что, при ультразвуковых колебаниях стойкость инструмента возрастает в 1,7—3 раза.

Исследование воздействия ультразвуковых колебаний на процесс шлифования показали, что при обработке инструментальных и жаропрочных сталей значительно уменьшается шероховатость и обеспечивается большая стабильность параметра Ra. При внутреннем шлифовании сталей 4Х13, ШХ15, У8А и твердого сплава ВК20 применение ультразвука позволяет значительно повысить удельный съем материала, увеличить производительность и снизить окружную скорость инструмента.

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения поверхностей деталей является поверхностное пластическое деформирование (ППД), сущность которого заключается в том, что деформирующий элемент (индентор) прижимается к поверхности обрабатываемого изделия (рис. 11). В результате пластической деформации поверхностного слоя увеличивается твердость, образуются сжимающие напряжения, снижается шероховатость. ППД ультразвуковым инструментом, вследствие своих особенностей (высокой частоты, силы ударов), ведет к более существенному изменению микроструктуры поверхностного слоя.

Величина параметра шероховатости Ra уменьшается с увеличением амплитуды колебаний или усилия прижима. Например, для стали 12Х18Н9Т, при исходном значении Ra = 25 мкм после ультразвукового упрочнения шерохова-

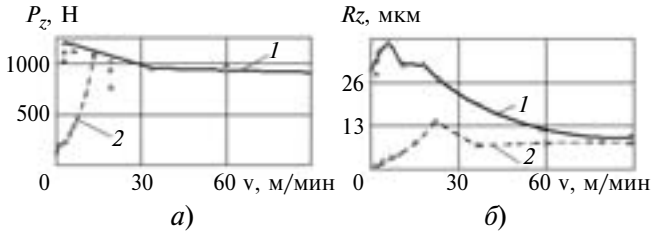


Рис. 10. Зависимость силы резания P_Z (*а*) и высоты микронеровностей Rz (*б*) от скорости резания v:
1— в обычном режиме; *2* — при ультразвуковых колебаниях резца

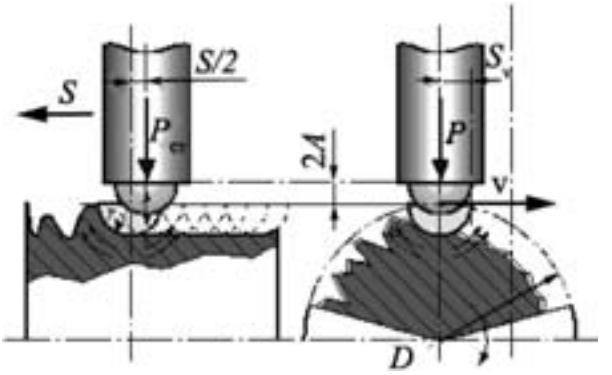


Рис. 11. Схема поверхностного пластического деформирования при ультразвуковой упрочняющей обработке

тость составила 0,4 мкм. Одновременно в результате пластического деформирования увеличивается плотность дислокаций. В недеформированных металлах средняя плотность дислокаций составляет $10^6...10^8$ см$^{-2}$. После обкатки роликом количество дислокаций увеличивается до $6 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$, а при ультразвуковой поверхностной обработке оно возрастает до $3 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$. С увеличением плотности дислокаций растет и твердость.

Пластическая деформация поверхности, снижение шероховатости, появление сжимающих остаточных напряжений приводят к увеличению износостойкости материала и обеспечивает двукратное повышение предела выносливости по сравнению с обычной полировкой.

Основными параметрами режима обработки являются: усилие прижима F, амплитуда колебаний ξ_m, скорость перемещения инструмента v, подача S, радиус кривизны индентора R.

Среди известных способов повышения надежности сварных соединений широко распространены методы поверхностного пластического деформирования, к которым относится и ультразвуковой метод (рис. 12). В отличие от инструментов, используемых для упрочняющей ультразвуковой обработки, деформирующие элементы не закреплены на конце волновода, а располагаются в зазоре между колеблющимся торцом волновода и обрабатываемой поверхностью.

Отличительной характеристикой материала, полученного в результате ультразвуковой обработки, является заметное измельчение зерен и

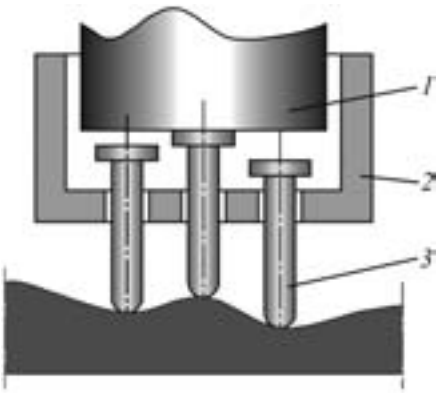


Рис. 12. Схема рабочего узла многоэлементного инструмента для обработки сварных швов:
1 — волновод; *2* — обойма; *3* — деформирующие элементы

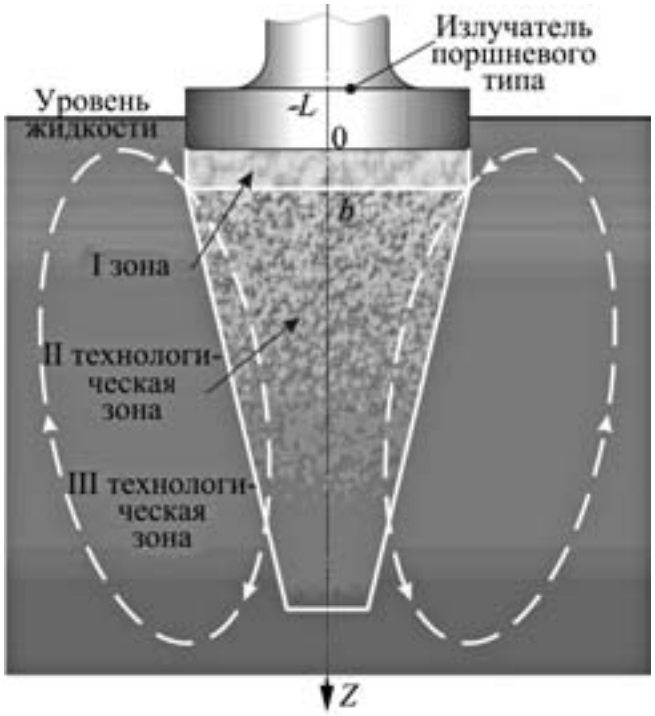


Рис. 13. Схематическое изображение технологических зон

сложный характер деформации (изгиб—кручение) кристаллической решетки. В результате обработки наблюдается также измельчение частиц вторых фаз, средние размеры которых составляют 0,1...0,3 мкм. В результате структурно-фазовых превращений повышается прочность, твердость и коррозионная стойкость материала.

Сравнение ультразвуковой очистки с другими методами удаления загрязнений показывает, что ультразвуковой метод дает недостижимое другими способами качество очистки. При этом обеспечивается высокое качество при минимальных затратах времени на процесс, замена ручного труда, возможность исключения из технологического процесса пожароопасных и токсичных растворителей.

Способ высокоамплитудной ультразвуковой очистки существенно расширил возможности как эрозионного, так и безэрозионного механизмов удаления загрязнения.

Схема высокоамплитудной ультразвуковой очистки представлена на рис. 13. В жидкости под излучателем образуются три устойчивые зоны: зона интенсивной кавитации (I); зона высокоскоростного потока кавитирующих пузырьков (II); зона

гидродинамических потоков (III), насыщенных газонаполненными пузырьками, способствующая удалению отслоившихся загрязнений.

Широта технологических возможностей, открываемых особенностями ультразвуковой высокоамплитудной обработки, позволила установить ранее ненаблюдаемые физические эффекты, в частности: стабилизацию работы колебательной системы при работе в жидкости; низкочастотные пульсации кавитационной области; изменение уровня кавитационного воздействия при относительном перемещении излучателей и объектов обработки; управление кавитацией подачей технологической жидкости в зону обработки.

Исследования динамики процесса ультразвуковой очистки деталей показали, что для эксплуатационных загрязнений связь степени очистки γ с длительностью τ описывается уравнением:

$$\gamma = 100\left(1 - e^{-2K\tau^{0,5}}\right),$$

где K — величина, зависящая от параметров режима очистки и, в первую очередь, от амплитуды колебательных смещений ξ_m на поверхности излучателя.

Если принять, что практически полной очистке соответствует уровень $\gamma = 97{,}5$ %, то на основе проведенных исследований можно определить

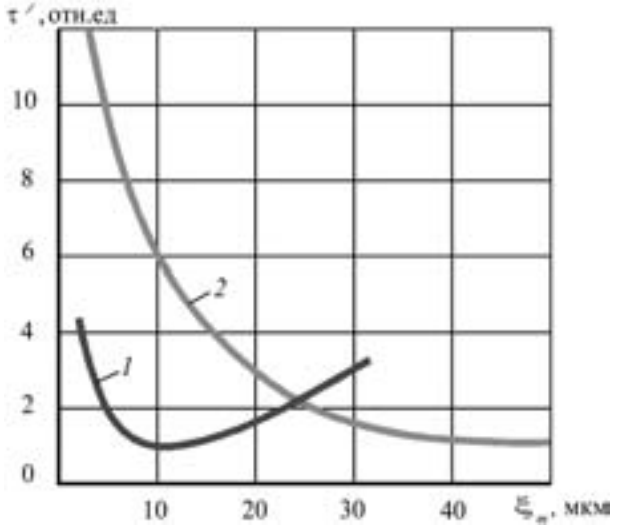


Рис. 14. Зависимость продолжительности очистки от амплитуды смещения:
1 — при очистке от эксплуатационных загрязнений; *2* — при очистке от технологических загрязнений

зависимость длительности очистки τ' от амплитуды колебаний (рис. 14).

Кривая *2* на рис. 14 отражает результат исследования зависимости продолжительности очистки от амплитуды смещения при очистке деталей от технологических загрязнений. Из графика видно, что при очистке деталей от технологических загрязнений продолжительность очистки монотонно сокращается при увеличении амплитуды смещения.

Разборка узлов, представляющих собой соединения деталей, не просто неизбежно входит в подавляющее большинство восстановительных технологий, а в значительной мере определяет трудоемкость, себестоимость и качество восстановительных работ. Основным фактором, осложняющим разборку, являются силы трения в зазоре, сильно возрастающие в процессе эксплуатации узлов из-за коррозии, загрязнений, полимеризации смазок, задиров и схватывания сопряженных поверхностей.

Преимущества ультразвукового метода разборки по сравнению с другими связаны с некоторыми его особенностями [4].

Во-первых, под действием ультразвука заметно интенсифицируется проникновение жидкости в тонкие капиллярные зазоры; ускоренное проникновение правильно выбранной технологической жидкости в зазор между сопряженными поверхностями пары в конечном итоге способствует снижению в ней сопротивления трению. Во-вторых, ультразвуковая разборка может быть осуществлена с большой скоростью, причем состояние поверхностей деталей разбираемых соединений не ухудшается.

На рис. 15 приведены зависимости продолжительности процесса ультразвуковой разборки от амплитуды колебательных смещений излучателя (кривая *1*) и продолжительности процесса ультразвуковой очистки от технологических загрязнений (кривая *2*). Из графика видно, что подбирая амплитуду колебательных смещений излучателя, можно найти время, необходимое для осуществления совмещенного процесса очистки и разборки.

Ультразвуковое резание представляет собой процесс механического разрушения, производимого частичками абразива *2* (рис. 16), лежащими на обрабатываемой поверхности заготовки *1*, в результате удара по ним инструмента *3*, колеблющегося с ультразвуковой частотой (20...40 кГц) и

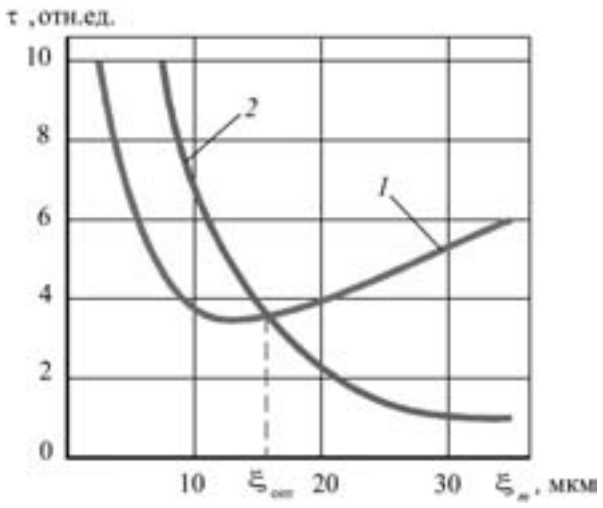


Рис. 15. Зависимость продолжительности разборки и очистки от амплитуды смещения излучателя ультразвуковых колебаний: *1* — очистка; *2* — разборка

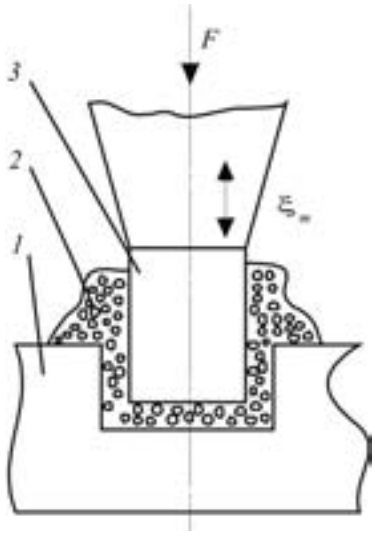


Рис. 16. Принципиальная схема ультразвуковой обработки: *1* — обрабатываемое изделие; *2* — суспензия абразива; *3* — инструмент

прижимаемого к поверхности с заданной силой *F*. Разрушение носит характер микровыкола, поэтому эффективно поддаются этому способу обработки только хрупкие материалы. В результате обработки в материале образуется углубление. Донная поверхность углубления является зеркальным отображением поверхности инструмента, а его глубина зависит от длительности обработки.

Ультразвуковым способом хорошо обрабатываются твердые и хрупкие материалы — керамика, кварц, рубин, алмаз, стекло, твердые сплавы. При оптимальных условиях скорость съема при обработке стекла составляет 6000...9000 мм^3/мин, при обработке твердого сплава — около 100...150 мм^3/мин.

Точность обработки и шероховатость поверхности определяются, в основном, размерами зерен применяемого абразива. При обработке стекла — Ra = 5...2,5 мкм, для твердого сплава — Ra = = 0,63...0,32 мкм.

Таким образом, ультразвук находит все более широкое применение в создании наукоёмких технологий в машиностроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

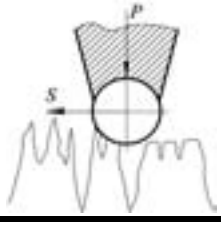
1. **Приходько В.М.** Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общ. ред. О.В. Абрамова, В.М. Приходько. М.: Янус-К, 2006. 688 с.

2. **Сиротюк М.Г**. Ультразвуковая кавитация. М.: Наука, 2010. 240 с.

3. **Казанцев В.Ф.** Физические основы технологического применения ультразвука: учеб. пособие. М.: МАДИ (ГТУ), 2008. 102 с.

4. **Приходько В.М**. Применение ультразвука при сборочно-разборочных операциях / В.Ф. Казанцев и др. М.: Техполиграфцентр, 2008. 146 с.

Рецензент д-р техн. наук А.В. Хандожко



УДК 621.9

А.П. Бабичев, д-р. техн. наук
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону),
П.Д. Мотренко, д-р. техн. наук
(ОАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону)
E-mail: rvertol@rambler.ru

Виброударная отделочно-упрочняющая обработка деталей нетрадиционных форм и размеров наукоёмких изделий (на примере силовых деталей вертолета)

Рассмотрена наукоёмкая технология виброударной отделочно-упрочняющей обработки ответственных деталей различной формы и размеров.

Ключевые слова: виброударная обработка; упрочнение; шероховатость поверхности.

A.P. Babichev, Dr. Tech. Sci
(Donskoy State Technical University, Rostov-on-Don),
P.D. Motrenko, Dr. Tech. Sci
(«Rostvertol», Rostov-on-Don)

Vibroimpact finishing-and-hardening working for science intensive products parts with non-traditional shape and size (by way of example force parts of helicopter)

The science intensive technology of vibroimpact finishing-and-hardening working for strength parts with different shape and size is considered in this paper.

Keywords: vibroimpact working; hardening; surface roughness.

В технологии изготовления деталей различного назначения отделочно-упрочняющая обработка (ОУО) ППД представлена широким спектром методов, отличающихся по своей сущности.

Отделочно-упрочняющая обработка деталей является в большинстве случаев завершающим этапом изготовления деталей, и ее цель — придать поверхности требуемые эксплуатационные свойства, которые, как известно, в значительной мере определяются геометрическими и физико-механическими параметрами: шероховатостью, микротвердостью, остаточными напряжениями и структурой материала поверхностного слоя [1, 2].

К особенностям рассматриваемых методов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) следует отнести отсутствие жесткой кинематический связи между элементами технологической системы, что дает возможность осуществлять обработку значительных участков или всей поверхности одновременно; некоторые схемы ВиОУО позволяют обрабатывать одновременно партии деталей, обеспечивая существенное сокращение затрат штучного времени. И, наконец, виброударная обработка решает такие технологические задачи, как повышение микротвердости поверхностного слоя, создание сжимающих остаточных напряжений, уменьшение шероховатости поверхности, создание регулярного микрорельефа, выполнение стабилизирующей обработки.

Обработке могут подвергаться детали из металлов и сплавов, используемых для изготовления изделий различного назначения [3].

В статье отражен опыт разработки и реализации процессов ВиОУО, специальных видов оборудования и инструментов. Предлагаемые технологические решения основаны на обобщении большого объема экспериментальных исследований и теоретических изысканий. Большое внимание уделено опыту совместной работы с предприятиями различных отраслей машиностроения и авиационной промышленности.

ВиОУО представляет собой комплекс взаимосвязанных явлений, в которых участвуют: упругопластическая деформация; активация поверхностного слоя металла; образование и разрушение вторичных структур, повторяющихся с частотой действия возмущающейся силы.

В зависимости от назначения операции в качестве рабочих сред могут применяться металлические и неметаллические деформирующие и полирующие материалы требуемой формы и размеров.

Интенсивность вибрационной обработки зависит от режима и продолжительности обработки, характеристики и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей камеры и степени ее заполнения, механических свойств материала обрабатываемых заготовок и др. [3, 4].

Виброударная обработка, используемая для достижения упрочняющего или стабилизирующего эффекта, осуществляется преимущественно в среде металлических и твердосплавных тел. Получение упомянутого технологического эффекта, возможность управления процессом предопределяются состоянием обрабатывающей среды и характерными ее параметрами. В числе последних рассматриваются: значение эквивалентной массы вибрирующей среды; коэффициент восстановления; параметры силовых связей; динамический зазор между частицами среды; диссипативные и квазиупругие свойства среды [5, 6].

ВиОУО осуществляется в условиях относительно высокой активности обрабатываемой поверхности. Это дает основания для поиска возможности совмещения процессов пластического деформирования и создания на поверхности обрабатываемых деталей различного рода покрытий путем введения в рабочую среду соответствующих веществ, например: образование пленки твердой смазки дисульфида молибдена (MoS_2), графита и др.; образование тонких пленок цинка, алюминия, титана, меди, бронзы и других металлов и сплавов; в процессе химической реакции в растворах соответствующего состава — оксидирование, фосфатирование, цинкование, меднение и др. [3].

Отмеченные предпосылки ВиОУО указывают на широкие технологические возможности. Однако конкретные условия ее применения на различных операциях, раскрытие физической сущности протекания процесса в каждом случае и практическая целесообразность требуют дополнительных исследований и апробации.

Многообразие конструктивных форм, размеров обрабатываемых деталей и предъявляемых к ним технических требований предопределяют разработку различных технологических схем виброударной обработки.

ВиОУО с ее разновидностями имеет характерные признаки многоконтактной обработки, где роль инструмента выполняет вибрирующая среда металлических частиц (шары, ролики, тела других форм) [3].

Разновидностью базовой схемы ВиУО является обработка в уплотненной среде колеблющихся частиц.

Для многоконтактной виброударной обработки разработаны клиновые устройства, где распространение ударного импульса в среде стальных шаров инициируется вибрирующим клиновым устройством.

Характерным представителем группы методов обработки многоконтактным виброударным инструментом (МКВиУИ) является обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ). На рис. 1 представлена его схема.

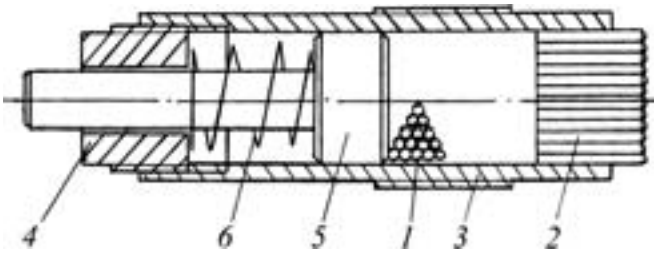


Рис. 1. Схема многоконтактного виброударного инструмента — шарико-стержневого упрочнителя (ШСУ):
1 — среда стальных шаров; *2* — стержни; *3* — корпус; *4* — гайка; *5* — боек; *6* — пружина

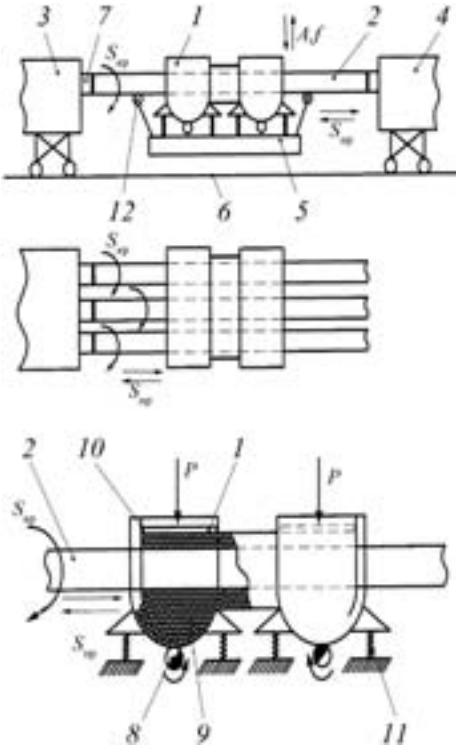


Рис. 2. Схема виброударной обработки наружной поверхности длинномерной детали с использованием проходных рабочих камер:

1 — рабочая камера; *2* — обрабатываемая деталь; *3* — привод подач $S_{кр}$ и $S_{пр}$ (передняя бабка); *4* — задняя бабка; *5* — основание; *6* — направляющие; *7* — технологический наконечник; *8* — вибратор; *9* — рабочая среда; *10* — отсекатель рабочей среды; *11* — пружина; *12* — поддерживающий ролик

В конструкциях некоторых изделий обработке подвергаются крупногабаритные детали и детали большой длины сложной формы, требующие упрочняющей обработки. Далее представлены примеры использования различных схем ВиОУО при упрочнении деталей (лонжеронов лопасти несущего и рулевого винта вертолетов, панели крыла и фюзеляжа самолета, элементов силовых нервюр и шпангоутов и др.) [3, 6, 8].

Схема обработки наружной поверхности длинномерной детали с использованием базовой схемы ВиОУО представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлена схема обработки наружной поверхности многоконтактным виброударным инструментом шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ) одновременно пятью инструментами.

На рис. 4 представлена схема виброударной обработки наружной поверхности длинномерной детали в уплотненной среде с использованием неподвижных рабочих камер и перемещающейся детали.

На рис. 5 представлена схема виброударной обработки с использованием клинового устройства (КУ) для передачи ударного импульса на обрабатываемую поверхность (стенки отверстия детали).

На рис. 6 представлена технологическая схема упрочняющей обработки внутренней поверхности длинномерной детали, в основе которой использован процесс вибрационного транспортирования сыпучих (гранулированных) сред.

Дальнейшее развитие технологических схем виброударной обработки рассматриваемых типов длинномерных деталей предусматривает и одновременную обработку наружной и внутренней поверхностей (рис. 7).

На рис. 8 представлена другая схема обработки наружной и внутренней поверхностей длинномерной детали, основанная на использовании полученных раннее результатов исследований ударно-волновых процессов при виброударном воздействии.

Механизм формирования поверхностного слоя при виброударной обработке. Одной из задач, решаемых в процессе ВиОУО, является создание на поверхности определенного микрорельефа и упрочненного слоя. При этом исходный микрорель-

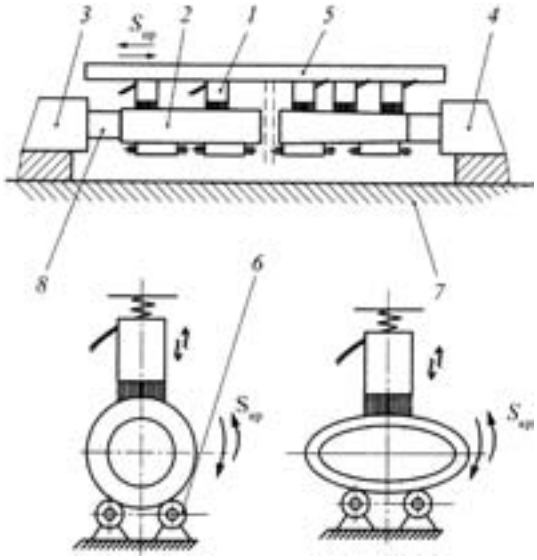


Рис. 3. Схема обработки наружной поверхности лонжерона многоконтактным инструментом — шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ):

1 — инструмент (ШСУ); *2* — обрабатываемая деталь; *3* — привод круговой подачи; *4* — задняя бабка; *5* — блок продольной подачи; *6* — опорный ролик; *7* — основание; *8* — технологический наконечник

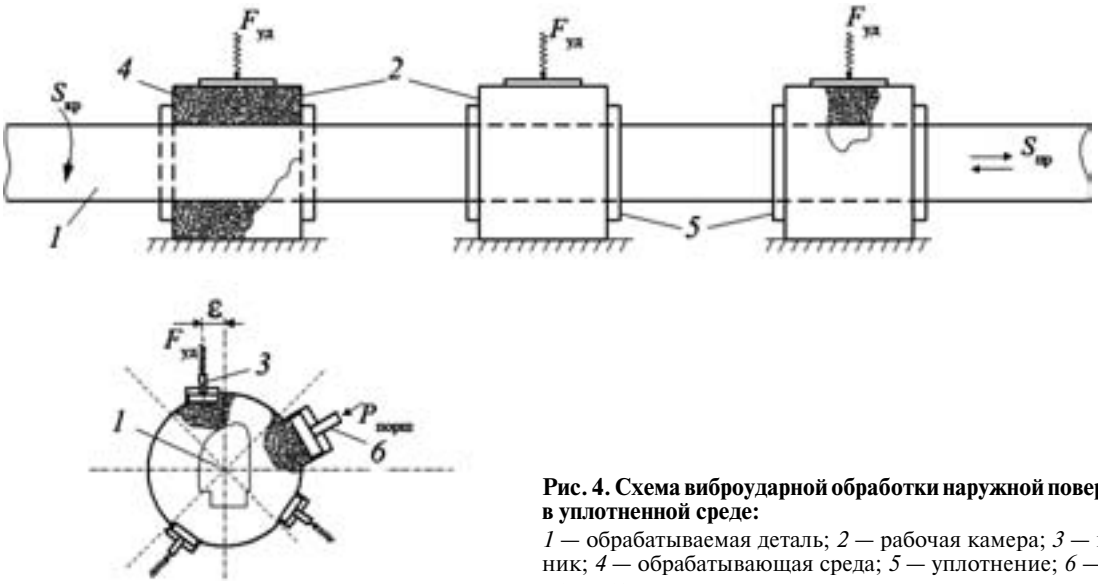


Рис. 4. Схема виброударной обработки наружной поверхности детали в уплотненной среде:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — рабочая камера; *3* — поршень-ударник; *4* — обрабатывающая среда; *5* — уплотнение; *6* — поршень поджатия среды

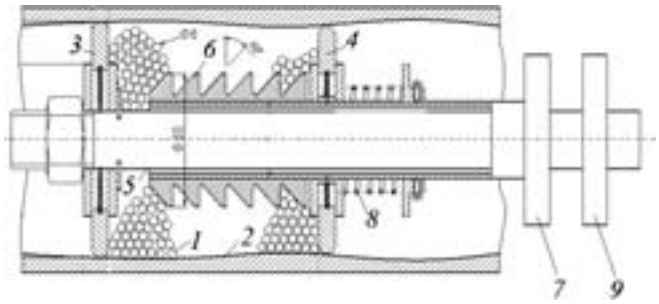


Рис. 5. Схема виброударной обработки внутренней поверхности детали клиновым упрочнителем:
1 — рабочая среда; *2* — обрабатываемая деталь; *3*, *4* — ограничители; *5* — подвижная ось; *6*, *7* — клиновый ударник; *8* — пружина; *9* — упорный диск

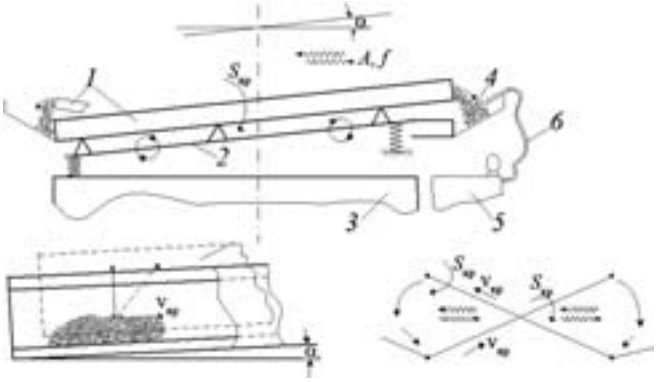


Рис. 6. Схема виброударной упрочняющей обработки внутренней поверхности детали:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — виброплатформа; *3* — основание; *4* — рабочая среда; *5* — бак-отстойник; *6* — система циркуляции технологической жидкости

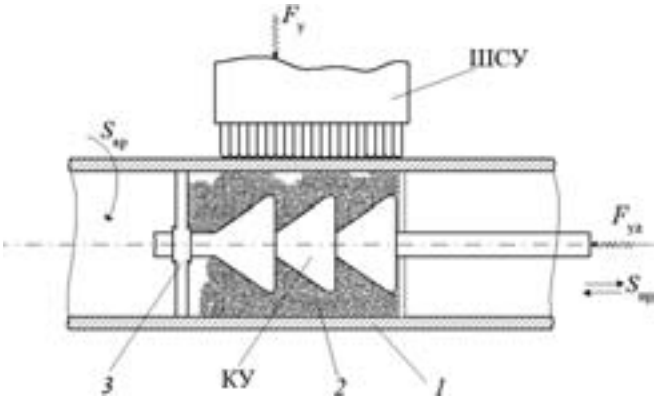


Рис. 7. Схема одновременной обработки наружной и внутренней поверхностей детали:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — рабочая среда; *3* — ограничитель

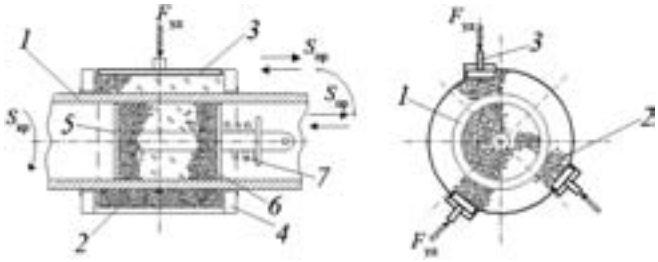


Рис. 8. Схема одновременной виброударной обработки наружной и внутренней поверхностей детали в уплотненной среде:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — рабочая среда; *3* — поршень (ударник); *4* — корпус внешней рабочей камеры; *5* — ограничитель (неподвижный); *6* — ограничитель (подвижный); *7* — пружина

еф может полностью или частично измениться в зависимости от условий обработки.

Формирование поверхностного слоя при ВиОУО характеризуется последовательным нанесением пластических отпечатков (элементарных следов обработки), являющихся следствием контактного взаимодействия рабочих элементов инструмента с обрабатываемой поверхностью (рис. 9).

Виброударная обработка ППД характеризуется ударным воздействием рабочих тел (инденторов), как правило, сферической формы на обрабатываемую поверхность и формирует характерный микрорельеф, представляющий собой систему многократно образующихся (перекрывающихся) отпечатков сферической (или близкой к ней) формы. Возникает он в том случае, когда глубина пластического отпечатка сравнима или превосходит высоту исходных микронеровностей.

Шероховатость поверхности после ВиОУО. Экспериментальные исследования процесса формирования микрорельефа поверхности при виброударной обработке подтверждают возможность полного смятия микронеровностей и создание нового микрорельефа поверхности, что подтверждается профилограммами поверхности (рис. 10, *а*). В то же время при обработке образцов из более твердых материалов (сталь 30ХГНМ, цементация, 617...635 HV), характер шероховатости поверхности остается наследованным от предшествующей обработки (рис. 10, *б*).

Влияние ВиОУО на микротвердость и остаточные напряжения. В процессе виброударной обработки происходит упрочнение поверхностного слоя, которое является результатом увеличения

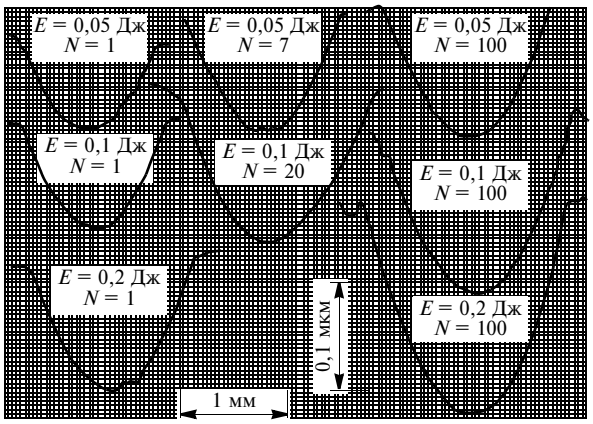


Рис. 9. Профилограммы пластических отпечатков, полученных при накоплении на поверхности образца из бронзы БРОФ7-0,2 идентичных ударов количеством *N*, с энергией *E* и сферическим индентором радиуса *R* = 2 мм

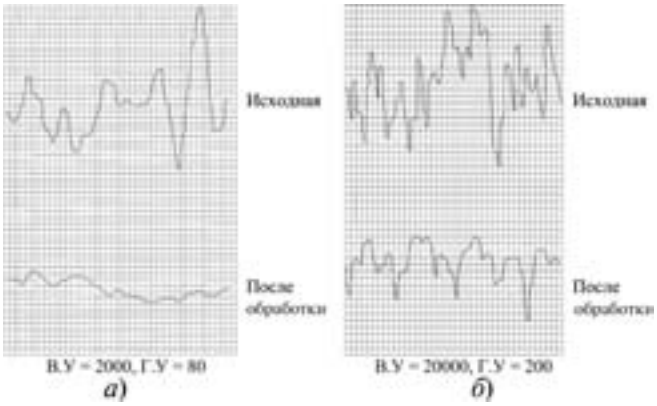


Рис. 10. Профилограммы поверхности образцов из стали 08кп (*а*) и 30ХГНМ (*б*) до и после виброударной обработки

микротвердости, создания сжимающих остаточных напряжений и формирования благоприятного микропрофиля поверхности. Эти параметры оказывают большое влияние на такие эксплуатационные характеристики, как усталостная прочность, износостойкость и др. [2, 3, 7].

Обработка многоконтактным виброударным инструментом может применяться для различных металлов и сплавов, в том числе сталей в незакаленном или закаленном состоянии, для деталей штамповой оснастки, холодновысадочного и прессового инструмента, некоторых типов режущих инструментов. Среди деталей основного производства

Рис. 11. Влияние продолжительности виброударной обработки на параметр шероховатости *Ra* образцов из стали 20ХГНМ при различных амплитудах колебаний

можно отметить обработку тяжело нагруженных и ответственных деталей, стыковых поверхностей кронштейнов, вилок, ступиц, отдельные участки крупногабаритных деталей — панелей, лонжеронов, шлангоутов и т.п. Некоторые примеры обработки такого типа деталей представлены на рис. 11.

Для реализации процессов виброударной обработки разработано технологическое оборудование в виде вибрационных станков, вибрационных машин, установок и вибростендов.

Вибрационные станки отличаются простой конструкцией, высокой надежностью, большим сроком службы, возможностью автоматизации и механизации производственных процессов, обеспечивают решение экологических задач. Весьма эффективно применение вибрационного оборудования в технологических процессах, связанных с использованием виброударной отделочно-упрочняющей обработки.

В частности, для обработки крупногабаритных деталей сложной формы (плоских и объемной ориентации) разработаны специализированные вибрационные станки (для поэлементной или адресной обработки). Для обработки длинномерных деталей — преимущественно специальные станки (в отдельных случаях это могут быть специализированные переналаживаемые станки) [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
2. **Суслов А.Г., Рыжов Э.В., Фёдоров В.П.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
3. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д: ДГТУ, 1999. 620 с.
4. **Гончаревич И.Ф., Фролов К.В.** Теория вибрационной техники и технологии. М.: Наука, 1981. 315 с.
5. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. Ростов-н/Д: ДГТУ, 2003. 192 с.
6. **Бабичев И.А.** Модель передачи ударного импульса в ШСУ. Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. Ростов н/Д: ДГТУ, 1991. С. 9—21.
7. **Киричек А.В., Соловьёв Д.Л.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.
8. **Копылов Ю.Р**. Виброударное упрочнение. Воронеж: Ин-т МВД России, 1999. 386 с.

Рецензент д-р техн. наук А.В. Киричек

УДК 621.787

А.В. Киричек, д-р техн. наук,
Д.Л. Соловьёв, д-р техн. наук,
А.В. Волобуев, аспирант
(ФГОУ ВПО «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл)
E-mail: avk@ostu.ru

Инновационная статико-импульсная обработка

Рассмотрен новый наукоёмкий способ упрочнения поверхностным пластическим деформированием — статико-импульсная обработка, отличающийся нагружением упрочняемой поверхности управляемыми ударными импульсами, что позволяет более точно регулировать эпюры микротвердости и остаточных напряжений на значительной глубине упрочненного поверхностного слоя.

Ключевые слова: обработка ППД; упрочнение; нагружение; ударный импульс; боек.

A.V. Kirichek, Dr. Tech. Sci
D.L. Solovyov, Dr. Tech. Sci
A.V. Volobuev, Candidate
(FSEI HPE «State University — educational-science-manufacturing complex»)

Innovation statico-pulse working

A new science intensive method for hardening by surface plastic forming — statico-pulse working, differing by loading a surface to be hardened with controlled shock pulses, which allows more precise controlling the diagrams of microhardness and temper for a considerable depth of a hardened surface layer, is considered in this paper.

Keywords: working by surface plastic forming; hardening; loading; shock pulse; striker.

Реальный ресурс работы машин и механизмов в значительной степени определяется долговечностью ответственных тяжело нагруженных деталей. Потеря их работоспособности обычно связана с разрушением поверхностного слоя. Поэтому создание поверхностного слоя, максимально повышающего эксплуатационные свойства деталей, является важной технологической задачей. Для ее решения эффективно применяются методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Упрочнением ППД может быть получен наклепанный поверхностный слой твердостью до 6500 МПа и сжимающими остаточными напряжениями, что благоприятно влияет на работоспособность и долговечность детали при действии циклических нагрузок. Наряду с этим, отделочно-упрочняющие способы ППД, обеспечивающие в очаге деформации давление менее $3\sigma_т$ ($\sigma_т$ — предел текучести обрабатываемого металла) [1], позволяют улучшить геометрические параметры поверхностного слоя деталей, а упрочняющие (давление в очаге деформации более $3\sigma_т$) — обеспечивать глубину упрочненного поверхностного слоя до 3...5 мм.

Несмотря на то, что эффективность работы упрочненного поверхностного слоя часто зависит (особенно при действии на него циклических нагрузок) от его толщины, способы ППД, обеспечивающие большую глубину упрочнения (чеканка, обкатывание с большими силами и радиусами деформирующей поверхности инструмента) недостаточно развиты и мало применяются на практике. Это объясняется тем, что создание больших давлений в очаге деформации связано с большими энергетическими затратами и сложностью применяемого технологического оборудования.

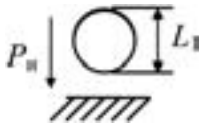
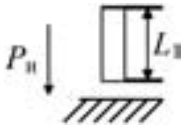
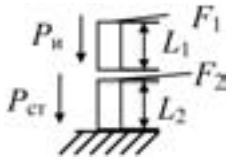
Результаты обработки ППД во многом определяются способом сообщения в очаг деформации энергии. По этому принципу способы ППД разделяют на статические (накатывание, выглаживание, дорнование), ударные (дробеструйная обработка, центробежная обработка, чеканка) и комбинированные, с одновременным статическим и ударным нагружением (ультразвуковая обработка, ударное раскатывание, чеканка по предварительно статически нагруженному инструменту).

Анализ статических и ударных способов ППД показал, что для создания высоких давлений в очаге деформации ударное воздействие на материал энергетически более выгодно, по сравнению со статическим [2, 3]. Однако одной из главных проблем успешного применения динамической нагрузки при ППД является недостаточная управляемость обеспечиваемых показателей качества поверхностного слоя, так как при одинаковой кинетической энергии удара энергия, расходуемая на пластическую деформацию, может быть разной. Это связано с тем, что с увеличением скорости нагружения уменьшается время протекания пластической деформации, и ее величина зависит не только от силы удара, т.е. амплитуды ударного импульса, но и от его длительности [4, 5]. При упрочнении ППД ударными способами это, как правило, не учитывается.

Исследованиями ударных процессов Е.В. Александровым, В.Б. Соколинским, О.Д. Алимовым, В.К. Манжосовым, В.Э. Еремьянцом доказана возможность управления формой ударных импульсов за счет варьирования геометрическими и акустическими параметрами используемой ударной системы [6].

На основании проведенных исследований установлены геометрические параметры ударных систем, создающих условия для генерирования импульсов, форма которых позволяет передавать в

Системы ударного воздействия

Подвод энергии удара в ОД	Ударом инструмента		Ударом бойка по волноводу
Инструмент	Шар	Боек	Торец волновода
Схема способа			
Номер кривой	1	2	3

Обозначения: $P_и$ — импульсная нагрузка; $P_{ст}$ — статическая нагрузка; L_1, L_2 — длина бойка и волновода соответственно; F_1, F_2 — площадь поперечного сечения бойка и волновода соответственно.

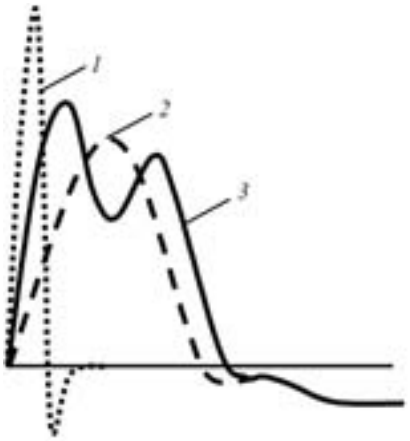


Рис. 1. Зависимость формы импульса, генерируемого в очаге деформации, от условий нагружения, вида деформирующей поверхности и конфигурации инструмента

очаг деформации наибольшую кинетическую энергию удара.

Экспериментально исследовались различные ударные системы (таблица) [4]. В очаге деформации наблюдались ударные импульсы различной формы (рис. 1). При ударе шаром формировался треугольный импульс с высокой амплитудой, небольшой длительности и малой энергией. При ударе торцом цилиндрического стержня (бойком) — импульс трапецеидальной формы меньшей амплитуды, но большей длительности и большей энергии. При ударе бойка через предварительно статически поджатое к нагружаемой поверхности промежуточное звено (волновод) — пролонгированный импульс, содержащий головную и хвостовую части. Оценка импульсов показала, что импульс, полученный в результате удара бойка через волновод, отличается наибольшей энергией.

Это объясняется тем, что при ударе бойком через волновод появляется возможность использовать энергию отраженных волн деформации, формирующихся в виде хвостовой части импульса, для повторного нагружения. Условием для этого является жесткий контакт друг с другом бойка, волновода, инструмента, нагружаемой поверхности после удара в течение времени, превышающем длительность ударного импульса.

Воздействие на нагружаемую поверхность пролонгированными динамическими импульсами при ударе через промежуточное звено при ППД не использовалось. Разработан способ статико-импульсной обработки (СИО), заключающийся в периодическом импульсном воздействии на нагружаемую поверхность бойком через статически нагруженный волновод (рис. 2) [Патент РФ № 2098259]. Предварительное статическое нагружение волновода с инструментом не позволяет ему выходить из контакта с нагружаемой поверхностью после удара, обеспечивая рекуперацию отраженных волн деформации. Исследования показали, что величина статической нагрузки должна быть не менее 10 % от динамической, из условия исчерпания упругой деформации. Следовательно, при упрочнении СИО основное деформирующее воздействие осуществляется за счет ударной нагрузки, а статическая должна способствовать ее максимальной реализации.

Использование нагружения управляемыми ударными импульсами позволяет более точно регулировать эпюры микротвердости и остаточных напряжений на значительной глубине упрочненного поверхностного слоя. Появляется возможность рационально расходовать энергию удара (достигающую 300 Дж) при упругопластическом нагруже-

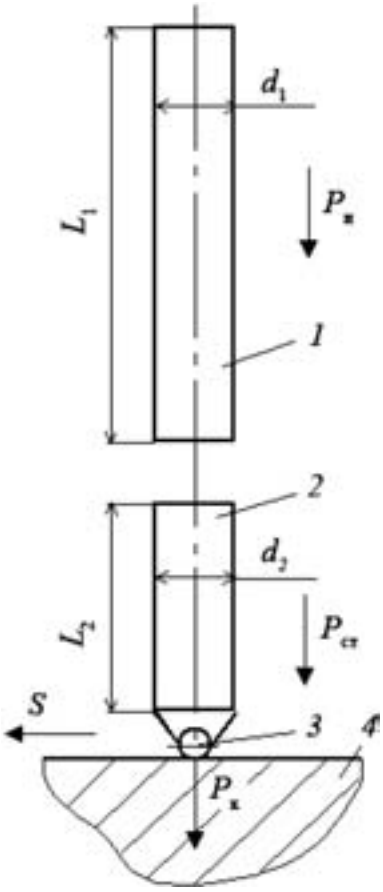


Рис. 2. Схема нагружения поверхности при статико-импульсной обработке:

1 — боек; *2* — волновод; *3* — индентор; *4* — упрочняемая поверхность; $P_к$ — контактная сила в очаге деформации; *S* — подача; d_1 — диаметр поперечного сечения бойка; d_2 — диаметр поперечного сечения волновода

нии, повысить КПД процесса и соответственно, расширить возможности упрочнения ППД.

Проведенные исследования упрочнения СИО с использованием ударной системы, состоящей из бойка и волновода цилиндрической формы, показали, что до 86 % энергии удара расходуется на пластическую деформацию при соотношении площадей поперечных сечений бойка и волновода 1...3, а их длин — 3...5. Исследования проведены для коэффициента сопротивления внедрению $k = (2{,}5...7{,}5) \cdot 10^8$ Н/м, который характеризует условия контакта (размеры и кривизну инструмента и упрочняемой поверхности) и свойства упрочняемого металла.

В процессе СИО ППД генератор импульсов статически поджимается к упрочняемой поверхности (рис. 3, *а*). Внутри генератора импульсов размещена ударная система боек-волновод. Инструмент монтируется на торце волновода либо его роль играет сам торец волновода, заправленный соответствующим образом. Возле торца волновод имеет уступ. Между уступом и корпусом генератора импульсов размещается пружина. Таким образом, статическая сила $P_{ст}$ действует на генератор импульсов и через пружину сжатия статически поджимает волновод с инструментом к обрабатываемой поверхности, образуя отпечаток $\alpha_{ст}$. В таком положении генератор импульсов жестко фиксируется. Включается подача заготовки относительно инструмента.

Динамическая составляющая нагрузки обеспечивается ударами бойка по волноводу с периодичностью, заданной генератором импульсов. Волна деформации, сформированная в волноводе при ударе по нему бойком, характеризуемая силой $P_и$, подходит к нагружаемой поверхности и распределяется на проходящую и отраженную с $P_к$ и $P_о$ (рис. 3, *б*). Под действием проходящей волны деформации $P_к$ (головной части импульса) инструмент внедряется в поверхность, а отраженная волна преобразуется в ударной системе и через интервал времени, определяемый длинами бойка и волновода, возвращается в очаг деформации, формируя хвостовую часть ударного импульса, под действием которой происходит дополнительное внедрение инструмента.

На следующем этапе СИО, после окончания действия ударного импульса, инструмент остается в контакте с очагом деформации под действием статической нагрузки. В результате движения подачи инструмент выходит из образовавшегося отпечатка, преодолевая волну пластически деформированного металла и перемещаясь на расстояние, превышающее глубину упругопластической деформации α (рис. 3, *в*). Инструмент пройдет расстояние δ за время, определяемое частотой ударов f. При этом, как правило, инструмент не успевает полностью выйти из отпечатка с глубиной $\alpha_{пл}$, образованного предыдущим ударом. На этом этапе начинается следующий цикл ударного воздействия.

Механизм упрочнения СИО позволяет достаточно эффективно регулировать равномерность упрочнения

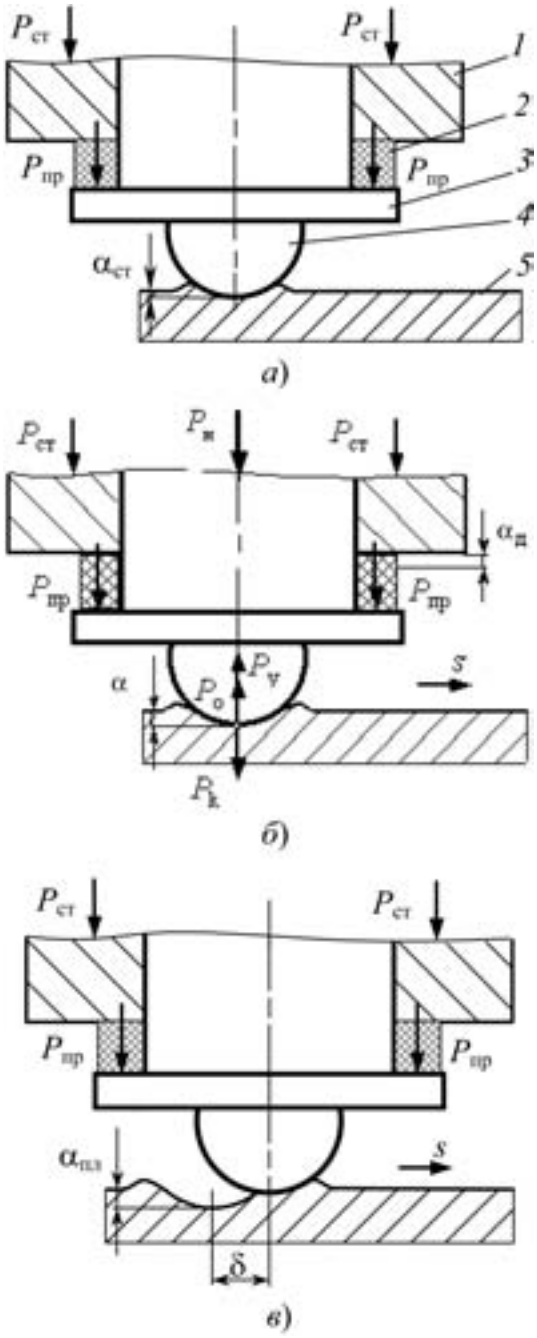


Рис. 3. Формирование пластической деформации при упрочнении СИО:

1 — корпус генератора импульсов; *2* — пружина; *3* — уступ волновода; *4* — инструмент; *5* — обрабатываемая поверхность

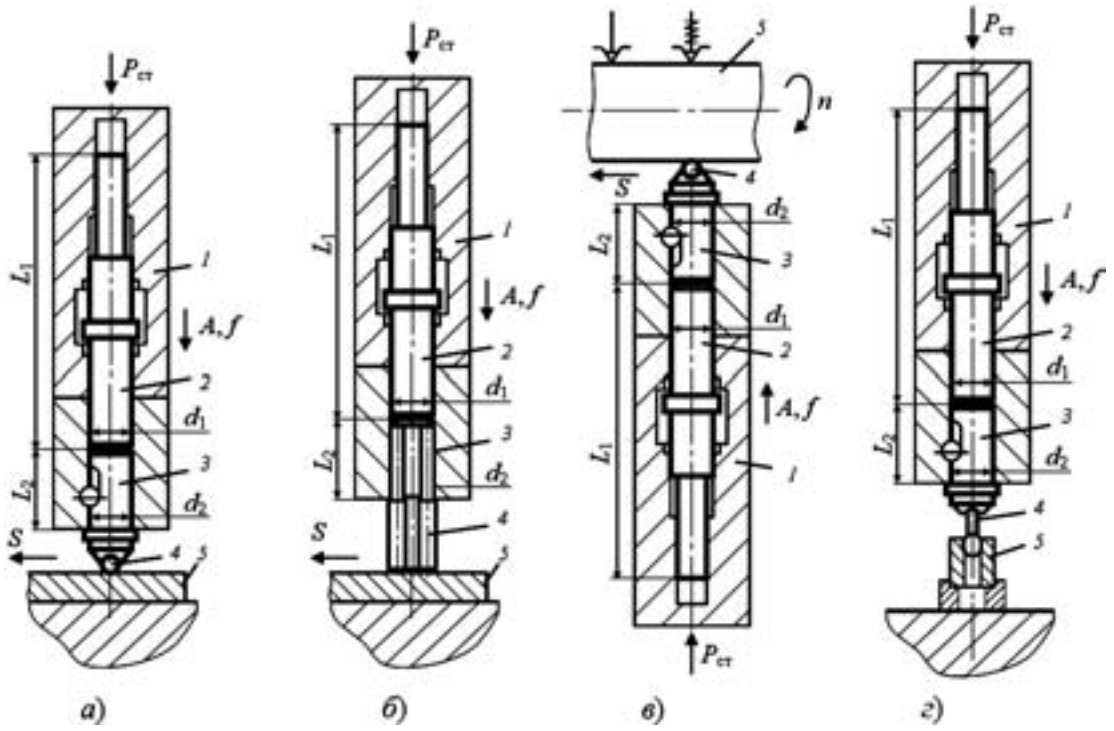


Рис. 4. Схемы нагружения упрочняемой поверхности при статико-импульсной обработке:
1 — генератор механических импульсов; *2* — боек; *3* — волновод; *4* — инструмент; *5* — упрочняемая поверхность; *A* — энергия ударов; *f* — частота ударов; *n* — частота вращения детали

поверхностного слоя и получать как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру [8, 9]. Преимущество материалов с гетерогенной структурой особенно проявляется при действии на них циклических контактных нагрузок, когда происходит торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей, что способствует повышению долговечности и работоспособности такого материала.

Возможны различные схемы СИО в зависимости от формы обрабатываемой поверхности и детали в целом.

При обработке плоских поверхностей (рис. 4, *а*) заготовке сообщается возвратно-поступательное движение относительно инструмента и при необходимости (если площадь обработанной поверхности больше) после каждого рабочего прохода в продольном направлении производится смещение заготовки в поперечном направлении на ширину, определяемую размерами инструмента. Для такой схемы нагружения волновод может выполняться как в виде одного стержня, так и в виде пакета из стержней одинаковой длины (рис. 4, *б*). Использование в качестве деформирующих инструментов пакета волноводов позволяет формировать несколько очагов деформации за один удар бойка, увеличивая производительность процесса упрочнения.

При обработке наружных цилиндрических поверхностей (рис. 4, *в*) обрабатываемой детали сообщается вращательное движение, а ударному устройству — осевая подача. При обработке внутренних цилиндрических поверхностей (рис. 4, *г*) инструмент (шар или дорн) внедряется в обрабатываемое отверстие под действием силы статического поджатия и затем под действием ударов проходит всю длину обрабатываемой поверхности.

Проведены исследования глубины и степени упрочнения после СИО, а также долговечности полученного упрочненного слоя. Твердость стали 110Г13Л при $A / b_р \leqslant 6$ Дж/мм и $D_р = 10$ мм (где A — энергия удара, $D_р$ и $b_р$ — диаметр и ширина стержневого ролика), увеличилась более чем на 150 %, стали 45 — на 30 %, а стали 40Х — на 20 %, при этом глубина упрочненного слоя составила 10, 7 и 6 мм соответственно (рис. 5). Установлено, что упрочненная СИО гетерогенная структура позволяет до шести раз повысить долговечность деталей, работающих при контактных циклических нагрузках.

СИО обладает широким диапазоном технологических возможностей. За счет изменения режимов СИО может быть получен наклепанный поверхност-

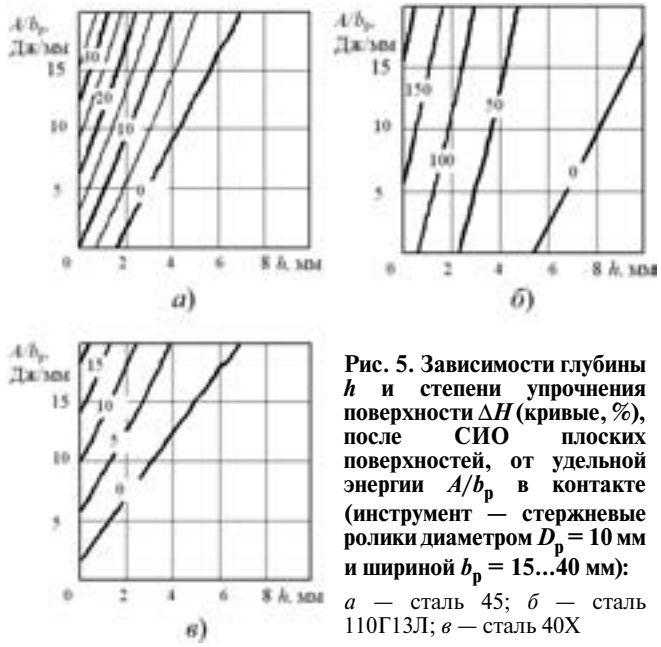


Рис. 5. Зависимости глубины h и степени упрочнения поверхности ΔH (кривые, %), после СИО плоских поверхностей, от удельной энергии $A/b_р$ в контакте (инструмент — стержневые ролики диаметром $D_р = 10$ мм и шириной $b_р = 15...40$ мм):

а — сталь 45; *б* — сталь 110Г13Л; *в* — сталь 40Х

ный слой с глубиной до 8...10 мм и большой степенью упрочнения до 6500 МПа — «глубокая» статико-импульсная обработка (ГСИО). После ГСИО желательна последующая чистовая механическая обработка для обеспечения заданной точности и снижения шероховатости (тонкое или чистовое точение, фрезерование, абразивная обработка, отделочно-упрочняющая обработка ППД). ГСИО можно помещать как в начале или середине, так и в конце технологического маршрута обработки деталей. Большая глубина упрочненного СИО слоя позволяет выбирать величину припуска на механическую обработку для «сырых» сталей до 0,5...1 мм, а термообработанных — до 0,3 мм. Также СИО может быть получен наклепанный поверхностный слой с большой степенью упрочнения (до 6500 МПа), малой глубиной (до 2...3 мм) и низкими высотными параметрами шероховатости поверхности, достигающими $Ra = 0{,}1$ мкм — отделочно-упрочняющая статико-импульсная обработка (ОУСИО). Поскольку при ОУСИО обеспечиваются достаточно низкие параметры шероховатости, то ее предпочтительно использовать в конце технологического маршрута обработки.

СИО может быть рекомендована, в первую очередь, для повышения эксплуатационных свойств тяжело нагруженных деталей машин, разрушение поверхностного слоя которых происходит вследствие циклических нагрузок. К таким деталям относятся: зубчатые колеса; подшипники качения; рельсовые колеса; прокатные валки; толкатели кулачков; бойки; элементы червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, направляющих и шлицевых соединений с телами качения, обгонных роликовых муфт; гильзы пневмо- и гидроцилиндров и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Качество** машин: справочник / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. Т.1. 256 с., Т.2. 430 с.

2. **Браславский В.М.** Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение, 1975. 160 с.

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

4. **Киричек А.В., Соловьёв Д.Л., Лазуткин А.Г.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.

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

6. **Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э.** Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. М.: Наука, 1985. 357 с.

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

8. **Повышение** контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьёв, С.В. Баринов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 7. С. 9 — 15.

9. **Соловьёв Д.Л., Киричек А.В., Баринов С.В.** Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно наклепанной структуры // Тяжелое машиностроение. 2010. № 7. С. 3—7.

Рецензент д-р техн. наук П.Ю. Бочкарёв

ООО «Издательство **Машиностроение**», 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО «Издательство Машиностроение». **E-mail: naukatm@mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-268-7. **http://www.mashin.ru**

Дизайнер *Н.А. Свиридова*. Технический редактор *Е.М. Патрушева*. Корректор *Т.В. Пчелкина*

Сдано в набор 28.04.2011. Подписано в печать 15.06.2011.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ.л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,22. Цена свободная.
Отпечатано в ООО «Белый ветер», 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4