

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 1 (79)

2018

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Злобина И.В., Бекренев Н.В., Павлов С.П. Технологическое повышение прочности композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Чудин В.Н. Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах 10
Лебедев В.А., Жук Г.В., Новиков С.В. Научно обоснованное совершенствование элементов дуговой механизированной сварки и наплавки 14

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Комплексное технологическое повышение износостойкости и статической прочности деталей из стали 40Х13 19

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Петрова Л.Г., Александров В.Д., Морщилов М.В. Формирование износостойких покрытий на алюминиевом сплаве АЛ9 гальваническими, детонационными и газофазными методами 22

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

Гусев В.Г., Савина Е.С. Проектирование обработки сложных поверхностей на токарных станках с ЧПУ в САМ-системе Esprit 28
Козлов А.М., Малютин Г.Е. Расчет траектории инструмента при фрезеровании внутренних поверхностей на станках с ЧПУ 36

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Макарова О.А., Алексейчук В.И., Банников А.И. Технологическое обеспечение качества концов труб большого диаметра с полиэтиленовым покрытием 41
Шоев А.Н. Шлифование и полирование рабочих поверхностей коленчатых валов и кулачков распределительных валов бесконечными алмазными лентами. 45

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 «Наукоёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

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.А. (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 (индексы по каталогам:

«Роспечать» **79195**, «Пресса России» **39536**).

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 1 (79)

2018

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. FAYUKHIN 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, which can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» **79195**, «Pressa Rosii» **39536**).
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
ПН № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Pavlov S.P. Composite strength technological increase in SHF electromagnetic field.3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

Chudin V.N. Hot extrusion of inner stages in housings. 10
Lebedev V.A., Zhuk G.V., Novikov S.V. Scientifically substantiated updating of arc mechanical welding and surfacing. 14

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF FINISHING AND HARDENING PROCESSING

Suslov A.G., Shalygin M.G. Complex technological increase of wear-resistance and static strength of parts made of steel 4Ch13.19

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

Petrova L.G., Alexandrov V.D., Morshchilov V.D. Wear-resistant coating formation on aluminum alloy Al9 through galvanic, detonation and gas-cycle methods. 22

PROCESSING ON NC MACHINE TOOLS AND MACHINING CENTERS

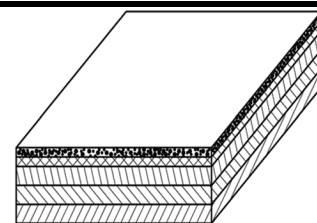
Gusev V.G., Savina E.S. Design of complex surface machining on NC lathes in Esprit CAD system.28
Kozlov A.M., Malyutin G.E. Tool path calculation at inner surface milling on NC machines.36

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Makarova O.A., Alexeychuk V.I., Bannikov A.I. Technological support of quality in large diameter pipes with polyethylene coating.41
Shoey A.N. Grinding and buffing of work surfaces in crankshafts and cams of camshafts by endless diamond belt. 45

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 academic 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 536.24:519.63

DOI: 10.12737/article_5a5a44e7789f39.08085474

И.В. Злобина, к.т.н., Н.В. Бекренев, д.т.н., С.П. Павлов, д.ф.-м.н.
(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: irinka_7_@mail.ru

Технологическое повышение прочности композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле

Установлено, что обработка в СВЧ электромагнитном поле средней мощности стандартной частоты способствует увеличению количества участков контакта волокон и матрицы и формированию развитой поверхности микроагломерированной структуры. Показано, что модификация в СВЧ электромагнитном поле способствует увеличению напряжения изгиба на 11 – 16 %, растяжения - на 13 – 21 %. Во время испытаний на межслойной сдвиг обработанные образцы, имеют прочность на 14 – 15 % больше, чем контрольные. Исследование микроструктуры контрольных и обработанных образцов методом фрактального анализа показало, что фрактальная размерность объектов микроструктуры обработанного материала увеличена по сравнению с контрольным образцом на 14 – 22 %. Этот факт может быть принят в качестве одного из механизмов повышения прочности материала, обработанного в СВЧ электромагнитном поле, за счет увеличения точек контакта армирующих волокон и матрицы.

Ключевые слова: композиционные материалы; углеродные волокна; микроструктура; контактная зона; СВЧ электромагнитное поле; фрактальный анализ.

I.V. Zlobina, Can. Eng., N.V. Bekrenev, D. Eng., S.P. Pavlov, D. Phys-Math.
(“Yuri Gagarin State Technical University”, 77, Polytekhnikeskaya Str., Saratov, Russia, 410054)

Composite strength technological increase in SHF electromagnetic field

As a method for the mechanical strength increase in products made of composite and its uniformity increase in a product there is offered a structure modification in a SHF electromagnetic field of a standard frequency range. It is defined that a SHF modification contributes to the increase of bend stress by 11 – 16 %, cut stress increase by 13 – 21 %. During tests for an inter-laminar shear the samples processed withstand stress by 14 – 15 % more than reference samples. The study of the micro-structure in reference samples and processed ones with the use of the fractal analysis procedure has shown that a fractal dimensionality of micro-objects of the structure of material worked increased as compared with a reference sample by 14 – 22 %. This fact may be accepted as one of the mechanisms for material strength increase at the expense of the increase of contact interaction points of the matrix and reinforcing fibers.

Keywords: composites; carbon fibers; micro-structure; contact area; SHF (super-high frequency) electro-magnetic field; fractal analysis.

Разработка и внедрение перспективных транспортных систем, в частности летательных аппаратов, требуют опережающего создания новых высокопрочных и легких материалов и совершенствования технологий формообразования конструктивных элементов из них. Анализ научно-технической литературы,

материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике.

По данным исследовательской компании Grand View Research объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 г. 23,55 млрд. дол. По данным другой исследовательской компании MarketsandMarkets, глобальный рынок углепластиков уже к 2020 г. поднимется до уровня 35,74 млрд. дол. При этом изменится структура применяемых углепластиков и композитов на их основе: если в 2014 г. доля терморепаративных композитов составляла порядка 75 %, то в перспективе наиболее высокие темпы роста будут характерны для термостойких композитов на основе углепластиков, что повлечет за собой также реорганизацию технологического обеспечения производства изделий [5, 6, 8, 14, 15].

Одними из основных потребителей композитов на основе углеродных волокон в промышленно развитых странах были и остаются аэрокосмическая и оборонная промышленности, а также автомобилестроение (особенно производство гоночных болидов и суперкаров). В частности, на аэрокосмическую отрасль приходилось в 2014 г. более 30 % потребления данных материалов.

Изложенное свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества. Однако композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. В то же время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений.

В этой связи перспективно использование армированных микро- и нано частицами композитов с полимерной матрицей, обладающих малым весом, значительной прочностью и высоким температурным потенциалом. Поэтому весьма актуальными являются исследование и разработка методов определения эффективных термомеханических свойств армированных композитов и их оптимизация с учетом свойств межфазного слоя, конструктивных особенностей изделия и характера действующих нагрузок [5, 6].

Однако, вследствие определенного закона распределения компонентов, условий формирования и отверждения композиций, полученные материалы (и изделия из них) обладают явно выраженной анизотропией свойств, что вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, приводя к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для изделий авиационно-космической техники, особенно для высокоманевренных и скоростных объектов.

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективного метода представляется применение микроволнового (СВЧ электромагнитного) поля.

Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [1, 7, 10] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения микроволновых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки.

Вопросы нагрева материалов в электромагнитном поле обсуждаются на международных симпозиумах, наиболее представительным среди которых можно считать Конгресс по Применению Радиочастоты и Микроволн, проводимый раз в два года, в котором участвуют специалисты таких стран как Россия, США, Великобритания, Германия, Франция, Бразилия, Румыния, Турция, Мексика, Чехия, Польша. На конгрессах по применению радиочастот и микроволн рассматривается большой спектр различных направлений развития и применения электромагнитных технологий различного частотного диапазона, в частности: энергетическая эффективность технологий; термообработка керамики, полимеров, стекла, минералов и других диэлектрических материалов; обработка отходов различных производств; полупроводники и микроэлектронное производство; методы измерения диэлектрических свойств материалов; моделирование и взаимодействие материалов с энергией электромагнитного поля сверхвысоких частот и т.д. Отмечается, что применение волновых технологий позволяет значительно улучшить качественные показатели при производстве и обработке многих видов материалов.

В последнее время благодаря работам оте-

чественных и зарубежных ученых: Ю.С. Архангельского, В.А. Коломееца, Е.В. Колесникова, В.А. Царева, А.Н. Каргина, Г.А. Морозова, О.Г. Морозова, И.А. Рогова, Л.Э. Рикенглаза, Г. Пюшнера, J.R. Cannon, W.C. Chew, A. Razek, T.L. White и других в основном создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа и технологических магнетронов, реализованные в установках промышленного и бытового назначения. В работах С.Г. Калгановой, С.К. Слепцовой получены результаты, свидетельствующие о положительном влиянии на прочность и другие свойства стекловолоконных и других полимерных материалов нетеплового воздействия.

В области направленного электрофизического модифицирования композиционных материалов, в том числе с формированием регулярных наноструктур работ относительно немного и они посвящены в основном компаундам, синтетическим волокнам и стеклотканым композициям на стадии их синтеза. Влияние электромагнитного поля на весь спектр эксплуатационных характеристик окончательно сформированных изделий, включая время до разрушения при предельных нагрузках, применительно к перспективным для летательных аппаратов и других транспортных систем углепластикам, а также материалам с внутренней иерархической структурой мало изучено. Это сдерживает практическую реализацию перспективных технических решений высокоскоростных или малогабаритных летательных аппаратов из-за значительной анизотропии свойств указанных материалов, имеющих явную волокнистую структуру.

В настоящее время доказано, что, варьируя геометрией и напряженностью электрического поля, можно создать условия объемного нагрева изделия, что позволяет значительно интенсифицировать процесс его термообработки; повысить качество изделий; уменьшить габариты нагревательных установок; улучшить экономические показатели процесса; разработать новые виды термических процессов, невозможные для реализации при использовании традиционных методов нагрева [1]. Однако термические эффекты СВЧ воздействия проявляются в основном на стадиях формирования материала, при синтезе армирующих волокон, при отверждении матрицы. При этом не решается проблема возникновения в процессе формирования изделия, отверждения

и финишной механической обработки неоднородностей структуры, приводящих к росту остаточных напряжений и снижению прочностных характеристик.

Авторами выполнены экспериментальные исследования [11 – 13] влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность пултрузионного карбона и углепластика с квазиизотропной структурой. Установлено, что на оптимальных режимах воздействия, не вызывающих нагрев объекта обработки выше 39...40 °С, обеспечиваются следующие положительные эффекты. Напряжения изгиба возрастают на 11...16 %, напряжения среза – на 13...21 %. При испытаниях на межслоевой сдвиг обработанные образцы выдерживают напряжения более чем на 14...15 %. При этом обработка в СВЧ электромагнитном поле практически не влияет на напряжения при растяжении. Увеличение не превышает 2 %, что находится в области погрешности измерений.

Очевидно, что механизмы указанного изменения прочностных характеристик могут проявляться через модифицирование структуры композиционного материала. Однако до настоящего времени мало внимания уделено изменению микроструктуры материалов в процессе СВЧ обработки после их окончательного отверждения, что не позволяет полностью описать механизм отмеченных выше эффектов.

Причины появления упрочняющих эффектов в окончательно сформированном композиционном материале при воздействии СВЧ электромагнитного поля могут быть выявлены на основе изучения микро- и наноструктуры образцов при помощи электронной микроскопии.

Задачей исследований явилась количественная оценка характеристик микроструктуры слоистых армированных углеродными волокнами композиционных материалов путем фрактального анализа.

Методы и объекты исследований

Выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц на структуру отвержденного углепластика. Использовали образцы в виде балок сечением 7×10 мм и длиной 70 мм. Эксперименты проводили в специальной СВЧ установке, позволяющей ступенчато регулировать подводимую мощность в рабочей камере. Использовали малый, средний и высокий уровни удельной мощности, определяемой с учетом объема

образца и установленного в камере балласта. Во всех опытах время обработки составляло 2 мин. На каждом уровне удельной мощности обрабатывали по 3 образца. В процессе опыта в камере помещали один образец. Исследования структуры образцов проводили после прочностных испытаний на изгиб и межплоскостной сдвиг.

Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA // TESCAN в лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. На микрофотографиях выявляли объекты при использовании размерной шкалы 50×50, 20×20, 10×10 и 5×5 мкм. При этом для оценки выбирались объекты с практически одинаковыми размерами в двух направлениях (длина – ширина) по шкале микрофотографии. Для вычисления фрактальной размерности на изображении объектов последовательно накладывали сетку со стороной квадрата 3 и 1 мм. По известным методикам [2 – 4, 9] подсчитывали число квадратных ячеек, в которых укладывалась линия контура рассматриваемого объекта, и определяли фрактальную размерность по выражению:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \left(\frac{N(\delta)}{N(\delta')} \right)}{\log \left(\frac{\delta}{\delta'} \right)}, \quad (1)$$

где $N(\delta)$ и $N(\delta')$ – количество клеток максимального и минимального размера, в которое укладывается линия, описывающая контур фрактала; δ и δ' – сторона максимального и минимального квадрата (расстояние между параллельными сторонами квадрата). Приняли на увеличенном изображении объекта $\delta' \approx 1$ мм, $\delta = 3$ мм.

Изменение фрактальной размерности элементов структуры после СВЧ обработки подсчитывали по формуле

$$\Delta D = \frac{D_{\text{обр}}}{D_{\text{контр}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{контр}}$ и $D_{\text{обр}}$ – фрактальная размерность элемента структуры контрольного и обработанного образцов соответственно, мм.

Рассматривали объекты в поле зрения 50 мкм (размеры 13,0×7,0 – 12,0×6,0 мкм), 20 мкм (размеры 4,0×3,0 – 5,0×3,0 мкм) и 10 мкм (размеры 1,7×1,7 – 2,0×1,7 мкм). При этом приняли, что количество клеток, в которое оказался вписан контур рассматриваемого

объекта, определяет количество фрагментов данного контура, а размер стороны квадрата – размер самого фрагмента. В этом случае, становится возможным, сравнив размер стороны квадрата на изображении объекта с его размерами, определить размер фрагмента.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 а, б, в, г приведены выделенные на микрофотографиях контрольного образца характерные объекты с нанесенной сеткой на предыдущей и последующей итерации, на рис. 1, д, е, ж, з выделенные на микрофотографиях обработанного образца.

В табл. 1 представлены рассчитанные значения фрактальной размерности для объектов микроструктуры контрольного и обработанного образцов.

В процессе анализа контура выделенных объектов установлено, что значимые (более 10 %) изменения проявляются при максимальном увеличении (поле зрения менее 75 мкм). С учетом установленной шкалы размерной сетки в 20 и 5 мкм это означает, что на границе контура объекта возможно достоверное выделение структур с размерами менее 0,1 мкм, т.е. относящихся к нанодиапазону параметров.

Повышение степени увеличения изображения контрольного образца позволяет выявить рост фрактальной размерности не более чем на 1,5 %. У обработанного образца рост фрактальной размерности при большем увеличении составляет порядка 14,2 %. С учетом данных расчета это означает, что именно наноразмерные структуры вносят вклад в рост фрактальной размерности объектов, а, следовательно, и в увеличение точек их когезионного взаимодействия, что объясняет повышение прочностных характеристик материала. Также это означает, что воздействие СВЧ электромагнитного поля на отвержденный материал окончательно сформированного образца вызывает измельчение контурных образований элементов микроструктуры. Механизм указанного измельчения может являться предметом дальнейших исследований.

Фрактальная размерность элементов структуры образца, помещенного в СВЧ электромагнитное поле, значимо больше, чем у контрольного (рис. 2). Эффект по увеличению фрактальной размерности элементов структуры обработанного образца возрастает для более мелких образцов, выявляемых при большем увеличении (рис. 3), и достигает практически 22 %.

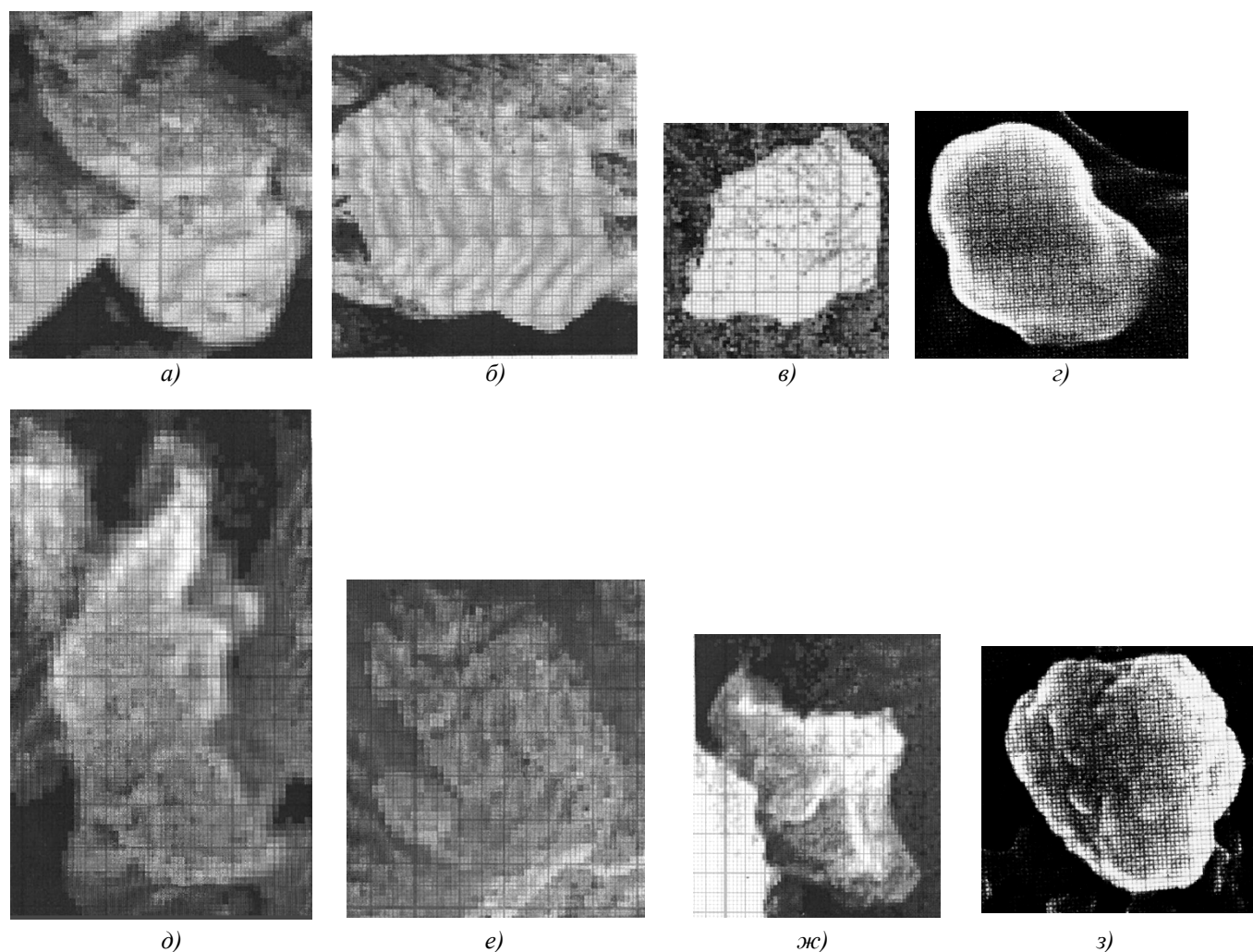


Рис. 1. Выделенные в микроструктуре контрольного (а, б, в, г) и обработанного (д, е, ж, з) образцов объекты с нанесенной на контур сеткой. Поле зрения 239,9 мкм (а); 74,79 мкм (б); 33,07 мкм (в, ж); 165,3 мкм (д); 16,53 мкм (е, з). Сторона квадрата на изображении равна 1 мм

1. Фрактальная размерность D контура объектов микроструктуры

Поле зрения, мкм	239,9 ... 165,3	74,79 ... 66,13	33,07	16,53
Контрольный образец, $D_{\text{контр}}$	1,114	1,195	1,196	1,099
Размеры, мкм	13,0×7,0	4,0×3,0	1,7×1,7	3,0×3,0
Обработанный образец, D	1,194	1,364	1,346	1,257
Размеры, мкм	12,0×6,0	5,0×3,0	2,0×1,7	3,0×2,5
$\Delta = D / D_{\text{контр}}, \%$	+7,2	+14,1	+12,5	+14,4

Это подтверждает предложенное нами ранее объяснение эффекта упрочняющего воздействия СВЧ электромагнитного поля на окончательно сформированные изделия из композиционных материалов возрастанием точек контакта (сшивок) элементов матрицы и армирующих волокон. Также можно заметить, что значения роста фрактальной размерности (7,5...22 %) хорошо коррелируют с полученными ранее значениями увеличения допус-

каемых напряжений в материале при различных видах испытаний (11...21 %), что свидетельствует о приемлемой достоверности предложенного авторами механизма упрочняющего влияния СВЧ электромагнитного поля.

Таким образом, сопоставление размеров элементов контура объектов и изменений его фрактальной размерности свидетельствует о преимущественном влиянии СВЧ электромагнитного поля в нанодиапазоне параметров

структуры. Это влияние проявляется в существенном увеличении фрактальной размерности. То есть можно говорить о формировании более развитой и протяженной границы взаимодействия элементов структуры «матрица–армирующее волокно», что обеспечивает возрастание количества молекулярных физико-химических сшивок и, как следствие, увеличение прочностных характеристик материала.

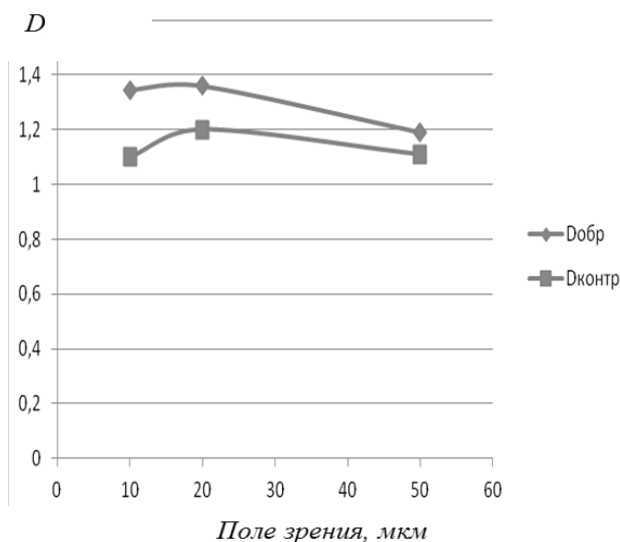


Рис. 2. Фрактальная размерность объектов, выявленных при разном поле зрения

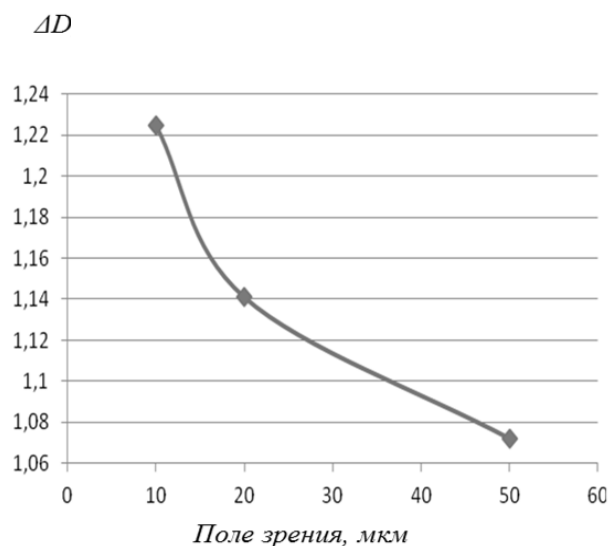


Рис. 3. Изменение фрактальной размерности объектов в структуре обработанного образца по сравнению с контрольным, выявленных при разном поле зрения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архангельский, Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Научная

книга, 2011. – 560 с.

2. Божокин, С.В., Паршин, Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

3. Иванов, С.А. Стохастические фракталы в информатике // Научно-техническая информация. – Сер. 2. – Вып. 8. – 2002. – С. 7–18.

4. Иудин, Д.И., Гелашвили, Д.Б., Розенберг, Г.С. Мультифрактальный анализ видовой структуры биотических сообществ // Докл. Акад. Наук. – Т. 389. – № 2. – 2003. – С. 279–282.

5. Каблов, Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). – С. 3–33.

6. Каблов, Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – №6. – С. 520–530.

7. Коломейцев, В.А. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т.18. – № 12. – С. 25–31.

8. Композитный мир / спецвыпуск. Авиация и космос. – М.: Издательский дом «Мир композитов», 2011. – 36 с.

9. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

10. Estel, L. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. – 2004. – № 11. – P. 33.

11. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K. // AIP Publishing, 020236-1 - 020236-4.

12. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. 2016. – V. 870, – P.p. 101-106.

13. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // Научные технологии. – 2016. – Т. 17. – № 2. – С. 25-30.

14. Кошкин, Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.

15. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, дата последнего обращения сентябрь 2017 г.

REFERENCES

1. Arkhangelsky, Yu.S. Reference book on SHF – electrothermics / Yu.S. Arkhangelsky. – Saratov: *Scientific Book*, 2011. – pp. 560.
2. Bozhokin, S.V., Parshin, D.A. Fraktal and multi-fractals. – Izhevsk: SRC “Regular and Random Dynamics”, 2001. – pp. 128.
3. Ivanov, S.A. Stochastic Fractals in Informatics // *Scientific-Technical Information*. – Series 2. – Issue 8. – 2002. – pp. 7-18.
4. Iudin, D.I., Gelashvili, D.B., Rozenberg, G.S. Multi-fractal analysis of visual structure of biotic communities // Reports of the Academy of Sciences. - Vol. 389. – No.2. – 2003. – pp. 279-282.
5. Kablov, E.N., Innovation elaborations of FSUC “VIAM” SSC of the RF on realization of “Strategic Development Directions of Materials and Technologies of Their Processing up to 2030” // Aircraft Materials and Technologies. – 2015. – No.1 (34). – pp. 3-33.
6. Kablov, E.N., Materials and Chemical Technologies for Aircraft Engineering // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 82. – No.6. – pp. 520-530.
7. Kolomeitsev, V.A. Experimental investigations of inequality in heating dielectric materials and power absorption in SHF devices of cavity type / V.A. Kolomeitsev, Yu.A. Kuzmin, D.N. Nikuiko, A.E. Semyonov // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. – 2013. – Vol.18. – No. 12 – pp. 25-31.
8. Composite World / special issue. *Aircraft and Space*. – M.: “Composite World” Publishing House, 2011. – pp. 36.
9. Mandelbrot, B. *Fractal Geometry of Nature*. – M.: Institute of Computer Investigations, 2002. – pp. 656.
10. Estel, L. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. - 2004. - № 11. - P. 33.
11. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K. // AIP Publishing, 020236-1 - 020236-4.
12. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. 2016. - V. 870, - P.p. 101-106.
13. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // *Science Intensive Technologies*. – 2016. – Vol. 17. – No.2. – pp. 25-30.
14. Koshkin, R.P. Basic Directions of Development and Updating of Unmanned Aircraft Systems: <http://spmagazine.ru/420>, of last address date 28.01.2017.
15. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, last date address, September, 2017.

Рецензент д.т.н. В.В. Мартынов

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО журнала

«Научно-технические технологии в машиностроении»
объявляет подписку на 2018 год

Подписные индексы
по каталогам:

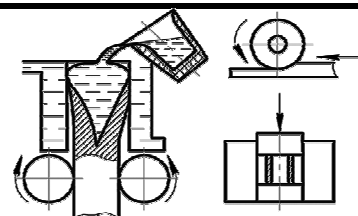
«Роспечать» – 79195,
«Пресса России» – 3953.

Журнал выходит с 2011 г.

Почтовый адрес издательства:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7,

Редакция издания приглашает авторов публикаций к совместной работе.



УДК 621.983; 539.374

DOI: 10.12737/article_5a5a44e7af0b11.86223240

В.Н. Чудин, д.т.н.

(Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, ул. Часовая, 22/2)

E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru

Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах

Предложены технологическая схема и расчет процесса выдавливания ступеней на корпусах. Горячий материал заготовки принят вязкопластичным в процессе обработки. Использована экстремальная теорема пластичности применительно к разрывному полю скоростей перемещений. Приведены расчетные результаты.

Ключевые слова: вязкопластичность; мощность; давление; повреждаемость; критические режимы.

V.N. Chudin, D. Eng.

(Russian University of Transport (MIEC), 2/22, Chasovaya, Moscow)

Hot extrusion of inner stages in housings

A technological scheme and computation for the process of stage extrusion in housings of high-strength aluminum alloys are offered. Blank material is assumed to be viscoplastic during hot working, that is, deformation strengthening is followed by softening in view of viscous deformations growth (short-term creep). An extreme theorem of plasticity is used, in accordance with which the deformation kinematics defines the upper boundary assessment of pressure. The flow kinematics is defined with the aid of a discontinuous field of traverse speeds. At the same time a power in the deformation areas and on the surfaces of a speed gap is computed. The pressure of the operation is defined through a power equation of equilibrium in powers and depends upon strengthening and a rate of deformation. The assessment of damageability of blank material is given according to equations of the energetic and kinetic theories of strength at viscoplasticity. The calculated data and a product sample are shown.

Keywords: viscoplasticity; power; pressure; damageability; critical modes.

Ряд изделий специальной техники имеют в своей конструкции конические пустотелые корпуса с внутренними ступенями (полками) для монтажа входящих элементов изделия. Материалы корпусов – высокопрочные легкие сплавы. Обработка давлением заготовок для корпусов более эффективна, чем обработка резанием. Деформирование производится на гидропрессовом оборудовании с нагревом зоны деформаций. Схема процесса формообразования ступени на внутренней поверхности корпуса показана на рис. 1, а.

Горячий деформируемый материал заготовки находится в состоянии вязкопластичности. При этом развиваются упрочняющие пластические деформации и разупрочняющие деформации ползучести [1, 2] и состояние материала определяется уравнением:

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m \dot{\varepsilon}_i^n, \quad (1)$$

где σ_i , ε_i , $\dot{\varepsilon}_i$ – соответственно интенсивности напряжений, деформаций и скоростей деформаций; A , m , n – константы материала заготовки.

Для расчета используем экстремальную верхнеграницную теорему пластичности [3] в соответствии с которой справедливо энергетическое неравенство:

$$q v_0 s \leq N_1 + N_p + N_{тр}. \quad (2)$$

Здесь в левой части – мощность внешних сил, в правой – мощности внутренних сил, в том числе N_1 – мощность в блоке деформаций; N_p – мощность на поверхности разрыва скорости; $N_{тр}$ – мощность трения; q – давление опе-

рации; S – площадь приложения внешних сил;
 v_0 – скорость нажимного пуансона.

Входящие в неравенство (2) мощности определяются по кинематике деформирования. Установим кинематику по разрывному полю скоростей перемещений при плоской деформации применительно к осесимметричной заготовке. Поле и план скоростей приведены на рис. 1, *а, б*.

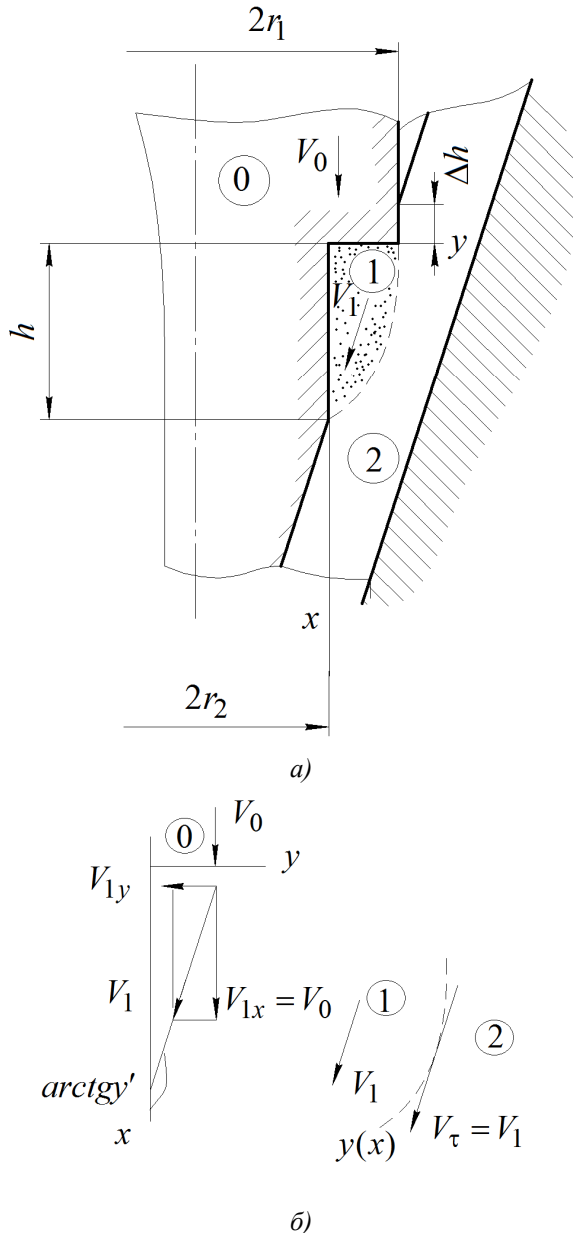


Рис. 1. Расчетно-технологическая схема процесса, поле (а) и план скоростей (б)

Поле состоит из блока деформации «1», ограниченного поверхностями разрыва скоростей с образующими линиями «01», «12». Нажимной пуансон и коническая часть заготовки обозначены как блоки «0» и «2». Деформации происходят в объеме блока деформаций и на поверхностях разрыва скорости. Линия «01» является контактной границей трения. Линия

разрыва «12» – кривая $y(x)$, уравнение которой определяется в ходе решения задачи.

Названные линии являются образующими соответствующих поверхностей. В соответствии с планом скоростей запишем выражения для скорости и ее составляющих по осям координат в блоке деформаций:

$$v_1 = v_0 \cos(\pi - \arctan y') = v_0 [1 + (y')^2]^{1/2}, \quad (3)$$

$$V_{1x} = V_0; \quad V_{1y} = V_0 y',$$

где y' – первая производная уравнения $y(x)$ по x .

Компоненты скорости деформаций, их интенсивности и интенсивность деформаций в этом блоке вычисляются по формулам

$$\xi_x = \frac{\partial v_{1x}}{\partial x} = \xi_y = \frac{\partial v_{1y}}{\partial y} = 0;$$

$$\xi_{xy} = \frac{\partial v_{1y}}{\partial x} = v_0 y''; \quad (4)$$

$$\xi_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \xi_{xy} = \frac{v_0}{\sqrt{3}} y''; \quad \varepsilon_i = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}} y'',$$

где y'' – вторая производная уравнения $y(x)$;
 Δh – ход нажимного пуансона.

Интенсивность напряжений определяется по уравнению (1) при подстановке соотношений (4), т.е.

$$\sigma_i = A(\Delta h)^m v_0^n \left(\frac{y''}{\sqrt{3}} \right)^{m+n}. \quad (5)$$

Мощность в блоке деформаций объемом W представим, учитывая выражения (4), (5), соотношением

$$N_1 = \int \sigma_i \xi_i dW = \frac{2\pi A(\Delta h)^m}{(\sqrt{3})^{1+m+n}} y_{\text{u.t.}} \cdot S_1 \times \\ \times \mathbf{v}_0^{1+n} \int_0^h (y'')^{1+m+n} dx \quad (6)$$

где $y_{\text{ц.т.}} \approx \frac{3}{8}(r_1 - r_2) + r_2$ – расстояние от центра тяжести блока в продольном сечении до оси симметрии заготовки; $S_1 = \frac{2}{3}(r_1 - r_2)h$ – площадь сечения блока.

На криволинейной поверхности разрыва скорости имеем:

— касательная скорость

$$v_{\tau} = v_1 = v_0 [1 + (y')^2]^{1/2}; \quad (7)$$

– интенсивности скоростей деформаций, деформаций и напряжений соответственно:

$$\xi_i = \frac{dv_\tau}{\sqrt{3}dl} = \frac{dv_\tau}{\sqrt{1+(y')^2}dx} = \frac{v_0 y' y''}{\sqrt{3}[1+(y')^2]},$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_i, \quad (8)$$

$$\sigma_i = A(\Delta h)^m v_0^m \left[\frac{y' y''}{\sqrt{3}[1+(y')^2]} \right]^{m+n}. \quad (9)$$

Выражения (7) – (9) позволяют записать мощность на этой поверхности площадью S_p в виде

$$N_p = \frac{1}{\sqrt{3}} \int \sigma_i v_\tau dS_p = \frac{2\pi A(r_1 + r_2)}{(\sqrt{3})^{1+m+n}} \times$$

$$\times (\Delta h)^m v_0^{1+n} \int_0^h (y' y'')^{m+n} [1+(y')^2]^{1-m-n} dx. \quad (10)$$

На контактной поверхности трения площадью S_k под торцом пуансона касательное напряжение примем в виде:

$$\tau_{tp} = \mu q, \quad (11)$$

при скорости перемещения материала

$$v_{tp} = v_{ly} = v_0 y'_{x=0}, \quad (12)$$

μ – коэффициент предельного трения.

Мощность трения при учете выражений (11) и (12) определяется как

$$N_{TP} = \int \tau_{TP} v_{TP} dS_k = \pi \mu q (r_1^2 - r_2^2) v_0 y'_{x=0}. \quad (13)$$

Давление операции получим подстановкой выражений (6), (10), (13) в неравенство (2)

$$q \leq \frac{A(\Delta h)^m v_0^{1+n}}{(r_1 - r_2)(1 - \mu \cdot y'_{x=0})} \int_0^h F(y', y'') dx. \quad (14)$$

Здесь

$$F = \left(\frac{y''}{\sqrt{3}} \right)^{1+m+n} \left\{ \frac{2y_{\text{ит.}} S_1}{r_1 + r_2} + \frac{(y')^{m+n}}{y''} [1+(y')^2]^{1-m-n} \right\}.$$

Давление (14) может быть рассчитано при нахождении минимизирующей функции $y(x)$ – уравнения образующей поверхности разрыва скорости линия «12». Искомое уравнение

определяется вариационным методом в соответствии с уравнением Эйлера [3]

$$\frac{\partial F}{\partial y'} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y''} = C \quad (15)$$

с граничными условиями $y(0) = r_1 - r_2$, $y(h) = 0$.

Первому условию удовлетворяет функция

$$y = c_1 x + c_2 x^2 + r_1 - r_2. \quad (16)$$

По второму условию отсюда следует, что

$$c_2 = \frac{1}{h} \left(\frac{r_2 - r_1}{h} - c_1 \right).$$

Искомое уравнение (16) и его производные получают вид

$$y = c_1 x + \frac{1}{h} \left(\frac{r_2 - r_1}{h} - c_1 \right) x^2 + r_1 - r_2; \quad (17)$$

$$y' = c_1 + \frac{2}{h} \left(\frac{r_2 - r_1}{h} - c_1 \right) x; \quad y'' = \frac{2}{h} \left(\frac{r_2 - r_1}{h} - c_1 \right).$$

Запишем уравнение (17) и его производные в промежуточных точках (точках коллокации) $x = h/4$, $x = 3h/4$ и внесём в уравнение (15), выполнив указанные в нем действия. Получим алгебраическое уравнение относительно c_1 , c_2 , что позволяет установить искомое уравнение линии разрыва скорости и рассчитать давление (14). Порядок расчета приведен так же в работах [1, 3].

Критический рабочий ход нажимного пуансона, определяющий максимально возможную деформацию, установим на основе уравнений кинетики повреждаемости материала заготовки в процессе деформирования [1, 2].

Используя выражения (4) и (5), имеем

– по энергетическому уравнению

$$\Delta h_{\text{кр}} = \left[\frac{A_{\text{пр}}(1+m)}{A v_0^n} \left(\frac{\sqrt{3}}{y''} \right)^{1+m+n} \right]^{\frac{1}{1+m}}; \quad (18)$$

– по деформационному уравнению

$$\Delta h_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{3}}{y''} \varepsilon_{\text{инп}}, \quad (19)$$

где $A_{\text{пр}}$, $\varepsilon_{\text{инп}}$ – предельные удельная работа и интенсивность деформаций к моменту разрушения материала.

Соотношение (18) относится к материалам, критическая деформация которых, зависит от скорости операции; соотношение (19) – к ма-

материалам, критическая деформация которых от скорости не зависит.

Расчеты выполнены применительно к заготовке из алюминиевого сплава АМг6 при 450 °С. Константы уравнений для материала приняты по данным работы [2]. Размеры заготовки: $r_1 = 200$; $r_2 = 185$ мм; $h = 50$ мм. Графики давления при различной длительности деформирования и конечная повреждаемость материала приведены на рис. 2.

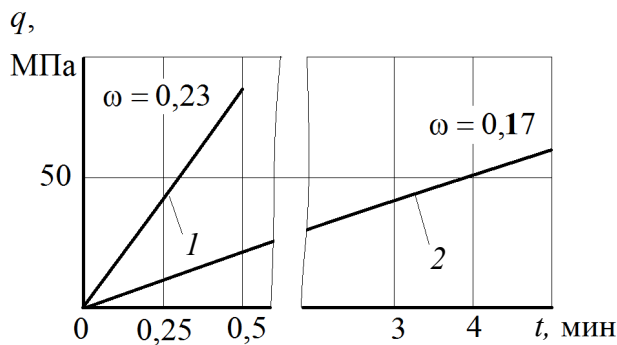


Рис. 2. Графики «давление–время»: 1 – при $t_k = 0,5$ мин; 2 – при $t_k = 5$ мин

Из графиков следует, что давление операции может быть снижено при увеличении времени (длительности) процесса деформирования. Повреждаемость материала заготовки нарастает при его обработке давлением, причем в меньшей степени при увеличении длительности деформирования, т.е. при уменьшении скорости движения нажимного пуансона.

Образец корпуса представлен на рис. 3.

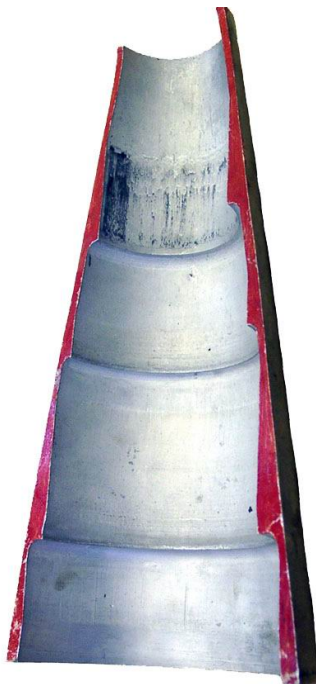


Рис. 3. Образец корпуса

Выводы

Горячее формообразование ступеней на внутренней поверхности корпуса в заданном скоростном режиме происходит при вязкопластическом деформировании материала заготовки.

Давление операции и повреждаемость материала уменьшаются при увеличении времени деформирования для рассмотренного сплава при заданной температуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, С.П., Чудин, В.Н., Яковлев, С.С., Соболев, Я.А. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427с.
2. Романов, К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М: Машиностроение. 1993. 240 с.
3. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1980. 456 с.

REFERENCES

1. Yakovlev, S.P., Chudin, V.N., Yakovlev, S.S., Sobolev, Ya.A. *Isothermal Deformation of High-Strength Anisotropic Materials*. M.: Mechanical Engineering, 2003. pp. 427.
2. Romanov, K.I. *Mechanics of Hot Metal Forming*. M.: Mechanical Engineering. 1993. pp. 240.
3. Gun, G.Ya. *Theoretical Fundamentals of Metal Forming*. M.: Metallurgy, 1980. pp. 456

Рецензент д.т.н. В.А. Демин

УДК 621.791.927.5

DOI: 10.12737/article_5a5a44e7e76648.65231570

В.А. Лебедев, д.т.н.,
Г.В. Жук, директор ГП ОКБ,
С.В. Новиков, ведущий инженер
(ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев)
E-mail: valpaton@ukr.net

Научно обоснованное совершенствование элементов дуговой механизированной сварки и наплавки

Рассмотрены вопросы, связанные с определением времён цикла формирования капли электродного металла при дуговой механизированной сварке и наплавке. Рассмотрены основные стадии переноса расплавленной капли с математическим описанием времён каждой из стадий с учётом характеристик дугового процесса. Приведен пример определения времён цикла, а также пример наплавки, выполненной при импульсной подаче с параметрами в соответствии с предложенным математическим описанием.

Ключевые слова: дуговая сварка; перенос электродного металла; времена цикла переноса; определение параметров; управление.

V.A. Lebedev, D. Eng.,
G.V. Zhuk, Director of SD DO,
S.V. Novikov, Principle Engineer
(Paton IEW of NAS of the Ukraine, Kiev)

Scientifically substantiated updating of arc mechanical welding and surfacing

In the paper there is considered a process of electrode metal drops transfer at arc welding-surfacing with the emphasis of characteristic stages of their formation and motion in a molten bath for the realization of a welding method with the dosed electrode wire feeding. The analytical expressions are obtained defining terms of the existence of drop formation stages according to which it is possible to assess a level of inverse connections on arc process parameters introduced into a regulator of an electrical drive of the mechanism of electrode wire feeding. There are shown examples of carrying out a welding method with the dosed feeding the parameters of which are designed according to the procedure mentioned.

Keywords: arc welding; electrode metal transfer; terms of transfer cycle; parameter definition; management.

В силу современной мировой тенденции снижения затрат, обуславливающих экономию ресурсов и энергии, актуальной задачей машиностроения является создание новых или доработка старых технологий в соответствии с новыми требованиями ресурсосбережения. В частности в технологиях дуговой сварки и наплавки механизированными способами по-прежнему являются актуальными задачи улучшения формирования сварного соединения или наплавленного валика наряду со снижением потерь электродного металла, затрат на последующую обработку шва или валика, облегчение формирования сварных соединений в положениях отличных от нижнего и др.

В ГП ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработано несколько новых, до настоящего времени неизвестных в технике сварочного оборудования и технологии, вариан-

тов систем управления переносом электродного металла с использованием импульсных алгоритмов воздействия на систему подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. Основные из них [1]:

1) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по току сварки;

2) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по току сварки и дополнительно низкочастотную модуляцию скорости подачи;

3) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по напряжению сварки.

Эти способы подачи и равно управляемая импульсная подача в отсутствие методик ана-

литического расчёта и выбора параметров движения электродной проволоки для эффективного воздействия на перенос электродного металла требуют большого числа опытных сварок – наплавов для выбора лучшего варианта и получения планируемого результата. Для значительного сокращения этой процедуры необходима аналитическая оценка характеристик сварочного процесса для выбора параметров импульсной или дозированной подачи.

Целью настоящей работы является выделение и аналитическое определение характерных времён как одного из основных параметров цикла переноса электродного металла в зависимости от условий и характеристик сварочного процесса для оценки и выбора вида и опций регулирования и управляемой импульсной и дозированной подачи электродной проволоки.

Геометрические соотношения в положении электродной капли при её переносе представлены на рис. 1.

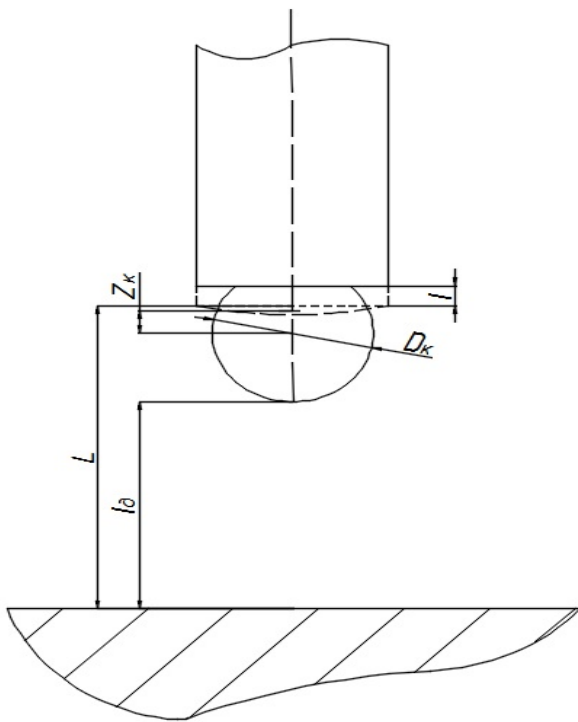


Рис. 1. Положение капли электродного металла в начальной стадии формирования

Управление переносом металла осуществляется в три стадии, продолжительность которых может быть определена аналитически.

1. На этой стадии горения дуги происходит формирование капли, что характеризуется неравенством скоростей плавления и подачи

электродной проволоки $v_{пл} > v_{пз}$. При этом длина междугового промежутка максимальна. Время этой стадии t_{11} определяется соотношением [2]:

$$t_{11} = T \ln \frac{v_{max} - v_{пл}}{v_{пз} - v_{пл}}, \quad (1)$$

где T – эквивалентная постоянная времени сварочной цепи, с; v_{max} – максимальная скорость плавления, м/с.

Рост капли характеризуется соотношением $v_{пл} \approx v_{пз}$, а длина междугового промежутка практически не меняется [3]. Продолжительность t_{12} этой стадии можно определить, принимая в выражении для длины дуги l , м, при сварке в CO_2 с короткими замыканиями [2]:

$$l = T(v_{max} - v_{пл}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - t(v_{пз} - v_{пл}). \quad (2)$$

При равенстве скоростей подачи и плавления электродной проволоки $v_{пл} \approx v_{пз}$, дифференцируя выражение (2) и приравнявая его к производной от диаметра капли D_k , можно получить следующую формулу:

$$\frac{dD_k}{dt} = (v_{max} - v_{пл}) e^{-\frac{t}{T}}. \quad (3)$$

Так как процесс роста капли обусловлен плавлением участка сварочной проволоки длиной L , то, пренебрегая потерями на испарение, можно записать выражение:

$$\rho_{pm} \frac{\pi D_k^3}{6} = \rho \frac{\pi d_0^2}{4} L, \quad (4)$$

где ρ_{pm} – плотность расплавленного металла, кг/м³; ρ – плотность металла проволоки; d_0 – диаметр электродной проволоки, м. Откуда:

$$\frac{dD_k}{dt} = \frac{\rho d_0^2}{2 D_k^2 \rho_{pm}} \frac{dL}{dt} = \frac{\rho d_0^2}{2 D_k^2 \rho_{pm}} v_{пл}. \quad (5)$$

Приравнявая выражения (3) и (5), можно определить продолжительность роста капли t_{12} :

$$t_{12} = T \ln \frac{2 \rho_{pm} D_k^2 (v_{max} - v_{пл})}{\rho d_0^2 v_{пл}}. \quad (6)$$

Существует гипотеза, подтверждённая экспериментально, согласно которой снижения степени разбрызгивания и улучшения формирования шва, даже при сварке в вертикальном или потолочном положении, можно добиться при отключении скорости подачи электродной проволоки в период t_{12} . Тогда рост капли будет описываться уравнением:

$$\frac{dD_k}{dt} = (v_{max} - v_{пл}) e^{-\frac{t}{T}} + v_{пл}. \quad (7)$$

Откуда:

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2) v_{\text{пл}}} \quad (6.1)$$

2. Подача проволоки должна включаться в период t_2 образования «шейки» между каплей и торцом электрода, продолжительность которого можно определить по выражению:

$$t_2 = T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2) v_{\text{пл}}} \quad (8)$$

где первое слагаемое является временем горения дуги до короткого замыкания [1].

3. В течение стадии t_3 протекает короткое замыкание междуготового промежутка до момента взрыва, а скорость подачи электродной

проволоки равна 0. t_3 можно определить по выражению [4]:

$$t_3 = \frac{\pi Q \rho_{\text{рм}} d_{\text{э}}}{2\theta I_{\text{кз}} j} \quad (9)$$

где Q – атомная теплота испарения металла, Дж/кг; θ – удельное сопротивление жидкого металла, Ом·м; $I_{\text{кз}}$ – сила тока короткого замыкания, А; j – плотность тока текущего через перемычку, А/м².

ПРИМЕР

$d_{\text{э}} = 2,0$ мм; $\rho = 7,87$ г/см³; $\rho_{\text{рм}} = 7,02$ г/см³; $v_{\text{max}} = 10,5$ м/мин; $v_{\text{пл}} = 0,45$ м/мин; $v_{\text{пэ}} = 2,2$ м/мин (для $I_{\text{д}} = 250$ А); $T = 0,01$ с; $D_{\kappa} = 1,0$ мм.

$$t_{11} = T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} \approx 17,5 \text{ мс};$$

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{\rho d_{\text{э}}^2 v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{7,87 \cdot 4 \cdot 0,45} \approx 22 \text{ мс (при } v_{\text{э}} \approx v_{\text{пл}});$$

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2) v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{(7,87 \cdot 4 - 2 \cdot 7,02 \cdot 1) \cdot 0,45} \approx 29 \text{ мс (при } v_{\text{пэ}} = 0)$$

(при $v_{\text{пэ}} \approx v_{\text{пл}}$);

$$\begin{aligned} t_2 &= T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{\rho d_{\text{э}}^2 v_{\text{пл}}} = \\ &= 0,01 \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{7,87 \cdot 4 \cdot 0,45} = \\ &= 57 - 17,5 - 22 \approx 17,5 \text{ мс} \end{aligned}$$

(при $v_{\text{пэ}} = 0$);

$$\begin{aligned} t_2 &= T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\kappa}^2) v_{\text{пл}}} = \\ &= 0,01 \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{(7,87 \cdot 4 - 2 \cdot 7,02 \cdot 1) \cdot 0,45} = 57 - 17,5 - 29 \approx 10,5 \text{ мс} \end{aligned}$$

Практическое использование полученных результатов апробировано в процессе наплавки порошковой электродной проволокой диаметром 1,6 мм с обратной связью по току дуги при установлении параметров импульсного движения этой проволоки: скорость в импульсе, моменты при которых включается подача

и когда она прекращается.

Процесс реализовывался безредукторным подающим механизмом подачи на основе компьютеризованного вентильного электропривода [5] при введении обратных связей по току дугового процесса. Результаты такой наплавки горизонтального шва на токах

200...220 А на вертикальной плоскости в сравнительных испытаниях представлены в

виде осциллограмм тока и напряжения на рис. 2, а результаты сравнительной наплавки на рис. 3.

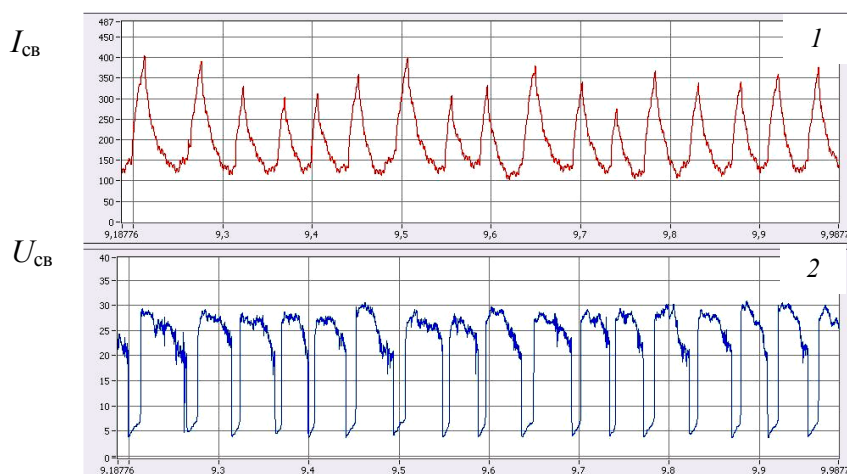


Рис. 2. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) при наплавке с дозированной подачей электродной проволоки

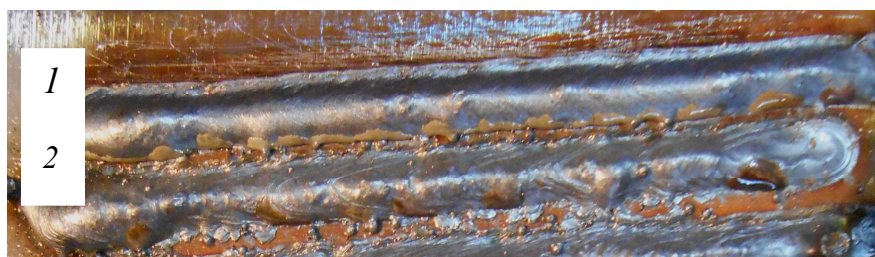


Рис. 3. Наплавленные валики с подачи электродной проволоки:
1 – дозированная; 2 – обычная

Анализ полученных результатов показывает достаточно близкую сходимость (отличия в 12...17 %) полученных результатов (оценка частот коротких замыканий) с расчётными значениями, что свидетельствует об адекватности использованного метода математического описания стадий переноса электродного металла. Кроме этого, частичное подтверждение полученных результатов описано в работе [6].

ВЫВОДЫ

1. Аналитическое определение характеристик импульсного движения электродной проволоки для нового способа сварки-наплавки с дозированной её подачей может быть основано на рассмотрении отдельных этапов формирования и переноса электродного металла с математическим определением времён существования этих этапов, выполненных на основе известных представлений о кинетике и динамике образования капли и их движения в дуговом процессе.

2. Учёт всех основных факторов, влияющих на длительность той или иной стадии формирования и переноса капель, позволяет с достаточной степенью точности установить величины обратных связей, параметры которых вводятся в регулятор электропривода механизма подачи электродной проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев, В.А., Жук, Г.В. Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке // Тяжёлое машиностроение. – №6. – 2017. – С. 27–32.
2. Ленивкин, В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: ООО "БПМ-ПР", 2011. 369 с.
3. Потальевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах / А.Г.Потальевский. Издание 2-е, недоработанное. – К.: Экотехнолоя, 2007. – 192 с.
4. Гулаков, С.В., Бурлака, В.В., Харланов, О.В. Исследование причин разбрызгивания металла при сварке в

среде CO₂. / ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 1 (32), 2014. С. 188 - 192

5. Лебедев, В.А., Гулый, МВ. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2014. – №6. – С.47–51.

6. Лебедев, В.А., Лендел, И.В. Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2015. №9(51). С.20-27

REFERENCES

1. Lebedev, V.A., Zhuk, G.V. Electrode metal transfer control based on pulse algorithms of system functioning with dosed electrode wire supply at mechanical arc welding // *Heavy Engineering*. – No.6. – 2017. – pp. 27-32.

2. Lenivkin, V.A., Dyurgerov, N.G., Sagirov, H.N. *Tech-*

nological Properties of Welding Arc in Protective Gases. М.: PC “BPM-PM”, 2011, pp. 369.

3. Potapievsky, A.G. *Welding with Consumable Electrodes in Protective Gases. Part 1. Welding in Active Gases* / A.G. Potapievsky. 2-d Edition unfinished. – K.: Ecotechnology, 2007. – pp. 192.

4. Gulakov, S.P., Burlaka, V.V., Kharlanov, O.V. Analysis of metal spatter reasons at welding in CO₂. / *Bulletin of Donbass State Machine Engineering Academy*. No.1 (32), 2014. pp. 188-192.

5. Lebedev, V.A., Guly, M.V. Fast-acting valve electrodrive for equipment of mechanical arc welding // *Mechatronics. Automation. Management*. – 2014. – No.6. – pp. 47-51.

6. Lebedev, V.A., Lendel, I.V. Analysis of technological capabilities of arc welding and surfacing with pulse supply of electrode wire // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. No.9(51). pp. 20-27.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников

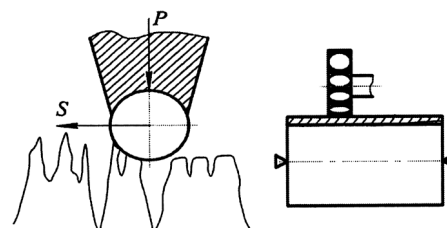
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Наукоёмкие 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 621.7.016.623

DOI: 10.12737/article_5a5a44e88cdc22.07121039

А.Г. Суслов, д.т.н.

(Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ),
115409, Москва, Каширское шоссе, 31)

М.Г. Шалыгин, к.т.н.

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

E-mail: mootechmash@mail.ru; migshalysin@yandex.ru

Комплексное технологическое повышение износостойкости и статической прочности деталей из стали 40Х13

На основе анализа показана возможность упрочнения стали 40Х13 комплексной обработкой на глубину 4,2 мм. Приведены результаты испытаний на сопротивление разрушению и износ. Представлены результаты исследования твердости и микрогеометрии поверхностного слоя образцов. Комплексная обработка, состоящая из термической и механической обработок, высоковакуумного отжига и диффузионного силицирования может стать перспективным направлением повышения ресурса работы стальных деталей.

Ключевые слова: комбинированная обработка; термическая обработка; механическая обработка; высоковакуумный отжиг; диффузионное силицирование; водородное изнашивание; качество поверхности.

A.G. Suslov

(National Research Nuclear University (MEPhI), 115409, Moscow, Kashirskoye highway, 31)

M.G. Shalysin

(Bryansk state technical University, 241035, Bryansk, br 50th-anniversary of October 7)

The study of the properties of steel 40X13 complex obtained by heat treatment– high vacuum annealing - diffusion saturation with silicon

On based on the analysis of the possibility of hardening of steel 40x13 comprehensive treatment to a depth of 4.2 mm. the results of tests on the resistance to fracture and wear. Presents results of a study of hardness and micro geometry of the surface layer of samples. Comprehensive treatment, consisting of thermal and mechanical treatments, high-vacuum annealing and diffusion silicon may become a promising direction to increase the service life of steel parts.

Keywords: the combined processing; heat treatment; machining; high-vacuum annealing; diffusion siliconizing; hydrogen wear; surface quality.

Введение

В настоящее время для упрочнения поверхностных слоев деталей машин широко применяют различные комбинированные и комплексные методы обработки. Одним из эффективных методов воздействия на поверхностный слой является диффузионное силицирование. Диффузионный силицированный слой на углеродистой стали образуется в ре-

зультате взаимодействия паров четыреххлористого кремния с металлом при температурах 990...1100 °С [1].

Само по себе диффузионное силицирование применяется для повышения стойкости поверхности против коррозии в газовой среде и не приводит к улучшению износостойких свойств поверхности. По этой причине, для повышения износостойкости поверхностей трения технологическими способами требует-

ся комплексная обработка. Ответственные поверхности стальных деталей подвергают различным видам обработок, с целью придания им требуемых физико-механических свойств, при работе в водородсодержащих средах. Проблема водородного изнашивания поверхностей трения остро стоит в узлах, работающих в агрессивных, водородсодержащих средах, к которым относятся углеводороды.

В работах [2, 3] предложена комплексная функционально-ориентированная обработка поверхностей трения стальных деталей, увеличивающая износостойкость ответственных узлов трения, подверженных водородному изнашиванию, включающая: термообработку, с целью уменьшения размеров зерен; высоковакуумный отжиг, с целью снижения концентрации биографического водорода в образце; ионную имплантацию кремнием, с целью уменьшения диффузии водорода из смазывающего материала или водородсодержащей среды.

В работе [4] предложено, в качестве меры уменьшения износа деталей, работающих в водородсодержащих средах, диффузионное силицирование поверхностей трения. В работе [5] отмечено, что диффузионное силицирование из высокомолекулярных кремнийорганических соединений с применением лазерной обработки обеспечило формирование на поверхности стальных деталей пресс-форм равномерных бездефектных слоев, состоящих из высших силицидов железа и α -фазы с микротвердостью до 114 МПа.

В данной работе рассматривается комбинация методов термической обработки – высоковакуумного отжига – механической обработки – диффузионного силицирования, позволяющих управлять характеристиками качества поверхностного слоя и повысить водородную износостойкость. Проводятся исследования свойств и микрогеометрии поверхностного слоя, металлографической структуры и влияние на износостойкость образцов из стали 40X13, упрочненных комбинацией данных способов.

Методика обработки

Термическая обработка образцов проводилась в печи. Образцы подвергались закалке до температуры 955°C , охлаждению в воде при температуре 230°C в течение одного часа. Высоковакуумный отжиг осуществлялся на установке, описанной в работе [6]. Перед помещением в камеру образцы промывались

бензином и четыреххлористым углеродом. После помещения образцов в камеру установки, камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха из камеры до давления $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь, и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523 К электропечь выключалась, и при достижении температуры в камере в 293 К в нее запускался воздух.

Финишная механическая обработка образцов осуществлялась на шлифовальном станке до шероховатости поверхности образцов $Ra = 0,2; 0,4; 1,6$ мкм. Диффузионное силицирование проводилось следующим образом. Камера разогревалась и в ней поддерживалась температура 230°C , с целью недопущения фазовых превращений в стали. В камеру помещался образец, полностью покрытый порошкообразным карбидом кремния. Облучение образца и нахождение его в камере составляло 30 мин, после чего камера открывалась и образец остывал на воздухе.

Результаты и обсуждение

Образцы были испытаны на износ (рис. 1). В качестве контртела выступала термически обработанная сталь 40X13, с твердостью 45...47 HRC и шероховатостью, идентичной испытываемому образцу. Нагрузка в процессе испытаний поддерживалась равной $P = 50$ Н. Износ по массе измеряли каждые 1000 м пути трения. За данный путь трения образец совершал 12,7 цикла.

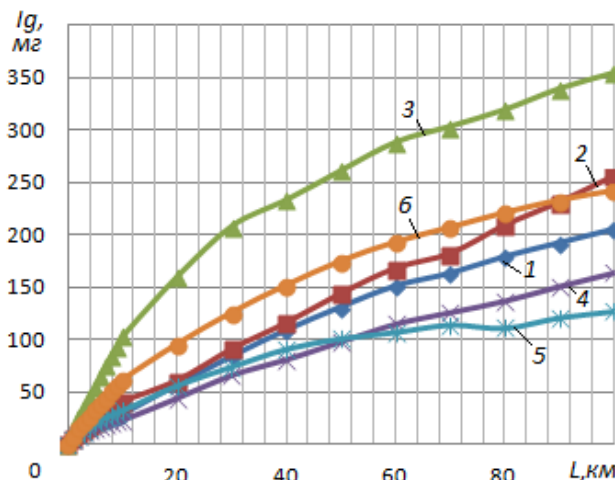


Рис. 1. Результаты испытаний на износ стали 40X13 после термической (1 – $Ra = 0,2$ мкм; 2 – $Ra = 0,4$ мкм; 3 – $Ra = 1,6$ мкм) и комплексной обработки (4 – $Ra = 0,2$ мкм; 5 – $Ra = 0,4$ мкм; 6 – $Ra = 1,6$ мкм)

Измерение шероховатости поверхности образцов после механической обработки и диффузионного силицирования показали, что уменьшение параметра шероховатости Ra незначительно, в пределах допускаемой погрешности измерения ($< 1\%$). Параметр шероховатости Sm в среднем уменьшился в 2,5 раза, что позволяет утверждать о выравнивании неровностей поверхностного слоя.

Исследование торца поверхности после травления в азотной кислоте показало (рис. 2), что на торце решетчатая структура. Расположение решетчатой структуры относительно поверхности образца $40...60^\circ$. Наибольшая глубина образования структуры не превышает 4,2 мм. Чем глубже находилась решетчатая структура, тем ее грани были тоньше и в некоторых местах наблюдается разрыв.

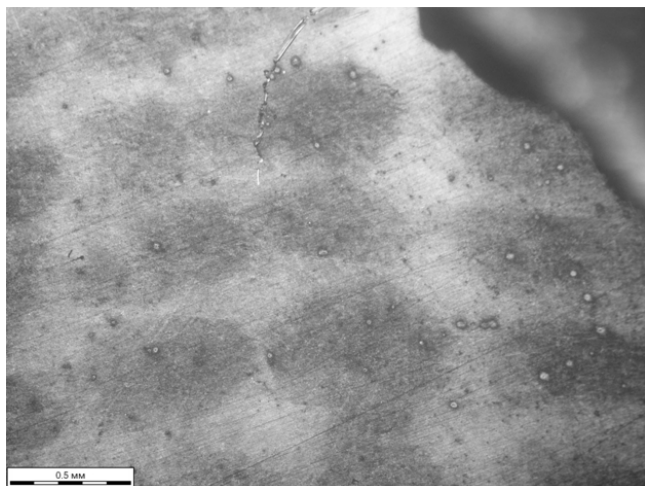


Рис. 2. Торцевая поверхность образца после травления

Твердость образцов снизилась после силицирования с 44,5 HRC после термообработки до 42 HRC. Испытания на растяжение показали, что предел текучести, по сравнению с термически обработанным образцом $\sigma_{0,2} = 770...790$ МПа, увеличился до $\sigma_{0,2} = 1300...1320$ МПа. Предел прочности увеличился с $\sigma_b = 990...1010$ МПа для термообработанных образцов до $\sigma_b = 1620...1640$ МПа для образцов после проведения комбинированной обработки.

Выводы

Выполненные исследования комплексной обработки, состоящей из термической и механической обработок, высоковакуумного отжига и диффузионного силицирования, показывают возможность формирования микрогеометрии поверхности и изменение физико-механических свойств, направленных на обес-

печение качества и износостойкости поверхностного слоя узлов трения, работающих в водородсодержащих средах.

Внедрение комплексной обработки позволяет в несколько раз уменьшить износ узлов трения машин и механизмов, работающих в условиях водородсодержащей среды и повысить статическую прочность деталей машин.

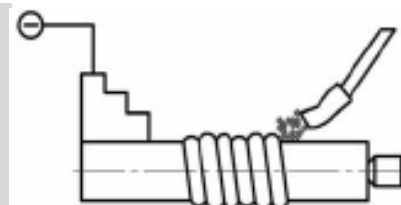
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пассивность и коррозия металлов. Государственный институт прикладной химии / Сборник под ред. проф. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1971. – 208с.
2. Суслов, А.Г., Шалыгин, М.Г. Научная технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 2(68). – С. 19–24.
3. Шалыгин, М.Г. Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 7(61). – С. 10–13.
4. Орлов, П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн.1. / под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
5. Шестопалов, В.Е., Квачев, В.П., Далисов, В.Б. и др. Повышение долговечности деталей пресс-форм силицированием из полимерсодержащих сред / В кн.: Получение и применение защитных покрытий. – Л.: Наука, 1987. – С. 194–197.
6. Шалыгин, М.Г. Научная технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 10(64). – С. 3–6.

REFERENCES

1. Passivity and corrosion of metals [Passivnost' i korrozia metallov]. State Institute of applied chemistry. Under edition A.M. Sukhotina. Leningrad: Chemistry. 1971. – 208 p.
2. Suslov A.G., Shalygin M.G. Knowledge-based technology of increasing wear resistance of friction surfaces of machine components operating in hydrogen environments, *Nauchnye tekhnologii v mashinostroyenii – Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017. no. 2. pp. 19-24.
3. Shalygin M.G. Structure formation in the surface layer of machine parts by methods of high-vacuum annealing and ion implantation, *Nauchnye tekhnologii v mashinostroyenii – Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2016. no. 7. pp. 10-13.
4. Orlov P.I. Basic construction [Osnovy konstruirovaniya]. Under edition P.N. Uchaeva. Moscow: Mashinostroyenie. 1988. 560 p.
5. Shestopalov V.E., Kvachev V.P., Dalisov V.B. and others. Increase of durability of details of molds by saturation with silicon of the polymer-containing substances. In book Generation and application of protective coatings. Leningrad: Science. 1987. pp. 194-197.
6. Shalygin M.G. Knowledge-intensive technology reduction of hydrogen wear of working surfaces of friction, *Nauchnye tekhnologii v mashinostroyenii – Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2016. no. 10. pp. 3-6.

Рецензент д.т.н. С.В. Давыдов



УДК 621.785.5-034.71

DOI: 10.12737/article_5a5a44e94006c0.56648758

**Л.Г. Петрова, д.т.н.,
В.Д. Александров, д.т.н.,
М.В. Морщилов, к.т.н.**

(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)
E-mail: mvmorshchilov@gmail.com

Формирование износостойких покрытий на алюминиевом сплаве АЛ9 гальваническими, детонационными и газофазными методами*

В рамках проведенного исследования дана сравнительная оценка покрытий на алюминиевом сплаве АЛ9 (356.0; SG 70A; 323; AC 4 C – аналоги в других классификациях), полученных различными методами поверхностного упрочнения: нанесением гальванических покрытий, образование оксидов с использованием детонационного метода и получения защитных покрытий газофазным осаждением. Даны рекомендации по применению в зависимости от условий работы изделий на износ.

Ключевые слова: гальваническое покрытие; детонационный метод; газофазные покрытия; поверхностное упрочнение; алюминиевые сплавы; износостойкость.

**L.G. Petrova, D. Eng.,
V.D. Alexandrov, D. Eng.,
M.V. Morshchilov, Can. Eng.**

(Moscow State Technical Road University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

Wear-resistant coating formation on aluminum ally Al9 through galvanic, detonation and gas-cycle methods

This paper reports the comparative assessment of coatings on aluminum alloy Al9 obtained through different methods of surface strengthening under conditions of products wear operation. It is shown that galvanic coatings allow increasing surface hardness up to 4500 Pa and they may be recommended for products with wear operation with small specific load. Surface strengthening by oxides with the use of the detonation method of plating allowing the formation of layers with higher hardness (9000 MPa) may be recommended for products with wear operation under higher specific loads. For products operating with wear under hard conditions of loading, particularly, in aggressive environment (chemical engineering) there are recommended gas-cycle coatings consisting of metal-organic compounds of chromium with hardness up to 16 000 MPa.

Keywords: electroplate; detonation method; gas-cycle coatings; surface strengthening; aluminum alloys; wear-resistance.

Введение

Повышение производительности, качества, надежности, экономичности машин и оборудования, снижение их материалоемкости достигаются, прежде всего, применением современных материалов и упрочняющих техноло-

гий, позволяющих повысить прочность, износостойкость и коррозионную стойкость деталей машин и инструмента. Большое значение для снижения удельной материалоемкости изделий имеет замена черных металлов более легкими цветными, в частности алюминием и его сплавами. Алюминий характеризуется высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, хорошей обрабатываемостью и относительно низкой стоимостью, поэтому он

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01473).

находит все более широкое применение в промышленности.

Однако расширению сферы практического использования алюминиевых сплавов для изготовления корпусных деталей и разнообразных пар трения препятствует несоответствие высоким технологическим требованиям таких его эксплуатационных характеристик, как недостаточная твердость и низкая износостойкость.

Повышение износостойкости сплавов алюминия может быть достигнуто при помощи методов упрочняющей поверхностной обработки. Применение современных методов модифицирования поверхности позволяет целенаправленно изменять состав и строение поверхностных слоев изделий. Вместе с тем, анализ существующих современных методов химико-термической обработки (диффузионное хромирование, борирование, силицирование, цементация и др. [1 – 4]), показывает их ограничения применительно к алюминиевым сплавам, поскольку они традиционно проводятся при температурах значительно выше температуры плавления алюминия.

Традиционно упрочнение поверхностей изделий из алюминиевых сплавов осуществляется без их оплавления; применяются химические и гальванические методы нанесения покрытий [5 – 7], а также новые перспективные методы осаждения покрытий – детонационные и газофазные из металлоорганических соединений [8 – 10]. Отличительной особенностью детонационных покрытий из оксидных материалов является более высокая плотность по сравнению с гальваническими покрытиями [8].

Целью данной работы является исследование различных методов поверхностного модифицирования алюминиевых сплавов для определения возможностей по получению заданных физико-механических параметров при решении конкретных технологических задач.

Методика проведения экспериментальных исследований

Исследовали три метода нанесения покрытий на сплав АЛ9: гальванический, детонационный и газофазный метод осаждения из металлоорганических соединений.

Для нанесения гальванического никель-фосфорного покрытия использовали электролит состава: 180-200 г/л $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 25-35 г/л $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 30-40 г/л H_3PO_4 ; 5-10 г/л

NaH_2PO_4 . Осаждение проводили при плотности тока 8...12 А/дм², температуре 75...90 °С, рН 1...2,5. Полученные покрытия отжигали в вакууме при температуре 300 °С в течение 2 ч для повышения взаимной диффузии атомов покрытия и основы с целью увеличения прочности сцепления покрытия с подложкой алюминиевого сплава.

Гальваническое анодирование проводили в электролите, состоящем из H_2SO_4 и H_2CrO_4 ; плотность тока при осаждении 1,0...2,0 А/дм², напряжение 35...50 В, продолжительность процесса 20...90 мин.

Детонационные покрытия наносили по технологии, описанной в работе [8].

Газофазные покрытия, формируемые при осаждении хрома из металлоорганических соединений, получали на экспериментальной установке [9]. Технология осаждения этих покрытий подробно описана в работе [10].

Процесс химического осаждения из газовой фазы при термическом разложении (пиролизе) металлоорганических соединений (МОС) состоит из следующих последовательных стадий:

- испарение исходного химического соединения и перенос паров к нагретой поверхности детали (подложке);
- термические реакции в газовой фазе и на подложке с образованием покрытия;
- взаимодействие покрытия с продуктами распада;
- удаление продуктов реакции.

В качестве насыщающей среды была выбрана выпускаемая отечественной промышленностью бис-аренхромоорганическая жидкость «Бархос» (ТУ 6-01-1149-78), в составе которой преимущественно содержится бис-этилбензолхром (температура разложения до металла 330 °С). Суммарное содержание хромоорганических соединений соответствует 92 %, органических примесей 8 %. Содержание хрома в жидкости составляет не менее 16 %.

Основными технологическими параметрами процесса являлись: температура подложки ($T_{\text{подл}}$), давление в реакционной камере (P), температура испарителя ($T_{\text{исп}}$), продолжительность процесса (τ).

Процесс нанесения покрытий осуществлялся в реакционной камере, где предварительно создавался вакуум с остаточным давлением 13...65 Па. Температура подложки варьировалась от 350 до 550 °С, давление в камере – от 260 до 1040 Па, температура на испарителе – от 160 до 280 °С, продолжительность процесса – от 10 до 70 мин. Расход МОС составлял

1,0 мл/мин (через каждые 30 с – 0,5 мл).

Микроструктуру покрытий исследовали в оптическом металлографическом микроскопе «Neophot-21» при увеличениих $\times 500$. Микротвердость покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 50Г (0,49 Н) и 100Г (0,98 Н) (ГОСТ 9450-76).

Испытания износостойкости покрытий выполняли на машине трения с использованием стандартных образцов [11]. Для устранения влияния фактора неоднородности абразивных свойств шлифовальной шкурки М20 на результаты испытаний, исследовали как образец с покрытием, так и эталонный образец, изготовленный из стали Ст3. Величина износа контролировалась с помощью горизонтального оптиметра ИКГ до и после испытаний; путь трения составлял 15 м. Результаты испытаний определяли по относительной износостойкости E :

$$E = \frac{\Delta l_3}{\Delta l_n},$$

где Δl_3 – линейный износ эталонного образца, Δl_n – линейный износ образца с покрытием.

Методом гашения сцинтилляций (свечения) предусматривалось измерение интенсивности интегрального изнашивания сопряжения контртело–покрытие при смазывании вазелиновым маслом со специальными сцинтилляционными добавками.

Оценка износа проводилась на радиометрическом приборе «Альфа» по уменьшению интенсивности сцинтилляций масла, находящегося под действием источника ионизирующего излучения, по мере увеличения количества продуктов изнашивания в анализируемых пробах масла равного объема.

Испытания проводились на машине трения «СМЦ-2». Колодкой служила сталь 40, исследуемое покрытие наносилось на ролик из алюминиевого сплава АЛ9 диаметром 40 мм и шириной 10 мм. Продолжительность испытания при одной нагрузке составляла 10 мин, расход масла – 10 капель за 15 с. Нагрузка варьировалась в двух интервалах: первый – 0,05...0,4 МПа через каждые 0,05 МПа; второй – 0,5...5,0 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктурный анализ показал, что гальваническое никель-фосфорное покрытие проявляется в виде нетравящейся белой полосы с резкой границей раздела с подложкой сплава. Микротвердость остается постоянной по толщине покрытия и составляет порядка

4500 МПа при микротвердости основы 900 МПа (рис. 1).

Н 50, МПа

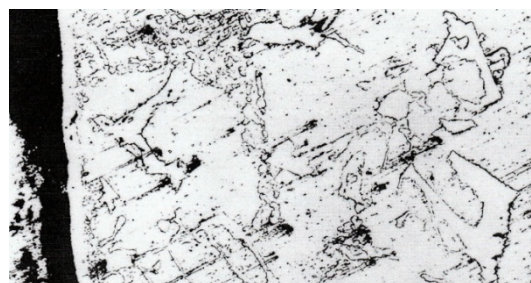
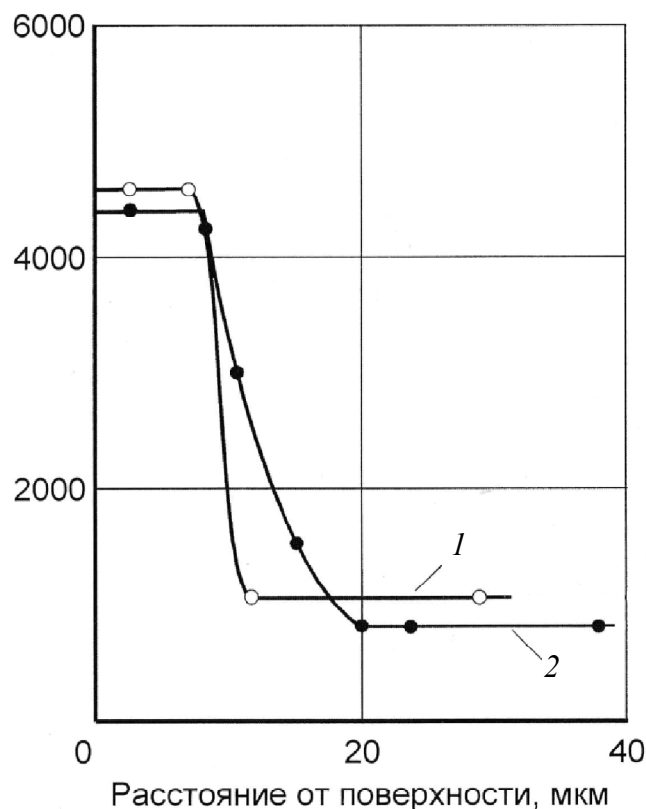


Рис. 1. Микроструктура ($\times 340$) и распределение микротвердости по толщине никель-фосфорного покрытия в алюминиевом сплаве АЛ9:

1 – без отжига; 2 – после отжига

Анодированные покрытия выявляются при микроструктурном анализе в виде темной полосы, имеющей четкую границу раздела с основой сплава. Толщина и строение анодированных покрытий на поверхности сплава АЛ9 зависят от напряжения и времени осаждения. Покрытие, полученное при напряжении 35 В в течение 20 мин имеет толщину до 30 мкм. Повышение напряжения до 50 В и увеличение продолжительности осаждения до 90 мин приводит к увеличению толщины покрытия до 80 мкм (рис. 2). В структуре анодированных покрытий наблюдается небольшая пористость, она тем больше, чем больше толщина покрытия.

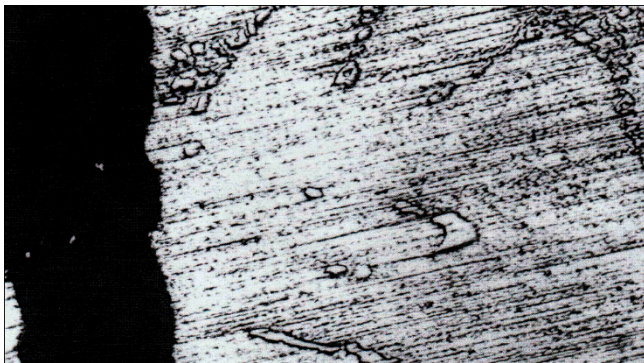
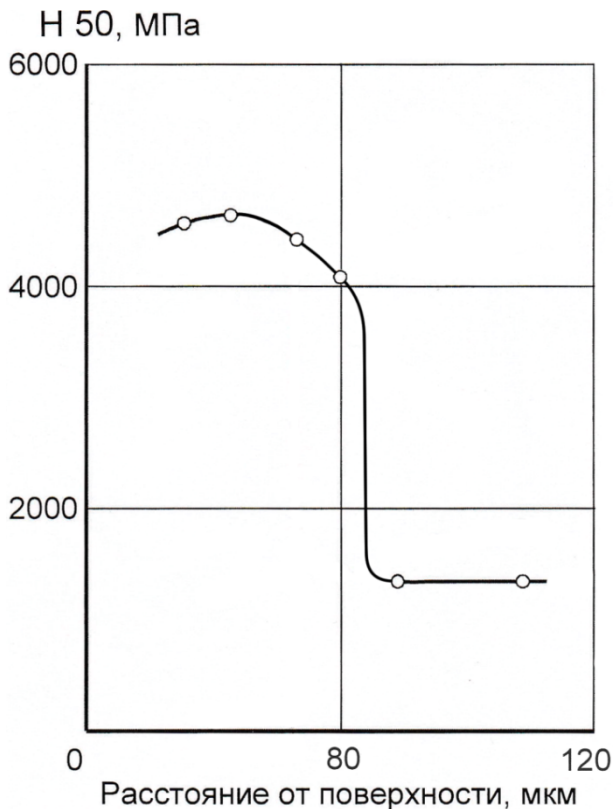


Рис. 2. Микроструктура ($\times 340$) и распределение микротвердости по толщине анодированного слоя в алюминиевом сплаве АЛ9 (плотность тока 1...2 А/дм², напряжение 50 В, время 90 мин)

Как анодированные, так как и никель-фосфорные покрытия имеют повышенную поверхностную микротвердость, величина микротвердости этих покрытий примерно одинакова.

Микроструктурный анализ детонационных покрытий на алюминиевом сплаве АЛ9 показал, что оксидные покрытия выявляются в виде темных полос толщиной от 70 до 300 мкм в зависимости от режимов обработки. Микротвердость по толщине покрытий оставалась постоянной и составляла 9000 МПа, что примерно в 2 раза выше по сравнению с гальваническим анодированием. При этом наблюдается резкий переход от твердости покрытий к твердости сердцевины так же, как и при гальваническом оксидировании. Такой переход по

твердости от покрытия к сердцевине указывает на недостаточную адгезионную прочность его с сердцевиной образцов.

Для увеличения адгезионной прочности оксидированного покрытия проводился дополнительный отжиг при температуре 535 °С в течение 2 ч (рис. 3). Оказалось, что твердость покрытия практически не меняется, но зато происходит плавный переход по твердости от покрытия к сердцевине образцов за счет развития диффузионных процессов. Это приводит к тому, что адгезионная прочность покрытия резко возрастает.

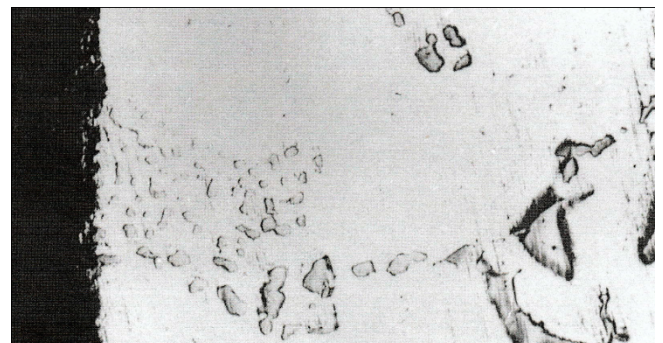
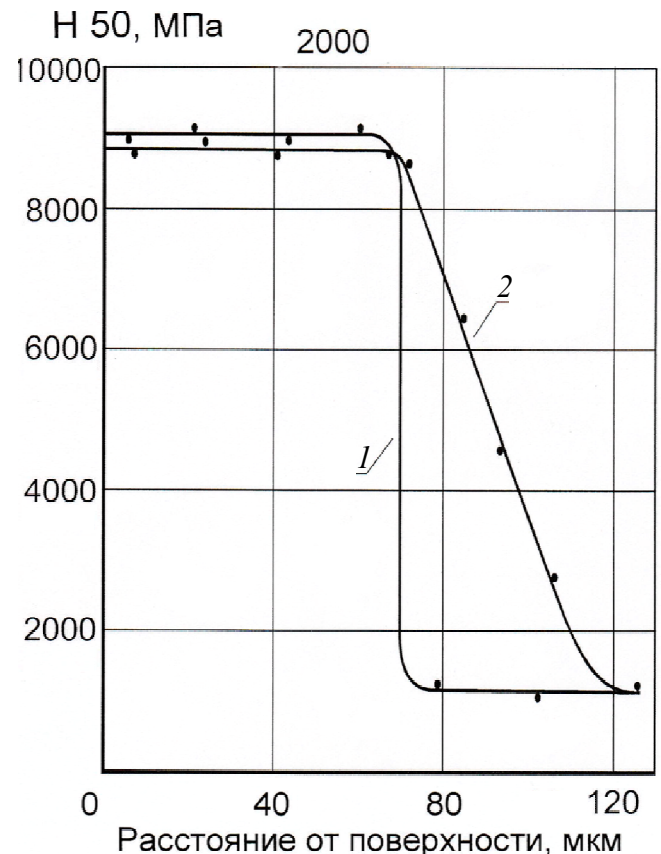


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) и распределение микротвердости по толщине оксидного покрытия на сплаве АЛ9, полученного детонационным способом (кривая 1) с последующим отжигом в течение 2 ч при $T = 535$ °С (кривая 2)

Высокая твердость детонационных покрытий из оксида алюминия должна способствовать повышению износостойкости при испытании на износ.

Анализ газоплазменных хромовых покрытий на силумине АЛ9 показал, что независимо от режимов осаждения все покрытия имеют слоистую структуру. Этот эффект можно объяснить циклической подачей жидкого МОС хрома в испаритель (через каждые 30 с по 0,5 мл). Циклическое изменение концентрации МОС и продуктов распада около подложки приводит к образованию слоистого хромового покрытия с различным содержанием углерода (темные участки содержат его больше, светлые меньше). Чередование слоев происходит в зависимости от режимов осаждения. Наиболее благоприятное сочетание слоев наблюдается в результате осаждения при температуре $T_{\text{подл}} = 450^\circ\text{C}$ (рис. 4).

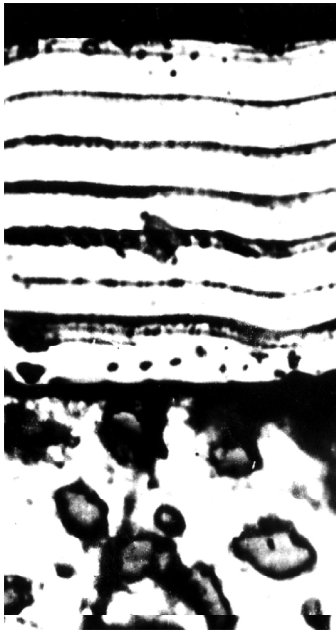


Рис. 4. Микроструктура газоплазменных хромовых покрытий на сплаве АЛ9, полученных при осаждении: $T_{\text{подл}} = 450^\circ\text{C}$; при $T_{\text{исп.}} = 200^\circ\text{C}$; $P = 650$ Па, продолжительность осаждения 30 мин

Оптимальная температура подложки (450°C), соответствующая максимальной толщине и микротвердости (16 000 МПа) покрытия, обеспечивает и высокую износостойкость (рис. 5).

Природа высокой твердости газоплазменного хромового покрытия (ГХП), вероятно, объясняется следующими причинами: структурой типа металлического стекла; высокими внутренними напряжениями, возникающими в

процессе формирования покрытия; пересыщенностью аморфного твердого раствора углеродом, наличием карбидов типа Cr_{23}C_6 и Cr_7C_3 из-за избыточного количества углерода (до 12 %), входящего в состав МОС. Из анализа результатов испытания видно, что ГХП способно выдерживать высокие удельные нагрузки. При этом, вследствие аморфного строения ГХП, сохраняются достаточные пластичность и вязкость.

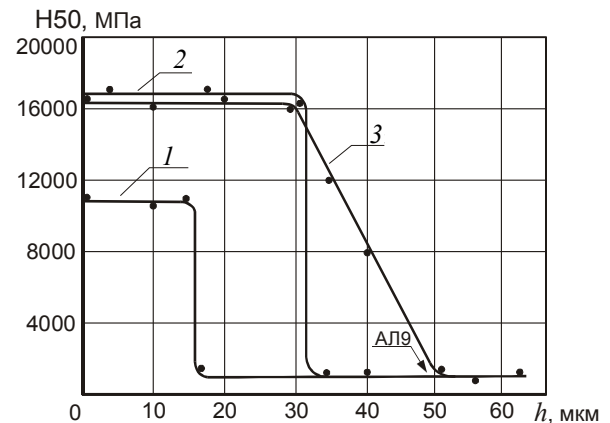


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине газоплазменных хромовых покрытий:

1 – $T_{\text{подл}} = 350^\circ\text{C}$; $P = 650$ Па; $T_{\text{исп.}} = 200^\circ\text{C}$; $\tau = 30$ мин;
2 – $T_{\text{подл}} = 450^\circ\text{C}$; $P = 650$ Па; $T_{\text{исп.}} = 200^\circ\text{C}$; $\tau = 30$ мин;
3 – $T_{\text{подл}} = 450^\circ\text{C}$; $P = 650$ Па; $T_{\text{исп.}} = 200^\circ\text{C}$; $\tau = 30$ мин;
отжиг при $T = 535^\circ\text{C}$ в течение 4 ч

Сравнение полученных результатов показывает, что исследуемые методы осаждения покрытий позволяют получить значения поверхностной микротвердости в широком диапазоне: от 4 500 МПа при гальваническом методе до 16 000 МПа при газоплазменном методе.

Сравнительная оценка стойкости покрытий, нанесенных различными методами на алюминиевый сплав АЛ9, проведена на основе результатов по относительной износостойкости и интенсивности изнашивания при абразивном износе (рис. 6).

Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод о том, что для деталей машин, работающих на износ при небольших удельных нагрузках, целесообразно использовать гальванические покрытия с твердостью до 4500 МПа. При работе на износ с большими удельными нагрузками можно рекомендовать детонационное покрытие с твердостью до 9000 МПа. Если трущиеся детали машин работают в тяжелых условиях нагружения, то следует использовать покрытия из металлоорганических соединений хрома с твердостью до 16 000 МПа. Кроме того, эти покрытия обла-

дают высокой коррозионной стойкостью, что позволяет их рекомендовать для работы на износ в агрессивных средах, в том числе и в химической промышленности.

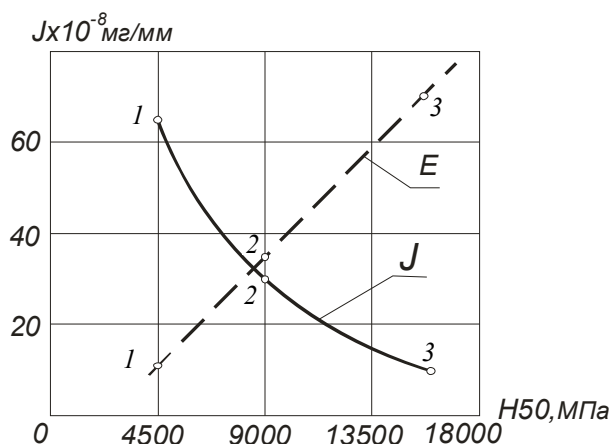


Рис. 6. Изменение относительной износостойкости E и интенсивности изнашивания J при абразивном износе различными методами нанесения покрытий на алюминиевый сплав АЛ9 толщиной 80 мкм:
1 – галваническое (анодирование); 2 – детонационное; 3 – газофазное (МОС)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богорад, Л.Я. Хромирование. – Л.: Машиностроение, – 1984. – 96 с.
2. Повышение стойкости к изнашиванию деталей из углеродистых сталей комбинированными методами диффузионного поверхностного легирования / Л.Г. Петрова [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 2 (49). – С. 29–40.
3. Демин, П.Е., Петрова, Л.Г., Косачев, А.В. Перспективные комбинированные технологии химико-термической обработки для увеличения ресурса работы деталей мостовых сооружений // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 10 (52). – С. 11–16.
4. Петрова, Л.Г., Александров, В.А., Брежнев, А.А. Новые возможности борирования для получения модифицированных слоев на стальных деталях, работающих в условиях износа и коррозии // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 10 (106). – С. 26–33.
5. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
6. Сыркин, В.Г. CVD – метод. Химическое паровое осаждение. – М.: Наука, 2000. – 496 с.
7. Получение покрытий высокотемпературным распылением/ под ред. Л.К. Дружинина, В.В. Кудинова. – М.: Атомиздат, 1973. – 322 с.
8. Александров, В.Д. Поверхностное упрочнение алюминиевых сплавов детонационными покрытиями // Технология металлов. – 2002. – № 4. – С. 34–36.

9. Александров, В.Д. Поверхностное упрочнение алюминиевых сплавов путем осаждения хрома из металлоорганических соединений // Технология металлов. – 2002. – № 3. – С. 26–29.

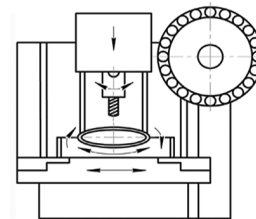
10. Хрущев, М.М., Бабичев, М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, – 1970. – 252 с.

11. Ситников А.А., Собачкин А.В., Яковлев В.И., Логинова М.В., Свиридов А.П. Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 12(78). – С. 20–25.

REFERENCES

1. Bogorad, L.Ya. *Chromium Coating*. – L.: Mechanical Engineering, - 1984. – pp. 96.
2. Wear-resistance increase in carbon steel parts by combined methods of surface diffusion alloying / L.G. Petrova [et al.] // *Bulletin of Moscow Road State Technical University (MADI)*. – 2017. – No. 2(49). – pp. 29-40.
3. Demin, P.E., Petrova, L.G., Kosachyov, A.V. Promising combined technologies of chemical-thermal treatment for life increase of bridge structure parts // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No. 10(52). – pp. 11-16.
4. Petrova, L.G., Alexandrov, V.A., Brezhnev, A.A. New potentialities in boronizing for obtaining modified layers on steel parts operating under wear and corrosion conditions // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2013. – No. 10(106). – pp. 26-33.
5. Melnikov, P.S. *Reference Book of Electroplates in Mechanical Engineering*. – M.: Mechanical Engineering, 1991. – pp. 384.
6. Syркин, V.G. *CVD – Method. Chemical Vapor-Phase Deposition*. – M.: Science, 2000. – pp. 496.
7. *Coating Obtaining Through High-Temperature Sputtering* / under the editorship of L.K. Druzhinin, V.V. Kudinov. – M.: Atomizdat, 1973. – pp. 322.
8. Alexandrov, V.D. Aluminum alloy surface strengthening with detonation coatings // *Metal Technology*. – 2002. – No. 4. – pp. 34-36.
9. Alexandrov, V.D. Aluminum alloy surface strengthening with chromium deposition from metal-organic compositions // *Metal Technology*. – 2002. – N.3. – pp. 26-29.
10. Khrushchev, M.M., Babichev, M.A. *Abrasion*. – M.: Science, - 1970. – pp. 252.
11. Sitnikov, A.A., Sobachkin, A.V., Yakovlev, V.I., Loginova, M.V., Sviridov, A.P. Peculiarities in structural state of mechanocomposites based on aluminum for gas-detonation sputtering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 12(78). – pp. 20-25.

Рецензент д.т.н. Д.И. Фатюхин



УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_5a5a44e9c174c4.06873607

**В.Г. Гусев, д.т.н.,
Е.С. Савина, магистрант**
(Владимирский государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87)
E-mail: prof_gusev@mail.ru; sec-1993@mail.ru

Проектирование обработки сложных поверхностей на токарных станках с ЧПУ в САМ-системе Esprit

Рассмотрены и реализованы функциональные возможности САМ-системы Esprit при проектировании механической обработки сложных пространственных поверхностей детали «Фланец» на современном токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Takisawa TS4000YS. Разработана управляющая программа и приведено её описание.

Ключевые слова: токарная обработка; станок с ЧПУ; САМ-система Esprit; сложная поверхность; управляющая программа; симуляция обработки.

**V.G. Gusev, D. Eng.,
E.S. Savina, Master post graduate student**
(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, Russia, 600000)

Design of complex surface machining on NC lathes in Esprit CAD system

A high-performance and accurate machining of complex special surfaces with the aid of NC equipment at the simultaneous use of four and more controlled coordinate axes is impossible without application of modern CAD systems and post-processors. Functional potentialities and a methodology for the design of complex surface machining in a "flange" part in modern CAD Esprit system are considered. Control commands are described the realization of which ensures a procedure for a computer aided design of technology, the development of a control program and simulation of operation motions of working units in a lathe. The simulation of profile surface turning is described in an intelligible way which is particularly significant for the comprehension and use of material presented.

Keywords: turning; NC machine; Esprit CAD system; complex surface; control program; simulation of processing.

Токарная обработка является одной из наиболее распространенных видов обработки резанием и применяется при изготовлении деталей типа тел вращения (валов, дисков, осей, пальцев, цапф, фланцев, колец, втулок, гаек, муфт и др.). Требования автоматизации мелкосерийного производства привели к развитию токарных, токарно-фрезерных станков и обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ).

Современные multifunctional токарные станки с ЧПУ позволяют выполнять различные технологические операции механической обработки: обтачивание цилиндрических, конических, фасонных поверхностей, растачивание сложных внутренних полостей, сверление и развертывание отверстий, нарезание цепочек резьбовых поверхностей (цилиндрической резьбы, переходящей в коническую резьбу), обработку винтовых поверхностей

(шнеков), пазов, шлицев, многогранников под ключ, поперечных отверстий в цилиндрической детали, различных несимметричных поверхностей и др.

Эффективная обработка сложных поверхностей на станках с ЧПУ может быть реализована на основе перспективных направлений повышения уровня технологической подготовки производства [1], обоснованного выбора оборудования с ЧПУ [2], оперативного проектирования технологии и разработки управляющих программ [3] с использованием современных автоматизированных компьютерных систем. В настоящее время известны различные САМ- и САД/САМ-системы, которые позволяют эффективно решать указанные задачи.

Одной из наиболее функциональных САМ-систем, позволяющих в полной мере задействовать возможности современных многофункциональных станков и обрабатывающих центров с ЧПУ, является САМ-система Esprit (разработчик DP Technology, США), которая представляет собой развитый функционал для создания 2D- и 3D-обработки на металлорежущем оборудовании с ЧПУ и позволяет сократить время на разработку управляющих программ [4].

Рассмотрим основные функции САМ-системы Esprit. Функция «Переключиться на 3D точение → Не ограниченная геометрия → Окружность» позволяет создать окружность из одного выбранного геометрического элемента. Самым распространенным вариантом является создание окружности по известным координатам её центра и значению радиуса. В Esprit можно создавать твердотельные модели – числовое представление 3D-детали. Дополнительно к описанию 3-х мерной формы, твердотельные модели характеризуются объемом и массой.

Esprit имеет штатный функционал импорта информации из сторонних САД-систем: Inventor, SolidWorks и др. и использует его для правильной интерпретации модели детали, создания траекторий обработки и визуализации процесса удаления материала.

Функция «Создать → 3D-моделирование → Выдавить выступ/Вырезать тело» проецирует обрабатываемый профиль в направлении оси Z текущей рабочей плоскости, чтобы создать тело или удалить материал из заготовки. Для 3D-модели профиль создается из геометрических примитивов меню «Неограниченная геометрия», но при этом профиль обязательно должен быть замкнутым.

В Esprit геометрические элементы, используемые в традиционных токарных операциях, обычно являются двухмерными и определяют траекторию движения режущего инструмента. Для создания геометрических элементов используется функция: «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Профиль детали», позволяющая создавать геометрию или элемент «Цепочка» в плоскости UV . Поперечное сечение 3D-модели создается в плоскости UV .

Функция «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Токарный профиль» анализирует деталь, чтобы найти OD (внешний), ID (внутренний) профили. Функция «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Автоцепочка» автоматически создает элемент «Цепочка» из открытых или закрытых форм заготовки, который определяет местоположение начала, конца процесса резания и направление траектории движения режущего инструмента.

Функция «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Ручной ОТКТ» создает или открывает существующий геометрический элемент, называемый «ОТКТ» (от точки к точке), который определяет начальное местоположение режущего инструмента, направление его движения по опорным точкам эквидистанты. Функция «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Профили торца» создает элемент «Профиль» из любой комбинации торцов 3D-модели, петель торца, 3D-кромки или каркасной геометрии.

Функция «Переключиться на 3D точение → Создание элементов → Отверстия» автоматически распознает отверстия, основанные на критериях выбора максимального и минимального диаметра, и создает из них геометрические элементы.

Для создания операций токарной обработки в САМ-системе Esprit имеется следующая функция «Переключиться на 3D точение → 3D точение → Черновая обработка», которая создает операцию черновой обработки литой цилиндрической заготовки, поковки или обработки на OD (внешнем диаметре), ID (внутреннем диаметре) и торце заготовки. Функция «Переключиться на 3D точение → 3D точение → Обработка отверстия» создает обработку отверстия, а функция «Переключиться на 3D точение → 3D токарно-фрезерная → Обработка контура на торце» – обработку контура на торце вращающейся цилиндрической заготовки.

Функция «Переключиться на 3D точение

→3D токарно-фрезерная → Обработка отверстия на диаметре или торце» создает обработку отверстий на цилиндрической заготовке. Входными параметрами должны быть торцы или отверстия, которые должны быть выбраны до начала создания технологии «Обработка отверстия на диаметре». Функция «Переключиться на 3D точение → 3D токарно-фрезерная → Обработка контура» допускает движение режущего инструмента в пределах ZX-плоскости (ось Z совпадает с осью заготовки, ось X перпендикулярна оси Z).

При использовании многофункциональных токарных станков и обрабатывающих центров с ЧПУ для выполнения технологических переходов приводным режущим инструментом (сверлом, фрезой, метчиком и др.), необходимо использовать дополнительные оси (чаще всего ось C). Функция «Переключиться на 3D точение → 3D токарно-фрезерная → обработка контура на диаметре» создает обра-

ботку контура на цилиндрической заготовке. Обычно технологические переходы «Обработки контура на диаметре» используются для удаления материала вдоль вертикальных или наклонных стенок.

Рассмотрим процедуру проектирования токарной обработки детали «Фланец» с помощью перечисленных выше функций в САМ-системе Esprit, а также разработку управляющей программы.

После запуска системы Esprit в открывшемся окне программы выбираем пункт меню «Файл → Открыть», «3D-модель детали», нажимаем кнопку «Открыть». При работе с новой моделью необходимо корректно позиционировать её относительно рабочей системы координат. Выбираем для токарной обработки основные оси Y, Z, X и подсвечиваем направления дополнительных осей U, V, W для удобства работы (рис. 1).

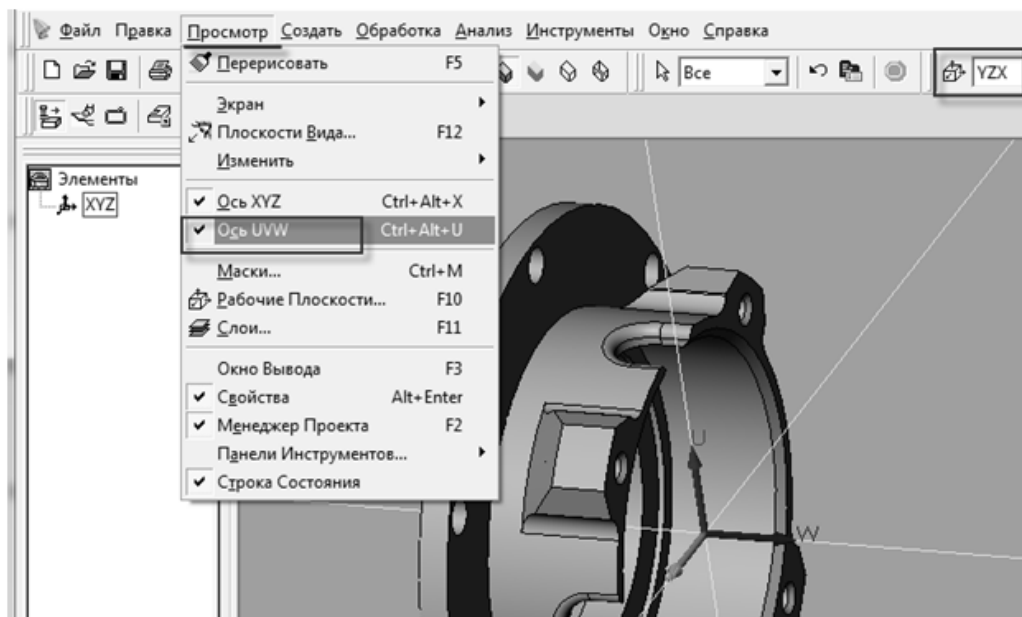


Рис. 1. Определение рабочей плоскости и осей координат при обработке детали «Фланец»

Создадим заготовку для последующей токарной обработки на новом слое «Заготовка» и элемент «Профиль детали» на этом слое. В окне параметров профиля детали установим необходимые параметры: в поле «Выбранные части» укажем всё тело детали, «Тип Профиля» – «Тень» (данная команда создает геометрию в форме силуэта детали), установим галочку «Оптимизация скорости» и нажмем ОК (рис. 2).

Строим окружность будущей заготовки и перемещаем на некоторое расстояние от про-

филя детали для обеспечения припуска на обработку торца. Перемещение осуществляется путем вызова контекстного меню «Копировать → Переместить» и указанием расстояния смещения.

Для создания заготовки вытягиваем созданную окружность с помощью опции «Выдавить выступ» на расстояние, достаточное для обеспечения длины детали и возможности закрепления заготовки в трехкулачковом самоцентрирующемся патроне.

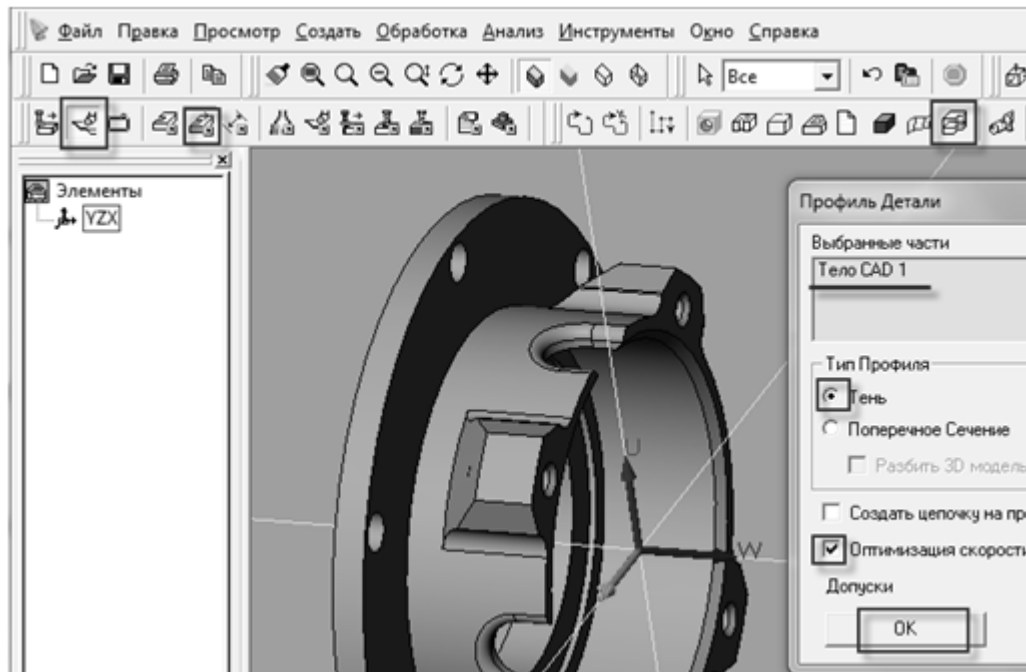


Рис. 2. Создание профиля детали «Фланец»

Зайдем в меню «Расширенная визуализация», переходим на закладку «3D-модель» и назначаем параметры визуализации: «Тип» – Заготовка, «Создать из» – 3D-модель, щелкаем по кнопке со стрелкой и выбираем 3D-модель заготовки. Помимо этого, необходимо определить цвет, которым будет отражаться материал заготовки при визуализации. После выполнения всех настроек отображения нажимаем кнопки «Добавить», «ОК». В левой части окна появится строка с именем заготовки (рис. 3). Для удобства работы с профилем детали отключим видимость 3D-модели через меню «Маски».

На основе геометрического профиля создаем цепочки для обработки геометрии фланца: «Торец», «Внешняя цепочка», «Внутренняя цепочка» и элемент «ОТКТ» (от точки к точке) для токарно-фрезерной операции сверления (рис. 4). После создания всех цепочек для обработки детали переходим к процессу их обработки. С помощью описанных выше функций произведем обработку цепочек «Торец» и «Внешняя цепочка», элемента «ОТКТ» и расточку отверстия до цепочки «Внутренняя цепочка». Для обработки выступов создадим «Профиль торца» этих выступов, который затем скопируем. Профиль создан, но САМ-система Esprit неверно определила глубину профиля, поэтому требуется ее корректировка. Для этого создается дополнительная точка, на которую ссылаются при определении глубины обработки (рис. 5).

Создадим обработку профиля «Обработка контура на вращающемся торце» сначала фрезой большего диаметра, а затем доработаем контур фрезой меньшего диаметра. Созданные технологические переходы обработки профиля торца копируем путем трехкратного вращения вокруг оси Z. САМ-система Esprit отобразила копии траекторий инструментов на 3D-модели детали (рис. 6). Для удобства обработки и её визуализации в дереве технологических переходов можно их упорядочить: сначала обработка производится по всем зонам одним, затем – другим режущим инструментом.

Распознаем отверстия в детали. САМ-система Esprit распознала две группы отверстий. Щелкаем в дереве элементов по группе больших отверстий и создаем «Обработку отверстия на диаметре или торце». Другую группу отверстий обрабатываем аналогично.

Создадим цепочку для обработки паза и обрабатываем этот элемент путем операции «Обработки контура». Для закругления паза воспользуемся командой «Обработка контура на диаметре» и фрезой для обработки галтелей. Аналогично производится обработка второго паза. Полная визуализация обработки фланца представлена на рис. 7.

После моделирования технологической операции механической обработки фланца в САМ-системе Esprit составлена управляющая программа (УП), фрагмент которой представлен далее.

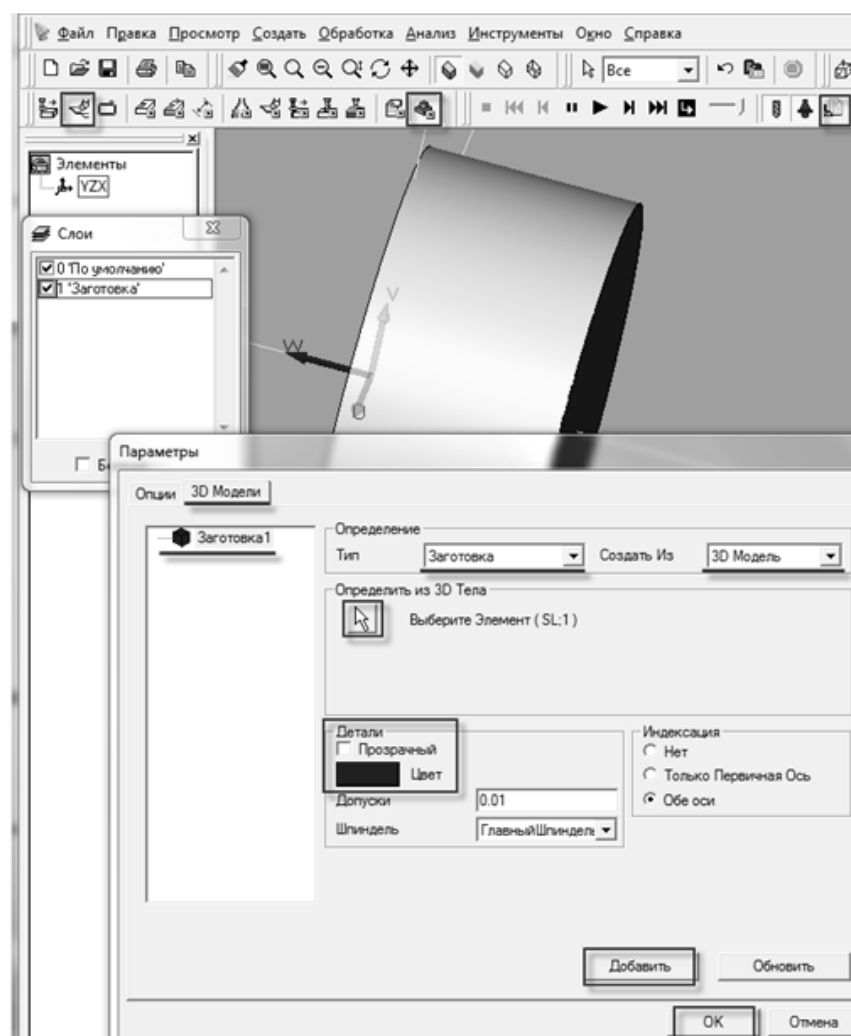


Рис. 3. Настройка параметров визуализации заготовки

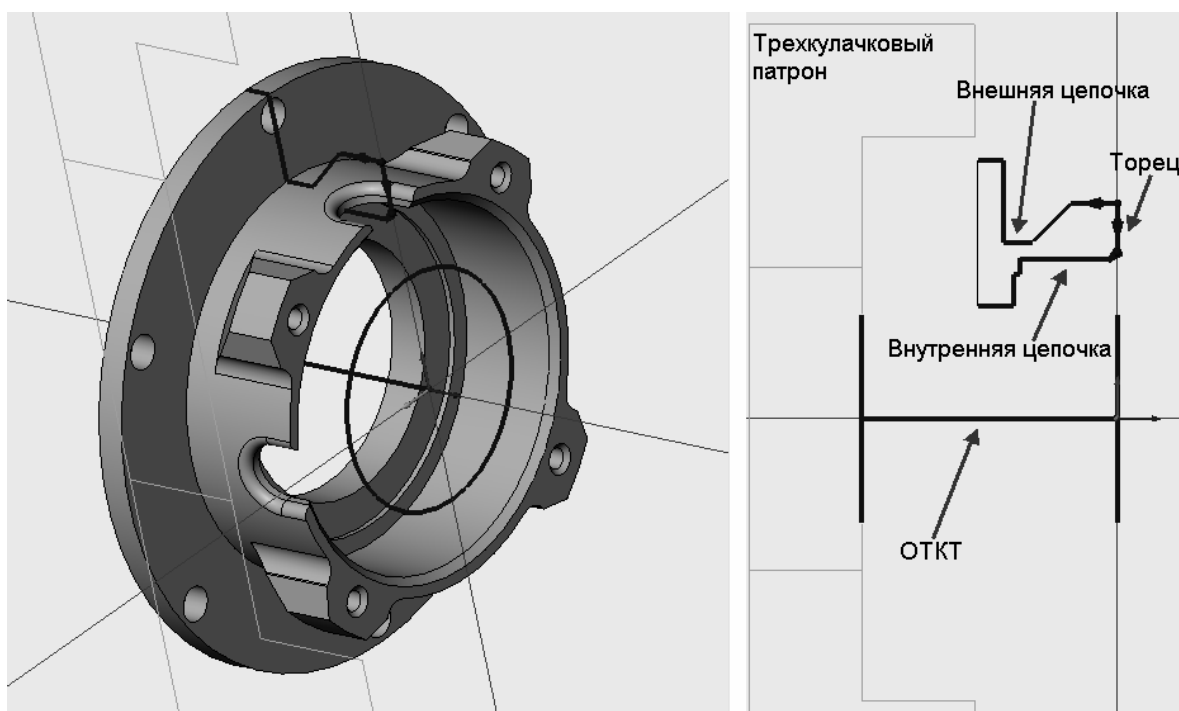


Рис. 4. Расположение цепочек обработки на 3D-модели заготовки

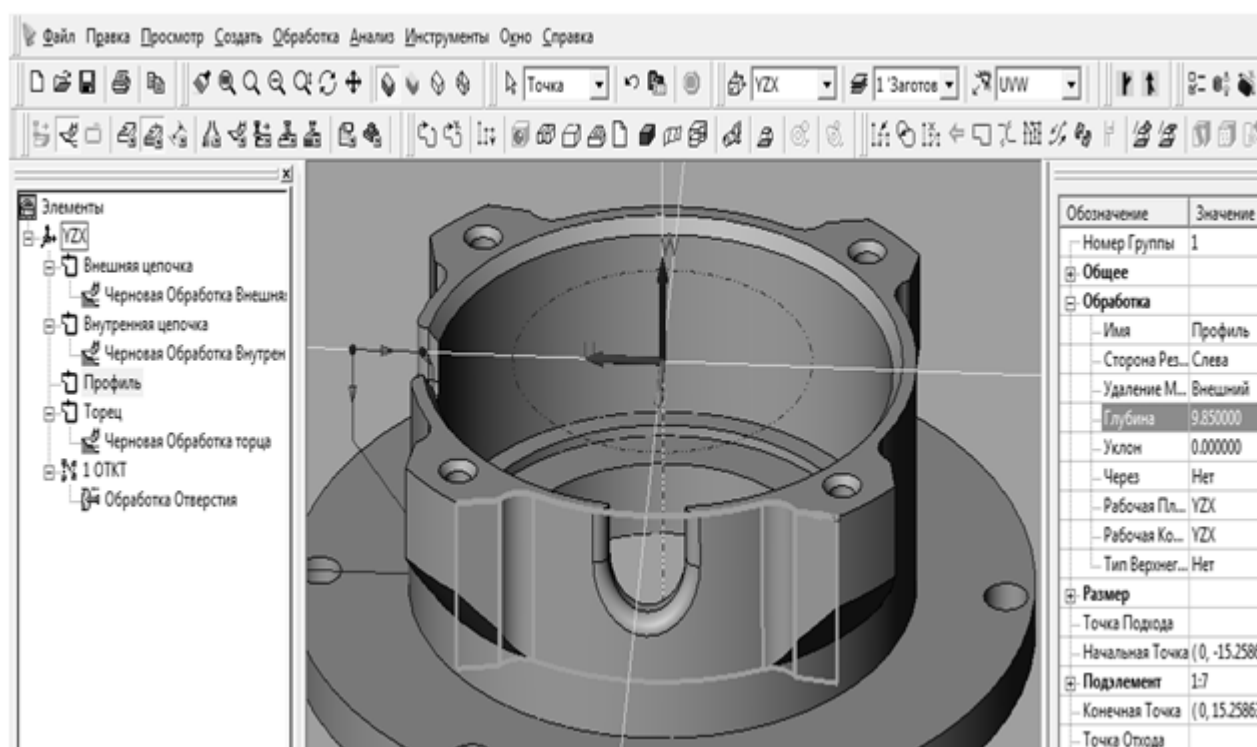


Рис. 5. Редактирование глубины обрабатываемого профиля заготовки

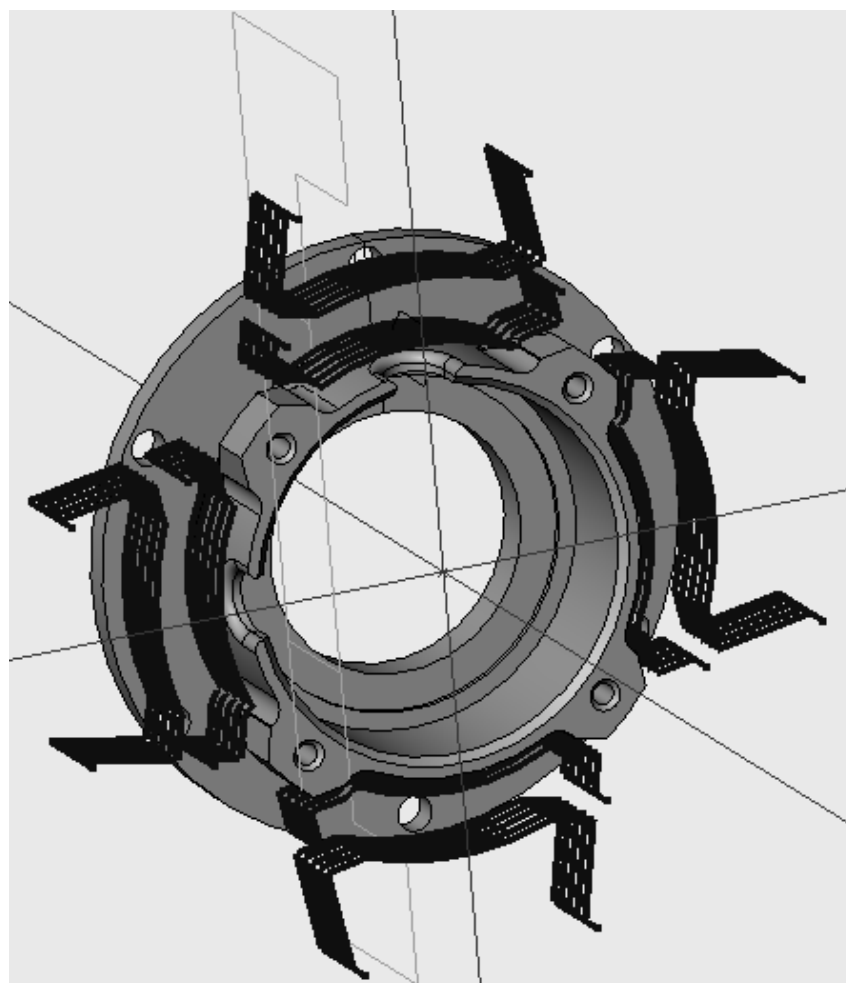


Рис. 6. Эквидистанта движения режущего инструмента при обработке сложных пространственных поверхностей «Фланца»

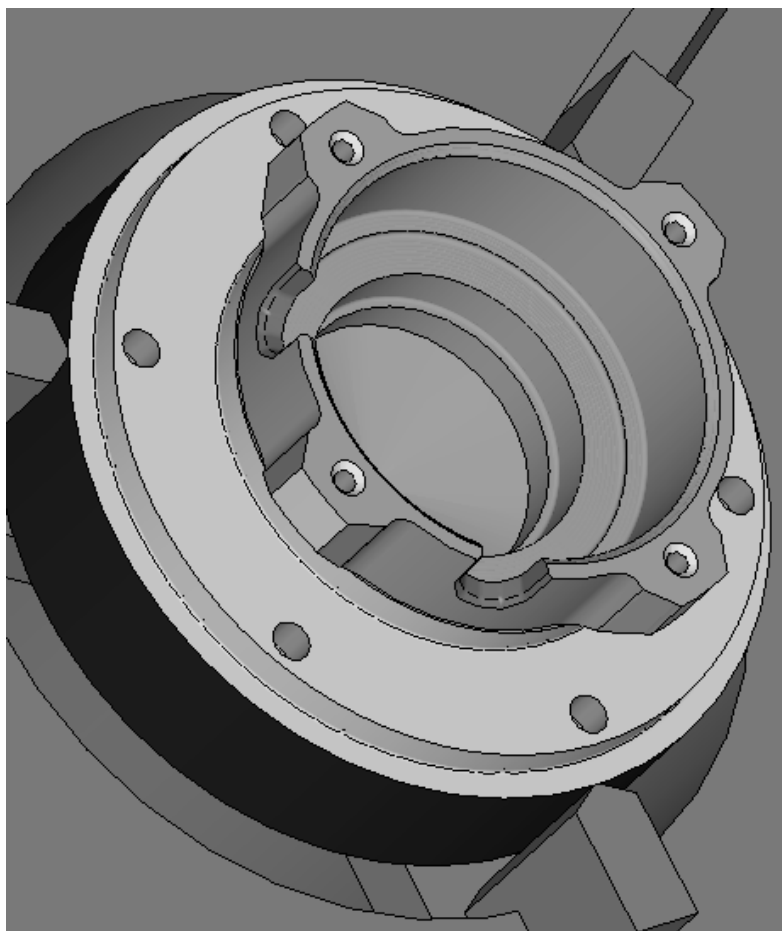


Рис. 7. Симуляция обработки сложного профиля детали

%	(DR 24)
(Токарная обработка фланца)	T5454 M16 (DR 24)
G0 G18 G40 G54 G80 G99	G97 S700 M3
M141 (L Spindle)	G0 Z2.
(Черновая обработка торца)	X0 M8
(DCLNR2525)	G83 Z-25.596 Q3000 F0.05
T0101 M16 (DCLNR2525)	G80
M75	...
G50 S4500	(Обработка контура на торце или диаметре)
G96 S163 M4	(EM 16.0)
G0 X69. Z0.05 M8	T0404 M16 (EM 16.0)
G1 G99 X-0.358 G99 F0.08	M76
Z0.5	S2000 M4
M9	G0 Z1. C107.665
G0 G28 U	G0 X79.396 Y0 M8
G0 G28 V0	G1 G98 Z-2. F80.
G0 G28 W0	G41 X62.378 F372.38
M1	X61.803 C115.493 F586.92
...	...
(Обработка отверстия)	(Обработка отверстия на диаметре)
	(DR 03.5)

T0808 M16 (DR 03.5)
M76
S1800 M4
G0 Z2. C0.
G0 X55. Y0 M8
G83 Z-17.776 R-13.21 Q3500 F108.
Z-17.776 C60. Q3500
C120. Q3500
C180. Q3500
C240. Q3500
C300. Q3500
G80
...
M30
(End program)
%

Для сокращения текста УП однотипные кадры пропущены, а вместо них поставлены три точки. Начало УП указано графическим символом (%), а её название – в круглых скобках (Токарная обработка фланца). Следующие два кадра (две строки УП) определяют общие параметры обработки: выбрана рабочая плоскость ZX, отменена коррекция режущего инструмента на радиус, активирован сдвиг нуля станка, отменены циклы сверления и активирована команда: «После выполнения каждого цикла не выводить режущий инструмент в зону его смены» (G0 G18 G40 G54 G80 G99). Обработка проводится с использованием главного шпинделя станка (M141, L Spindle).

В скобках в виде комментария указано название обработки (Черновая обработка торца) и используемый режущий инструмент (DCLNR2525). Далее происходит смена режущего инструмента на проходной резец (T0101 M16 DCLNR2525). Режущий инструмент закрепляется (M75), устанавливается система координат и максимальная частота вращения шпинделя $S = 4500$ 1/мин (G50 S4500). Активируется функция постоянной скорости резания и устанавливается значение частоты вращения в направлении против часовой стрелки (G96 S163 M4).

На холостом ходу инструмент перемещается в точку с координатами (X69. Z0.5) и включается подача смазочно-охлаждающей жидкости (G0 X69. Z0.5 M8). На рабочей подаче $F = 0,08$ мм/об режущий инструмент врежется в заготовку и протачивает ее торец (G1 G99 X-0.358 G99 F0.08). Резец отходит от заготовки (Z0.5). Выключается охлаждение (M9), а резец возвращается на холостом ходу в исходную позицию (G0 G28 U0; G0 G28 V0; G0 G28 W0). Далее работа станка останавливается до нажатия кнопки «Старт» (M1).

Следующие две строки комментария отражают название обработки и используемый режущий инструмент (обработка отверстия; DR 24). Далее происходит смена режущего инструмента на сверло Ø 24 мм (T5454 M16 DR24). Включается вращение шпинделя по часовой стрелке с частотой $S = 700$ мин⁻¹ (G97 S700 M3).

На холостом ходу сверло перемещается к плоскости безопасности и включается охлаждение (G0 Z2 X0 M8). Глубокое отверстие обрабатывается в цикле сверления на рабочей подаче $F = 0,05$ мм/об (G83 Z-25.596 Q3000 F0.05) с периодическим выводом сверла из отверстия. При достижении заданной глубины отверстия цикл сверления отменяется (G80).

Следующие две строки комментария отражают название технологического перехода обработки контура и используемый режущий инструмент (обработка контура на торце или диаметре, EM 16.0). Далее происходит смена режущего инструмента на концевую фрезу Ø 16 мм (T0404 M16 EM 16.0). Активируется функция обработки с использованием приводного инструмента (M76). Включается частота вращения шпинделя $S = 2000$ 1/мин и инициализируется магазин (S2000 M4). На ускоренном ходу инструмент позиционируется в точку с учетом поворота по оси C (G0 Z1. C107.665), перемещается в точку (X79.396 Y0) и включается охлаждение (G0 X79.396 Y0 M8). На рабочей подаче $F = 80$ мм/мин режущий инструмент врежется в заготовку (G1 G98 Z-2. F80.) и начинается её обработка (G41 X62.378 F372.38; X61.803 C115.493 F586.92).

Следующие две строки комментария отражают название технологического перехода обработки отверстия и используемый режущий инструмент (обработка отверстия на диаметре, DR03.5). Далее происходит смена режущего инструмента на сверло Ø 3,5 мм (T0808 M16 DR03.5). Активируется функция обработки с использованием приводного режущего инструмента (M76). Устанавливается частота вращения шпинделя $S = 1800$ 1/мин (S1800 M4). На ускоренном (холостом) ходу режущий инструмент позиционируется в точку (G0 Z2. C0), перемещается в точку (X55. Y0) и включается охлаждение (G0 X55. Y0 M8). Далее реализуется цикл сверления глубокого отверстия на рабочей подаче $F = 108$ мм/мин (G83 Z-17.776 R-13.21 Q3500 F108.) с периодическим выводом сверла.

При достижении заданной глубины отверстия сверло выходит из него и производится поворот заготовки относительно оси C на со-

ответствующий угол для обработки следующего отверстия (Z-17.776 C60. Q3500). Остальные отверстия обрабатываются аналогично (C120. Q3500, C180. Q3500, C240. Q3500, C300. Q3500). Команда G80 означает отмену цикла сверления, а команда M30 – конец программы, при этом система ЧПУ возвращает станок в состояние, соответствующее началу управляющей программы (%).

Разработанные с использованием современной САМ-системы Esprit технология и управляющие программы обработки сложных пространственных поверхностей детали «Фланец» на токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Takisawa TS4000YS позволили повысить уровень технологической подготовки производства, поскольку все описанные сложные процедуры реализованы в автоматизированном режиме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Наумов, Г.М. Перспективные направления повышения уровня технологической подготовки производства высокоточных изделий на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения, 2015. – №10. – С. 20 – 24.
2. Наумов, Г.М., Гусев, В.Г. Совершенствование подготовки производства высокоточных изделий путем обоснованного выбора оборудования с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. – №4 (306). – С. 70 – 73.

3. Морозов, В.В., Гусев, В.Г. Программирование обработки деталей на многооперационных станках: учеб. пособие / В. В. Морозов, В. Г. Гусев; Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. – 2011. – 366 с. ISBN 978-5-9984-0165-7.

4. Савина, Е.С., Гусев, В.Г. Сокращение времени на разработку управляющих программ для станков с ЧПУ на основе САМ-системы ESPRIT: сб. науч. статей МНПК «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении»; Курск: ЮЗГУ, ЗАО Университетская книга, 2016. – С. 76 – 79. – ISBN 978-5-9906195-4-8.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Naumov, G.M. Promising directions in technological preproduction level increase for manufacturing precision products on NC machines. *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2015. – No.10. – pp. 20-24.
2. Naumov, G.M., Gusev, V.G. Improvement of precision product pre-production by substantiated choice of NC equipment. *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technologies*, 2014. – No.4 (306). – pp. 70-73.
3. Morozov, V.V., Gusev, V.G. *Parts Machining Programming on Multi-operation Machines: manual* / V.V. Morozov, V.G. Gusev; Vladimir: Publishing House of Vladimir State University. – 2011. – pp. 366. ISBN 978-5-9984-0165-7.
4. Savina, E.S., Gusev, V.G. Time reduction for control program development for NC machines based on CAD ESPRIT system: *Proceedings of the Inter. Scientif. Pract. Conf. "Outlooks in Machining Technology and Equipment Development in Mechanical Engineering"*; Kursk: SWSU, CC University Book, 2016. – pp. 76-79. - ISBN 978-5-9906195-4-8.

Рецензент д.т.н. В.В. Морозов

УДК 621.914

DOI: 10.12737/article_5a5a44ea226d52.98902127

А.М. Козлов, д.т.н.,
(Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, ул. Московская, 30),
Г.Е. Малютин, к.т.н.,
(ОАО «Энергия», Липецкая область, г. Елец, пос. Электрик, 1),
E-mail: kam-48@yandex.ru; malgena@rambler.ru

Расчет траектории инструмента при фрезеровании внутренних поверхностей на станках с ЧПУ

Рассмотрена проблема повышения производительности фрезерования внутренних поверхностей деталей, в том числе зон, оставшихся необработанными после полуступового фрезерования.

Ключевые слова: фрезерование внутренних поверхностей; необработанные зоны; производительность.

Tool path calculation at inner surface milling on NC machines

Modern NC milling machines allow manufacturing complex parts. One of the urgent problems at concave surface milling is rib rounding in the corners connected with the radius of the tool used. The existed methods for rounded rib updating are inefficient. For this reason there is a necessity in the development of a new method for angle formation in concave surfaces with the aid of layer-by-layer milling based on the principle of square rolling by Reuleaux triangle. In the paper presented there is offered a procedure for the calculation of a tool path at the agreed motion of feed drives and a spindle for the finish milling of concave surfaces with small rib rounding in the corners.

Keywords: inner surface milling; unprocessed areas; productivity.

Объемное фрезерование – один из широко распространенных способов обработки поверхностей сложной формы. Конкуренция между предприятиями машиностроительной отрасли ведет к постоянному повышению производительности и снижению стоимости продукции. Достигается это различными способами: назначением рациональных режимов резания [1] и применением усложненных траекторий движений инструмента [2].

Современные фрезерные станки с ЧПУ позволяют изготавливать детали с поверхностями достаточно сложной формы. При весьма широкой номенклатуре изделий обрабатываемых фрезерованием, их можно разделить на детали с выпуклыми и вогнутыми поверхностями. Технологический процесс формирования вогнутых поверхностей имеет ряд проблем, таких как, формирование необработанных зон вблизи дна (рис. 1), при черновой обработке, которые приводят к повышению сил резания при чистовой обработке и непостоянству отжима инструмента [3, 4, 5].

Послойное черновое фрезерование

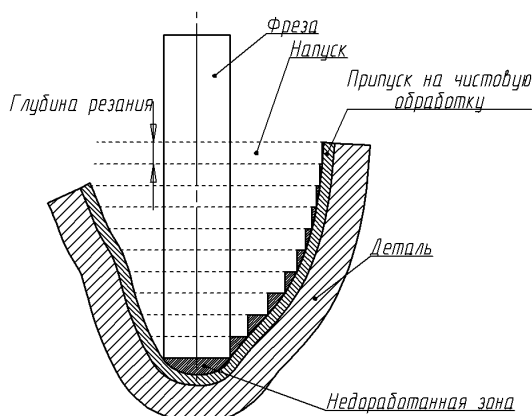


Рис. 1. Формирование необработанной зоны

Не менее актуальной проблемой при послойном фрезеровании вогнутых поверхностей, является скругление ребер в углах, связанных с радиусом применяемого инструмента (рис. 2).

Существует несколько способов доработки скругленных ребер;

- фрезерование инструментом меньшего диаметра,
- обработка (прожигание) на электроэрозионном оборудовании.

Но данные способы низкоэффективны, например, при фрезеровании инструментом с меньшим радиусом ограничением является его вылет и жесткость. Обработка на проволочном вырезном станке производится только на деталях со сквозными поверхностями, а использование прожигного станка требует изготовление электрода, близкого по форме к обрабатываемым впадинам. Все это значительно снижает производительность и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции.

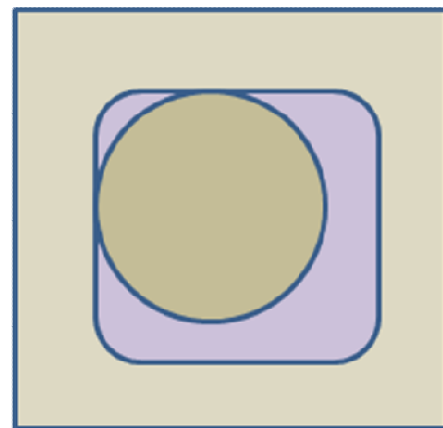


Рис. 2. Формирование скруглений в углах

В последние годы все чаще применяется способ доработки скруглений в углах квадратных отверстий сверлом Гарри Уаттса

(рис. 3), принцип действия которого основан на обкатывании квадрата треугольником Рёло.

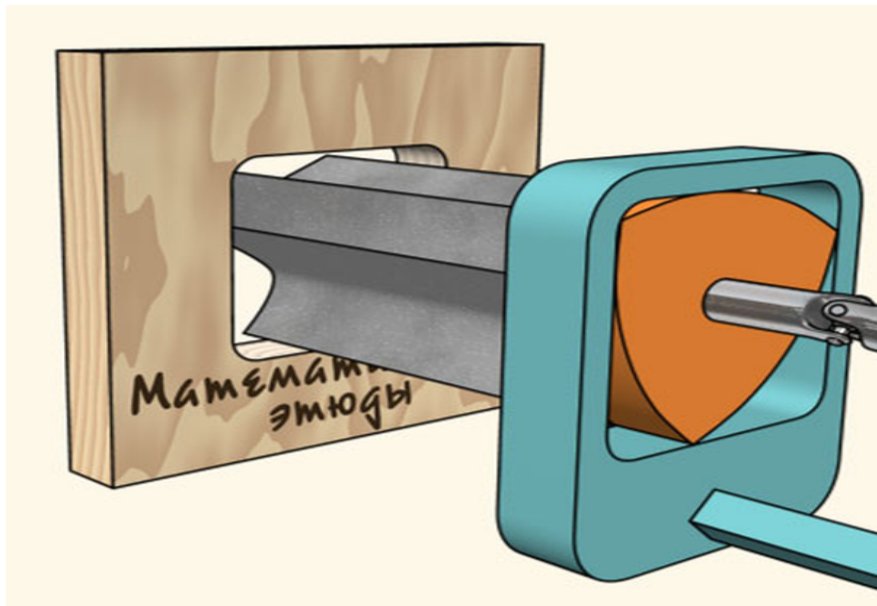


Рис. 3. Формирование квадратных отверстий сверлом Гарри Уаттса

Данный способ значительно производительнее вышеперечисленных, но имеет ряд недостатков: низкая жесткость конструкции; невозможность производить обработку поверхностей сложной формы; при обработке наклонных поверхностей требуется оборудование с управлением по нескольким осям.

По этим причинам, существует необходимость в разработке нового метода формирования углов в вогнутых поверхностях (характерный представитель – паз) послойным фрезерованием, основанным на принципе обкатывания квадрата треугольником Рёло.

Сверло Гарри Уаттса процесс резания производит только в осевом направлении, что ограничивает его применение при обработке наклонных и фасонных поверхностей.

Применение фрезы значительно расширяет область обрабатываемых поверхностей, но при этом обработка должна производиться послойно (в плоскости XY), по сложной траектории.

Треугольник Рёло при вращении в квадрате движется по траектории близкой к окружности, радиус которой определяется по выражению:

$$R = 0,06689 D ; \quad (1)$$

формируя квадрат со стороной:

$$L = 0,866035 D ; \quad (2)$$

в углах квадрата образуется скругление радиусом:

$$r = 0,109568 D , \quad (3)$$

где D – диаметр трехзубой фрезы.

На рис. 4 показан процесс движения инструмента при доработке угла фрезой $\varnothing 20$ мм.

Для обеспечения движения инструмента на станках с ЧПУ необходимо разработать управляющую программу, где задаются координаты траектории относительно нулевой точки. При фрезеровании углов методом обкатки треугольником Рёло, необходимо задать согласованное движение шпинделя с движением стола, следовательно, координаты траектории должны определяться от поворота шпинделя.

При повороте шпинделя на угол A , центр фрезы движется в противоположную сторону, и опережает угол поворота шпинделя в 3 раза:

$$p3 = -3A + 180 . \quad (4)$$

При движении инструмента по оси X координаты точки траектории определяются по выражениям:

$$X = p23 = (H_x - R1 \cdot \sin(p3)) + k \cdot A ; \quad (5)$$

$$Y = (H_y - R1 \cdot \sin(p3)) . \quad (6)$$

где k – коэффициент подачи инструмента на зуб.

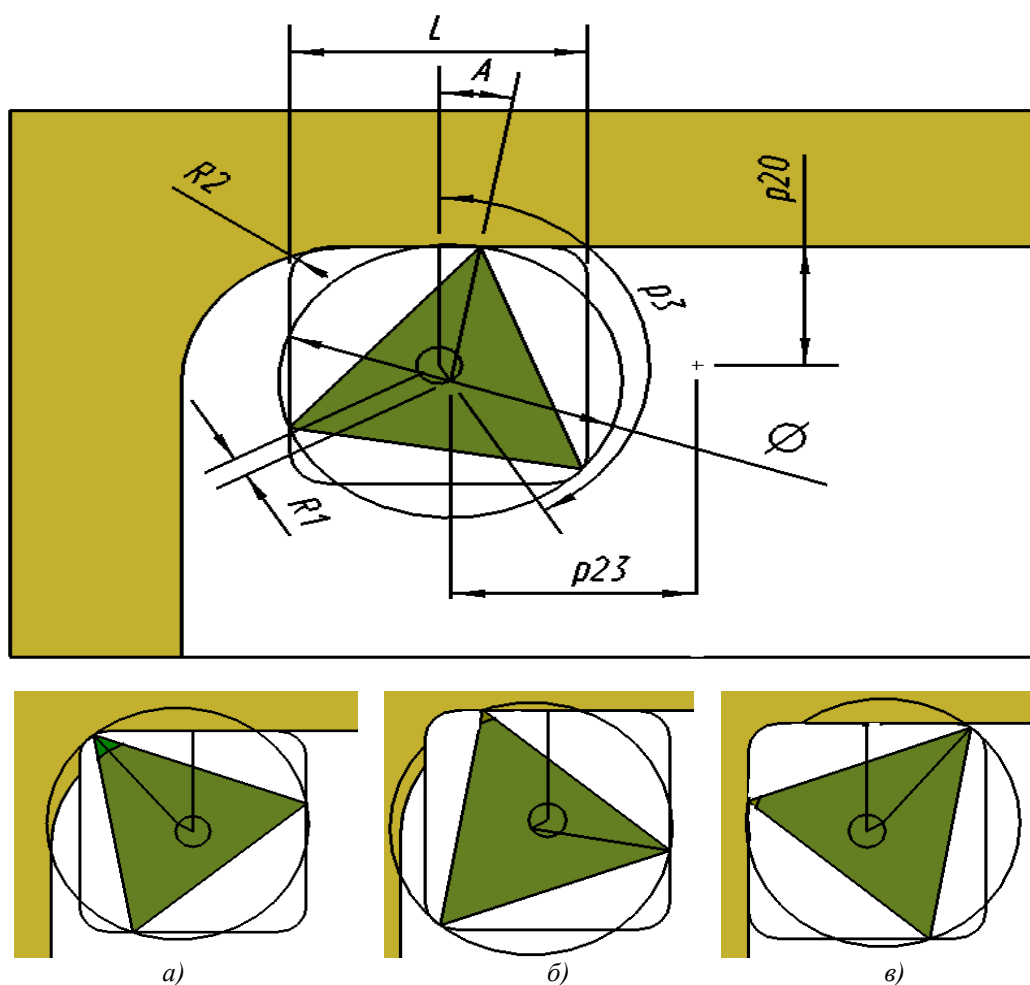


Рис. 4. Обработка угла:

а – начальное положение; б – промежуточное; в – конечное; А – угол поворота фрезы; D – диаметр фрезы; L – сторона квадрата (2); R1 – радиус траектории инструмента (1); R2 – радиус квадрата (3)

Для трехзубых фрез:

$$k = \frac{S_{\text{зуб}}}{120^\circ} \quad (7)$$

Выражения (1) - (7) позволяют определить координаты движения центра инструмента в зависимости от подачи на зуб в согласованности с поворотом шпинделя, что позволяет производить обработку углов вогнутых по

верхностей, инструментом, радиус которого значительно превышает радиус скругления ребер.

На рис. 5 представлена траектория центра инструмента, имеющая форму синусоиды с периодом 120° (значение выбирается для поворота шпинделя). При движении фрезы по оси X в точках периода значения координаты меняется на значение подачи.

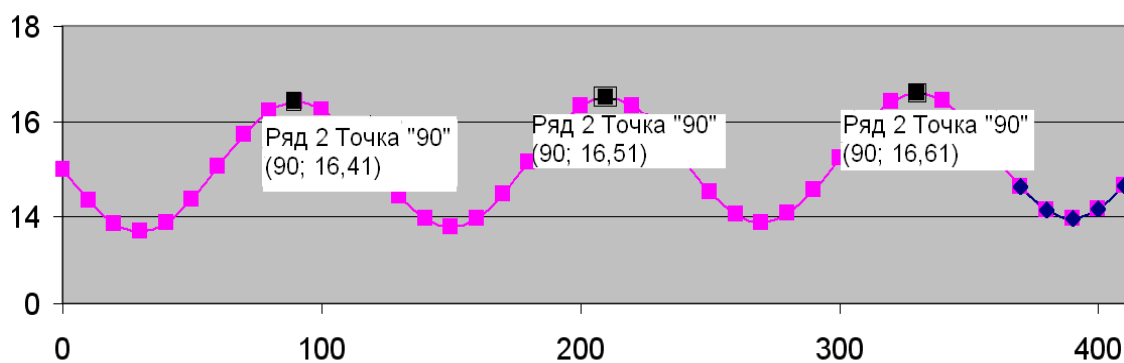


Рис. 5. Траектория инструмента

Проверка предложенного метода производилась на вертикально-фрезерном станке мод. 6Б52Ф3 с системой ЧПУ SIEMENS 802 (рис. 6). На данном станке можно задавать поворот и фиксацию шпинделя на установленный угол командой SPOS=.



Рис. 6. Фрезерование квадратного паза

Эксперимент проводился прямозубой фрезой с числом зубьев $Z = 3$; $D = 20$ мм. Обработывалась сталь 45; глубина на проход $t = 0,2$ мм; подача $S_z = 0,1$ мм/зуб; осевая подача $S = 400$ мм/мин. Фрезеровался паз глубиной 50 мм, со стороной квадрата 50 мм. Время обработки составило 2 мин. При электроэрозионной операции прожигания на станке SO-DICK время обработки составляет 130 мин.

Таким образом, применение стандартной фрезы при перемещении по разработанной траектории позволяет значительно повысить производительность выполнения операции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амбросимов, С.К., Большаков, А.Н. Исследование динамики процесса резания при выходе зуба из зоны обработки при фрезеровании // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – №1. – С. 29–34.
2. Амбросимов, С.К., Вепренцев, О.Ю., Косенков, М.А., Большаков, А.Н. Исследование параметров срезаемого слоя при винтовом фрезеровании со спиралевидной

траекторией // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – №6-3. – С. 3–12.

3. Козлов А.М. Повышение производительности объемного фрезерования необработанных зон. / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Сб. науч. статей V Междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение – основа технологического развития России». Курск. – 2013, С. 307–310.

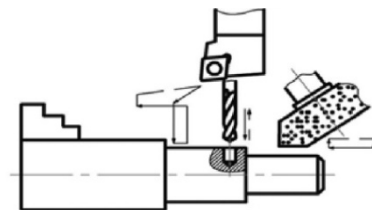
4. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2014. – №6. – С. 39–43.

5. Малютин, Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – №4(306). – С. 74–81.

REFERENCES

1. Ambrosimov, S.K., Bolshakov, A.N. Investigation of cutting dynamics at tooth leaving the area of machining at milling // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology*. – 2010. – No.1. – pp. 29-34.
2. Ambrosimov, S.K., Veprentsev, O.Yu., Kosenkov, M.A., Bolshakov, A.N. Parameter investigation of layer cut at helical milling with spiral path // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology*. – 2011. – No.6-7. – pp. 3-12.
3. Kozlov, A.M. Productivity increase in unprocessed area volume milling. / A.M. Kozlov, G.E. Malyutin // *Proceedings of the Inter. Scientif.-Tech. Conf. "Mechanical Engineering – Basis of Technological Development of Russia"*. Kursk. – 2013, pp. 307-310.
4. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Efficiency increase of 3D finish volume milling on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.6. – pp. 39-43.
5. Malyutin, G.E. Definition of cutting forces at volume finish machining of concave complex surfaces by ball mills on NC machines // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology*. – 2014. – No.4(306). – pp. 74-81.

Рецензент д.т.н. Н.В. Носов



УДК 621.9.02-589.2

DOI: 10.12737/article_5a5a44ea6eb049.83388359

О.А. Макарова, к.т.н.,
В.И. Алексейчук, магистрант,
А.И. Банников, к.т.н.
(Волгоградский государственный технический университет,
400131, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)
E-mail: techmash@vstu.ru

Технологическое обеспечение качества концов труб большого диаметра с полиэтиленовым покрытием

Рассмотрены методы обработки концов труб большого диаметра на АО «ВТЗ». Предложен новый инструмент для удаления покрытия.

Ключевые слова: цилиндрические щетки; покрытие трубы; праймер; слой полиэтилена; качество поверхности.

O.A. Makarova, Can. Eng.,
V.I. Alexeychuk, Master degree post graduate student,
A.I. Bannikov, Can. Eng.
(Volgograd State Technical University
28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400131)

Technological support of quality in large diameter pipes with polyethylene coating

The paper reports the consideration of basic methods used at PC "Volga Pipe Plant" for processing large diameter pipe ends. Each of the methods used at the plant does not meet current requirements of the market that is why the necessity of a new processing method arose.

Keywords: cylindrical brushes; pipe coating; primer; polyethylene layer; surface quality.

В современном мире перед машиностроением, как и всегда, стоят две главных задачи, это повышение качества продукции и снижение ее себестоимости. Для этого необходимо постоянное совершенствование технологического процесса и улучшение культуры производства.

Одной из отраслей машиностроения является трубная, актуальной проблематикой в которой является обработка конца трубы, т.е. снятие полиэтиленового покрытия не повредив праймер. Поверхность определенных видов сварных труб большого диаметра покрывается двумя изоляционными слоями: праймер – эпоксидный слой и слой полиэтилена. Такое покрытие по-

зволяет сохранять поверхность трубы от воздействия внешних сред и продлевать ее срок эксплуатации.

Для решения данной проблемы на производстве существуют две технологии. Рассмотрим подробно каждую из них.

При производстве трубы завод должен следовать ряду технических условий (рис. 1). Необходимо соблюдение геометрических параметров слоев праймера и полиэтилена, а также жестких требований к виду и качеству слоя праймера. Поверхность эпоксидного слоя должна быть заданной толщины и без следов полиэтилена.

Особенностью данной технологии покрытия является то, что праймер уже включает в себя адгезионные материалы, которые позволяют избавиться от необходимости покрывать прай-

мер дополнительным слоем адгезии, что ускоряет и удешевляет технологию производства труб (рис. 2) [3].

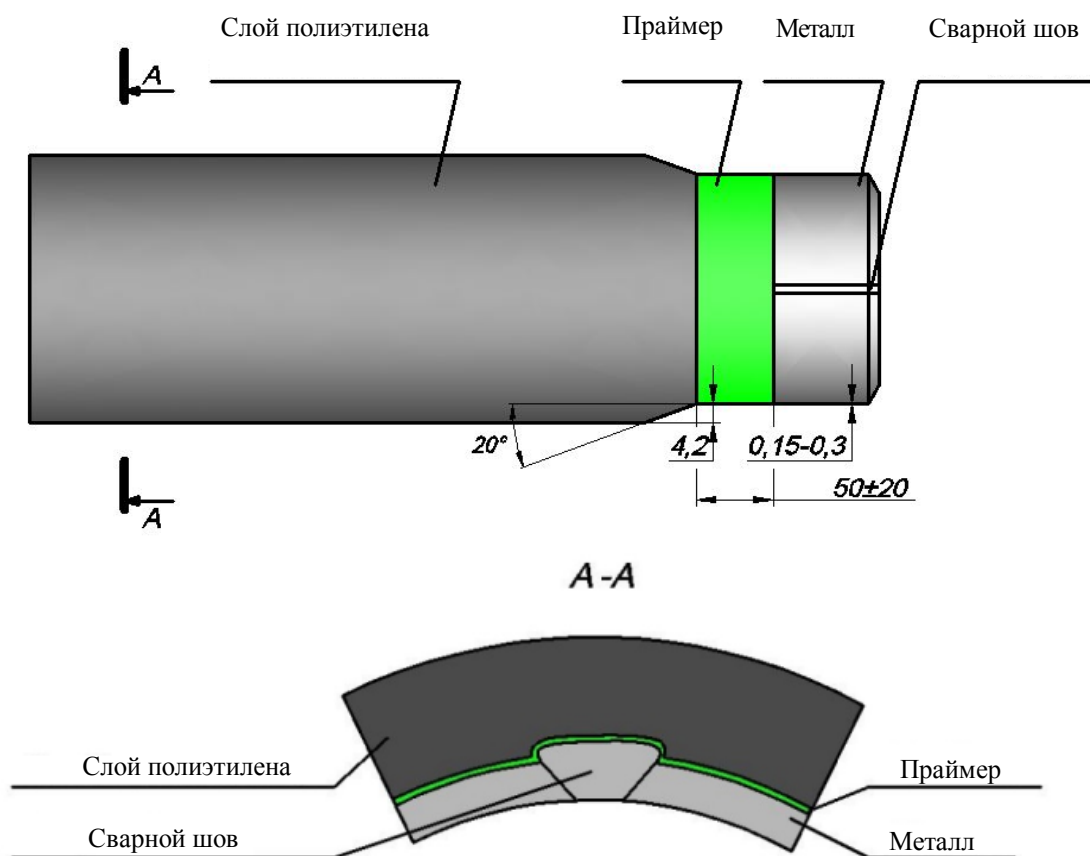


Рис. 1. Внешний вид прямошовной трубы

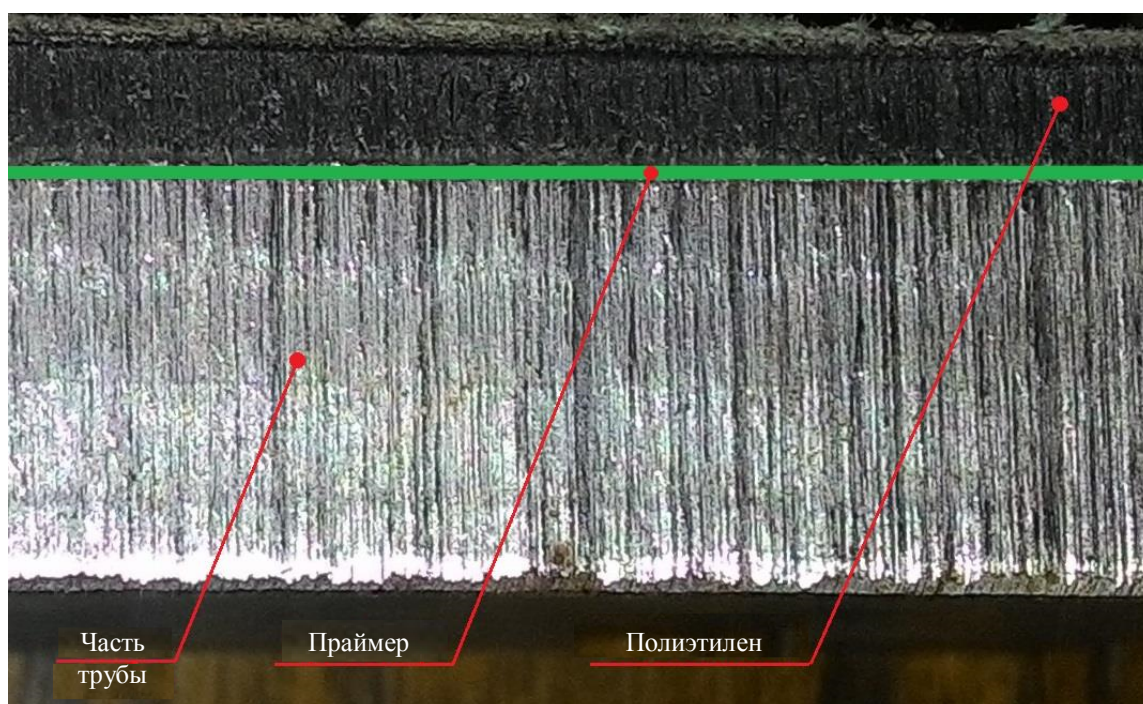


Рис. 2. Экспериментальный образец

На АО «ВТЗ» обработка края трубы ведется двумя методами: обработка гибким ножом и обработка жёсткими жгутиковыми щетками.

Обработка гибким ножом концов труб представлена на рис. 3.

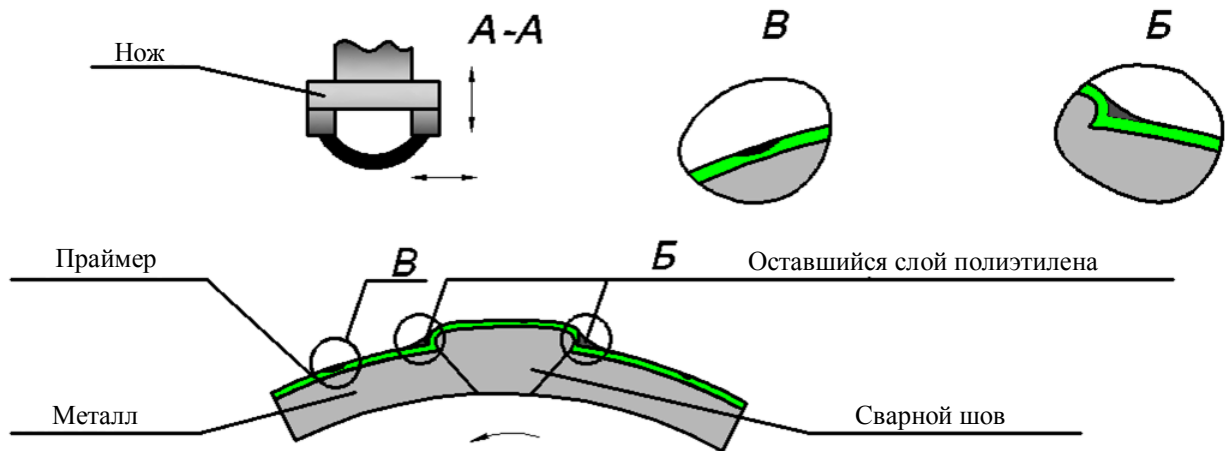


Рис. 3. Схема обработки края трубы гибким ножом

При данном методе обработки достигается высокая производительность, а также простота закрепления инструмента. При этих достоинствах у данного метода есть существенный недостаток: нож не может полностью удалить слой полиэтилена с поверхности праймера и оставляет вкрапления, а в местах стыка сварного шва с трубой сплошную линию эпоксидного слоя (полиэтилена).

Обработка края трубы жгутиковыми щетками показана на рис. 4.

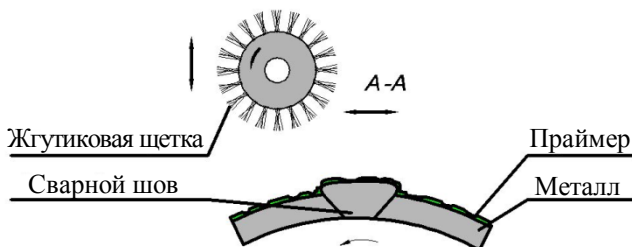


Рис. 4. Схема обработки края трубы жесткой жгутиковой щеткой

При данном методе обработки так же высока производительность, как и у предыдущего метода, сама щетка намного долговечнее ножа, так как имеет высокую стойкость. При обработке жгутиковыми щетками слой полиэтилена снимается полностью, но при этом повреждается праймер, что недопустимо при обработке конца трубы.

Для обработки концов трубы было предложено использовать цилиндрическую однорядную щетку (рис. 5), хотя «обычно» данный инструмент используют для снятия ржавчины и

окалины с поверхностями [4, 5]. При выборе щетки с «мягкими» гибкими элементами-щетинками, можно добиться различных эффектов при обработке полиэтилена и праймера. Щетка может срезать полиэтилен, а поверхность праймера будет полироваться, так как материал более твердый. Для подтверждения возможности срезания цилиндрическими щетками полиэтилена, не затрагивая праймер, авторами была произведена серия экспериментов на вертикально-фрезерном станке мод. 6Р13Ф3.

Для проведения эксперимента АО «ВТЗ» выделил экспериментальные образцы, которые были вырезаны из 5-ти труб одного диаметра и имели одинаковое покрытие и свойства (см. рис. 1). Образцы состояли из металла и изоляционного слоя, состоящего из двух слоев: праймера и полиэтилена (см. рис. 2).

Процесс резанья осуществлялся при частоте вращения шпинделя равной 630 об/мин, при данном числе оборотов обработка происходила за 3 прохода, при этом снимался слой полиэтилена, не затрагивая праймер, поверхность праймера оставалась «чистой», без следов полиэтилена.

Поверхность праймера не была повреждена, это является важным результатом обработки края трубы.

Частота вращения шпинделя была увеличена до 700 об/мин, при данном числе оборотов шпинделя обработка производилась за 2 прохода. Такой процесс приводил не только к полному очищению поверхности, но и ее полировке, что полностью соответствует техническим условиям.

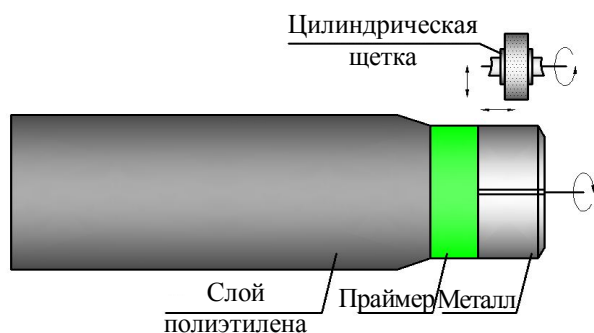


Рис. 5. Схема обработки цилиндрической щеткой края трубы

На следующем этапе эксперимента число оборотов шпинделя в минуту было увеличено до 800, обработка производилась за 2 прохода. При данных оборотах происходило полное снятие полиэтилена, а также частичное царапание праймера, что не соответствует техническим условиям, так как праймер должен быть полностью очищен от полиэтилена и не иметь повреждений поверхности.

Для того чтобы выяснить при каких оборотах будет происходить съем полиэтилена вместе с праймером, обработка производилась при 900 об/мин. При данной частоте обработка занимает 1 проход. При этом полностью снимался полиэтилен и почти полностью праймер. Что совершенно не допустимо по техническим условиям.

Каждое число оборотов опробовано по четырем образцам с пяти труб, результаты были одинаковы при применении данного метода от образца к образцу.

Качество поверхности праймера оценивалось по параметрам шероховатости. Использовался профилометр мод. 130 (рис. 6).

В табл. 1 приведены средние показатели качества, полученные при обработке на различных скоростях резания.

Средние показатели шероховатости при различных скоростях резания

Параметры шероховатости	Число оборотов шпинделя, об/мин			
	630	700	800	900
Ra , мкм	2,14	1,98	3,85	6,14
Rz , мкм	10,5	5,39	16,4	26,4
$Rmax$, мкм	25,3	11,4	25,1	46,1
Sm , мкм	42,6	38	35,1	51,4

Сравнение параметров шероховатости позволяет сделать вывод о существенном влиянии режимов обработки на качество получаемой

поверхности. Поверхность с наименьшей шероховатостью образуется при частоте вращения щетки 700 об/мин. При использовании щетки, как инструмента для обработки трубы, можно выявить такое свойство инструмента: на более «мягком» полиэтилене щетка срезает его, а подходя к праймеру начинается процесс полирования, за счет его более твердой структуры и конфигурации примененного инструмента. Данный режим обработки обеспечивает минимальные значения Ra среди всех замеров, за счет того что поверхность праймера не срезается щеткой, а «выглаживается».



Рис. 6. Внешний вид профилометра мод. 130

Для наглядности приведём внешний вид полученной профилограммы на 700 об/мин (рис. 7). Профилограмма получилась сглаженной, без высоких впадин и выступов, что подтверждает высокое качество.

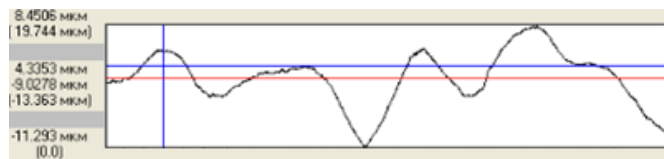


Рис. 7. Профилограмма при 700 об/мин

На режимах 630 и 800 об/мин поверхность имеет большую шероховатость. На данных скоростях параметры, не сильно отличаются друг от друга. Но при 800 об/мин происходит частичное снятие праймера вместе с полиэтиленом, после обработки присутствуют глубокие царапины на поверхности праймера.

При вращении инструмента со скоростью 900 об/мин достигаются максимальные значения всех четырех основных параметров шероховатости, так как на поверхности наблюдаются значительные глубокие риски, образующие обширные впадины до металла.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что наилучшая поверхность края трубы получена при обработке с частотой вращения шпинделя 700 об/мин.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- лучшим инструментом для снятия слоя полиэтилена с конца трубы по ТУ АО «ВТЗ» является цилиндрическая однорядная щетка;
- частота вращения шпинделя оказывает влияние на качество получаемой поверхности;
- анализ экспериментальных данных, полученных с использованием однорядной щетки показал, что лучшее качество поверхности конца трубы обеспечивается на скорости вращения шпинделя 700 об/мин при обработке за два рабочих хода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – OPS PHMSA [Electronic

resource]. URL: <http://www.phmsa.dot.gov> (accessed: 04.09.2013).

2. Aguirre-Vargas, F. / Novel technology to improve adhesion of fusion-bonded epoxy coating. DOW Coating Materials. [Electronic resource] – International conference «Pipeline Coating 2012». – 1 (CD-ROM).

3. Романцев, Б.А., Гончарук, А.В., Вавилкин, Н.М. Трубное производство: учебник. – М.: НИТУ МИСиС, – 2011. – 970с.

4. Пат. 2026119. СССР: Способ обработки цилиндрических изделий [Текст]: МПК В08В1/04. Мусьякин В.Е.

5. Пат. 2145911. РФ: Устройство для очистки наружной поверхности трубопровода [Текст]: МПК В08В009/023. Дьячков А.В.

REFERENCES

1. Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – OPS PHMSA [Electronic resource]. URL: <http://www.phmsa.dot.gov> (accessed: 04.09.2013).

2. Aguirre-Vargas, F. / Novel technology to improve adhesion of fusion-bonded epoxy coating. DOW Coating Materials. [Electronic resource] – International conference «Pipeline Coating 2012». – 1 (CD-ROM).

3. Romantsev, B.A., Goncharuk, A.V., Vavilkin, N.M. *Pipe Production*: textbook. – M.: RTU MISandA, - 2011. – pp. 970.

4. Pat. 2026119. The USSR: *Method for Cylindrical Product Processing* [Text]: IPC V08V1/04. Musyakin V.E.

5. Pat. 2145911. The RF: *Device for External Surface Cleaning in Pipe Line* [Text]: IPC V08V009/023. Diyachkov A.V.

Рецензент д.т.н. Л.М. Гуревич

УДК 621.793. 09

DOI: 10.12737/article_5a5a44e7550297.43103614

А.Н. Шоев, к.т.н.

(Институт технологий и инновационного менеджмента в городе Куляб, Таджикистан)

E-mail: shoev_a@mail.ru

Шлифование и полирование рабочих поверхностей коленчатых валов и кулачков распределительных валов бесконечными алмазными лентами

Рассмотрена технология и инструмент для обработки рабочих поверхностей коленчатых валов и кулачков распределительных валов бесконечными алмазными лентами. Приводятся характеристики бесконечных алмазных лент и их возможности в обеспечении шероховатости и производительности при шлифовании и полировании рабочих поверхностей. Установлена целесообразность обеспечения оптимального криволинейного поперечного профиля кулачков распределительных валов шлифованием бесконечными лентами.

Ключевые слова: коленчатый вал; кулачки; распределительный вал; шлифование; полирование; бесконечные алмазные ленты; шероховатость рабочей поверхности.

Grinding and buffing of work surfaces in crankshafts and cams of camshafts by endless diamond belt

A technology and a tool for processing work surfaces in crankshafts and cams of camshafts by endless diamond belts are considered. The characteristics of endless diamond belts and their potentialities in assurance of roughness and efficiency at work surface grinding and polishing are shown. The purposefulness in assurance of an optimum curvilinear transverse section of cams in camshafts by grinding with endless belts is defined. It is shown, that it is possible to control a curvilinear profile of cams in camshafts at the expense of a belt width and a belt tension. It is based on a theoretical basis of the interaction of a rigid die (cam) with the elastic half-space (belt).

An optimum curvilinearity of the transverse section of a cam ensures the increase of its life.

Keywords: crankshaft; cams; camshafts; grinding; polishing; endless diamond belt; work surface roughness.

Алмазные ленты характеризуются концентрацией алмазов, зернистостью, маркой, родом связки и материалом основы, а также размерами и формами лент. За основу берутся ленты из качественной стали толщиной 0,025...0,1 мм, лавсана, капрона и других материалов. Хорошие результаты при шлифовании рабочих поверхностей шеек коленчатых валов и кулачков распределительных валов двигателей показали ленты марки Р9 на лавсановой ткани с алмазным слоем на каучуковой связке [1].

Производство алмазных лент происходит при помощи связок, содержащих каучук, наносимых на износостойкую лавсановую ткань. Стойкость лент к действию СОЖ увеличивается с повышением жесткости связок. Также освоено производство лент из эльбора на основе шифона (эльбор Л10 – ЛМ28) длиной 500...2000 мм и шириной 60 и 90 мм, и на капроновой основе (эльбор ЛМ5 – ЛМ20) длиной 500...1000 мм и шириной 100 мм [2].

Для абразивных лент вопрос изготовления бесшовных бесконечных основ из КНБ остается открытым, а для алмазных лент эта же проблема решена положительно. Следовательно, нужно улучшать навыки склейки абразивных лент и поэтому данный вопрос требует особого контроля работников промышленности. Безусловно, что любое воздействие на шов должно быть сведено к минимуму [3].

За основу бесконечных алмазных лент и лент с зернами из КНБ берут износостойкую лавсановую рукавную ткань, на которую нанесен алмазоносный слой из алмазной шлифовальной шкурки в виде полос шириной 20 мм [4]. Производительность по съему материала составляет 110...210 мм³/мин при скорости ленты 30 м/с зернистостью 80/63–20/14 и с использованием

различных степеней жесткости – Р1, Р4 и Р5 [1].

Применение охлаждающей жидкости является необходимым условием при работе с алмазными лентами. Также добавление в смесь oleиновой кислоты, веретенного масла 1...2 % и керосина существенно увеличивает производительность процесса.

Расширение производства алмазных, абразивных и эбонитовых лент, также их постоянное усовершенствование создает перспективу для дальнейшего успешного использования процесса шлифования лентой (рис. 1). Например, в решении вопросов производительной обработки с хорошим качеством поверхностного слоя помогает использование лент с упорядоченным положением зерен, а для решения вопросов снятия больших припусков применяются крупнозернистые термостойкие ленты на упругой основе.

Чтобы полировать кулачки распределительных валов, шейки коленчатых валов со снятием припуска 0,001...0,004 мм используют алмазные ленты длиной до 2 м на связках Р1, Р4 и Р9. При этом стойкость алмазной ленты составляет 30...50 тыс. коленчатых валов, также за 20...30 с обработки шероховатость поверхности уменьшается с $Ra\ 0,32\ \mu\text{m}$ до $Ra\ 0,16...0,08\ \mu\text{m}$ [1].

Как показано на рис. 2, использование алмазных лент гарантирует возможность значительно повысить параметры шлифованной поверхности [5].

При шлифовании возможны следующие ситуации в случае взаимного расположения инструмента и обрабатываемого кулачка: ширина кулачка перекрывается инструментом, одинаковая ширина кулачка и инструмента, ширина кулачка не перекрывается инструментом (рис. 3).

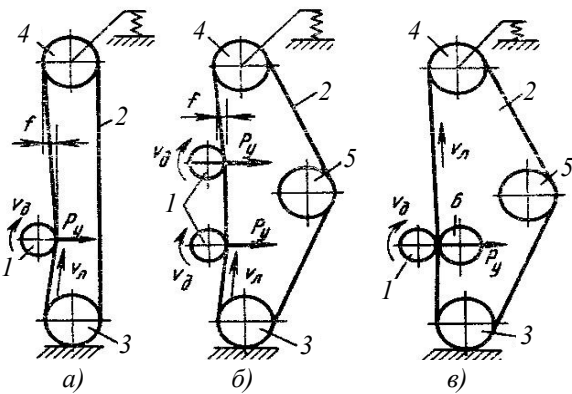


Рис. 1. Схемы обработки бесконечными лентами:
 а – на свободной ветви ленты; б – на свободной ветви ленты с опорным роликом; в – с поджатием ленты к обрабатываемой поверхности заготовки при помощи контактного ролика; 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – лента; 3 – приводной ролик; 4 – натяжной ролик; 5 – опорный ролик; 6 – контактный ролик [3]

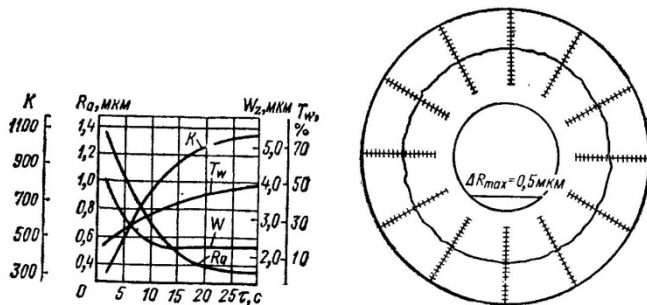


Рис. 2. Параметры шлифованной поверхности при использовании алмазных лент

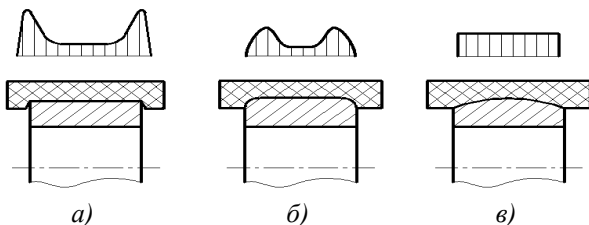


Рис. 3. Распределение давления между эластичным инструментом и деталью:
 а – в начале обработки; б – после образования закруглений; в – после образования выпуклой формы

$$p = \frac{2P \sin[(\pi - 2\varphi_0) \cos \varphi + \sin \varphi \ln \left| \frac{\sin(\varphi + \varphi_0)}{\sin(\varphi - \varphi_0)} \right|]}{\pi a(\pi - 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0)} + \frac{\sin \varphi_0 \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right|}{\pi a(\pi - 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0)}, \quad (1)$$

где $2b$ – ширина области контакта после сжатия ($b > a$); $2a$ – длина прямолинейного отрезка, вдоль которого осуществляется первоначальное касание сжимаемых тел; φ_0 – угол охвата.

В этой формуле значение величины b определяется силой P , формой закругления штампа

и упругими свойствами контактирующих тел. Тот случай, когда довольно гибкий инструмент может перекрыть ширину обрабатываемого кулачка, соприкосновение инструмента и кулачка можно рассматривать как взаимодействие упругой полуплоскости и жесткого штампа. Так как в данном варианте, чем ближе границы участка контакта под штампом, тем большее возрастает давление, следовательно, это приводит к тому, что при обработке по краям кулачка сьем металла будет осуществляться более эффективно, а это может привести к образованию выпуклой формы или радиусов.

Неравномерный сьем металла должен закончиться, когда давление будет распределено равномерно по всей ширине кулачка (рис. 4).

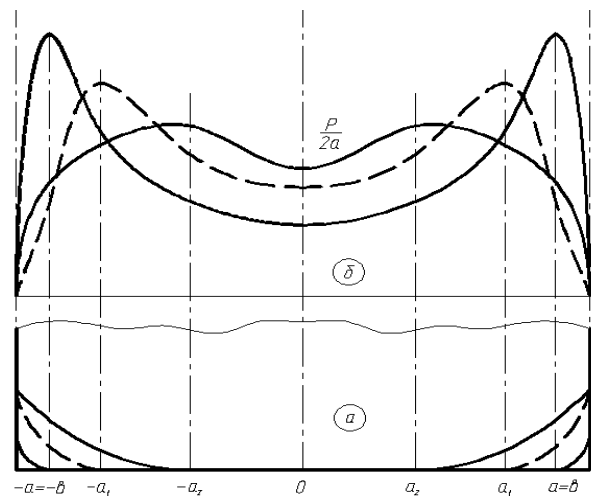


Рис. 4. Зависимость распределения давления от формы обрабатываемой детали:

а – деталь; б – эпюра давления

Чтобы установить закономерность и проанализировать данный вопрос, было определено распределение давления инструмента на кулачок в процессе обработки. Для этого за основу взята формула [4] для определения давления под штампом:

и упругими свойствами контактирующих тел.

Если деталь закругляется при обработке ее гибким инструментом, то величина области контакта $2b$ равна ширине обрабатываемого кулачка.

Произведя ряд математических преобразований формулы (1) получим:

$$p = \frac{2P \frac{a}{b} \left[(\pi - 2\varphi_0) \frac{1}{b} B + \frac{x}{b} \ln \left| \frac{x A + a B}{x A - a B} \right| \right]}{\pi a \left(\pi - 2\varphi_0 - \frac{2a}{b^2} A \right)} + \frac{\frac{a}{b} \ln \left| \frac{\left[1 - \frac{1}{b^2} (AB - ax) \right] \left[1 - \frac{1}{b^2} (AB + ax) \right]}{\frac{1}{b^4} (x^2 A^2 - a^2 b^2)} \right|}{\pi a \left(\pi - 2\varphi_0 - \frac{2a}{b^2} A \right)}, \quad (2)$$

где $A = (b^2 - a^2)^{\frac{1}{2}}$; $B = (b^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}$; x – расстояние от среднего до рассматриваемого сечения; $2b$ – ширина обрабатываемой детали.

В процессе обработки величина a уменьшается, что приводит к изменению распределения давления между деталью и инструментом. По формуле (2) с помощью программных средств определены давления для различных значений a и построены графики (см. рис. 4), из которых видно, что уменьшение a способствует смещению максимального удельного давления к центру. В то же время уменьшается разность давлений на отдельных участках. Таким образом, на уменьшение разности съема металла и уменьшение разности давления на отдельных участках влияют закругления, образующиеся во время обработки, и приводящие, следовательно, к более замедленному процессу образования выпуклой формы.

Таким образом, наряду с уменьшением шероховатости рабочих поверхностей кулачков, шлифование бесконечными лентами позволяет обеспечивать их оптимальную форму за счет ширины ленты и ее натяжения. Это обеспечивает значительное повышение долговечности распределительных валов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Технология машиностроения: учебник. – М.: КНОРУС, 2013. – 336.

2. Древал, А.Е., Скороходов, Е.А., Агеев, А.В. и др. Краткий справочник металлста. – 4-е изд. перераб. – М.: Машиностроение, 2005. – 960 с.

3. Инженерия поверхности детали / кол. авт., под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 230 с.

4. Кашук, В.А., Верещагин, А.Б. Справочник шлифовальщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 408 с.

5. Курносков, А.П. Абразивные инструменты и шлифование. – Челябинск: «Абразивы Урала», 2000. – 96 с.

6. Паньков, Л.А., Костин, Н.В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. – Л.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Engineering Techniques: textbook*. – M.: KNORUS, 2013. – pp. 336.

2. Dreval, A.E., Skorokhodov, E.A., Ageev, A.V. et al. *Short Metal-worker's Reference Book*. – 4-th Edition revised. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 960.

3. *Part Surface Engineering* / authors' team, under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 230.

4. Kashchuk, V.A., Vereshchagin, A.B. *Grinder's Reference Book*. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – pp. 408.

5. Kurnosov, A.P. *Abrasive Tools and Grinding*. – Chelyabinsk: The Urals Abrasives, 2000. – pp. 96.

6. Pankov, L.A., Kostin, N.V. *Processing by Tools with Emery Paper*. – L.: Mechanical Engineering, 1988. – pp. 240.

Рецензент д.т.н. А.Н. Прокофьев

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 10.12.2017. Выход в свет 31.01.2018.

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