

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 8 (74)

2017

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г.

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом почтовом
отделении индекс по каталогу
«Роспечать» 79195.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по
надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой
информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Дёмин В.А. Проектирование инновационных технологий в обработке
металлов давлением 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования
как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для
упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием . . . 7

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Инновационные технологии виброволновой
обработки деталей машиностроения и вертолетостроения 17

Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технологии улучшения
поверхностных свойств геометрически сложных изделий воздействием
низкотемпературной плазмы 24

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Технология
комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией
конструкционных низколегированных сталей 30

НАУКОУМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Инновационные технологии обработки
полимерных композиционных материалов в машиностроении 36

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Суслов А.Г., Петрешин Д.И., Федонин О.Н., Хандожко В.А.
Автоматизированная технологическая система обеспечения контактной
жесткости деталей машин 43

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России
изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней
по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение*

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 8 (74)

2017

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s. SUSLOV A.G.

Chairman of Editorial Committee
m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant
d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

Acad. RAS
LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39

E-mail: naukam@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate
ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

Demin V.A. Design of innovation technologies in metal shaping3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Blyumenstein V.Yu. Mechanics of technological inheritance as scientific basis of designing complex-profile tools for hardening treatment by surface plastic deformation7

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Babichev A.P., Motrenko P.D. Innovation technologies of parts vibro-wave machining of engineering and helicopter production. 17

Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Improvement technologies of surface properties in products with complex geometry by low-temperature plasma impact24

Kirichek A.V., Soloviyov D.L., Silantiev S.A. Technology of combined strengthening by wave deformation and case-hardening of structural low-alloy steels30

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

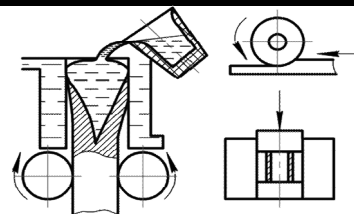
Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. Innovation technologies of polymeric composite materials in mechanical engineering36

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Syslov A.G. Petreshin D.I., Fedonin O.N., Khandozhko V.A. Automated technological system to ensure contact stiffness of machine parts 43

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for agademic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines.

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



УДК 621.7.04

DOI: 10.12737/article_5971e72d9cb153.82722176

В.А. Дёмин, д.т.н.

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)

E-mail: va_demin@bk.ru

Проектирование инновационных технологий в обработке металлов давлением

Рассмотрены методики проектирования инновационных технологий в обработке металлов давлением. Особое внимание уделено технологическим процессам получения заготовок максимально приближенных к готовым изделиям.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; проектирование технологических процессов.

V.A. Demin, D. Eng.

(Bauman State Technical University of Moscow, 5, Building 1, 2-nd Baumanskaya Str., Moscow 105005)

Design of innovation technologies in metal shaping

The procedures of designing innovation technologies in metal shaping are considered. Particular attention is paid to the technological processes of manufacturing blanks approximated to ready-made products in the maximum possible way.

Keywords: mechanical engineering; metal shaping; design of technological processes.

Современное машиностроение невозможно без применения современных инновационных наукоемких технологий [1, 2]. Однако для их широкого внедрения в производство необходимы научно обоснованные методы проектирования технологических процессов, в частности, обработкой металлов давлением.

Сегодня перед исследователями поставлена задача максимального приближения заготовки к форме и размерам готового изделия. Одним из наиболее перспективных методов получения готовых деталей обработкой металлов давлением являются технологические процессы прессования порошков.

В работе [3] предложен инженерный метод решения задач, связанных с производством заготовок с высокой плотностью. Проведена экспериментальная оценка погрешности описания кинематики течения при штамповке порошковых заготовок с пористостью 13...14 %.

Исследовано распределение интенсивности деформаций в зависимости от материала заготовки, глубины внедрения пуансона и координаты заготовки. В результате экспериментального исследования доказано, что для решения задач деформирования заготовок с небольшой пористостью можно использовать результаты анализа напряженно-деформированного состояния при штамповке сплошных заготовок.

Также проанализировано влияние сжимаемости материала заготовки на напряжение текучести. Авторами введено понятие условного напряжения текучести и предложена методика экспериментального получения зависимости величины условного напряжения текучести для железных порошков от плотности заготовки.

Полученные результаты открывают большие возможности для анализа процессов де-

формирования заготовок из порошка существующими программными комплексами, например, QForm.

Интересные исследования проведены в Ульяновском государственном университете по изучению механизма структурообразования в процессе уплотнения порошков [4]. Теоретическое и экспериментальное исследование проводилось по схеме прессования представленной на рис. 1.

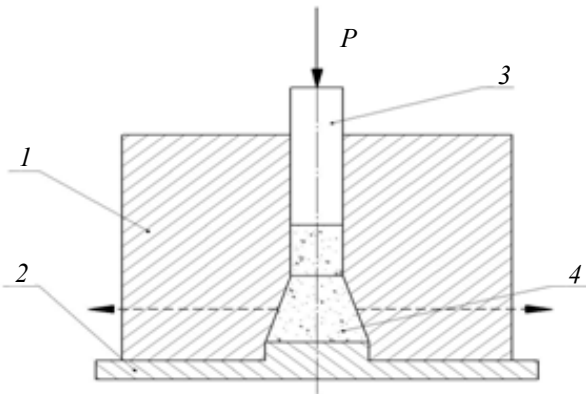


Рис.1. Схема прессования:

1 – матрица; 2 – основание пресс-формы; 3 – пуансон; 4 – порошок

Проведен расчет коэффициента преодоления энергетического барьера в момент, когда происходит схватывание металлов при образовании новой межзеренной границы. Особого внимания заслуживают работы по штамповке увлажненных механических смесей. В этом случае в порошок добавляется до 10 % воды и после этого проводится прессование. В результате получают образцы со 100 %-ной плотностью.

В листовой штамповке сегодня, при проектировании технологических процессов, особое внимание уделяется влиянию анизотропии на процесс штамповки.

Например, в работе [5] анализируется напряженно-деформированное состояние при штамповке листовой заготовки в режиме кратковременной ползучести. С использованием теории ползучести [6], исследуется операция формовки прямоугольной заготовки, у которой соотношение радиуса к толщине больше 10. Предполагается, что главные оси анизотропии совпадают с направлением главных напряжений и длина мембраны значительно превосходит ее ширину, т.е. реализуется схема плоского напряженного и деформированного состояния.

Для упрощения решения этой задачи задается форма деформируемой поверхности.

Принятые допущения позволяют получить аналитические решения для оценки силовых параметров процесса и предельных возможностей формоизменения узкой прямоугольной тонкой листовой заготовки.

Наличие анизотропии в заготовке при вытяжке цилиндрических деталей приводит к необходимости введения в технологический процесс обрезки «фестонов». Таким образом, дважды производится обрезка заготовки: первый раз при вырубке заготовки, второй – после первой вытяжки. Поэтому, для исключения из технологического процесса первой обрезки предлагается использовать многоугольную заготовку или даже квадратную.

В работе [7] проведено исследование влияния формы заготовки на предельные деформации при вытяжке цилиндрических деталей. В качестве предельной деформации принимали предельный коэффициент вытяжки.

Процесс вытяжки моделировали в программе Auto Formplus R5.1. Моделирование проводилось для марок стали: DC03, DC04 и DC05. Были получены предельные коэффициенты вытяжки, которые приведены в таблице.

1. Результаты расчета предельных коэффициентов вытяжки

Материал Заготовка	DC03	DC04	DC05
Круглая	0,5	0,51	0,49
Восьмиугольная	0,51	0,52	0,5
Шестиугольная	0,51	0,52	0,51
Квадратная	0,53	0,54	0,53

Как видно из таблицы, при проектировании технологических процессов вытяжки из фигурной заготовки можно использовать предельные коэффициенты вытяжки для круглых заготовок, деля их на полученные в работе коэффициенты перехода. Штамповку из восьмиугольной заготовки можно проводить при предельных коэффициентах вытяжки, полученных для круглой заготовки.

Показано, что переход на квадратную заготовку позволяет увеличить коэффициент использования материала на 15 %, исключить операцию вырубке заготовки и уменьшить заготовку на величину перемычек.

При проектировании процессов вытяжки цилиндрических деталей из квадратных заготовок необходимо учитывать изменение толщины по периметру заготовки. На рис. 2 показано характерное сечение, в котором появляется максимальная разнотолщинность. Теоре-

тически и экспериментально получено, что максимальная разнотолщинность может быть более 35 %.

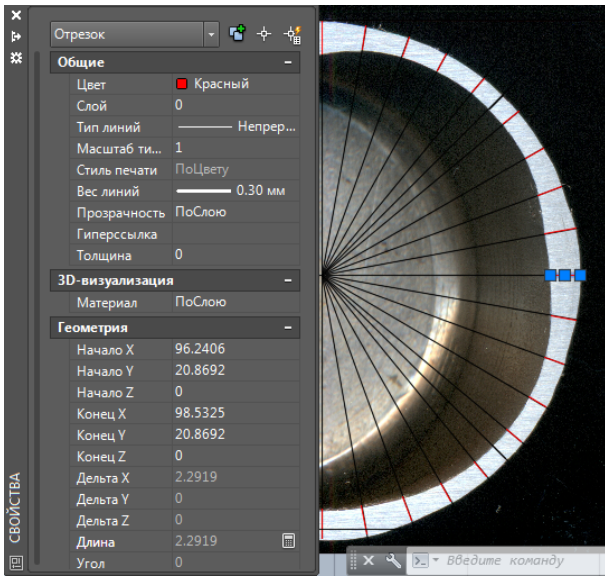


Рис. 2. Изменение толщины заготовки по периметру детали

При вытяжке из анизотропного материала на детали появляются фестоны. Для их удаления необходимо вводить дополнительную операцию обрезки. Поэтому определенный интерес представляет поиск условий, когда величина фестонов вписывается в допуск на высоту детали.

На величину «фестонов» влияют коэффициент вытяжки и анизотропия заготовки и при определенных значениях коэффициента вытяжки и коэффициентов анизотропии величина «фестонов» не будет превышать допуск на величину высоты детали.

Для изотропного материала или небольших коэффициентов вытяжки, величина «фестонов» будет незначительной, и в этом случае нет необходимости вводить в технологический процесс операцию обрезки фланца. Поэтому проанализируем влияние показателей анизотропии и коэффициента вытяжки на величину «фестонов».

Обозначим разницу высот цилиндрической детали между выступающей частью фестона и впадиной U . Рассмотрим влияние коэффициента вытяжки $m = d_d/d_3$, где d_d – диаметр детали; d_3 – диаметр заготовки, на величину U . Влияние коэффициентов анизотропии в данной работе рассматриваться не будет. Это связано с тем, что в европейских стандартах коэффициенты не изменяются и жестко связаны с маркой стали. Для российских сталей в ГОСТ коэффициенты анизотропии не оговариваются.

Моделирование проведено в AutoFormplus R5.1. для штамповки цилиндрической детали имеющей следующие размеры: $d_d = 70$ мм; радиус пуансона и матрицы – 8 мм; толщина – 1мм. Материалы заготовок – стали DC03, DC04 и DC05, которые являются аналогом стали 08. Механические характеристики материалов брали из программы AutoFormplus R5.1.

Для примера приведем характеристики стали DC03.

Кривая упрочнения по Сфивту:

$$\sigma = A \varepsilon^n,$$

где $A = 560$ МПа; $n = 0,176$.

Коэффициенты анизотропии: $R_0 = 2,09$; $R_{45} = 1,47$; $R_{90} = 2,44$.

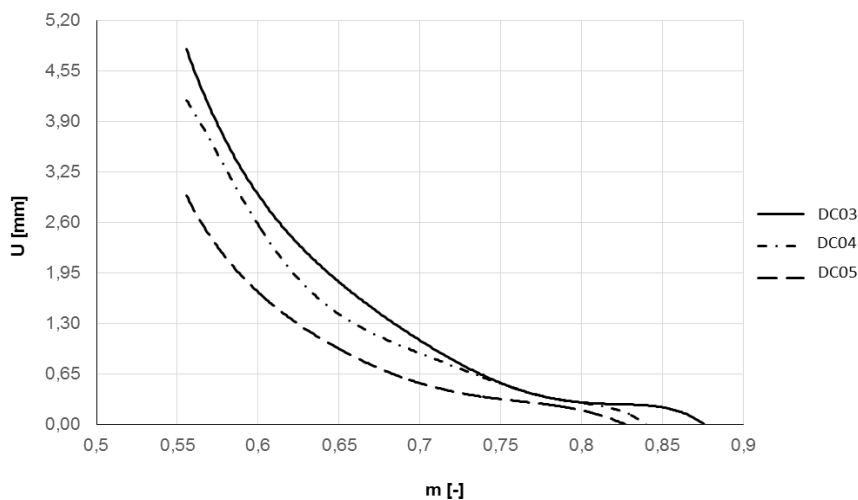


Рис. 3. Влияние коэффициента вытяжки на разность высот фестонов

Результаты расчета показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что стали имеющие больший разброс коэффициентов анизотропии имеют большую разницу между выступами и впадинами на фланце. Большинство деталей, получаемых листовой штамповкой, изготавливаются по качеству IT14.

Для размера 70 мм допуск по ГОСТ 25346-89 будет составлять 0,74 мм и, например, для стали DC05 при $m > 0,66$ можно исключить добавление металла на обрезку фланца, после первой операции вытяжки, а из технологического процесса штампы для обрезки фланца и второй операции вытяжки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дёмин, В.А. Инновационные технологии производства заготовок обработкой давлением // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 8(38). – С. 3–5.
2. Дёмин, В.А. Научные технологии обработки давлением на современном этапе развития машиностроения // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 4(58). – С. 10–13.
3. Григорьев, С.Н., Дмитриев, А.М., Коробова, Н.В., Толмачев, С., Петров, М.Д. Построение метода решения задач для производства высокоплотных порошковых заготовок // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – №1. – С. 50–58.
4. Кокорин, В.Н., Филимонов, В.И., Сизов, Н.А., Кокорин, А.В., Брызгин, М.А. Исследование механизма структурообразования в процессе интенсивного уплотнения порошков с использованием эффекта межчастичного срачивания // Известия МГТУ «МАМИ». – №1(19). – 2014. Т.2. – С. 114–117.
5. Ларин, С.Н., Платонов, В.И., Яковлев, (мл.) С.С. Оценка напряженного и деформированного состояния деформирования листовой оболочки из изотропного материала в режиме кратковременной ползучести // Известия

ТулГУ. Технические науки. – 2016. – №1. – С. 3–9.

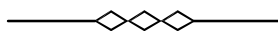
6. Локощенко, А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 504 с. ISBN 978-5-9221-1645-9.

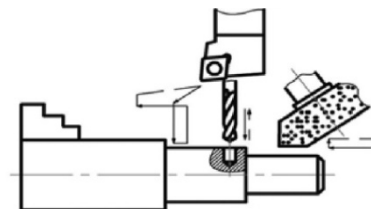
7. Дёмин, В.А., Рыжкова, А.А. Влияние формы заготовка на коэффициент вытяжки цилиндрических деталей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №11. – С. 30–34.

REFERENCES

1. Demin, V.A. Innovation technologies in manufacturing blanks through shaping // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 8(38). – pp. 3–5.
2. Demin, V.A. Science intensive technologies of metal shaping at current stage of engineering development // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 4(58). – pp. 10–13.
3. Grigoriev, S.N., Dmitriev, A.M., Korobkova, N.V., Tolmachyov, S., Petrov, M.D. Method formation of problem solution for manufacturing high-density powder blanks // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2016. – №1. – pp. 50–58.
4. Kokorin, V.N., Filimonov, V.I., Sizov, N.A., Kokorin, A.V., Bryazgin, M.A. Investigation of structure formation mechanism during powder intensive consolidation using interparticle splicing effect // *Proceedings of MSTU "MAMF"*. – №1(19). – 2014. Vol.2. – pp. 114–117.
5. Larin, S.N., Platonov, V.I., Yakovlev, (jun.) S.S. Assessment of stressed and deformed state of sheet casing made of isotropic material at short-term creep mode // *Proceedings of TulSU. Engineering Sciences*. – 2016. – №1, – pp. 3–9.
6. Lokoshchenko, A.M. Creep and Metal Long Strength. – М.: PHYSMATHLIT, 2016. – pp. 504. ISBN 978-5-9221-1645-9.
7. Demin, V.A., Ryzhkova, A.A. Impact of blank form upon elongation ration of cylindrical parts // *Blank Production in Mechanical Engineering*. – 2016. – №11. – pp. 30–34.

Рецензент д.т.н. С.Н. Ларин





УДК 621.787

DOI: 10.12737/article_5971e6e56cd3d8.31840363

В.Ю. Блюменштейн, д.т.н.
(ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)
E-mail: Blumenstein@rambler.ru

Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

На основе механики технологического наследования разработаны новые конструкции деформирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль. Проведено МКЭ-моделирование процесса ППД мультирадиусным роликом и показана возможность накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя.

Ключевые слова: поверхностный слой; очаг деформации; напряженно-деформированное состояние; механика технологического наследования; метод конечных элементов; пластичность; гидростатическое давление.

V.Yu. Blyumenstein, D. Eng.
(FSBEI HE Gorbachev State Technical University of Kuzbass, 28, Vesennyaya Str., Kemerovo, 650000, Russia)

Mechanics of technological inheritance as scientific basis of designing complex-profile tools for hardening treatment by surface plastic deformation

On the basis of technological inheritance mechanics there are developed new designs of deforming tools having a complex operation profile. The simulation with a finite element method (FEM) of the surface plastic deformation (SPD) process by a multi-radius roller is carried out and a possibility to accumulate large values of deformations without metal destruction of a surface layer is shown.

Keywords: surface layer; deformation source; stress-strain state; technological inheritance mechanics; finite element method; plasticity; hydrostatic pressure.

В условиях современного машиностроения постоянное внимание уделяется совершенствованию схем и методов механической обработки. Ключевое внимание уделяется повышению точности обработки и качества поверхностного слоя деталей машин. Сегодня не вызывает сомнения тот факт, что качество изделия закладывается на стадии проектных работ. Это предполагает перенос центра тяжести работ по созданию изделия с натурных испы-

таний опытных образцов или партий на математическое моделирование свойств изделий, а также моделирование процессов производства изделий, что позволяет обнаружить и устранить конструкторские и технологические дефекты еще до начала стадии производства.

Разработка новых инструментов и технологий основана, в первую очередь, на моделировании процессов механической обработки. Современные конечно-элементные программ-

ные продукты позволяют разрабатывать модели высокого качества, о чем свидетельствует их сравнение с экспериментальными тестами.

Так, в работе [1] представлены новые достижения в механической обработке твердых металлов, основанные на физике моделирования. Показано, что сокращение времени цикла при обеспечении качества зависит от физической модели операций по механической обработке твердого металла.

Знание физических закономерностей пластического течения металла позволило разработать и успешно применить на практике процессы резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [2]. Эффективность метода ОПД достигается путем целенаправленного изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя путем его предварительного деформирования, осуществляемого в процессе резания дополнительным механическим источником энергии.

Расчеты напряженно-деформированного состояния и оценка пластичности в очаге деформации позволили усовершенствовать схему деформирующе-режущего протягивания (ДРП) с опережающим пластическим деформированием [3]. Для устранения упругой усадки изделия (втулки) был разработан ряд способов деформирующе-режущего протягивания и протяжек с совмещением зон резания и деформирования с размещением режущих кромок в зоне контактной деформации. Это позволило снизить энергозатраты на процесс резания на 20 % по сравнению с деформирующе-режущим протягиванием с ОПД, а также суммарные энергозатраты на резание и деформирование на 10...14 %.

Развитие методов и технологий ППД связано с уточнением МКЭ-моделей, усложнением геометрии деформирующих инструментов, наложением термических и колебательных воздействий, учетом запаса пластичности металла и др.

Так, Ю.И. Сидякин с соавторами научные исследования, инженерные расчеты и проектирование процессов ППД проводят путем моделирования контактного взаимодействия индентора с обрабатываемым материалом и оценки упругопластической деформации [4].

В рамках научного направления С.А. Зайдеса исследуются и разрабатываются процессы охватывающего ППД, позволяющие обеспечивать точность и высокое качество поверхностного слоя деталей [5]. В упругопластической постановке разработана МКЭ-модель процесса, выполнены расчеты напря-

женно-деформированного состояния очага деформации. Математическое моделирование и последующие инженерные расчеты позволили создать теорию процесса, разработать технологические рекомендации и комплекс средств технологического оснащения, обеспечивающие заданные величины точности, упругости и остаточных напряжений исходя из назначенных условий эксплуатации маложестных валов.

Altan T. выполнил исследование механики процесса ППД, создав 2D и 3D МКЭ-модели обкатывания роликом [6]. Результаты моделирования, включая поверхностные деформации и остаточные напряжения, показали высокую сходимость с экспериментальными данными.

Смелянским В.М. разработана механическая теория процесса ППД, проведено моделирование напряженно-деформированного состояния очага деформации и установлены закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин. Установлено, что при обработке ППД возникает асимметричный очаг деформации (ОД), форма и размеры которого зависят от технологических факторов [7]. Движение частицы металла в ОД осуществляется по линии тока, взятой на определенной глубине и определяемой из решения задач механики твердого тела. Перемещаясь вдоль линии тока, эквидистантной профилю очага деформации, частица проходит через три состояния: начальное, текущее и конечное. Анализ модели позволил получить распределение компонент тензора напряжений, деформаций и скоростей деформаций и оценить влияние гидростатического давления на накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металла.

Одним из важных направлений развития технологий механической обработки, в том числе ППД, является создание в тонком поверхностном слое наноструктурированного состояния металла.

Киричек А.В. и Соловьев Д.Л. на основе физической модели разработали способ градиентной статико-импульсной обработки (СИО) ППД, использующий для пластического деформирования ударные волны, создающие высокое давление в очаге деформации и формирующие большую глубину упрочненного поверхностного слоя [8]. Выявлены измельченные частицы металла размером до 100...300 нм по всей толщине упрочненного образца; высокая концентрация наночастиц обнаружена в поверхностном слое на глубине 3...8 мм. Авторы показали, что способ дефор-

мационного упрочнения ударными волнами позволяет создавать гетерогенные ультрамелкозернистые градиентно-упрочненные структуры, чередующие твердые и пластичные участки по заданному закону.

Кузнецов В.П. с соавторами выполнили в динамике МКЭ-моделирование процесса выглаживания тонкого поверхностного слоя стального образца под внедряемым с постоянной силой и затем движущимся с постоянной скоростью индентором [9]. В условиях плоской деформации исследованы закономерности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) материала и выявлены механизмы образования наноструктурированного слоя. Результаты исследований находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Одним из приоритетных направлений является разработка и реализация методов интенсивной пластической деформации (ИПД), особенностью которых является большое гидростатическое давление в очаге деформации [10 – 11]. Это позволяет достичь высоких пластических деформаций с обеспечением наноструктурированного состояния без разрушения металла; уникального сочетания таких свойств, как исключительно высокой прочности, так и пластичности при комнатной температуре.

Известно, что воздействие режущего и/или деформирующего инструмента на наноструктурированный металл поверхностного слоя приводит к пластическим и тепловым деформациям, что приводит к росту зерна и потере большинства полезных свойств. Поэтому уси-

лия исследователей направлены на сохранение этих свойств, в том числе, путем определения рациональных режимов механической обработки [12].

Анализ показал, что повышение эффективности (интенсификация) процессов «холодной» механической упрочняющей обработки возможно, в том числе, путем создания в очаге деформации сложного напряженно-деформированного состояния с преобладающими схемами с высоким гидростатическим давлением. В свою очередь, такие схемы реализуются инструментами, имеющими сложную геометрию и обеспечивающими определенную кинематику течения металла.

Теоретические исследования. Автором разработана теория формирования и трансформации наследуемого состояния поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации – механика технологического наследования (ТН) [13]. В основе описания лежат представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпании запаса пластичности металла в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения. Жизненный цикл представлен стадиями резания, поверхностного пластического деформирования и усталостного нагружения, состоящего, в свою очередь, из двух стадий – циклической долговечности и циклической трещиностойкости.

Для решения задач механики ТН используют известные из механики деформируемого твердого тела параметры:

- показатель схемы напряженного состояния:

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} = \frac{1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{6} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}; \quad (1)$$

- степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \left\langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2} [(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2]} + \frac{3}{4} (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2) \right\rangle dt; \quad (2)$$

- тензор остаточных напряжений:

$$[T\sigma_{ост}]_{ij} = [T\sigma_{деф}]_{ij} + [T\sigma_{паз}]_{ij} + [T\sigma_t]_{ij}; \quad (3)$$

- степень исчерпания запаса пластичности [14]:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right), \quad (4)$$

где σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений; $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}^2, \eta_{yz}^2, \eta_{zx}^2$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $[T\sigma_{\text{деф}}]_{ij}$ – тензор напряжений нагрузки; $[T\sigma_{\text{раз}}]_{ij}$ – тензор напряжений разгрузки; $[T\sigma_t]_{ij}$ – тензор тепловых напряжений; Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = \text{const}$; Λ и Λ_p – накопленная и предельная степень деформации сдвига при данном показателе схемы напряженного состояния Π ; n – коэффициент деформационного упрочнения; φ_0 – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность. В неупрочненном металле $\Psi = 0$, а при полном исчерпании запаса пластичности $\Psi = 1$.

В качестве исходных характеристик металла используется кривая упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\Lambda)$, кривая предельной пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ и диаграмма циклической трещиностойкости $V = V(K)$ в координатах «коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины V ».

В единых терминах и категориях выполнено решение задач механики на исследуемых стадиях и показано, что технологическое наследование проявляется в формировании наследственных программ нагружения в зависимости от наследственных очагов деформации (ОД), выступающих в качестве комплекса начальных и граничных условий при решении задач механики деформирования. Программа нагружения была представлена в координатах «показатель напряжённого состояния Π – накопленная степень деформации сдвига Λ ».

Выявлены закономерности пластического течения металла, накопления деформации, исчерпания запаса пластичности металла, формирования и трансформации поверхностного слоя по исследуемым стадиям нагружения, сформулированы правила технологического наследования. Результаты исследований позволили в процессах свободного ортогонального резания выявить, а в процессах ППД подтвердить наличие в очаге деформации трех участков квазимонотонной деформации, на границах которых деформация меняет знак.

В частности, при обработке ППД торковым роликом усилием $P = 2500$ Н установлено, что большая часть материала очага деформации находится в условиях сжатия, причем наибольшее значение среднего нормального напряжения соответствует зоне контакта инструмента с деталью. Наибольшие значения интенсивности касательных напряжений имеют место в зоне вершины волны перед деформирующим инструментом. При перемещении вглубь поверхностного слоя происходит уменьшение абсолютных значений, однако, характер распределения этих компонент прак-

тически не изменяется. Такой характер схемы нагружения приводит к тому, что наиболее интенсивно накопление деформаций происходит в передней зоне очага деформации. По мере упрочнения металла каждый последующий рабочий ход приводит к более «жестким» схемам нагружения, приводящим к накоплению предельных деформаций и полному исчерпанию запаса пластичности металла.

Результаты усталостных испытаний упрочненных ППД образцов показали, что исчерпание запаса пластичности до определенного предела полезно с точки зрения увеличения циклической долговечности [13]. В то же время это приводит к обратному эффекту на стадии циклической трещиностойкости, увеличивая скорость роста трещин и сокращая продолжительность этой стадии. Установлено, для каждого материала и каждой программы нагружения существует определенный уровень степени исчерпания запаса пластичности, начиная с которого происходит повышение интенсивности скорости роста трещин.

Таким образом, доступный диапазон изменения достигаемых при обработке ППД параметров механического состояния металла поверхностного слоя ограничен как исходными свойствами металла детали, так и допустимым диапазоном изменения технологических параметров режима обработки, к которым относится и форма профиля обкатного ролика.

При этом расширение технологических возможностей ППД возможно за счет создания схем обработки с большим гидростатическим давлением и количеством участков квазимонотонной деформации. Это приведет к накоплению больших деформаций при относительно невысоком исчерпании запаса пластичности без разрушения металла поверхностного слоя.

Результаты и обсуждение. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать новые конструкции деформирующих инстру-

ментов, имеющих сложный рабочий профиль [15 – 17]. Отличительными признаками предлагаемых конструкций являются: возможность варьирования в широких пределах геометрии рабочих профилей, как в радиальном, так и в осевом направлении; создание в очаге деформации больших натягов деформирующих элементов; создание сложного напряженного состояния с преимущественным большим гидростатическим давлением и получения больших деформаций с относительно низкой степенью истощения запаса пластичности металла.

Ролик обкатной мультирадиусный (МР-ролик) имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины, находящимися относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях [17].

Оценка механического состояния очага деформации при обработке МР-роликом проводилась путем МКЭ-моделирования; моделируемый материал принимался изотропным с параметрами механического состояния, соответствующими параметрам стали 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки. Была принята билинейная аппроксимация кривой течения, учитывающая упрочнение металла. Использовалась плоско-деформированная по-

становка; при этом процесс накопления деформаций и истощения запаса пластичности моделировался в плоскости подачи, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки [18].

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной $L = 50$ мм и высотой $h = 20$ мм (рис. 1). Как известно, плоскость главных деформаций располагается в меридиональном сечении цилиндрической заготовки – плоскости подачи [7]. Нижняя и боковые границы фрагмента жестко закреплялись по обоим осям. Размеры возникающего при обработке очага деформации значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому появляющиеся при такой постановке краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

Индентор моделировался как абсолютно жесткое тело и представлял собой окружность, моделирующую ролик заданного профильного радиуса. На материал поверхности детали, со свойствами, приведенными в таблице 1, воздействовал мультирадиусный ролик с профильными радиусами: $R_{пр1} = 1$ мм и натягом $h_{д1} = 0,05$ мм; $R_{пр2} = 1$ мм и натягом $h_{д2} = 0,1$ мм; $R_{пр3} = 1$ мм и натягом $h_{д3} = 0,15$ мм; $R_{пр4} = 3$ мм и натягом $h_{д4} = 0,05$ мм (рис. 2).

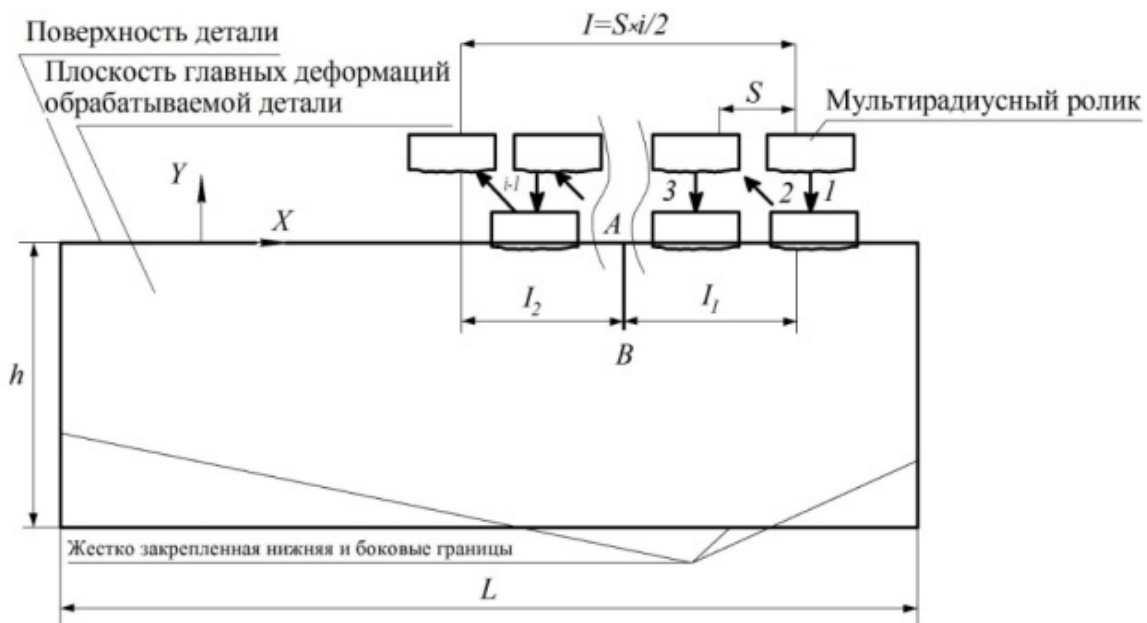


Рис. 1. Схема к постановке задачи МКЭ-моделирования

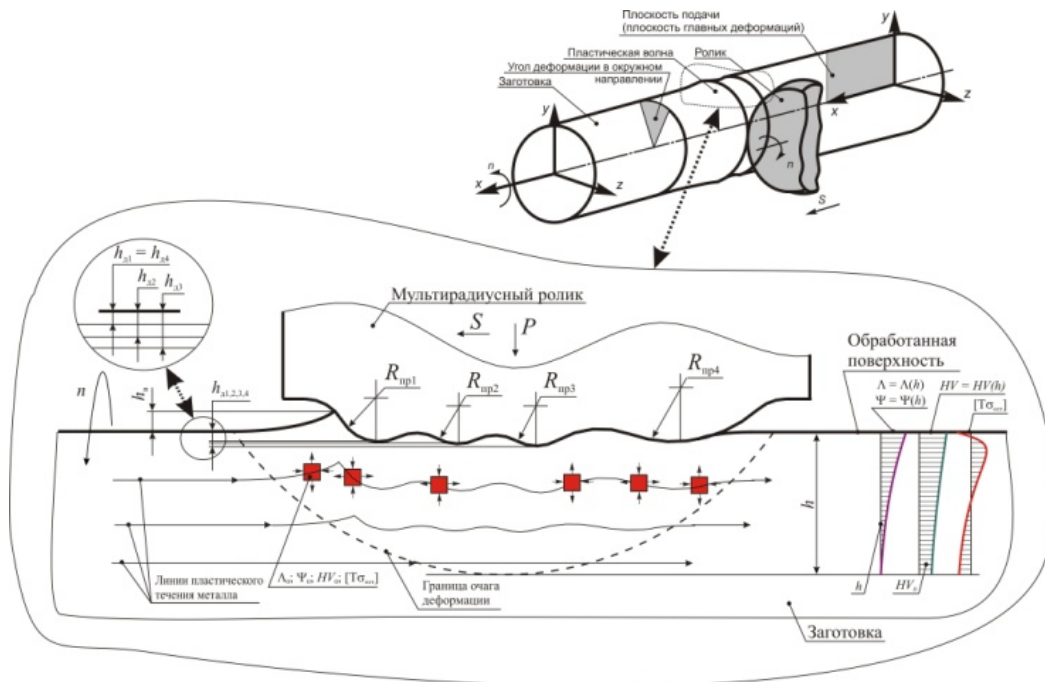


Рис. 2. Схема обработки ППД мультирадиусным роликом

Физические и механические свойства металла и параметры кривой течения (сталь 45, ГОСТ 1050-88, 160...180 HV)

Модуль Юнга	E , МПа	2×10^{11}
Плотность	ρ , кг/м ³	7800
Коэффициент Пуассона	ν	0,3
Коэффициент трения	η	0,21
Экстраполированный предел текучести	$\sigma_{экс}$, МПа	$3,66 \times 10^8$
Тангенциальный модуль	$T_{мод}$, МПа	$2,596 \times 10^6$

В плоскости главных деформаций перемещение очага деформации в направлении подачи носит дискретный характер: новый ОД возникает со смещением относительно предыдущего на величину подачи.

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с некоторым зазором. На первом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на некоторую величину, предполагающую внедрение и создание заданного при моделировании натяга. На втором и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на исходное расстояние с его одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Всего было смоделировано 340 шагов – 170 шагов нагружения и 170 шагов разгрузки. При этом длина обработанной поверхности в представленной модели составила $l = S \cdot n/2 = 15$ мм.

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования указанное сечение проходит через пространство очага деформации и является тем сечением по глубине обработанного поверхностного слоя, в котором произошло накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора остаточных напряжений.

После решения модели в выделенном сечении для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов, составляющие вектора смещений узлов, компоненты тензора напряжений, компоненты тензора упругой, пластической и суммарной упруго-пластической деформации.

Для дальнейших расчетов накопленных параметров механического состояния угол деформации в окружном направлении был принят равным 10°, частота вращения детали равной 300 об/мин [7]. Таким образом, время одного оборота детали составило 0,2 с. Для принятого угла деформации в окружном направлении, время одного цикла, за который происходит нагрузка и разгрузка металла поверхностного слоя, составило 0,0054 с. При этом половину этого времени (0,0027 с) осуществляется нагружение и столько же – разгрузка.

В дальнейшем выполняли пересчет компонент тензоров напряжений и деформаций в координаты точек линий тока в очаге деформации [19].

На рис. 3 представлен профиль очага деформации, восстановленный по результатам МКЭ-моделирования. На рис. 4–7 приведено

распределение компонент напряженно-деформированного состояния вдоль линии данного профиля очага деформации; при этом абсциссы точек на графиках совпадают с абсциссами профиля.

Деформирующий элемент, первым входящий в контакт с исходным (необработанным) поверхностным слоем детали, имеет профильный радиус $R_{пр1} = 1$ мм и перемещается с натягом $h_{д1} = 0,05$ мм. В результате возникает ОД, по форме и размерам идентичный очагу деформации при ППД торцовым роликом.

Второй деформирующий элемент также имеет профильный радиус $R_{пр2} = 1$ мм и перемещается с натягом $h_{д2} = 0,1$ мм относительно исходной поверхности и натягом $0,05$ мм относительно первого деформирующего элемента. При этом происходит перекрытие зон пластического течения от действия первого и второго деформирующих элементов. Исходя из представлений о механике ППД в зоне этого перекрытия, происходит изменение схемы напряженного состояния, которое приводит к смене знака пластической деформации. Этот же эффект наблюдается во всех зонах, расположенных между соседними деформирующими элементами.

Третий деформирующий элемент с профильным радиусом также $R_{пр3} = 1$ мм перемещается с натягом $h_{д3} = 0,15$ мм относительно исходной поверхности и натягом $0,05$ мм относительно второго деформирующего элемента. Четвертый деформирующий элемент с профильным радиусом $R_{пр4} = 3$ мм перемещается с натягом $h_{д4} = 0,05$ мм относительно исходной поверхности и натягом $-0,05$ мм относительно третьего деформирующего элемента. Такая конструкция мультирадиусного ролика приводит к сложному напряженному состоянию металла, при котором происходит неоднократная смена знака пластической деформации.

Анализ результатов МКЭ-моделирования показал, что профиль очага деформации с достоверностью свыше 85 % совпадает с экспериментальным профилем, полученным методом профилографирования после быстрого отвода/отстрела МР-ролика от поверхности детали (рис. 3). Это говорит о корректности постановки МКЭ-модели и решения задачи по определению компонент тензоров напряжений и деформаций. Вторым важным выводом заключается в том, что в верхних зонах очага деформации металл находится в условиях сжатия

(рис. 4).

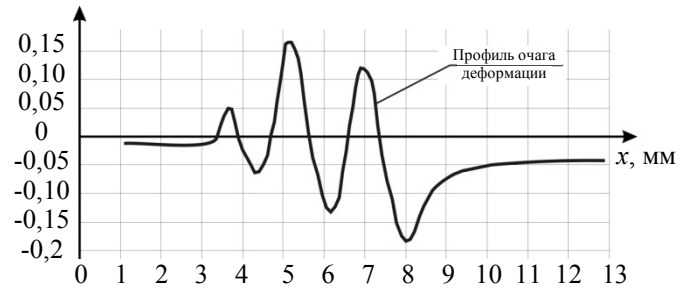


Рис. 3. Профиль очага деформации, восстановленный по результатам МКЭ-моделирования

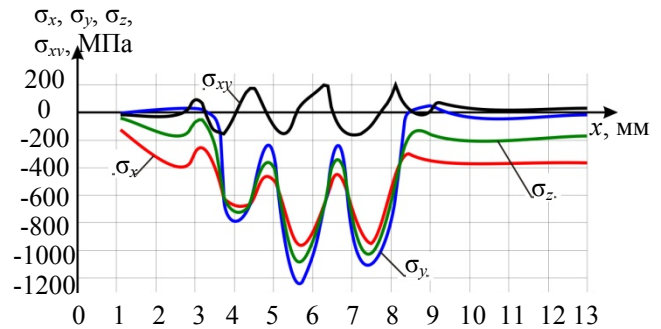


Рис. 4. Распределение компонент тензора напряжений

Компоненты тензора напряжений изменяются в соответствии с профилем деформирующих элементов МР-ролика. Компонент σ_x в зоне передней внеконтактной поверхности перед первым деформирующим элементом вначале снижается до уровня -380 МПа, затем увеличивается до -230 МПа в зоне вершины пластической волны. Компонент σ_y снижается до уровня -850 МПа, а компонент σ_{xy} вначале растет до $+75$ МПа, затем снижается до -85 МПа в зоне вершины пластической волны. В зоне передней контактной поверхности первого деформирующего элемента вначале происходит рост, снижение численного значения компонента σ_x до уровня -630 МПа, затем опять некоторый рост до -550 МПа в точке вершины профиля первого деформирующего элемента. В этой же зоне происходит непрерывное повышение компонента σ_y до значения -190 МПа, а компонента σ_{xy} до положительных значений $+175$ МПа.

В переходной зоне между первым и вторым деформирующими элементами в точках с абсциссами $4,2 \dots 5,2$ мм компонент σ_x растет, компонент σ_y снижается до -1300 МПа, а компонент σ_{xy} вначале снижается до -180 МПа, затем растет.

В передней контактной зоне второго деформирующего элемента происходит резкое сни-

жение компонента σ_x до значения -980 МПа, компонент σ_y начинает возрастать, а компонент σ_{xy} увеличивается до +200 МПа.

В переходной зоне между вторым и третьим деформирующими элементами, а также в контактной зоне третьего деформирующего элемента наблюдается качественно та же картина изменения компонент напряженного состояния.

В переходной зоне между третьим и четвертым деформирующими элементами происходит рост компонент σ_x и σ_y , а компонент σ_{xy} уменьшается.

Среднее нормальное напряжение повторяет тенденции изменения компонент напряженного состояния и показывает, что очаг деформации находится в условиях сжатия (рис. 5). При этом под вторым и третьим деформирующими элементами достигаются условия, при которых действует максимальное гидростатическое давление, достигающее 1150 МПа.

Третий важный вывод заключается в том, что ввиду сложной картины течения металла в тех же характерных зонах в соответствии с теми же тенденциями скорости деформации неоднократно меняют величины и знак (рис. 6).

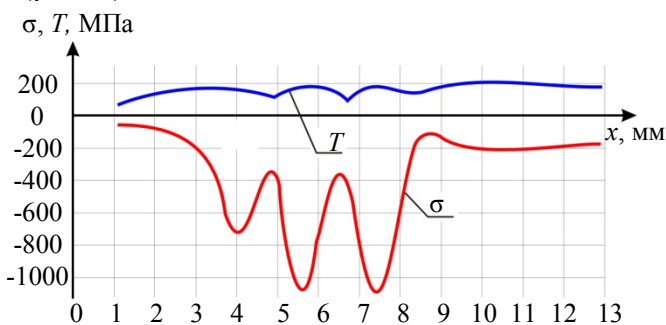


Рис. 5. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений

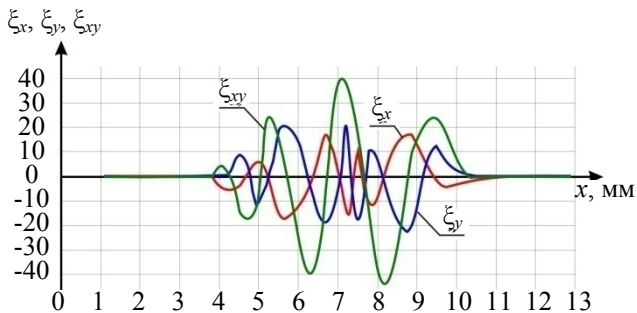


Рис. 6. Распределение компонент тензора скоростей деформации

Тем самым накопление степени деформации сдвига и истощения запаса пластичности металла происходят непрерывно при отрица-

тельном значении показателя схемы напряженного состояния (рис. 7). При этом даже при существенной накопленной деформации $\Lambda \approx 7$ вследствие благоприятной схемы деформирования степень истощения запаса пластичности не превышает значений $\Psi \leq 0,62$.

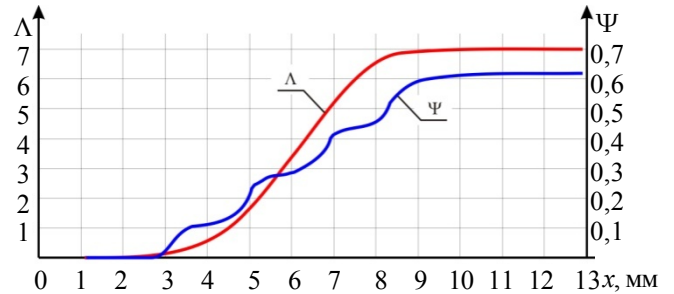


Рис. 7. Накопление степени деформации сдвига и изменение степени истощения запаса пластичности металла

Результаты исследований показали, что при обработке торковым роликом традиционной конструкции:

- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к предельному состоянию металла $\Psi = 1$ при профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм и натяге $h_d = 0,03$ мм;
- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к предельному состоянию металла $\Psi = 1$ при профильном радиусе $R_{пр} = 3$ мм и натяге $h_d = 0,05$ мм;
- натяг $h_d = 0,15$ мм при профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм недопустим, т.к. при внедрении инструмента в течение нескольких оборотов детали приводит к нестационарному очагу деформации. Это заключается в катастрофическом росте пластической волны перед деформирующим инструментом и разрушению в районе ее вершины;
- обработка ППД с указанными натягами и профильными радиусами последовательно вторым, третьим и четвертым рабочими ходами приводит к накоплению предельных деформаций и полному истощению запаса пластичности металла уже после первого рабочего хода.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемая конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя, что предоставляет дополнительные возможности по обеспечению, как циклической долговечности, так и циклической трещиностойкости.

Исследования микротвердости металла зо-

ны очага деформации и упрочненного поверхностного слоя, проведенные на приборе мод. Dura Skan 20, подтвердили полученные закономерности.

Выводы

1. Совершенствование схем и методов, разработка новых инструментов и технологий основана, в первую очередь, на моделировании процессов механической обработки. Современные конечно-элементные программные продукты позволяют разрабатывать модели высокого качества, о чем свидетельствует их сравнение с экспериментальными тестами. При этом качество расчетов определяется качеством физической модели, основанной на современных представлениях о механике деформируемого твердого тела.

2. Знание физических закономерностей пластического течения металла, расчеты напряженно-деформированного состояния и оценка накопленных деформаций и пластичности в процессе и по окончании обработки позволили разработать ряд уникальных методов и процессов, обеспечивающих высокое качество поверхностного слоя и, соответственно, высокую долговечность обрабатываемых деталей машин.

3. Повышение эффективности (интенсификация) процессов «холодной» механической упрочняющей обработки возможно, в том числе, путем создания в очаге деформации сложного напряженно-деформированного состояния с преобладающими схемами с высоким гидростатическим давлением. В свою очередь, такие схемы реализуются инструментами, имеющими сложную геометрию и обеспечивающими определенную кинематику течения металла.

4. Теория формирования и трансформации наследуемого состояния поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации – механика технологического наследования (ТН), разработанная автором, использует представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпанию запаса пластичности металла в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения. Показано, что расширение технологических возможностей ППД возможно за счет создания схем обработки с большим гидростатическим давлением и количеством участков квазимонотонной деформации.

5. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать новые конструкции де-

формирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль. Отличительными признаками предлагаемых конструкций являются: возможность варьирования в широких пределах геометрии рабочих профилей, как в радиальном, так и в осевом направлении; создания в очаге деформации больших натягов деформирующих элементов; создание сложного напряженного состояния с преимущественным большим гидростатическим давлением и получения больших деформаций с относительно низкой степенью исчерпания запаса пластичности металла.

6. Проведено МКЭ-моделирование процесса ППД мультирадиусным роликом, имеющим форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов с радиусами постоянной величины, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях. Выявлена картина пластического течения металла в очаге деформации в условиях сложного напряженного состояния и показано, что рассматриваемая конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя. В свою очередь, это предоставляет дополнительные возможности по обеспечению, как циклической долговечности, так и циклической трещиностойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marusich, T.D., Usui, S., Zamorano, L., Marusich, K., Leopold, J. New advances in the machining of hard metals using physics-based modeling (2013) *Engineering Transactions*, 61(1), pp. 3–13.
2. Ярославцев, В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлостружки. <http://technomag.bmstu.ru/doc/567548.html#> 07, июль 2013 DOI: 0.7463/0713.0567548.
3. Амбросимов, С.К. Определение технологических параметров процесса деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием и упругопластическим нагружением зоны резания // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №8. – С. 3–7.
4. Сидякин, Ю.И., Осипенко, А.П., Бочаров Д.А. Совершенствование технологии отделочно-упрочняющей обработки валов поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №8. – С. 23–26.
5. Зайдес, С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
6. T. Altan. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process [accessed Apr 18, 2017].

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

8. **Kirichek, A.V., Soloviyev, D.L.** Nanostructure changes in iron-carbon alloys as a result of impulse deformation wave action (2013) *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 5 (4), art. no. 04009.

9. **Kuznetsov, V.P., Smolin, I.Y., Dmitriev, A.I., Konov, D.A., Makarov, A.V., Kiryakov, A.E., Yurovskikh, A.S.** Finite element simulation of nanostructuring burnishing (2013) *Physical Mesomechanics*, 16 (1), pp. 62–72.

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

11. **Valiev, R.Z.** Nanostructured alloys: Large tensile elongation (2013) *Nature Materials*, 12 (4), pp. 289–291.

12. **Резание** металлов с объемной нано- и субмикрористаллической структурой [Текст]: монография/ А.И. Грабченко, Дж. Каптай, А.А. Симонова, А.П. Тарасюк, В.В. Драгобецкий, Н.В. Вerezub. – Харьков: Изд-во «Точка», 2012. – 217 с.

13. **Блюменштейн, В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

14. **Филиппов Ю.К.** Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 2. – С. 3–9.

15. **Пат. 2529335 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной комбинированный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135796/02; заявл. 30.07.2013;опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

16. **Пат. 2530600 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной двухрадиусный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135794/02; заявл. 30.07.2013;опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

17. **Пат. 2557377 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной мультирадиусный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135795/02; заявл. 30.07.2013 ;опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

18. **Махалов, М.С.** Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / М. С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 21–25.

19. **Кречетов, А.А.** Методика расчета параметров механического состояния поверхностного слоя деталей машин // Вестник КузГТУ. – 2001. – №5. – С. 27–31.

REFERENCES

1. Marusich, T.D., Usui, S., Zamorano, L., Marusich, K., Leopold, J. New advances in the machining of hard metals using physics-based modeling (2013) *Engineering Transactions*, 61(1), pp. 3–13.

2. Yaroslavtsev, V.M. *Cutting with Leading Plastic Deformation in Technologies of Metal Chip Disposal*. <http://technomag.bmstu.ru/doc/567548.html#> 07, July, 2013 DOI: 0.7463/0713.0567548.

3. Ambrosimov, S.K. Technological parameters definition of deformation-cutting drawing process with leading plastic deformation and elasto-plastic loading of cutting area // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2008. – №8. – pp. 3–7.

4. Sidyakin, Yu.I., Osipenko, A.P., Bocharov, D.A.Improvement of shaft finish-strengthening technology with surface plastic deformation // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2007. – №8. – pp. 23–26.

5. Zaides, S.A. *Female Surface Plastic Deformation*. – Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2001. – pp. 309.

6. T. Altan. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process [accessed Apr 18, 2017].

7. Smelyansky, V.M. Mechanics of Parts Strengthening with Surface Plastic Deformation. – М.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 300.

8. Kirichek, A.V., Soloviyev, D.L. Nanostructure changes in iron-carbon alloys as a result of impulse deformation wave action (2013) *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 5 (4), art. no. 04009.

9. Kuznetsov, V.P., Smolin, I.Y., Dmitriev, A.I., Konov, D.A., Makarov, A.V., Kirya-kov, A.E., Yurovskikh, A.S. Finite element simulation of nanostructuring burnishing (2013) *Physical Mesomechanics*, 16 (1), pp. 62–72.

10. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V. *Nano-structural Materials Obtained by Intensive Plastic Deformation*. М.: Logos, 2000. pp. 272.

11. Valiev, R.Z. Nanostructured alloys: Large tensile elongation (2013) *Nature Materials*, 12 (4), pp. 289–291.

12. *Cutting of Metals with Solid Nano- and Submicrocrystalline Structure* [Text]: monograph/ A.I. Grabchenko, J. Kaptay, A.A. Simonova, A.P. Tarasyuk, V.V. Dragobetsky, N.V. Verezub. – Kharkov: “Tochka” Publishing House, 2012. – pp. 217.

13. Blyumenstein, V.Yu., Smelyansky V.M. *Mechanics of Technological Inheritance at Stages of Machining and Operation of Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering-1, 2007. – pp. 400.

14. Filippov Yu.K. Criterion of quality assessment of parts manufactured by cold die forging // *Forging and Stamping Production*. – 1999. – № 2. – pp. 3–9.

15. Pat. 2529335 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Combined Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135796/02; applied 30.07.2013; published. 27.09.2014, Bull. № 27.

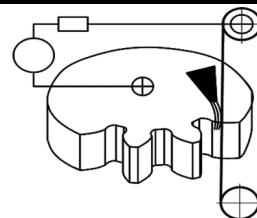
16. Pat. 2530600 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Two-Radius Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135794/02; applied 30.07.2013; published 10.10.2014, Bull. № 28.

17. Pat. 2557377 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Multi-Radius Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135795/02; applied 30.07.2013 ; published 20.07.2015, Bull. № 20.

18. Makhalov, M.S. Simulation of residual stresses at stages of product life cycle / M. S. Makhalov, V.Yu. Blyumenstein // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2014. – №12. – pp. 21–25.

19. Krechetov, A.A. Procedure of Parameter Computation of Mechanical State of Machine Parts Surface Layer // *Bulletin of KuzSTU*. – 2001. – №5. – pp. 27–31.

Рецензент д.т.н. Д.Л. Соловьев



УДК 621.924

DOI: 10.12737/article_5971dbbf4e3ee2.23021556

А.П. Бабичев, д.т.н.

(Донской государственный технический университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

П.Д. Мотренко, д.т.н.

(ПАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону)

E-mail: vibrotech@mail.ru

Инновационные технологии виброволновой обработки деталей машиностроения и вертолетостроения

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований с целью изучения особенностей взаимодействия волн деформаций с образцами из различных материалов, подвергнутыми различным схемам виброволнового нагружения.

Ключевые слова: виброволновая обработка; качество поверхности; деформация.

A.P. Babichev, D. Eng.,

(Don State Technical University 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344010)

P.D. Motrenko, D. Eng.

(PJ-S Co "Rostvertol", Rostov-upon-Don 319)

Innovation technologies of parts vibro-wave machining of engineering and helicopter production

The results of theoretical and experimental investigations with the purpose of the analysis of peculiarities in the interaction of deformation waves with samples of different materials subjected to different circuits of vibro-wave loading are shown.

Keywords: vibro-wave machining; surface quality; deformation.

Виброволновые процессы и явления в технологии машиностроения и металлообработки представляют особый интерес, создавая условия для разработки новых методов обработки, и находят широкое применение в физике деформационных процессов [1 – 5]. Для изучения приведенных предпосылок выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований с целью изучения особенностей взаимодействия волн деформаций с образцами, подвергнутыми различным схемам виброволнового нагружения.

Одним из примеров является исследование виброволнового нагружения образца в виде закрытого корпуса с разъёмными соединениями (рис. 1.).

Представленный на рис. 1 «корпус» состо-

ит из 4-х «стенок» с размерами 60×70×10 и 70×80×10 мм, и 2-х «крышек» с размерами 80×80×10 мм. Сборка «корпуса» выполнена с помощью болтовых соединений. Для проведения эксперимента изготовлены два «корпуса» с одинаковыми габаритными размерами, но выполненными из разного материала. Материал образцов – сталь 30ХГСА и алюминиевый сплав АВТ1. Буквами «Л» и «Т» обозначены, соответственно, лицевые (наружные) и тыльные (внутренние) стороны образцов.

Технологическая схема одностороннего виброволнового нагружения модели (образца) виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом (ШСУ) представлена на рис. 2.

Продолжительность обработки – 10, 60 и

120 с. Радиус сферы контактных поверхностей, деформирующих элементов инструмента (стержней) составляет $R = 2,5$ мм.

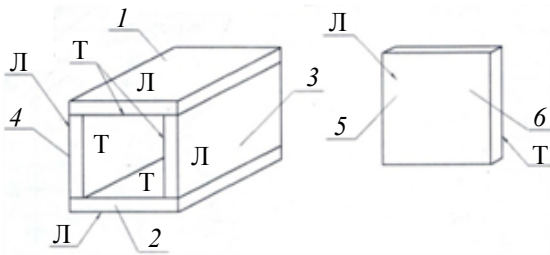


Рис. 1. Сборочная единица «корпус»:

1, 2 – стенка 70×80×10; 3, 4 – стенка 60×70×10; 5, 6 – крышка 80×80×10 (5 и 6 в сборе условно не указаны)

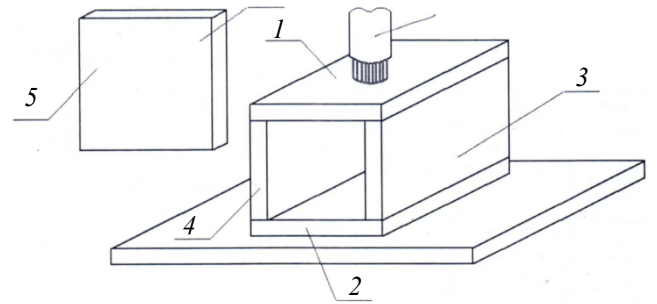


Рис.2. Схема одностороннего виброволнового нагружения модели (образца) виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом

Результаты изменений микротвердости материала H_{μ} элементов «корпусной» детали представлены в табл. 1.

1. Результаты изменения H_{μ} отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, с	Изменение H_{μ} на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л'	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	-40,7	-86,7	-20,3	+51,3	-7,4	-9,6	+45,3	-76,6	2,7	-10,1	-0,7	-7,5
ЗОХГСА	10	-32,8	-2,4	+175,6	+71,5	+69,7	+9,8	-114	-73,8	-	-	-35,8	-8,4
АВТ1	60	-39,4	-62,5	-37,1	+13,8	-2,3	-23,7	-0,9	-68,8	+4,2	+17	-23,8	-52,5
ЗОХГСА	60	-16,9	+11,4	+186,6	+0,9	+64,5	-15,8	+106,6	-34,2	-	-	-42,2	-9,8
АВТ1	120	-19,5	-79,2	-69,4	-35,2	-62,8	-54	+34,3	-70,6	-10,3	-0,3	-195	-22,3
ЗОХГСА	120	+36,6	-45,3	+83,5	-3,3	-40,8	-32,8	-149,5	-66,8	-	-	-186,4	-159

По результатам проведённого эксперимента одностороннего виброволнового нагружения модели виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом (ШСУ) отмечено:

1. В основном снижение H_{μ} для образцов.
2. При обработке 120 с преобладает снижение H_{μ} . Лишь одно показание увеличилось для поверхности «4Л» образца из материала АВТ-1.
3. Существенное снижение H_{μ} поверхности образца 6, изготовленного из материала 30ХГСА при обработке 120 с.
4. С увеличением t возрастает уровень снижения H_{μ} .

Произведена обработка имитационной модели корпусной детали при отсутствии контактного виброударного нагружения среды стальных шаров или ШСУ с целью выявления виброволнового воздействия. Образец, (пустой) закреплённый на виброплощадке, подвергался вибрированию. Режимы колебаний: $A = 2,5$ мм; $f = 30$ Гц; $t = 10$ мин.

Результаты измерений представлены в табл. 2.

2. Результаты изменения H_{μ} отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, мин	Изменение H_{μ} на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	-30,4	-14,38	+29,1	-14,28	+7,26	+33,94	-14,28	-19,9	-4,48	+21,16	-20,96	+23,2
30ХГСА	10	-39,3	-21,3	+113,4	+8,4	-88,8	-3,6	-31,5	-32,1	-	-	-47,4	-64,8

По результатам эксперимента отмечен увеличенный разброс значений H_{μ} для материала АВТ-1. Более стабильны результаты измерения H_{μ} для стали 30ХГСА, где отмечается снижение H_{μ} .

Произведена обработка «корпуса», закреплённого на виброплощадке с заполнением внутренней полости стальными шарами на 80... 90 % объёма (рис. 3). Далее произведена повторная обработка с поворотом образца на 180°.

Режимы обработки те же, что и при обработке «пустого» образца: $A = 2,5$ мм; $f = 30$ Гц; $t = 10$ мин.

Результаты изменений H_{μ} представлены в табл. 3.

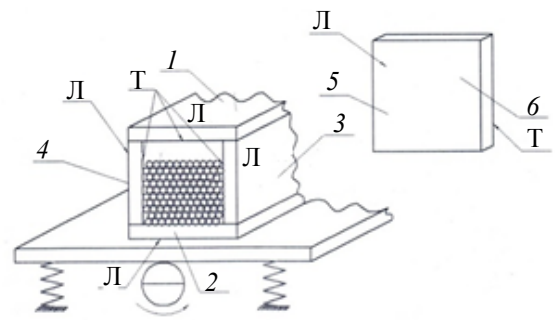


Рис. 3. Схема обработки «корпуса», закреплённого на виброплощадке с заполнением внутренней полости стальными шарами.

3. Результаты изменения H_{μ} отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t , мин	Изменение H_{μ} на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	28,22	19,92	53,76	54,66	19,48	50,48	55,22	83,84	3,84	55,58	83,04	28,72
30ХГСА	10	108,9	43,5	32,4	58,1	132,6	-23,4	93,9	42	-	-	124	214,1
После поворота корпуса на 180°													
АВТ-1	10	-9,66	74,84	-25,04	1,34	22,42	20,66	5,84	-14,3	30,14	37,62	-26,9	27,24
30ХГСА	10	36,1	96,4	-48	131,8	-60	167,2	-19,5	70	-	-	13,7	47,8

В отличие от обработки «пустой» коробки, при обработке с заполнением рабочей средой (стальные шары) на 80...90% объёма полости («коробки»), отмечено повышение H_{μ} всех поверхностей (сторон образца 1, 2, 3, 4, 5, 6) в том числе «Л» и «Т». Это объясняется соударением частиц среды, сопровождаемых пластической деформацией и взаимодействием ударных волн.

По результатам табл. 3 представлены диаграммы изменения H_{μ} отдельных элементов корпусной детали.

После продолжения обработки образца и поворота его на 180° отмечены разные значения H_{μ} в виде его изменения преимущественно лицевых поверхностей (Л).

С целью проверки изменений H_{μ} при разностороннем виброволновом воздействии на корпусной образец (внутри полый – «пустой») произведена ВиО образца в среде стальных шаров $d = 7$ мм в течение 60 мин в рабочей камере. Схема нагружения и в «свободном состоянии» (без закрепления).

Результаты изменений H_{μ} представлены в табл. 4.

4. Результаты изменения H_{μ} отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t , мин	Изменение H_{μ} на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	60	72,86	24,04	68,5	53,5	110,1	47,1	86,5	1,3	157,8	5,6	82,4	0,2
30ХГСА	60	53,8	120,9	145,5	126,3	226,3	52,8	326,5	140,6	-	-	199	213,8

В качестве следующего примера, раскрывающего особенности взаимодействия волн деформаций при нагружении пакета образцов выполнены комплексные исследования величин виброволнового нагружения на микро-

твердость, остаточные напряжения и усталостную долговечность.

Известно, что физико-механические свойства (микротвердость, остаточные напряжения), структура являются важнейшими пока-

зателями, характеризующими состояние материала детали и оказывающими влияние на ее эксплуатационные свойства (усталостную прочность, размерную стабильность и др.).

Виброударные воздействия на тела и среды различных характеристик сопровождаемые виброволновыми процессами могут оказаться достаточно эффективными при решении широкого спектра технологических задач. Представленные ниже результаты исследований подтверждают эти предположения.

Обработке подвергались плоские образцы (рис. 4) из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава Д16Т, собранные в пакеты и зафиксированные технологическим крепежом (рис. 5). Обработка осуществлялась в среде стальных шаров из закаленной стали ШХ15 (62...64 HRC). Режимы виброволнового нагружения: амплитуда колебаний $A = 2,5$ мм; частота $f = 30$ Гц; продолжительность обработки $t = 30$ и 60 мин. Оценка изменения уровня остаточных напряжений осуществлялась по величине прогиба f образца с помощью специального устройства. Измерение f осуществлялось с лицевой и тыльной стороны (соответственно стороны 1 и 2 для каждого образца). Результаты исследований представлены в таблицах и характеризуют дифференцированное изменение величины прогиба f пакета образцов при времени обработки 30 и 60 мин.

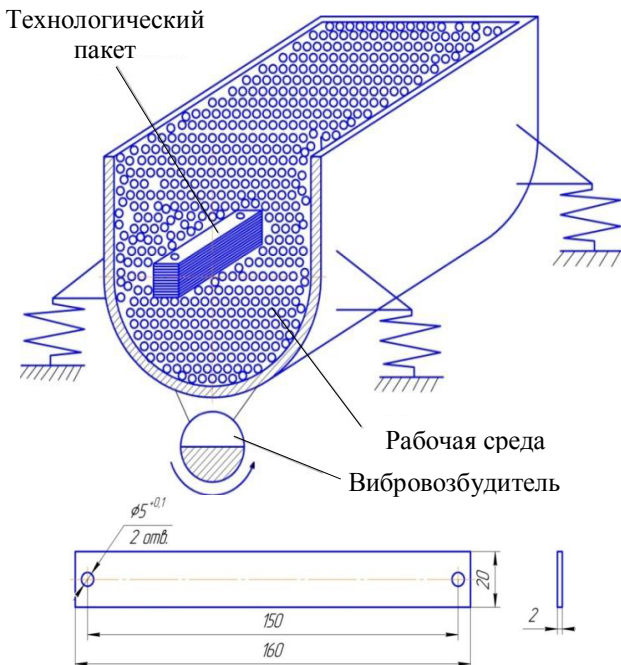


Рис. 4. Схема нагружения и общий вид образца

Представим также результаты обработки пакета плоских образцов из разнородных матери-

алов (с различными механическими свойствами), при различном размещении образцов в пакете.

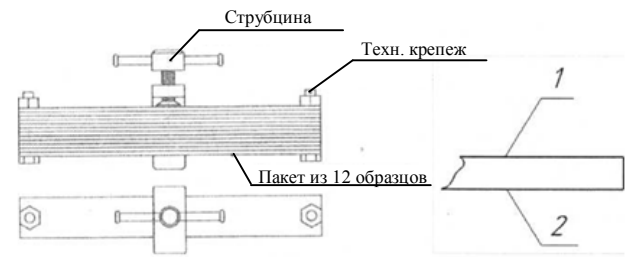


Рис. 5. Схема пакета образцов

Целью эксперимента является изучение особенностей распространения ударных волн в пакете набранных из различных материалов, в частности алюминиевого сплава АМг6 и стали 30ХГСА.

Обработке подвергались плоские образцы (см. рис. 5) из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава АМг6. Образцы были собраны в пакеты различных размеров и зафиксированы технологическим крепежом (см. рис. 6). Обработка осуществлялась в среде стальных шаров из закаленной стали ШХ15 $d = 7$ мм, при свободной загрузке (62...64 HRC_Э) (см. рис. 5). Режимы обработки: амплитуда колебаний $A = 2,5$ мм; частота $f = 30$ Гц; продолжительность обработки $t = 30$ и 90 мин.

Оценка результатов эксперимента осуществлялась измерением микротвёрдости H_{μ} с двух сторон: лицевой нагруженной прямой стороны и тыльной противоположной стороны. Измерение величины прогиба f осуществлялось с лицевой стороны и тыльной (соответственно стороны 1 и 2 для каждого образца).

Результаты исследований представлены в табл. 5 для четырех пакетов, набранных из различно расположенных образцов в пакете.

В таблице показаны номера образцов, их расположение в пакете; справа для каждого образца указаны значения изменения микротвёрдости (верхнее – лицевая сторона; нижнее – тыльная сторона); знаком «+» отмечено увеличение H_{μ} ; «-» уменьшение H_{μ} .

Анализируя полученные результаты, установлено следующее: при обработке в течении 30 мин отмечено повышение H_{μ} для всех образцов из АМг6 (исключение: в пакете №3 при верхнем расположении образца из АМг6 повышение H_{μ} оказалось одинаковым для лицевой и тыльной поверхности). Для образцов из стали 30ХГСА в пакете №3 (нижнее расположение) отмечено снижение H_{μ} ; то же самое отмечено в пакете №4 при среднем располо-

жении стального образца. Для сравнения исследована обработка пакета образцов из одинакового материала (алюминиевого сплава АВТ-1).

5. Результаты исследований для четырех пакетов, набранных из различно расположенных образцов в пакете

30 мин			90 мин		
№1	Сталь 30ХГСА	74	№1	Сталь 30ХГСА	-24
		5			-20
№1	Алюминиевый сплав АМг6	30	№1	Алюминиевый сплав АМг6	79
		60			104
№2	Сталь 30ХГСА	37	№2	Сталь 30ХГСА	-67
		109			-2
№2	Алюминиевый сплав АМг6	104	№2	Алюминиевый сплав АМг6	212
		21			55
№3	Сталь 30ХГСА	67	№3	Сталь 30ХГСА	-31
		49			-147
№3	Алюминиевый сплав АМг6	19	№3	Алюминиевый сплав АМг6	106
		56			76
№4	Алюминиевый сплав АМг6	19	№4	Алюминиевый сплав АМг6	119
		19			57
№5	Алюминиевый сплав АМг6	2	№5	Алюминиевый сплав АМг6	0
		39			43
№4	Сталь 30ХГСА	-143	№4	Сталь 30ХГСА	-57
		-53			-79
№7	Сталь 30ХГСА	67	№7	Сталь 30ХГСА	47
		41			202
№6	Сталь 30ХГСА	-133	№6	Сталь 30ХГСА	-133
		-165			-60
№6	Алюминиевый сплав АМг6	41	№6	Алюминиевый сплав АМг6	50
		115			35

Результаты обработки представлены на рис. 7, 8. Пакеты набраны из образцов различных размеров (образцы-призмы имели размеры 10×10×25 мм; образцы пластины – 10×10×2 мм). На образцах представлены результаты изменения состояния материала в виде увеличения «+» или снижения «-» микротвердости.

На рис. 6 представлена схема компоновки из четырех образцов при расположении двух «тонких» образцов – 10×10×2 мм под двумя большими (призматическими) – 10×10×20 мм.

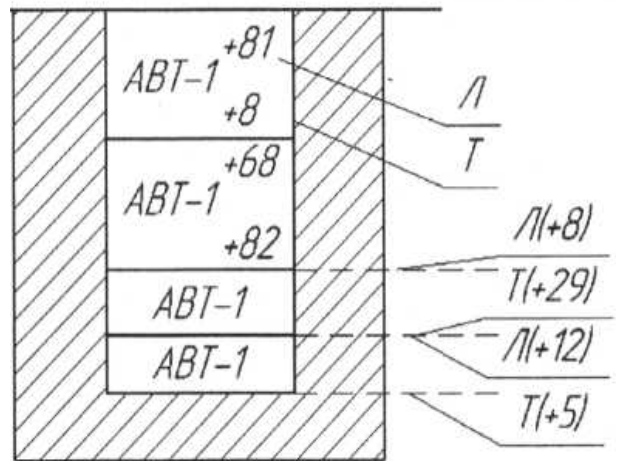


Рис. 6. Схема компоновки из четырех образцов из алюминиевого сплава АВТ-1

Для рассматриваемого пакета образцов характерно повышение H_{μ} «Л» и «Т» сторон (различного уровня). Отмечено у второго по высоте образца превышение H_{μ} тыльной поверхности по сравнению с лицевой («Т» + 82; «Л» + 68).

Для расширения вариантов компоновки пакетов образцов проведены экспериментальные исследования виброволнового нагружения пакета из трёх «тонких» образцов (10×10×2 мм) из алюминиевого сплава АВТ-1. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.

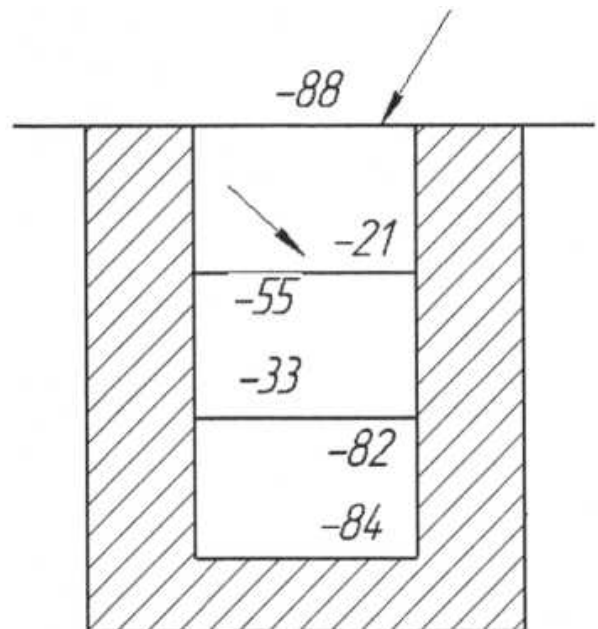


Рис. 7. Схема виброволнового нагружения пакета из трёх «тонких» образцов (10×10×2 мм) из алюминиевого сплава АВТ-1

Особенностью результатов обработки пакета тонких образцов является снижение H_{μ} ли-

цевой и тыльной сторон всех образцов, что представляет интерес для технологических операций, например, вибрационной стабилизирующей обработки.

Одним из важных аспектов полученных результатов следует отметить роль волнового нагружения на изменение состояния материала. В частности, при верхнем расположении более мягкого образца из алюминиевого сплава, ниже расположенный образец из стали (более твердый) показал изменение микротвердости.

Отмечено влияние продолжительности виброволнового нагружения на изменение микротвердости. При этом имеет место, как повышение, так и снижение указанных показателей.

Наиболее заметное повышение H_{μ} отмечено у образцов больших размеров и массы. Увеличение времени обработки t (от 30 и 60 с) сопровождается увеличением f (прогиба).

Анализируя полученные результаты, отмечено следующее: 70 % образцов из стали 30ХГСА при $t = 30$ мин показали отсутствие изменений величины прогибов (возможная причина в незначительной продолжительности виброволнового воздействия). Результаты обработки образцов из стали 30ХГСА при $t = 60$ мин, показывают преимущественно увеличение прогибов, как по тыльной, так и по лицевой стороне. Результаты обработки образцов из сплава Д16 при $t = 60$ мин, показывают увеличение прогибов либо отсутствие изменений, как по тыльной, так и по лицевой стороне в равной пропорции.

Уместно отметить, что распространение и взаимодействие волн в слоистых структурах (пакетах) материалов представляет значительный интерес. В этом случае имеют место сложные явления, связанные с интерференцией, дифракцией, трансформацией различных типов волн друг в друга на границах нагружаемых образцов сжатого пакета, результаты которых представляют интерес при решении технологических задач.

В заключение комплекса экспериментальных исследований, в результате которых получена информация об изменении физико-механических параметров материала образцов, проведены испытания усталостной долговечности. Усталостные испытания проведены на усталостной машине УИМ-5 конструкции ЦНИИТМАШ. Контроль измерений усталостной долговечности осуществлялся количеством циклов, нагружаемых образцов до разрушения (табл. 6).

6. Результаты испытаний усталостной долговечности 30ХГСА

№ образца	Количество циклов до разрушения $N_{ц}$. Исходные	$N_{ц}$, после упрочнения образца	Изменение $N_{ц}$ (\pm)	H_{μ} (\pm)	σ_0 (\pm)
30ХГСА					
1	4 000	4 000	0	18,6	0
2	5 000	7 000	2 000	23	3,52
3	3 000	5 000	2 000	138,6	0
4	7 000	33 000	2 600	45	0
5	23 000	26 000	3 000	82	0
Д16Т					
1	13000	10000	-3000	-44,5	2
2	5000	110000	105000	31,3	0,59
3	9000	18000	9000	-27,8	0
4	14000	39000	25000	-7	1,81
5	11000	25000	14000	31,1	0,59

Заключение

Представлены результаты виброволнового воздействия на слоистый пакет образцов. Реакция изменения состояния материала образцов, расположенных на разном расстоянии от контактного нагружения, различна.

Отмечаются преимущественные повышения микротвердости материала образцов, в меньшей степени изменяются остаточные напряжения.

По результатам исследований усталостной долговечности отмечены следующие особенности: образцы, воспринимающие контактное нагружение №1, показали снижение или отсутствие изменения (по сравнению с исходным) значений усталостной долговечности. Нижележащие в пакете образцы (прежде всего нижние) показали более высокие результаты повышения усталостной долговечности. Объяснением этому является, наличие деформации верхнего образца при контактном взаимодействии, разрушение при этом целостности структуры тонкого поверхностного слоя первого образца.

Нижележащие образцы подвержены лишь волновому воздействию, сопровождающегося повышением микротвердости, образованием сжимающих остаточных напряжений, однако структурное состояние материала этих образцов не подвержено разрушению и сохраняет более стабильное состояние по сравнению с образцами, подвергаемыми контактному

деформирующему разрушению.

Реализация данных научных исследований нашла отражение в виде разработки технологий, специального оборудования, инструментов, обрабатывающих сред и технологических жидкостей (ТЖ) деталей летательных аппаратов (в том числе крупногабаритных – панели крыла и фюзеляжа, лонжеронов лопасти несущего и рулевого винта вертолета, силовых деталей); деталей автомобилей, тракторов и их двигателей – коленчатые и распределительные валы, шатуны, карданные валы и др.; бандажей колесных пар подвижного состава железных дорог; деталей подшипников качения – кольца, ролики, сепараторы [6 – 7].

В настоящее время ведутся исследования ВиСО деталей летательных аппаратов (на примере деталей вертолета и радиоантенных устройств). Установлено в частности, что при виброволновом воздействии на образцы (детали) отмечаются изменения как лицевой (нагружаемой) стороны (поверхности), так и противоположной (тыльной) стороны, которая не подвергалась контактному нагружению. При определенных условиях (режимах) виброволнового нагружения имеют место более существенные изменения микротвердости тыльной стороны по сравнению с лицевой поверхностью. Выявленные особенности изменяют сложившееся представление о механизме динамических методов упрочнения ППД, когда рассматриваются лишь контактные воздействия ударного нагружения и деформация поверхностного слоя, считая, что нижележащие слои материала сохраняют исходное состояние [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов, О.Д., Манжосов, В.К. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М: Наука, 1985. – 342 с.
2. Аврорин, Е.Н., Водолага, Б.К., Симоненко, В.А., Фортгов, В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // РАН. Успехи физических наук. – 1993. – Т.163. – №5. – С. 16.

3. Меерс, М.А., Мурр, Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. – М.: Metallurgy, 1984. – 482 с.

4. Ахмадеев, Н.Х., Нигматулин, Р.И. Динамическое откольное разрушение в волнах разгрузки. ПМТФ, МГУ, 1981. – 121 с.

5. Ганиев, Р.Ф., Кобаско, Н.Ф., Фролов, К.В. Волновая технология в упрочнении материалов // Научно-технический прогресс в машиностроении. – 1989. – Вып. 18. – 72 с.

6. Бабичев, А.П., Бабичев, И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 621 с.

7. Бабичев, А.П., Мотренко, П.Д. и др. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2003. – 191 с.

8. Бабичев, И.А. Модель передачи ударного импульса в ШСУ/ Вопросы вибрационной технологии // Межвуз. сборник. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ. – 1991. – С. 9–21.

REFERENCES

1. Alimov, O.D., Manjosov, V.K. *Deformation Wave Propagation in Shock Systems*. – M: Science, 1985. – pp. 342.

2. Avrorin, E.N., Vodolaga, B.K., Simonenko, V.A., Fortov, V.E. Power impact waves and experimental states of matter // *RAS. Physical Sciences Successes*. – 1993. – Vol.163. – №5. – pp. 16.

3. Meers, M.A., Murr, L.E. *Impact Waves and Phenomena of High-Speed Metal Deformation*. – M.: Metallurgy, 1984. – pp. 482.

4. Akhmadeev, N.H., Nigmatulin, R.I. *Dynamic Breaking off Destruction in Unloading Waves*. PMTF, MSU, 1981. – pp. 121.

5. Ganiev, R.F., Kobasko, N.F., Frolov, K.V. Wave technology in material strengthening // *Scientific-Technical Progress in Mechanical Engineering*. – 1989. – Edition 18. – pp. 72.

6. Babichev, A.P., Babichev, I.A. *Fundamentals of Vibration Technology*. – Rostov-upon-Don: DSTU, 1999. – pp. 621.

7. Babichev, A.P., Motrenko, P.D. et al. *Finish-Strengthening of Parts by Multicontact Vibroimpulsive Tool*. – Rostov-upon-Don: Publishing house of DSTU, 2003. – pp. 191.

8. Babichev, I.A. Model of Shock Pulse Transmission in ShSU/ *Problems of Vibration Technology* // Inter-College Proceedings. Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU. – 1991. – pp. 9–21.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдес

УДК 621.785.5

DOI: 10.12737/article_5971dbf8eb2259.94178701

Б.М. Бржозовский, д.т.н.,

Е.П. Зинина, д.т.н.,

В.В. Мартынов, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: v_martynov@mail.ru

Технологии улучшения поверхностных свойств геометрически сложных изделий воздействием низкотемпературной плазмы*

Представлены технологии, обеспечивающие улучшение поверхностных свойств сложнопрофильных изделий воздействием низкотемпературной плазмой комбинированного разряда. Технологии упрочнения и формирования на поверхности пассивирующей пленки рассмотрены на примере изделий из металлических материалов. Технология улучшения шероховатости поверхности рассмотрена на примере изделий из металлических и неметаллических материалов. Показано, что для достижения максимально возможного улучшения поверхностных свойств изделий необходима разработка специальной оснастки.

Ключевые слова: сложнопрофильное изделие; поверхность; свойства; улучшение; низкотемпературная плазма; технологии; микротвердость; шероховатость.

B.M. Brzhozovsky, D. Eng.,

E.P. Zinina, D. Eng.,

V.V. Martynov, D. Eng.

(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov 410054)

Improvement technologies of surface properties in products with complex geometry by low-temperature plasma impact

Technologies ensuring the surface properties improvement of complex-profile products by the impact of low-temperature plasma of a combined discharge are shown. The technologies of strengthening and a passivating film formation on the surface are considered by the example of metal products. The technology of surface roughness improvement is considered by the example of metal and non-metal products. It is shown that for the achievement of maximum possible improvement of surface properties in products the development of special equipment is necessary.

Keywords: complex-profile product; surface; properties; improvement; low-temperature plasma; technologies; micro-hardness; roughness.

Улучшение свойств рабочих поверхностей изделий представляет собой конкретную научную и практическую проблему [1 – 5], от решения которой во многом зависит результативность их использования. Существуют различные подходы к решению этой проблемы [6 – 14], поскольку изделия изготавливаются из различных материалов, работают в различных условиях и выполняют различные функции.

В Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. на протяжении 30 лет ведутся работы по созданию и совершенствованию технологий для улучшения поверхностных свойств изделий воздействием низкотемпературной плазмы

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00030).

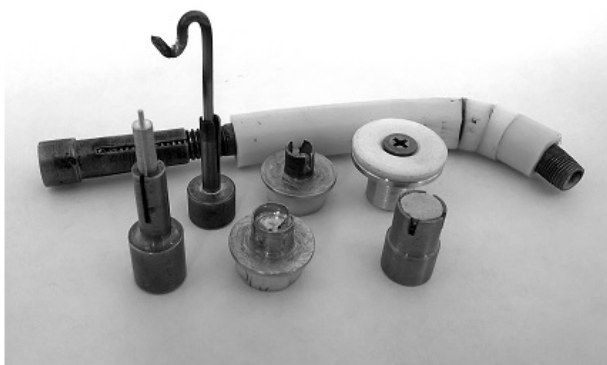
комбинированного разряда. Основными объектами технологического воздействия были изделия из металлических материалов и сплавов, а основной целью воздействия – упрочнение в различной степени их поверхностного слоя и формирование переходного слоя (подслоя) с целью улучшения связи упрочненного слоя с материалом основы. Разработанная технология упрочнения реализовывалась по результатам выполнения следующих действий [15].

Предварительно очищенное и обезжиренное в горячем трихлорэтилене $\text{CICH}=\text{CCl}$ изделие устанавливалось в соответствующую оправку (рис.1), закрепляемую в держателе. В случае обработки небольших изделий в дополнение к оправке используют удлинители. Поверхность

оправки и часть поверхности изделия, не подлежащая обработке, изолировались двумя слоями тонкой фторопластовой ленты, и изделие располагалось в рабочей камере технологической установки по координатам, соответствующим его типу и размеру. Затем камера герметизировалась и откачивалась до предельного давления, равного 10 Па, после чего производился напуск технологического газа (N_2) до давления, равного 300 Па, включался блок питания, обеспечивающий подачу на изделие положительного потенциала требуемой величины, и блок питания генератора СВЧ-энергии.



а)



б)

Рис. 1. Базовая (а) и специальная (б) оснастка

При плавной регулировке анодного тока магнетрона обеспечивалась подача в камеру обработки СВЧ-мощности, необходимой для поджига плазмы.

Для каждого типа изделий координата положения, давление, потенциал, СВЧ-мощность и время обработки устанавливались с учетом их массы, геометрии и марки материала с целью обеспечения требуемой скорости нагрева, определяющей эффективность воздействия частиц плазмы на обрабатываемую поверхность с точки зрения степени ее упрочнения.

По окончании обработки изделие остывало

в защитной среде, и после разгерметизации рабочей камеры извлекалось из держателя.

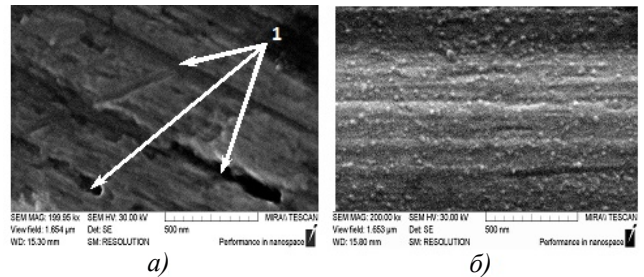
Анализ результатов упрочнения изделий различного целевого назначения по представленной технологии, выполненный с использованием аналитического комплекса на базе растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN MIRA\LMU (рис. 2, а) показал:

– образование на поверхности равномерно распределенных сплошных (или точечных) структур, которые могут быть определены как пленка (или островковая пленка), появление которой связано с изменением химического состава поверхности в результате ее взаимодействия с ионизированной в плазме газовой средой;

– в поверхностном слое:

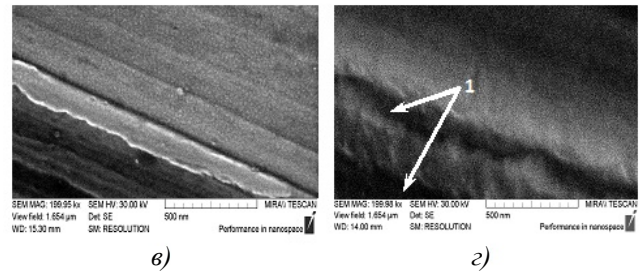
1) образование многочисленных наночастиц шаровидной формы с размерами 20...50 нм, расположенных поверх следов от механической и абразивной обработки (рис. 2, б). Это свидетельствует, во-первых, об их более позднем появлении, во-вторых, о достижении в них температуры плавления, и последующем резком охлаждении, что возможно только при воздействии плазмы;

2) изменение химического состава, вызванное либо взаимодействием газовой среды с поверхностью с образованием химических соединений типа оксидов или нитридов, либо растворением карбидов (например, у инструментальных сталей), либо образованием сложных карбидов (например, у титановольфрамкобальтовых твердых сплавов).



а)

б)



в)

г)

Рис. 2. РЭМ-изображения исходной поверхности (а) и поверхностей после плазменного воздействия с положительным (б), отрицательным (в) потенциалами смещения и без потенциала смещения (г):

1 – следы от механической обработки

Материалы опытно-промышленной эксплуатации изделий, упрочненных в соответствии с представленной технологией, на примере металлорежущего инструмента из вольфрамо- и титановольфрамокобальтовых твердых сплавов представлены в табл. 1 [15]. Они позволили

установить, что упрочнение приводит к изменению механизма износа режущих кромок. Износ приобретает характер постепенного истирания передней и задней поверхностей до состояния, при котором происходит потеря устойчивости режущего клина.

1. Обобщенные результаты стойкостных испытаний модифицированного режущего инструмента из твердого сплава

№ п/п	Вид инструмента	Обрабатываемый материал	Увеличение стойкости, раз
1	Резец с напайной пластиной из сплава T15K6	Сталь 10864-ВИ	4,0...5,0
2	Фреза пазовая из сплава BK6OM	Пластмасса с абразивным наполнителем	4,0
3	Сборный резец с пластинами из сплава T15Ta3K6	Сталь 45ГСФ	1,4
4	Сборные резцы с пластинами из сплава RX-10	Стали 40X, 20X13, 30XГСА, сплав Д16Т	1,5...2,0
5		Сталь 30XГСА	2,3...2,7
6		Сталь 35XГСЛ	2,0
7		Сталь 30XГСА	1,2
8	Цельная фреза из сплава RX-10	Сталь 35XГСЛ	1,8...3,0
9	Сборный резец с пластиной из сплава T15K6	Сталь ШХ-15	1,8...3,7
10	Сборные резцы с пластинами из сплава T15K6 и покрытием TiN	Сталь ШХ-15	4,0...4,5
11	Сборные резцы с пластинами из сплава CT35M	Стали 15XФ и 40XН2МА	1,2...1,6

Анализ разработанной технологии с позиций физики процессов взаимодействия электромагнитного и электростатического полей в рабочей камере позволил установить, что и поверхностные, и, особенно, объемные изменения связаны с подачей на изделие положительного потенциала. Это легло в основу модификации исходной технологии (назовем ее базовой) в направлении подачи на изделие перед началом обработки отрицательного потенциала. Результаты апробации технологии позволили зафиксировать образование на поверхности изделий равномерно распределенных точечных структур с размерами элементов, в среднем 12...15 нм (рис. 2, в), т.е. той же островковой пленки. При этом увеличение времени воздействия плазмы приводило к увеличению размеров элементов; для обработки требовалось в 1,6 раза больше СВЧ-мощности, поскольку в противном случае плазма вокруг образца не формировалась.

Логическим завершением анализа базовой технологии стала ее модификация в направлении проведения обработки без подачи потенциала на изделие. Результаты показали, что в этом случае образование новых структур ни

на поверхности, ни в поверхностном слое не происходит, а имеет место лишь очищение поверхности от фрагментов органических соединений и «сглаживание» следов от технологических воздействий (рис. 2, г) вследствие притупления микронеровностей и/или снижения их высоты. Но это означает улучшение шероховатости обработанной таким способом поверхности, подтвержденное проведением исследований с помощью двухлучевого микроскопа МИС-11 и методики, специально разработанной для проведения измерений на криволинейных поверхностях.

В табл. 2 представлены результаты этих исследований на примере режущего инструмента из инструментальной стали Р6М5.

Результаты исследований шероховатости послужили основой для оценки возможностей улучшения поверхностных свойств изделий из неметаллических материалов, в частности, из стекла различных марок. Основной проблемой при этом стала разработка оснастки, обеспечивающей, с одной стороны, закрепление изделия, с другой – формирование плазменного облака вокруг него. Разработка велась с позиций выполнения следующих условий:

– оснастка должна иметь минимум один выступающий металлический элемент, выполняющий функции концентратора силовых линий электромагнитного и электростатического полей при формировании плазменного облака;

– оснастка должна обеспечивать возможности различной пространственной ориентации изделия в рабочей камере.

2. Шероховатость поверхности режущих кромок режущего инструмента из стали Р6М5 до и после воздействия низкотемпературной плазмы комбинированного разряда

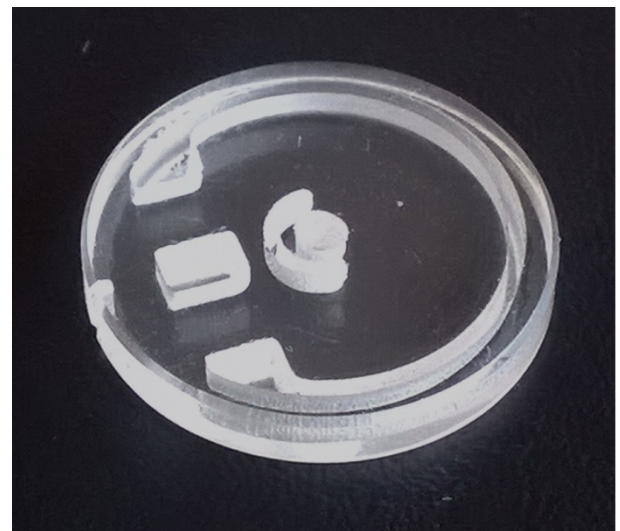
№ п/п	Тип инструмента	Шероховатость по Ra, мкм		Уменьшение Ra, раз
		исходная	после обработки	
Метчики				
1	M5	0,68	0,20	3,4
2		0,41	0,14	2,9
3		0,50	0,22	2,3
4	M6	0,33	0,19	1,7
5		0,21	0,18	1,1
6	M8	0,40	0,06	6,6
7		0,47	0,09	5,1
8		0,24	0,12	1,9
9	M8 TiN	0,20	0,19	0,9
10		0,48	0,16	3,0
	M8	0,40	0,12	3,3
	M8	1,10	0,46	2,3
Сверла				
11	∅ 4,1	0,55	0,15	3,7
12	∅ 4,1	0,34	0,11	3,4
13	∅ 4,1	0,36	0,15	2,4

Значения потенциала и СВЧ-мощности при этом выбираются так, чтобы обеспечить условия только для поджига плазмы.

В качестве примера на рис. 3, а показана пластина из кварцевого стекла КУ-1 диаметром 15,6 мм, плазменное воздействие на которую в течение 4 мин при реализованной схеме позиционирования в рабочей камере обеспечило улучшение шероховатости поверхностей в 2 и 3 раза (рис. 3, б).

На рис. 4, а показан набор микролинз диаметром 2 мм и высотой 2 мм, состоящих из двух марок оптических стекол серии ВО, а на рис. 4, б в приведены полученные на микроскопе БИОЛАМ-И изображения поверхностей линзы после механической полировки и плазменного воздействия. Хорошо видно, что плазменное воздействие устраняет, во-первых, дефекты в виде недополированных дорожек, возникающие при воздействии абразивной

среды, во-вторых, точечные дефекты, связанные с неоднородностью физико-механических свойств стекол, причем результаты эти распространяются на все линзы, входящие в набор. Это означает, что одновременная обработка обеспечивает воспроизводимость результатов с вероятностью большей, чем обработка каждого изделия в отдельности. Особенно это касается мелкогабаритных изделий, где установка и позиционирование являются наиболее трудоемкими. Говоря иначе, в этом случае приобретает актуальность создание технологии групповой обработки, основной специфической особенностью которой является применение оснастки, которая в данном случае не может быть универсальной, поэтому требует проведения дополнительных проектно-конструкторских работ.



а)

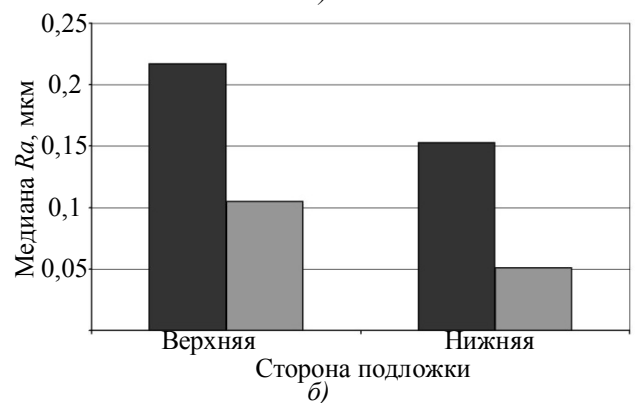


Рис. 3. Пластина из кварцевого стекла КУ-1 (а) и результаты измерения шероховатости ее поверхностей до (темные) и после (светлые) плазменного воздействия (б)

В качестве примера на рис. 5 представлены образцы оснастки, разработанные для групповой обработки хирургических игл диаметром 0,9 мм и деталей часов с диаметром оси 0,5 мм.

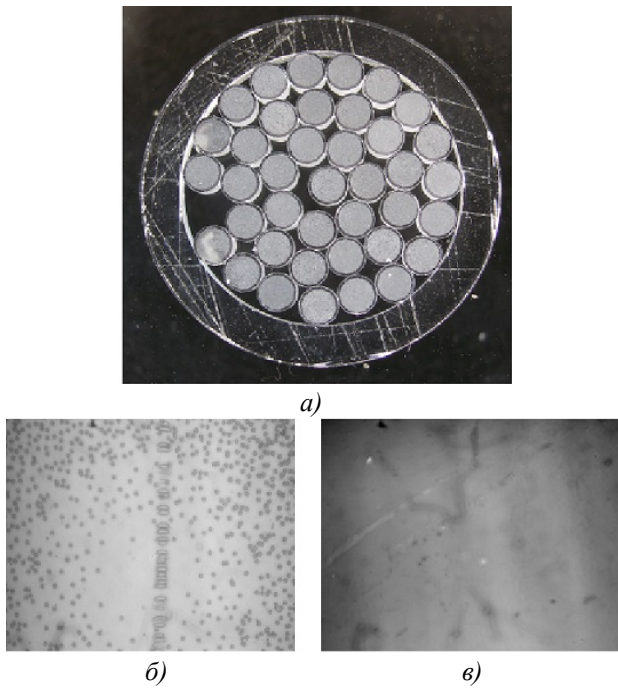


Рис. 4. Набор микролинз в оправке (а) и вид поверхности микролинзы ($\times 400$) после полировки на абразивных порошках (б) и плазменного воздействия (в)

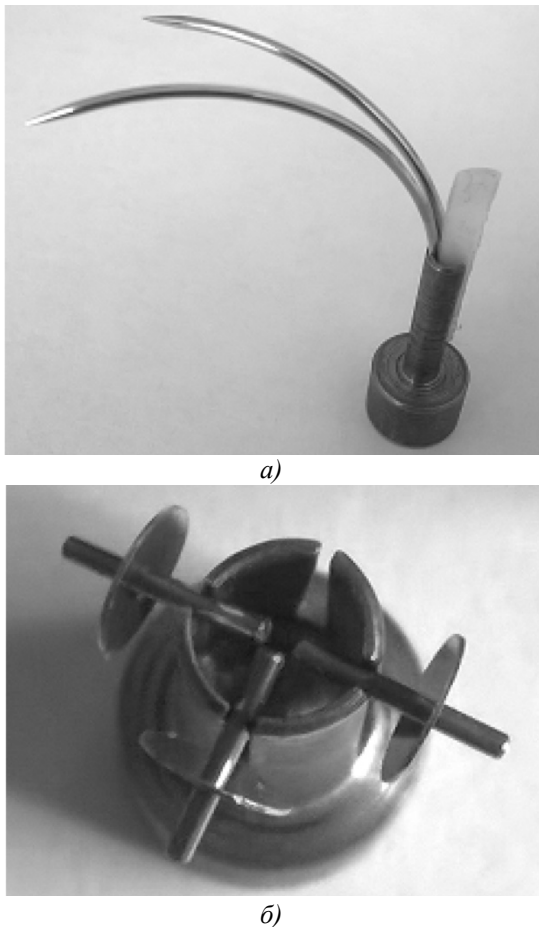


Рис. 5. Примеры оснастки для групповой обработки мелкоразмерных заготовок:
а – хирургических игл; б – деталей часов

Выводы:

1. Низкотемпературное плазменное воздействие на геометрически сложные изделия позволяет улучшать различные свойства их рабочих поверхностей только при условии разработки специальных технологий, учитывающих особенности протекающих в плазме физических процессов.

2. Разработка технологий должна базироваться на максимальном учете индивидуальных особенностей конструкции и условий эксплуатации изделий.

3. Ключевым моментом разработки технологий является проектирование и изготовление оснастки, поскольку она в значительной степени определяет максимальное улучшение поверхностных свойств изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака, А.С., Лыткин, Д.Н. Влияние субстрата работоспособность режущего инструмента с покрытием // *Металлообработка*. – 2017. – №1. – С. 23–28.
2. Безъязычный, В.Ф., Фоменко, Р.Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД // *Металлообработка*. – 2017. – №1. – С. 16–22.
3. Григорьев, С.Н. Как повысить надежность режущего инструмента // *ТехноМИР*. – 2004. – №3(21). – С. 53–57.
4. Лашманов, В.И. Повышение износостойкости инструмента // *ПРО инструмент*. – 2002. – №18. – С. 16–18.
5. Кожина, Т.Д., Волков, С.А., Соколов, Н.Н. Технологическое обеспечение высокоэффективного производства лопаток компрессора стратегической линейки промышленных газотурбинных двигателей // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева*. – 2017. – №1. – С. 20–24.
6. Блинков, И.В., Волхонский, А.О., Аникин, В.Н., Скрылева, Е.А. Мультислойные наноструктурные покрытия TiAlN/ZrNbN/CrN, полученные методом Arc-PVD, для режущего твердосплавного инструмента // *СТИН*. – 2012. – №5. – С. 18–24.
7. Шулов, В.А., Пайкин, А.Г., Теряев, А.Д., Быценко, О.А. и др. Нанесение эрозионно стойких нанопокровов системы Ti-Si-B, содержащих тах-фазу, на поверхность деталей из сплава Ti6Al14V вакуумно-плазменным методом с сепарацией плазмы от капельной фазы // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2008. – №12. – С. 23–25.
8. Ли, И.П., Рухляда, Н.Я. Создание поверхностных структур с заданными свойствами с помощью концентрированных потоков частиц // *Физика и химия обработки материалов*. – 2005. – №1. – С. 61–65.
9. Верещака, А.С., Григорьев, С.Н., Ким, В.А. Научно-технические технологии упрочнения инструмента // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2013. – № 6(24).

– С. 19–24.

10. **Зайдес С.А., Нго Као Кыонг.** Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №3(69). – С. 25–31.

11. **Шеховцева, Е.В.** Электроэрозионная обработка как технологический инструмент обеспечения рабочих свойств поверхностного слоя зубчатых колес // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №1. – С. 52–56.

12. **Смыслов, А.М., Смыслова, М.К., Мухин, В.С.** Ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности лопаток компрессоров ГТД // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №1. – С. 133–137.

13. **Таминдаров, Д.Р., Плотников, Н.В., Смыслов, А.М.** Электролитно-плазменное полирование лопаток компрессора из титановых сплавов // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №1. – С. 141–144.

14. **Балановский, А.Е., Ву Ван Гюи.** Технологическое повышение качества поверхности деталей с плазменной цементацией // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №3(69). – С. 16–25.

15. **Бржозовский, Б.М., Бровкова, М.Б., Зинина, Е.П., Мартынов, В.В., Плешакова, Е.С.** Технология и оборудование для синтеза нанокompозитных ионно-плазменных покрытий на рабочих поверхностях геометрически сложных изделий // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №1. – С. 216–222.

REFERENCES

1. Vereshchaka, A.S., Lytkin, D.N. Substrate influence upon working capacity of cutter with coating // *Metal Working*. – 2017. – №1. – pp. 23–28.

2. Beziyazychny, V.F., Fomenko, R.N. Technological support of operation properties of GTE parts // *Metal Working*. – 2017. – №1. – pp. 16–22.

3. Grigoriev, S.N. *How to Improve Cutter Reliability* // *TechnoMIR*. – 2004. – №3(21). – pp. 53–57.

4. Lashmanov, V.I. *Tool Wear-resistance Increase* // *PRO Tool*. – 2002. – №18. – pp. 16–18.

5. Kozhina, T.D., Volkov, S.A., Sokolov, N.N. Technological support of high-performance production of compressor blades of strategic line of industrial gas turbine engines // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – №1. – pp. 20–24.

6. Blinkov, I.V., Volkhonsky, A.O., Anikin, V.N., Skryleva, E.A. Multi-layer nano-structural coatings TiAlN/ZrNbN/CrN obtained by Arc-PVD method for hard-alloy tool // *STIN*. – 2012. – №5. – pp. 18–24.

7. Shulov, V.A., Paikin, A.G., Teryaev, A.D., Bytsenko, O.A. et al. Application of erosion-resistant nano-coatings of Ti–Si–B system having max-phase on surface of parts made of alloy Ti6Al14V by vacuum-plasma method with plasma separation from drop phase // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2008. – №12. – pp. 23–25.

8. Lee, I.P., Rukhlyada, N.Ya. Formation of surface structures with specified properties using concentrated particles flows // *Physics and Chemistry of Material Working*. – 2005. – №1. – pp. 61–65.

9. Vereshchaka, A.S., Grigoriev, S.N., Kim, V.A. Science intensive technologies of tool strengthening // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – №6(24). – pp. 19–24.

10. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. New technological possibilities of finish-strengthening by surface plastic deformation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – №3(69). – pp. 25–31.

11. Shekhovtseva, E.V. Electro-erosion working as technological tool ensuring operation properties of surface layer of cog-wheels // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – №1. – pp. 52–56.

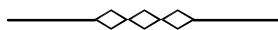
12. Smyslov, A.M., Smyslova, M.K., Mukhin, V.S. Ionic-implantation and vacuum-plasma modification of compressor blade surfaces in GTE // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – №1. – pp. 133–137.

13. Tamindarov, D.R., Plotnikov, N.V., Smyslov, A.M. Electrolytic-plasma burnishing of compressor blades made of titanium alloys // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – №1. – pp. 141–144.

14. Balanovsky, A.E., Vu Van Gui. Quality technological increase of parts surfaces with plasma carbonization // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – №3(69). – pp. 16–25.

15. Brzhozovsky, B.M., Brovkova, M.B., Zinina, E.P., Martynov, V.V., Pleshakova, E.S. Technology and equipment for synthesis of nano-composite ionic-plasma coatings on operation surfaces of geometrically-complex products // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – №1. – pp. 216–222.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев



УДК 621.787.6.004

DOI: 10.12737/article_5971db7fe454d8.56390820

А.В. Киричек, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7),

Д.Л. Соловьев, д.т.н., **С.А. Силантьев**, к.т.н.

(Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета)

E-mail: avk.57@yandex.ru; murstin@yandex.ru

Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей

Перспективным направлением развития упрочняющей обработки является комбинированное упрочнение поверхностным пластическим деформированием с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией. Рассмотрены технологические возможности комбинированного упрочнения волной деформации с последующей цементацией конструкционных малоуглеродистых низколегированных сталей на примере стали 10ХСНД. Установлено, что полученные в результате комбинированного упрочнения результаты, сопоставимы с результатами упрочнения цементуемых легированных сталей, применяемых для изготовления тяжело нагруженных деталей машин.

Ключевые слова: волна деформации; удар; сталь; цементация; твердость; глубина упрочнения; степень упрочнения; поверхностный слой.

A.V. Kirichek, D. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University" 7, October 50 Years Avenue, Bryansk, 241035),

D.L. Soloviyov, D. Eng.,

S.A. Silantiev, Can. Eng.

(Murom Institute (Branch) of Vladimir State University)

Technology of combined strengthening by wave deformation and case-hardening of structural low-alloy steels

The promising direction of strengthening development is a combined strengthening with surface plastic deformation with the further chemical-thermal treatment, in particular, with case-hardening. The technological possibilities of combined strengthening by a deformation wave with the further case-hardening of structural mild low-alloy steels by the example of steel 10ChSND are considered. It is defined that the results, obtained as a result of combined strengthening, are comparable with the results of strengthening of case-hardened alloy steels used for manufacturing heavy loaded parts of machines.

Keywords: deformation wave; blow; steel; carbonization; hardness; strengthening depth; strengthening degree; surface layer.

В процессе эксплуатации изделий всегда наиболее нагружен поверхностный слой. Поэтому в технологии машиностроения большое внимание уделяется способам упрочнения, изменяющих свойства поверхностного слоя. Одним из таких способов является упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД), который отличается простой практической реализацией и высокой эффективностью. Существенным преимуществом способов ППД является возможность использования в комбинированных упрочняющих технологиях, позволяющих обеспечить максимальное соответствие параметров качества поверхностного слоя условиям эксплуатации детали, что обеспечивает максимальный ресурс работы как самой детали, так и машины в целом.

Достаточно перспективным является комбинированное упрочнение ППД с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией [1, 2]. Использование ППД перед цементацией интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Появляется возможность сокращения времени и энергетических затрат, связанных с процессом науглероживания. Поверхностный слой, упрочненный комбинированной обработкой ППД и цементацией, может иметь дополнительные ресурсы для повышения эксплуатационных характеристик детали.

Волновое деформационное упрочнение (ВДУ) материала в процессе статикоимпульсной обработки (СИО) – новая

технология ППД. Использование для упрочнения ударных волн деформации значительно расширяет технологические возможности по формированию упрочненного поверхностного слоя и позволяет создавать большую глубину (до 6...10 мм) и высокую твердость упрочненного поверхностного слоя (до 6500 МПа) [2, 3].

В отличие от других известных способов ППД, в ударной системе боек-волновод генерируются плоские акустические волны, которые формируют в очаге деформации – пятне контакта инструмента и упрочняемой поверхности, импульсы различной формы, отличающиеся законом изменения силы во времени.

Форма импульсов во многом определяет количество энергии удара, сообщаемой упрочняемому материалу, и зависит от свойств материала, геометрических параметров бойка и волновода, акустических свойств их материалов и скорости соударения.

Статическая составляющая нагрузки не позволяет инструменту выходить из контакта с упрочняемой поверхностью после воздействия на нее прямой волны деформации, формирующейся в начальной стадии удара бойка по волноводу, и предназначена для наиболее полного использования динамической (импульсной) составляющей за счет рекуперации отраженных волн деформации. Для увеличения КПД процесса и создания более глубокого упрочненного слоя форма импульсов адаптируется к свойствам материала и условиям нагружения.

Важной особенностью технологии упрочнения волной деформации является то, что она позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру, сочетающую одновременно высокую твердость и пластичность [5]. Регулирование равномерности достигается за счет перекрытия пластических отпечатков, полученных в результате действия на материал ударных импульсов, которое оценивается через коэффициент перекрытия:

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

где δ – размер отпечатка, мм; S – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударов, Гц.

Если $K = 0$, то край одного отпечатка

граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента (деформирующего индентора) в одно и то же место.

Проведенными исследованиями установлено, что технология волнового деформационного упрочнения, применяемая как самостоятельно, так и совместно с химико-термической обработкой, позволяет сформировать в монолитном металлическом материале многослойную естественно армированную структуру, обеспечивающую одновременно высокую прочность и большую вязкость материала.

Создание в сплошном материале гетерогенно модифицированной структуры создает хорошие условия для сопротивления циклическим нагрузкам, поскольку вязкий материал тормозит развитие хрупкой микротрещины, сформировавшейся в несущей твердой составляющей. Кроме того, твердые и мягкие составляющие однородного материала не имеют ярко выраженных границ областей с измененными свойствами, что исключает возможность дополнительной концентрации напряжений и зарождения усталостных трещин.

Испытания на действие контактных циклических нагрузок поверхности гетерогенно упрочненной волной деформации показало повышение долговечности в 2–7 раз, а упрочненной комбинированной технологией, включающей предварительное воздействие волной деформации и последующую цементацию до 2,5 раз [6 – 12].

Исследования комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией проводились для конструкционных легированных сталей, используемых для цементованных деталей ответственного назначения, таких как сталь 20Х2Н4А и сталь 18ХГТ. Однако обеспечение высокой несущей способности комбинированным воздействием волной деформации и цементацией сталей, не обладающих большими потенциальными возможностями при упрочнении, не изучено. Между тем, это позволит значительно расширить номенклатуру деталей, для которых может быть создана структура с высокими эксплуатационными свойствами и снизить затраты на их изготовление за счет применения более дешевых материалов.

Для проведения исследований комбинированного упрочнения волной деформации и цементации конструкционных малоуглеродистых низколегированных сталей была выбрана сталь 10ХСНД, для изделий из которой не характерно применение упрочняющей термиче-

ской и химико-термической обработки. Сталь 10ХСНД используется для создания сварных конструкций, а ее стоимость одна из наиболее низких по сравнению с большинством конструкционных легированных сталей.

Исследования проводились на плоских образцах с режимами, близкими к режимам комбинированного упрочнения легированных сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ. Упрочнение волной деформации осуществлялось инструментом в форме стержневых роликов диаметром 10 мм с различной длиной b_p (мм). Варьирование длиной ролика и энергией ударных импульсов A (Дж) обеспечивало заданную динамическую составляющую удельной энергии деформирования $a = A / b_p$.

Предварительное, перед цементацией, упрочнение волной деформации осуществлялось так, чтобы глубина наклепа составляла не менее 3...5 мм и была заведомо больше толщины диффузионно-упрочненного цементацией слоя. Исходя из этого условия, рассчитанная для сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ удельная энергия ударных импульсов составляла 3,57...5,0 Дж/мм, а для стали 10ХСНД – 2,0...2,7 Дж/мм. Упрочнение волной деформации осуществлялось при коэффициенте перекрытия 0,2...0,6 в целях обеспечения гетерогенного упрочнения материала. Продолжительность цементации – 8 ч.

Результаты исследований (карты микротвердости) комбинированно упрочненной низколегированной стали 10ХСНД в сравнении с результатами исследований легированных цементованных сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Анализ полученных эпюр показал, что характер распределения твердости по глубине и вдоль упрочненной поверхности после комбинированного упрочнения и после цементации отличается у всех рассматриваемых сталей. Наружная часть упрочненного слоя и в том и в другом случае имеет достаточно равномерную структуру, характерную для цементации. Твердость в направлении подачи практически не изменяется, но при этом градиентно снижается по глубине. Ниже расположен подповерхностный слой, в котором твердость в большей степени изменяется в направлении подачи и в меньшей – по глубине, постепенно переходящий в нецементованную сердцевину.

Характер упрочнения подповерхностного слоя хорошо коррелирует с параметрами гетерогенного упрочнения, полученного на стадии ВДУ, что свидетельствует о наличии технологической наследственности после волнового

деформационного упрочнения. Твердый равномерно упрочненный поверхностный слой «опирается» на переходный твердо-вязкий гетерогенно упрочненный подслои, что благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах изделий [6]. Параметры равномерно и гетерогенно упрочненных поверхностных слоев зависят от режимов волнового деформационного упрочнения.

В результате анализа полученных данных установлено, что технология комбинированного упрочнения с применением волны деформации для сталей 20Х2Н4А и 10ХСНД способствует повышению степени упрочнения поверхностного слоя, соответственно на 25 % и 10 %. Причем, при упрочнении стали 10ХСНД максимальное увеличение степени упрочнения достигало 300 %, а величина максимальной твердости – 8400 МПа, тогда как у сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ, соответственно 200 % и 80 %, а величина максимальной твердости – 7890 МПа и 7260 МПа.

Установлено, что увеличение коэффициента перекрытия способствует повышению максимальной степени упрочнения, т.е. при упрочнении с $K = 0,6$ формируется большее количество дефектов кристаллической решетки упрочняемого материала, способствующих лучшему проникновению углерода в поверхностный слой при цементации. При этом глубина цементованного слоя для сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, полученного с упрочнением волной деформации и без, практически не изменяется и составляет соответственно 2 мм и 3 мм. Тогда как для стали 10ХСНД предварительное упрочнение волной деформации способствует увеличению глубины цементации с 1,4 мм до 2 мм, т.е. на 30 %.

Выводы

Установлено, что при комбинированном упрочнении конструкционной малоуглеродистой низколегированной стали 10ХСНД максимальная степень упрочнения увеличивается до 10 %, а глубина цементованного слоя – на 30 %.

При комбинированном упрочнении стали 10ХСНД, также как и легированных цементуемых сталей, формируется наружный равномерно упрочненный слой и гетерогенно упрочненный подповерхностный слой, параметры которых (соотношение их твердости и толщины, а также характер чередования твердых и вязко-пластичных участков гетерогенной структуры) оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства.

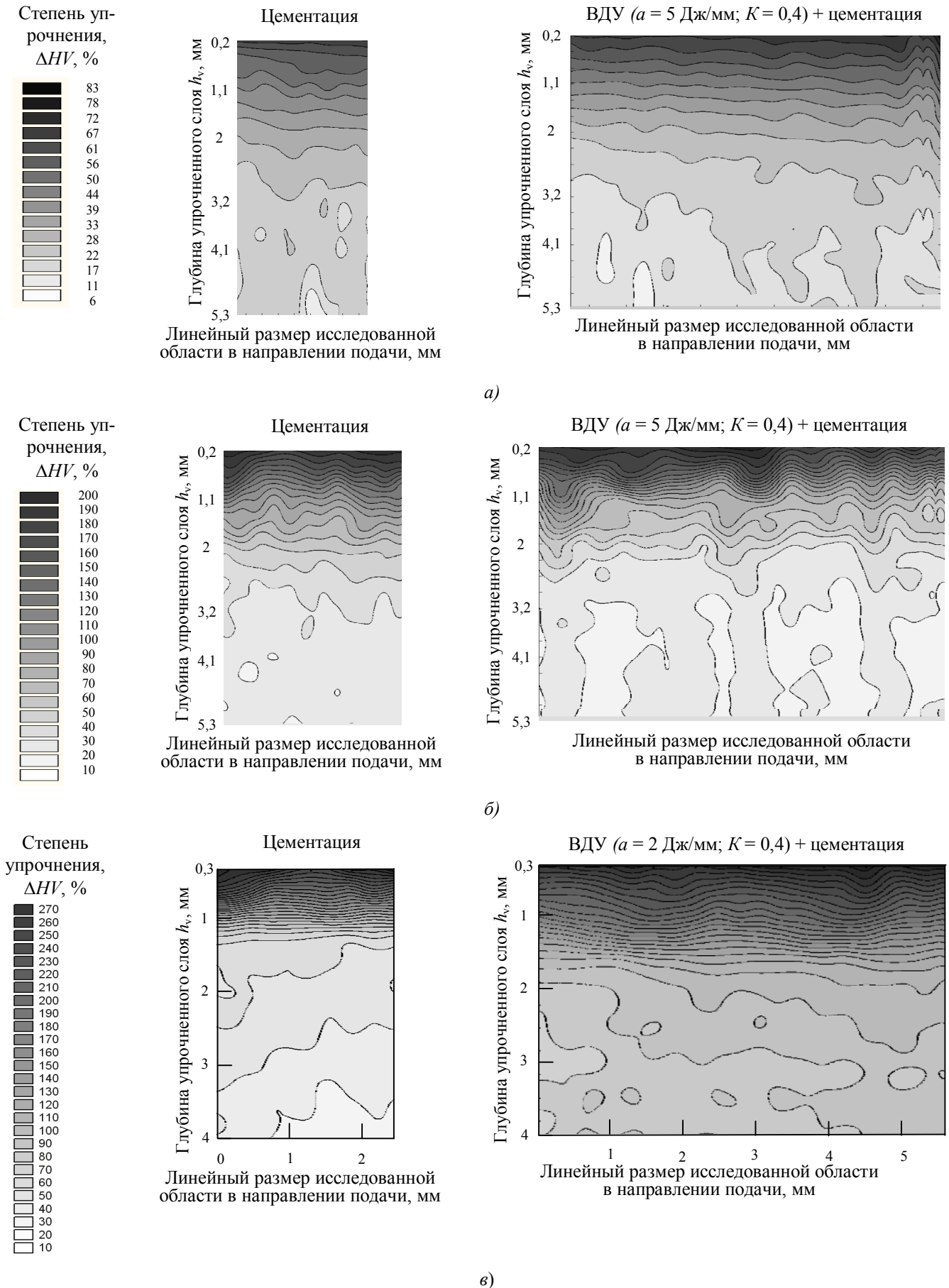


Рис. 1. Влияние технологии упрочнения на степень упрочнения, рассчитанную в результате анализа карт микротвердости:

a – сталь 20Х2Н4А; *б* – сталь 18ХГТ; *в* – сталь 10ХСНД

1. Влияние технологии упрочнения на микротвердость, степень упрочнения и глубину упрочненного слоя

Марка стали	Твердость сердцевины, МПа	Максимальная твердость, МПа / степень упрочнения, %		Увеличение максимальной степени упрочнения, %	Глубина цементованного слоя, мм		Увеличение глубины цементованного слоя, %
		без упрочнения волной деформации	с упрочнением волной деформации		без упрочнения волной деформации	с упрочнением волной деформации	
20X2H4A	4500	7240/60	7890/75	25	3	3	0
18XГТ	2500	7270/190	7260/190	0	2	2	0
10XСНД	2100	7800/270	8400/300	10	1,4	2	30

Достоинством комбинированного упрочнения стали 10XСНД является возможность двукратного увеличения производительности при обеспечении необходимых параметров наклепа поверхностного слоя волной деформации по сравнению с легированными цементуемыми сталями, вследствие ее более низкой исходной твердости.

Результаты комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей сопоставимы с результатами упрочнения цементуемых легированных сталей, что позволяет рекомендовать их использование для изготовления тяжело нагруженных деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Папшев, Д.Д., Пронин, А.М., Кубышкин, А.Б. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61–64.
2. Лахтин, Ю.М., Арзамасов, Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Волобуев, А.В. Инновационная статико-импульсная обработка // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 1(01). – С. 43–48.
4. Kirichek, A.V., Solov'ev, D.L., Silant'ev, S.A. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obработка Metallov Davleniem) (2). 2004. pp. 13–17.
5. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Расширение технологических возможностей упрочняющей обработки металлических материалов волновым деформационным воздействием // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 11(41). – С. 28–35.
6. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной струк-

туры // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 3–10.

7. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / В.Н. Беляев, В.П. Иванов, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек и др. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – 403 с.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Возможности повышения долговечности деталей машин из цементуемых сталей комбинированным упрочнением // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. – 2012. – № 2. – С. 65–67.

9. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7. – С. 9–15.

10. Повышение контактной долговечности цементуемых подшипниковых сталей комбинированной обработкой / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов, Д.Л. Соловьев, М.А. Жилев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2 (288). – С. 83–89.

11. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Упрочнение железоуглеродистых сплавов комбинированной обработкой волной деформации и цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 12. – С. 36–39.

12. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной упрочняющей обработкой // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (50). – С. 52–58.

REFERENCES

1. Papshev D.D., Pronin A.M., Kubyshekin A.B. Efficiency of hardening of cemented machine parts // *Bulletin of Machine Building*. - 1990. - No. 8. - pp. 61-64
2. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. Chemical-thermal treatment of metals - M.: Metallurgy, 1985. - 256 p.
3. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Volobuev A.V. Innovative static-impulse processing // *Science intensive technology in mechanical engineering*. 2011. № 1(01). pp. 43-48
4. Kirichek, A.V., Solov'ev, D.L., Silant'ev, S.A. Influence

of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening // *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo* (Обработка Металлов Давлением) (2) 2004. pp. 13-17.

5. Kirichek A.V., Soloviev D.L. Expansion of technological possibilities of strengthening processing of metal materials by wave deformation influence // *Science intensive technology in mechanical engineering*. 2014. No. 11(41). - pp. 28-35.

6. Kirichek A.V., Soloviyov D.L. Prospects of operation properties multiple increase by natural metal reinforcement at technological support of multi-level heterogeneous structure // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2014. № 4 (112). pp. 3-10.2. Baskov, M.V. Investigation of cutter coatings impact upon quality parameters of surface layer and wear-resistance of parts during turning // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. 2017. №8. – pp. 38–43.

7. Effective technologies of surface plastic deformation and combined processing. / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek et al. - Moscow: Izd. House "Spektr", 2014. - 403 p.

8. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Possibilities of increasing the longevity of machine parts from cemented

steels by combined hardening // *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy. P.A. Soloviev*, 2012. № 2. - pp. 65-67

9. Increase of contact endurance of machine parts by heterogeneous deformation hardening by static-pulse treatment / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, S.A. Silantiev // *Reinforcing technologies and coatings*. 2008. No. 7. - pp. 9-15

10. Increase of contact durability of cemented bearing steels by combined treatment / A.V. Kirichek, D.E. Tarasov, D.L. Soloviev, M.A. Zhilyaev // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2011. № 4/2 (288). - pp. 83-89

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Strengthening of iron-carbon alloys by combined treatment with a deformation wave and cementation // *Reinforcing technologies and coatings*. 2013. No. 12. - pp. 36-39

12. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Increasing the durability of machine parts by combined hardening. // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016. № 2 (50). pp. 52-58.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдец

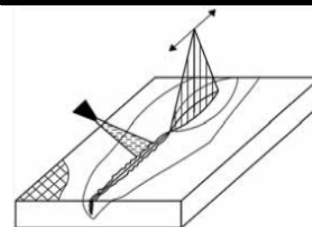
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru



УДК 678.067.621.892

DOI: 10.12737/article_5971daadf14630.10399069

Ю.М. Зубарев, д.т.н.,

А.В. Приемышев, к.т.н.

(ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого
195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru

Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении

Рассмотрены особенности обработки резанием полимерных композиционных материалов: стружкообразование; износ режущего инструмента, изготовленного из различных инструментальных материалов; силы резания и качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; углепластики; лезвийная обработка; режущий инструмент; режимы резания; качество обработки.

Yu.M. Zubarev, D. Eng.,

A.V. Priemyshev, Can. Eng.

(FSAEI HE Peter the Great State University of Saint-Petersburg 29, Polytechnicheskaya Str., Petersburg 195251)

Innovation technologies of polymeric composite materials in mechanical engineering

The peculiarities of polymeric composite material cutting are considered: chip formation, wear of a cutter manufactured of different tool materials; forces of cutting and quality of a surface worked.

Keywords: polymeric composite materials; carbon plastic; cutting edge treatment; cutter; cutting modes; machining quality.

В настоящее время во всех отраслях машиностроения достаточно широко используются различные полимерные композиционные материалы (ПКМ), номенклатура которых, как по свойствам, так и по областям применения, непрерывно растёт. Сегодня разработка и использование эффективных материалов для машиностроения является одной из приоритетных.

Различные пластмассы начиная с середины XX в. стали широко применяться в машиностроении. XXI в. открывает эру нанотехнологий. Создаются и уже широко используются полимерные композиционные материалы, различные углепластики, армированные волокнами, нитями, пряжами и пр. Представителем таких углепластиков, например, является карбон. Он в шесть раз прочнее титана, при этом в пять раз легче высокопрочной стали и в 1,5...2 раза легче алюминия. Он применяется сегодня не

только для обшивки корпусов самолётов-невидимок и космических антенн, но и в тормозных дисках, подшипниках скольжения, деталях двигателей, арматуре нефте- и газопроводов и прочее.

Прочность композиций зависит от способности матрицы передавать и перераспределять касательные напряжения на волокна. Она также зависит от отношения длины волокна к диаметру, от средней прочности волокна и от объёмной доли волокна [2, 5, 6, 9].

Используемая матрица в ПКМ обеспечивает связь армирующего материала, а также передачу и распределение напряжения в его объёме. Армирующие наполнители (тонкие непрерывные волокна, нити, ткани и жгуты) несут на себе основные нагрузки, обеспечивают физико-механические характеристики материала – высокую прочность и жёсткость в направлении

ориентации волокон. ПКМ состоят из армирующего материала на основе угле-, стекло-, арамидно- базальтовых тканых с термоотверждающейся (полиэфирной, винилоэфирной, фенольной, эпоксидной) или термопластичной РЕЕК (полиэфироэфиркетон), PPS (полифенилен сульфид), PEL (полиэфиримид) и т.д. матрицей. Армирующие материалы в зависимости от необходимых или заданных нагрузок имеют разные плотности, модули упругости, направления (однонаправленные, саржа, плейн, твил, мультиаксиальные и др.).

Проблемы механической обработки ПКМ, в первую очередь, связаны с особенностью процесса резания непластичных композиционных материалов. Поскольку в настоящее время материал ещё мало изучен, а свойства его представляют собой уникальную композицию физических, химических, механических и других свойств, работоспособность изделий из ПКМ во многом зависит от результатов финишной механической обработки.

Анализ выполненных известных результатов исследований механической обработки ПКМ и опыт промышленности показывают, что: на сегодняшний день не изучены физические процессы в зоне резания; не существуют проверенные на практике технологические рекомендации по назначению режимов резания, структур операций, условий обработки, методов обработки; нет рекомендаций по выбору оборудования, режущего инструмента; нет экономической оценки эффективности обработки.

Обработка ПКМ отлична по многим аспектам относительно обработки металлов. Пластики – это не однородные материалы, а состоящие из многих различных фаз. Армирующие волокна, прочные и хрупкие, могут обладать низкой теплопроводностью, как в случае с арамидными стекловолокнами. С другой стороны, полимерная матрица не прочная и, в определённой степени относительно армирующего материала, пластичная. Её теплопроводные свойства низкие, что, в конечном итоге, влияет на выбор производственного процесса и шероховатость обработанной поверхности, а недопустимость использования высоких температур является ограничивающим фактором в процессах постотверждения [4, 5, 7].

Обработываемость пластика определяется, в основном, физическими и механическими свойствами волокна и матрицы, содержанием волокна и его направлением. В то время как стекло и углеволокно разрушаются перед режущей кромкой, более жёсткие и прочные арамидные волокна накапливаются перед режущей кром-

кой. Следовательно, на качество обработанной поверхности значительно влияют тип армирования и его направления. Режущие силы зависят от используемого волокна, так как прочность матрицы не оказывает сильного влияния.

На температуры резания также влияют теплопроводные свойства и направление волокон. Углеродные волокна имеют больше возможности проводить тепло вдоль оси резания, чем стекло или арамидные волокна и, как следствие, могут лучше рассеивать тепло из зоны резания. Полимерные матрицы не имеют возможности выдерживать высокие температуры, часто встречаемые при обработке металлов, и необходимо соблюдать особые условия при их обработке и не подвергать матрицу излишнему нагреву в течение длительного времени. При применении СОТЖ влагопоглощение матрицы или волокна могут изменить форму, стабильность размеров и механические свойства обрабатываемого изделия [5, 12].

Различные коэффициенты теплового расширения матрицы и волокон образуют термические нагрузки, которые могут привести к деформации и повреждению поверхности изделия и всего изделия в целом.

Качество обработанной поверхности является определяющим фактором при оценке возможности обработки пластиков. Термин «качество» относится как к геометрическим свойствам, так и к степени повреждения материала, вызванного процессом обработки. Измерение обоих критериев для пластиков более сложное, чем для металлов из-за неоднородной структуры первого. На сегодняшний день не существует общепринятых стандартов технологий измерения и характеристик параметров качества. Кроме параметров шероховатости поверхности, имеют место такие характеристики, как расслоение, «разломачивание», задиры и др. [5].

Расслоение образуется вследствие низкой межслоевой прочности композиционной структуры и высокими воздействующими силами при обработке. Данные силы, в свою очередь, образуются вследствие применения неправильной стратегии резания (скоростей подачи), неправильной геометрии инструмента и его износа.

Материал, из которого производится инструмент, при обработке композитов должен выдерживать абразивность волокон и другие факторы, которые участвуют в процессе резания при обработке ПКМ. Геометрия инструмента должна обеспечивать правильный угол для необходимого сдвига (среза) волокон. Эти два требования кардинально отличаются от требо-

ваний, применяемых при обработке металлов [1, 5, 6, 10].

Абразивные круги часто применяются при обработке пластиков, так как они создают меньше механических повреждений и обеспечивают более высокое качество поверхности, чем лезвийная механическая обработка.

При механической обработке ПКМ полимерная матрица в армированном композите создаёт меньшее сопротивление обработки вследствие меньшей прочности и жёсткости, по сравнению с армирующими волокнами. Она оказывает значительное влияние на тип образования стружки. Помимо этого, вследствие её тепловых свойств (связующих), особенно теплопроводности, полимерная матрица играет важную роль при определении температуры в зоне резания. На поведение полимеров при обработке оказывают воздействие такие параметры процесса как: материал инструмента; угол его режущей части; радиус округления режущей кромки; глубина резания; скорость резания и скорость подачи.

Необходимо также учитывать влияние реологических (состав компонента) и тепловых свойств полимеров на образование стружки. Механическое поведение термореактивных и термопластичных матриц к применяемым нагрузкам кардинально различается. Термореактопласты характеризуются хрупкостью с очень низким коэффициентом удлинения, в то время как термопластические матрицы, благодаря своей пластической структуре, могут достигать коэффициента в несколько сотен процентов.

В зависимости от вязкости предельная прочность и коэффициент удлинения полимеров также зависит от степени применения нагрузки. Прочность материала повышается, а предельное удлинение уменьшается по мере увеличения степени деформации. Другими словами, в материале происходит переход из мягкого состояния в хрупкое при увеличении степени деформации. Из-за этой разницы тип образуемой стружки и качество обработанной поверхности различных типов полимеров будет сильно различаться с определёнными параметрами обработки.

Увеличение угла в плане и уменьшение глубины резания сказываются на уменьшении количества деформаций, которые происходят при формировании стружки. Повышение скорости резания влияет на процесс обработки двумя противоположными способами: с одной стороны, материал показывает высокую степень натяжения и в результате рушится при более низком натяжении, или становится хрупким, с дру-

гой стороны, создаваемое тепло повышает температуру в зоне резания, увеличивает молекулярные цепочки материала и, как следствие, повышает текучесть.

Рост температуры в полимере будет выше в случае применения количества тепла, равному объёму полимера. В процессе механической обработки тепло генерируется (выделяется) посредством сдвигов в первоначальной зоне деформации и, вследствие трения между стружкой и поверхностью инструмента, и между изделием и задним углом инструмента. При механической обработке металлов большая часть данного тепла (вплоть до 70 % при высокой скорости резания) удаляется из области резания за счёт стружкообразования. При механической обработке пластиков, благодаря их низкой теплопроводности, тепло генерируется в первоначальной зоне сдвига и медленно передаётся инструменту. Это необходимо учитывать в конструкции и материале державки режущего инструмента [3, 5, 7, 11].

Термореактивные пластики создают некоторую пластичную деформацию до момента излома, но не в той степени, которая требуется для создания непрерывной стружки. И поэтому они классифицируются как хрупкие. А термопластики, наоборот, показывают значительную эластичную пластическую деформацию до излома, что очень сильно влияет на саму обработку композитов в пропорциональной их объёмной доле в композитах.

При обработке полимеров и композитов из них, эластичная деформация играет значительную роль при определении режущих сил, особенно в третичной зоне деформации из-за эластичного восстановления (упругая деформация), имеет значительное трение в этой зоне и в результате повышение температуры стеклования, что приводит к потере свойств (жидкое состояние) матрицы на данном участке. Тем не менее, концепция сдвига в плоскости была применена с некоторым успехом при анализе обработки пластиков, но лишь для весьма ограниченного состава их матрицы.

Структура ПКМ, особенности её формирования, анизотропия свойств, связанная с различной реакцией составляющих компонентов на действие температурных и силовых факторов, а также определённая направленность армирующих элементов оказывают особое влияние на физические процессы в зоне резания, построение технологических процессов, выбор оборудования и материала режущего инструмента, а также его геометрии [1, 3, 5, 8, 10].

Учитывая это, к геометрии и материалу ре-

жущей части инструмента предъявляются особые требования. Для облегчения ровной обрезки волокон требуется острая режущая кромка и положительный передний угол инструмента, а для устойчивости к абразивной способности волокон и прерывистым нагрузкам, порождаемым их разрушением, требуется инструментальный материал с высокой твёрдостью и ударной вязкостью.

Материал, из которого производится инструмент, при обработке композитов должен выдерживать абразивность волокон и факторы, которые участвуют в процессе резания при обработке ПКМ. Геометрия инструмента должна обеспечивать угол для необходимого сдвига (среза) волокон. Эти два требования кардинально отличаются от требований, применяемых при обработке металлов.

Результаты многих исследований и опыт промышленности [1, 3, 4, 5, 8, 10] показывают, что при обработке ПКМ синтетический спечённый алмаз ПКА (АСПК), если отсутствуют сколы или разрушения, которые определяются его качеством, подвергается наименьшей степени износа. На втором месте, с небольшой разницей, находится кубический нитрид бора (КНБ) – эльбор-Р, -РМ, 05ИТ, гексанит-Р. Затем следует керамика на основе оксида алюминия и диоксида циркония.

Твёрдые сплавы с покрытием и без него значительно уступают по эксплуатационным свойствам инструментам, изготовленным из ПКА и КНБ. Отдельно следует отметить твёрдосплавный инструмент с алмазоподобным покрытием (DKL), который имеет достаточно высокую износостойкость и приближается к ПКА и КНБ. Однако этот инструмент значительно дороже, учитывая сложность технологий покрытия, и не всегда отличается высоким качеством – происходит отслаивание алмазоподобной плёнки.

Ведутся активные работы по созданию состава твёрдосплавной основы с переходной зоны, которая могла бы уменьшить несоответствие коэффициентов теплового расширения алмазоподобного покрытия и твёрдого сплава, что считается главной причиной возникновения термического напряжения и приводит к отслаиванию покрытия от основы.

Характерным отличием обработки углепластиков является отсутствие участка катастрофического изнашивания резцов. Наблюдаются лишь два участка изнашивания: интенсивного изнашивания (в первые минуты работы приработка) и нормального рабочего изнашивания. Исходя из этого, а также из того, что одним из главных критериев работоспособности режущей

го инструмента является его износостойкость, было предложено использовать для обработки углепластиков инструмент из углеродистых и легированных сталей, например, У12А и ХГТ, с покрытием режущей поверхности инструмента карбидом титана (TiC) или нитридной керамикой. Такой инструмент в 8...10 раз дешевле инструмента из ПКА и КНБ.

Как известно, износ инструмента приводит к таким нежелательным последствиям, как уменьшение прочности режущей кромки, увеличение сил, действующих на инструмент, и потребляемой мощности, повышение температуры резания, снижение качества обработки поверхности, ухудшение размерной точности детали и, в конечном итоге, снижение производительности.

При механической обработке углепластиков наиболее распространёнными видами износа в зависимости от используемого инструментального материала, являются округление режущей кромки, вызываемое постепенным истиранием образующих режущую кромку поверхностей, образование фаски износа по задней поверхности инструмента, которая, как правило, почти параллельно направлению резания. Её ширина точно отражает изменения в свойствах заготовки по длине контакта. Износ по задней поверхности может быть неоднородным вдоль режущей кромки. При обработке, например, углепластиков, видимая изогнутость износа по задней поверхности отражает различия в характеристиках износа волокна и полимерной фазы в разных слоях.

Другим видом износа, который проявляется при механической обработке углепластиков, является образование сколов на режущей кромке инструмента. Данный вид износа наиболее распространён, когда режущий инструмент не обладает достаточной ударной прочностью, когда глубина резания велика, а также в условиях прерывистого резания. Кроме того, сколы образуются при значительном износе по задней поверхности и износе по передней поверхности инструмента, например, твёрдосплавных с алмазоподобным покрытием. При этом резко уменьшается поперечное сечение режущей кромки и происходит её скол (сколы).

На рис.1 показана схема износа реза из твёрдого сплава группы ТК с алмазоподобным покрытием при обработке ПКМ с разнонаправленными волокнами из углепластика. Деструкция полимерного связующего материала при резании, в результате которой образуется вязкотекучий в микрообъёмах полимер, являющийся поверхностно-активным веществом

(ПАВ), уменьшает поверхностную энергию материала инструмента, что облегчает отрыв от его поверхности отдельных микро- и макрочастиц. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента с образованием лунки на его передней поверхности и фаски – на задней поверхности. При достижении размера лунки и фаски в направлении режущего клина больше критической, происходит микроскол режущего лезвия.

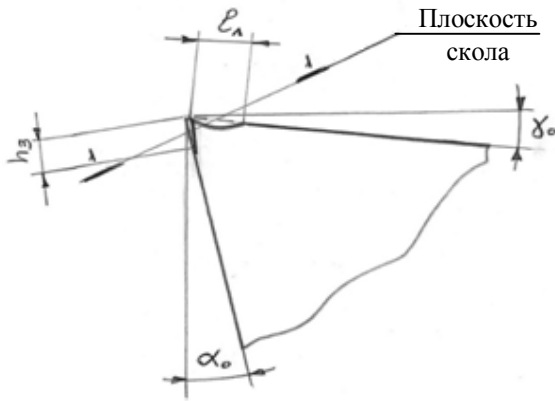


Рис. 1. Схема образования фаски и лунки износа, приводящие к сколам режущей кромки инструмента

На рис. 2 показаны результаты экспериментальных исследований по износостойкости режущего инструмента, оснащённого различным инструментальным материалом при токарной обработке углепластика УГЭТ.

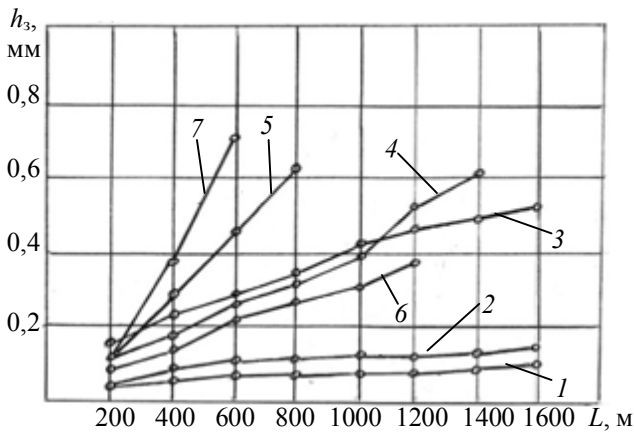


Рис. 2. Износ различных инструментальных материалов при токарной обработке углепластика УГЭТ: 1 – АСПК; 2 – КНБ (эльбор-Р; эльбор-РМ); 3 – керамика; 4 – У12А+TiC; 5 – твёрдый сплав ТК+TiN; 6 – ВК+алмазоподобное покрытие; 7 – ВК+TiN.

На основании выполненных исследований, а также обработки подобных заготовок в производственных условиях были установлены допустимые критерии износа резцов из АСПК:

для черновой обработки $h_3 = 0,1 \dots 0,2$ мм; для чистовой обработки $h_3 = 0,08 \dots 0,1$ мм. Для резцов из КНБ (эльбор-Р и эльбор-РМ): для черновой обработки $h_3 = 0,15 \dots 0,3$ мм; для чистовой обработки $h_3 = 0,06 \dots 0,1$ мм.

Работа данными резцами со степенью износа в рекомендуемых пределах обеспечивает получение поверхности изделий из углепластика требуемого качества – без сколов, расслоений, «разломачивания» с параметрами шероховатости поверхности $Rz = 20 \dots 10$ мкм при предварительной обработке и $Ra = 0,8 \dots 1,2$ мкм при чистовой обработке.

Таким образом, износ режущего инструмента при механической обработке углепластиков происходит, в основном, за счёт абразивного истирания и микроразрушения. Абразивный износ возникает вследствие трения поверхности инструмента под давлением об абразивный волокнистый материал, внедрённый в полимерную матрицу, а также вследствие истирания незакреплённым абразивом, образуемым обломками волокон и матрицы. Абразивный износ проявляется в виде отчётливого закругления режущей кромки, а также в виде фасок износа на передней и задней поверхностях инструмента. Эти фаски износа часто характеризуются неглубокими канавками, идущими в направлении резания и указывающими на изменение в микроструктуре заготовки по всей её толщине.

При механической обработке волокнистых полимеров наблюдается процесс колебания сил резания, частота которых зависит, в первую очередь, от ориентации волокон. Амплитуда и частота колебаний силы резания Pz при обработке со скоростью резания, направленной параллельно волокнам, инструментом с положительным передним углом свидетельствуют об отслаивании, изгибе и разрушении волокон, происходящих на передней поверхности инструмента.

При резании волокон с положительной ориентацией сила резания отражает изменения в процессе сдвига и разрушения волокнистых и связующих материалов с изменением ориентации волокон. Осевая сила определяет взаимодействие между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью режущего инструмента. Амплитуда колебаний силы резания уменьшается с увеличением угла ориентации волокон, а затем увеличивается при резании волокон с ориентацией 90° и больше. Следует отметить, что характер колебаний силы при резании волокон с большим углом ориентации (более 90°) отличается от резания волокон с малым поло-

жительным углом ориентации ($0...75^\circ$). При резании волокон с большим положительным углом ориентации большие амплитуды колебаний связаны с большими удельными давлениями в зоне сдвига и сдвигом волокон, а также с растрескиванием матрицы.

При применении моделей плоскости сдвига к механической обработке однонаправленных композитов существуют два ограничения:

– сдвиг имеет место только для ограниченного диапазона направлений волокон от 10° до 75° . Поэтому данную модель нельзя применять для всех возможных направлений волокон в композитах ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$);

– межповерхностный сдвиг происходит вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Это приводит к скольжению стружки вверх по передней поверхности инструмента. При этом угол плоскости сдвига принимается равным углу ориентации волокон независимо от принципа минимума энергии. Таким образом, результаты исследования дают приемлемое совпадение с экспериментальными данными только в диапазоне направлений волокон от 10° до 60° .

Стружкообразование при резании волокон с положительным углом ориентации ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) происходит в процессе сжатия с последующим сходом стружки вверх по передней поверхности инструмента за счёт межслоевого сдвига вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей.

Качество поверхности при механической обработке ПКМ зависит от направления траектории движения подачи инструмента и направления волокон армирующих элементов [7, 8]. При неблагоприятном сочетании этих движений возможно появление следов разрыва волокон, выброса на поверхность фрагментов основы компонентов ПКМ и ухудшение характеристик шероховатости поверхности.

На качество обработанной поверхности изделий из ПКМ оказывает влияние радиус округления режущей кромки, радиус при вершине резца и другие его геометрические параметры. Кроме того, необходимо строго регламентировать величину износа инструмента на передней или задней поверхности, что влияет не только на качество получаемой поверхности детали, но и в целом на эффективность всего процесса обработки.

Выводы

1. Анизотропия свойств ПКМ определяет различия процессов резания, в частности про-

цесса стружкообразования, при обработке вдоль и поперёк армирующих волокон.

2. Малая теплопроводность большинства ПКМ, которая обуславливает слабый отвод тепла из зоны резания со стружкой и в обрабатываемое изделие, определяет требование к режущему инструменту, конструкции державки резца и её сечению, который должен интенсивно отводить выделяющееся в зоне резания тепло.

3. При обработке ПКМ кроме абразивного возникает механический адсорбционный износ инструмента, что необходимо учитывать при выборе материала его режущей части. Наиболее лучшим материалом сегодня являются АСП и КНБ.

4. Склонность к упругому восстановлению обрабатываемой поверхности ПКМ приводит к появлению больших площадок контакта на задних поверхностях инструмента. Это определяет высокий уровень сил трения на задней поверхности инструмента и как следствие высокую интенсивность изнашивания инструмента по задней поверхности.

5. Характеристики шероховатости поверхности, образующиеся при обработке ПКМ, зависят от геометрии режущего инструмента, главным образом радиуса округления его режущей кромки, скорости резания, глубины и скорости подачи, а также от направления волокон армирующих элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зубарев, Ю.М.** Современные инструментальные материалы. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 304 с.
2. **Зубарев, Ю.М.** Технологическое обеспечение надёжности эксплуатации машин. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 320 с.
3. **Зубарев, Ю.М., Приемывшев, А.В., Заостровский, А.С.** Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5, С.3–33.
4. **Зубарев, Ю.М., Приемывшев, А.В., Заостровский, А.С.** Качество поверхности при обработке резанием полимерных композиционных материалов // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – №9. – С. 3–11.
5. **Механическая** обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. – Сумы: Изд-во ИТД. «Университетская книга», 2013. – 97 с.
6. **Старков, В.К.** Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
7. **Приемывшев, А.В., Заостровский, А.С.** Особенности механической обработки высокотехнологичных полимерных материалов на основе углеродистого волокна с термо-

пластичной матрицей // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие. – 2014. – №1. – С. 174–179.

8. **J. Davim and P. Reis** “Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 160. no. 2. pp. 160–167. Mar. 2005.

9. **N. Bhatnagar** “On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. vol. 35. no. pp. 701–716, May 1995.

10. **J. Davim, P. Reis and C.C. Antonio** “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up”. *Composites Science and Technology*, vol.64. no.2. pp. 289–297. Feb.2004.

11. **P. Ghidossi, M. Elmansori, and E. Pierron** “Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 989–999, Jul. 2004.

12. **P. Guegan, L.E. Maitre and J.C. Hamann** “Contribution à L’usinage des matériaux composites”. 1992. *Actes de Colloques*. pp. 7–9.

REFERENCES

1. Zubarev, Yu.M. *Modern Tool Materials*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2014. – pp. 304.

2. Zubarev, Yu.M. *Technological Support of Machine Operation Reliability*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2016. – pp. 320.

3. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of carbon plastic machining technology. – *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016. - №5, pp. 3–33.

4. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Surface quality at polymeric composite material cutting. Reference Book. *Engineering Journal*. – 2016. – №9. – pp. 3–11.

5. *Composite Material Machining at Aircraft Assemblage*. – Sumy: ITD Publishing House. “University Book”, 2013. – pp. 97.

6. Starkov, V.K. *Physics and Optimization of Material Cutting*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 640.

7. Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Machining peculiarities of science intensive polymeric materials based on carbon fiber with thermo-plastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. – 2014. – №1. – pp. 174–179.

8. J. Davim and P. Reis “Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 160. no. 2. pp. 160–167. Mar. 2005.

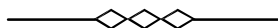
9. N. Bhatnagar “On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. vol. 35. no. pp. 701–716, May 1995.

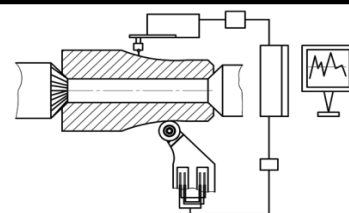
10. J. Davim, P. Reis and C.C. Antonio “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up”. *Composites Science and Technology*, vol.64. no.2. pp. 289–297. Feb.2004.

11. P. Ghidossi, M. Elmansori, and E. Pierron “Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 989–999, Jul. 2004.

12. P. Guegan, L.E. Maitre and J.C. Hamann “Contribution à L’usinage des matériaux composites”. 1992. *Actes de Colloques*. pp. 7–9.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев





УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_5971e872c26d91.93894036

А.Г. Суслов, д.т.н.

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, 115409, Каширское шоссе, 31)

Д.И. Петрешин, д.т.н.,

О.Н. Федонин, д.т.н.,

В.А. Хандожко, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: unti@tu-bryansk.ru

Автоматизированная технологическая система обеспечения контактной жесткости деталей машин

Одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства. Совместное использование самообучающейся технологической системы и автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости позволит с заданной точностью обеспечивать требуемое значение эксплуатационного свойства деталей машин и их соединений.

Ключевые слова: автоматизированная система; эксплуатационные свойства; контактная жесткость; параметры качества поверхностного слоя; механическая обработка; адаптивная система управления.

A.G. Suslov, D. Eng.,

(National Research Nuclear University "MIFI", 31, Kashirskoye Shosse, Moscow, 115409)

D.I. Petreshin, D. Eng.,

O.N. Fedonin, D. Eng.,

V.A. Khandozhko, Can. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50- Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Automated technological system to ensure contact stiffness of machine parts

A single-stage technological support of operation properties of machine parts and their joints is based on the integration and on the automated solution of problems of a designer and technologist for the definition of optimum conditions for machining parts at the stage of design-technological pre-production. A joint use of a self-learning technological system and an automated system of scientific investigations of contact stiffness will allow ensuring a required value of the operation property of machine parts and their units with the specified accuracy.

Keywords: automated system; operation properties; contact stiffness; quality parameters of surface layer; machining; adaptive control system.

Важнейшие показатели, характеризующие качество современных машин и приборов, – точность и надежность в значительной степени зависят от эксплуатационных свойств сопря-

гаемых поверхностей деталей, и в частности контактной жесткости.

Контактная жесткость определяет способность поверхностных слоев деталей, находя-

щихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать. Контактные перемещения составляют значительную часть в балансе упругих перемещений машин и их узлов. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80...90 % общих деформаций, в одностоечных координатно-расточных и вертикально-фрезерных станках — до 70 %, в двухстоечных карусельных станках — до 40 % и т.д. [1].

Контактная жесткость зависит от геометрических характеристик качества поверхности (макроотклонения, волнистости, шероховатости) и физико-механических свойств поверхностного слоя (микротвердости) сопрягаемых деталей машин [1, 2, 4]. Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов; на точности установки деталей в приспособлениях, на станках; на точности обработки и сборки деталей, т.е. на качестве машиностроительных изделий. Она играет большую роль при определении фактической площади касания, знание которой необходимо для расчета сил трения, оценки влияния предварительной обработки поверхностей на износ деталей, подбора износостойких пар трения, расчета прочности соединений с неподвижными посадками, расчета плотности соединений и т.д. Значение контактной жесткости велико и при изготовлении ответственных деталей с микронной точностью [2].

Анализ работ [2, 4] показывает, что сложилась практика решения задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, и контактной жесткости в частности, в два этапа. На первом этапе по заданной величине контактной жесткости стыка опреде-

ляются параметры качества контактирующих поверхностей. На втором устанавливают условия обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества этих поверхностей.

В настоящий момент развивается новое научное направление в технологии машиностроения – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, которое основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства [4, 6, 7]. Для реализации автоматизированного технологического обеспечения рассматриваемого эксплуатационного свойства необходимы соответствующее алгоритмическое обеспечение и математические зависимости, отражающие взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки различных видов поверхностей деталей машин. Причем при качественном совпадении результатов, приводимых разными исследователями, их количественные оценки контактной жесткости значительно отличаются. В большей степени это связано с различными методами измерения контактной жесткости поверхностей деталей машин.

На сегодняшний момент серийное оборудование для указанных измерений не выпускается, а методически процесс измерения регламентируется только нормалью МР42-82 [3]. В соответствии с требованиями нормы была реализована установка для измерения контактной жесткости в виде автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) контактной жесткости (рис. 1) [5].

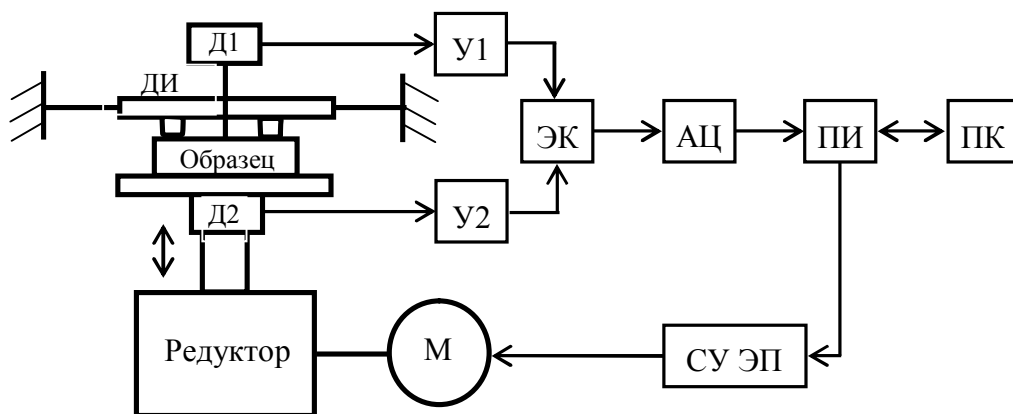


Рис. 1. Схема автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости:

М – электродвигатель; Д1 – индуктивный датчик измерения контактной деформации; Д2 – датчик для измерения нагрузки; ДИ – держатель индентров; У1 и У2 – электронные усилители сигналов с датчиков; ЭК – электронный коммутатор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПИ – преобразователь интерфейса; ПК – персональный компьютер

Созданная АСНИ предназначена для измерения контактной жесткости плоских, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей обработанных с шероховатостью от $Ra = 0,1$ мкм до $Ra = 3,2$ мкм и микротвердости образцов от 100 HV до 550 HV. При этом контактная жесткость рабочей поверхности может определяться с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости как при первой, так и при повторной нагрузках.

Перед измерениями в зависимости от формы исследуемой поверхности (плоская, наружная или внутренняя цилиндрическая) и вида контроля (с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости) выбирается соответствующая конфигурация инденторов и схема их расположения [4].

Затем, исходя из заданных параметров Ra или Rz и твердости исследуемых образцов, назначаются минимальная и максимальная нагрузка. При этом необходимо, чтобы исследуемый образец был изготовлен из того же материала и теми же технологическими методами, что и реальная деталь.

Исследуемый образец помещается на предметный столик нагрузочного устройства и проводится предварительное контактирование инденторов с исследуемой поверхностью образца для устранения возможных упругих деформаций и люфтов. Затем в автоматическом режиме происходит шестикратное нагружение-разгружение образца и определение математических зависимостей, отражающих взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки поверхностей деталей машин, например вида [6]:

– торцевое чистовое точение при первом нагружении:

$$j_1 = C_{j1} S_0^{x1} v^{y1} HB^{z1}; \quad (1)$$

– торцевое чистовое точение при повторном нагружении:

$$j_{повт} = C_{jp} S_0^{x2} v^{y2} HB^{z2}, \quad (2)$$

где j_1 – величина контактной жесткости при первом нагружении, МПа/мкм; $j_{повт}$ – величина контактной жесткости при повторном нагружении; МПа/мкм; S_0 – величина подачи на оборот, мм/об; v – скорость резания, м/мин; HB – твердость материала по Бринелю, МПа; C_{j1} , C_{jp} , $x1$, $y1$, $z1$, $x2$, $y2$, $z2$ – коэффициенты модели.

Таким образом, алгоритмическое, математическое и программное обеспечение разработан-

ной АСНИ позволяет одноступенчато решать задачу технологического обеспечения контактной жесткости деталей машин и их соединений. При этом АСНИ реализует следующий алгоритм поиска оптимального решения рис. 2. В качестве целевой функции в алгоритме АСНИ используется минимум технологической себестоимости.

Исходными данными для функционирования АСНИ являются:

- 1) материал контактирующих деталей;
- 2) размеры контактирующих поверхностей, которые определяют необходимость учета только шероховатости, шероховатости и волнистости или шероховатости, волнистости и макроотклонений;
- 3) нагрузка на контактирующие поверхности деталей.

Косвенно исходными данными является и система технологических ограничений – диапазон варьирования подач, скоростей, силы нагружения при поверхностно-пластическом деформировании и др. По исходным данным определяется требуемое значение контактной жесткости (при первом или повторных нагружениях).



Рис. 2. Алгоритм работы программы для определения режимов механической обработки, обеспечивающих требуемую контактную жесткость с минимальной технологической себестоимостью

На первом этапе выбирается метод обработки и соответствующие математические зависимости. Следующий блок носит сервисный характер и контролирует наличие в среде информации для конкретных материалов, конкретных размеров и т.д.

Далее устанавливается исходный уровень значения входных параметров и выполняется расчет контактной жесткости. Если контактная жесткость получается ниже требуемой, то текущая совокупность условий обработки отбрасывается. При положительных результатах ее включают в область допустимых решений и определяют технологическую себестоимость. Технологическая себестоимость рассчитывается укрупненно на основе машинного времени обработки. Таким образом, перебирается вся область возможных значений входных параметров и формируется область допустимых решений.

На последнем этапе из этой области выбирается сочетание условий обработки, которому соответствует минимальное значение технологической себестоимости. Далее расчет повторяется для всех методов обработки и в конце выбирается вариант с минимальной технологической себестоимостью. Таким образом, полученные математические модели [6] могут быть использованы для технологического обеспечения контактной жесткости.

В математические модели (1) и (2) входят управляющие факторы: величина подачи S_0 и скорость резания v , с помощью которых можно

управлять величиной контактной жесткости во время механической обработки. Однако во время механической обработки непосредственный контроль величины контактной жесткости невозможен. Поэтому для контроля величины контактной жесткости во время механической обработки, например при адаптивном управлении, необходимо использовать косвенный метод. Для этого можно использовать математическую модель вида

$$j = C_j Pz^{xf} T^{yf}, \quad (3)$$

где j – величина контактной жесткости; C_j , xf , yf – коэффициенты модели; Pz – главная составляющая силы резания, Н; T – температура в зоне резания, °С.

Таким образом, модели (1) и (2) используются для управления величиной контактной жесткости при механической обработке, а модель вида (3) для косвенного определения величины контактной жесткости на основании измеренных во время обработки силы резания Pz и температуры T в зоне резания при механической обработке.

Математические модели вида (1) и (2) определяют АСНИ контактная жесткость. Для определения математической модели вида (3) совместно с АСНИ контактная жесткость необходимо использовать самообучающуюся технологическую систему [8, 9, 10] (рис. 3) с режимом адаптивного управления контактной жесткостью.

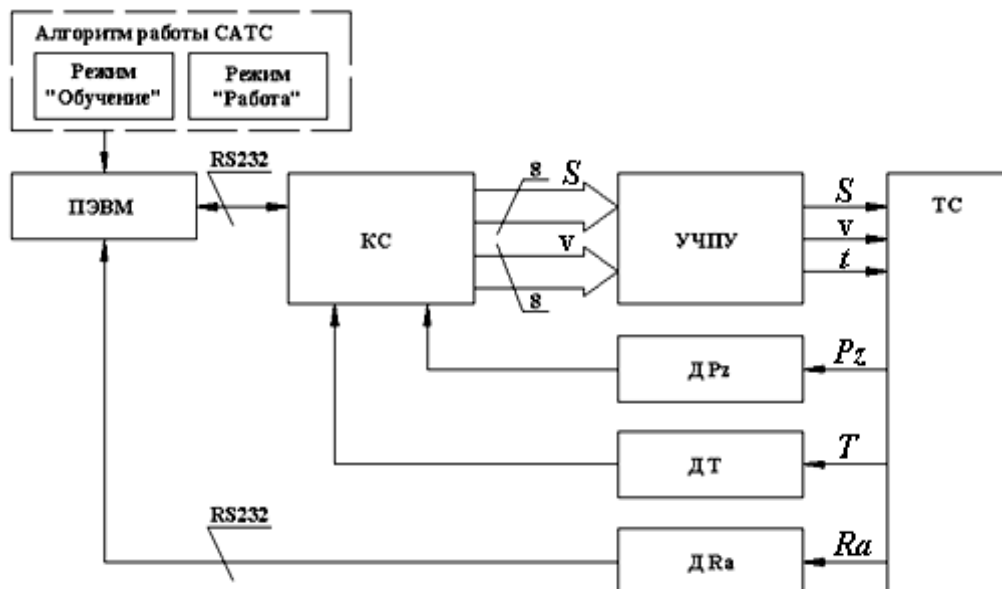


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной системы управления параметрами качества поверхностного слоя деталей машин

Необходимость использования самообучающейся технологической системы с режимом адаптивного управления контактной жесткостью обосновывается тем, что изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок приводят к рассеянию параметров качества поверхностного слоя и, как следствие, к рассеянию эксплуатационных свойств деталей. Кроме того, для ряда ответственных изделий требуется технологически обеспечивать закономерное изменение эксплуатационных свойств на различных участках поверхности детали.

В состав системы входят следующие элементы: технологическая система (ТС); датчик, измеряющий главную составляющую силы резания P_z ($D P_z$); датчик, измеряющий текущую температуру в зоне резания ($D T$); датчик, контролирующий параметр шероховатости Ra ($D Ra$); контроллер сопряжения (КС) датчиков с ПЭВМ и ПЭВМ с устройством ЧПУ; устройство числового программного управления (УЧПУ), обеспечивающее управление технологической системой за счет изменения подачи S и скорости резания v . В большинстве случаев УЧПУ предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для построения автоматизированной системы управления с режимом самообучения на базе УЧПУ необходимо использовать ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, реализующим алгоритм работы системы.

Совместное использование АСНИ контактная жесткость и самообучающейся технологической системы предполагает следующую последовательность действий. На основе исходных данных о величине требуемой контактной жесткости в АСНИ определяется, есть ли для этих данных соответствующие математические модели, связывающие условия механической обработки с требуемой величиной контактной жесткости модели вида (1), (2) и величину контактной жесткости с выходными параметрами процесса резания модель вида (3). В случае если такие модели имеются, то параметры данных моделей передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления при механической обработке.

В том случае, когда математические модели для заданных исходных данных отсутствуют, АСНИ сообщает оператору о необходимости получить данные модели. После этого с помощью самообучающейся технологической сис-

темы ставится активный эксперимент, причем материал образцов и их твердость должны быть такие же, как и для реальной детали.

Полученные в ходе активного эксперимента результаты и обработанные образцы передаются в АСНИ для измерения контактной жесткости и определения математических моделей вида (1), (2) и (3). После успешного получения математических моделей их параметры передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления.

Совместное использование самообучающейся технологической системы с АСНИ контактная жесткость позволит с заданной точностью обеспечивать требуемое значение контактной жесткости деталей машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. 1987. – 208 с.
2. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. 2000. – 320 с.
3. Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ, 1982.
4. Инженерия поверхности деталей/ А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
5. Суслов, А.Г., Захаров, А.Е., Петрешин, Д.И., Финатов, Д.Н., Штепа, А.П., Хандожко, В.А. Автоматизированная система нормализованного определения несущей способности поверхностных слоев деталей машин // Справочник. Инженерный журнал (приложение). – 2003. – №9. – С. 21–24.
6. Медведев, Д.М., Хандожко, В.А. Автоматизированное технологическое обеспечение контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 40–49.
7. Суслов, А.Г., Медведев, Д.М. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // СТИН. – 2010. – № 8. – С. 22–25.
8. Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И. Автоматизированное обеспечение параметров качества поверхностей, получаемых механической обработкой // Вестник машиностроения. – 2013. – №4. – С. 54–58.
9. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 9(15). – С. 25–27.
10. Suslov, A.G. Control law for an adaptive technological system to maintain surface-layer quality in machining/A.G. Sus-

lov, D.I. Petreshin// Russian Engineering Research. 2010. T. 30. №4. С. 418–423.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Technological Support of Parameter State of Surface Layer in Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering. 1987. – pp. 208.
2. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality of Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering. 2000. – pp. 320.
3. *Method for Definition of Normal Contact Stiffness in Fixed Joints: Methodical Recommendations*. – М.: VNIIMASH, 1982.
4. *Parts Surface Engineering/ A.G. Suslov [et al.]*; under the editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering. 2008. – 320.
5. Suslov, A.G., Zakharov, A.E., Petreshin, D.I., Finatov, D.N., Shtepa, A.P., Khandozhko, V.A. Automated system for normalized definition of surface layer carrying capacity in machine parts // *Reference Book, Engineering Journal (Appendix)*. – 2003. – №9. – pp. 21–24.

6. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Automated technological support of ground surface contact stiffness in machine parts and their joints // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – № 2 (46). – pp. 40–49.

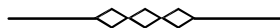
7. Suslov, A.G., Medvedev, D.M. *Single-Stage Technological Support of Cylindrical Surface Wear-Resistance of machine Parts* // STIN. – 2010. – № 8. – pp. 22–25.

8. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Quality parameter automated support of surfaces obtained by machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2013. – №4. – pp. 54–58.

9. Petreshin, D.I. Quality parameter technological support of surface layer in machine parts under conditions of uncertainty // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – № 9(15). – pp. 25–27.

10. Suslov, A.G. Control law for an adaptive technological system to maintain surface-layer quality in machining/A.G. Suslov, D.I. Petreshin// *Russian Engineering Research*. 2010. Vol. 30. №4. pp. 418–423.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Безъязычный



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru
Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 30.06.2017. Выход в свет 31.08.2017.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.
Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+