

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

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

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:

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

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

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

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

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

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

чл.-кор. 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)

проф. ПРУТЯНУ О. (г. Иаси, Румыния)

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. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

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

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

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Редактор

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

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

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-43337

ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Кожина Т.Д. Расчет функциональных наноструктур покрытий на
основе моделирования процесса их синтеза 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Холодное
выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью 8

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Полетаев В.А., Цветков Е.В. Профильное и контурное шлифование
хвостовиков лопаток компрессора 15

Янюшкин А.С., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Лосев Е.Д.
Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых
сплавов 20

Братан С.М., Сазонов С.Е., Колесов А.Г. Моделирование процессов доводки
абразивными пастами 25

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Чудин В.Н. Газоформовка корпусных гофро-стрингерных панелей
при кратковременной ползучести 30

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

Макаров В.Ф., Туранский Р.А., Григорьева А.В. Технологическое
обеспечение точности изготовления сопловых лопаток турбин при
глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ 34

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

ЗАГОТОВОК

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Медведев М.Н. Экспериментальные
исследования статико-импульсного деформационного протягивания 38

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Кочергин С.А., Моргунюв Ю.А., Саушкин Б.П. Научно-технологическая
технология снижения графообразования при импульсной
лазерной резке листового материала 43

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России
изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

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

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

CONTENTS

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)
m.-corr. 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)
prof. PRUTEANU O. (Iasi, Romania)
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. 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. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

Editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

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

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

E-mail: naukatm@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 № ФС77-43337

SCIENCE INTENSIVE MATERIALS

PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Kozhina T.D. Calculation of functional nanostructures of coatings, based on modeling of their synthesis 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES

IN BLANK PRODUCTION

Dmitriev A.M., Korobova N.V., Tolmachev N.S. Cold extrusion of conical cups with cylindrical cavity. 8

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Poletaev V.A., Tsvetkov E.V. Profile and contour grinding of compressor blade butts 15

Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V., Lobanov D.V., Popov V.Yu., Losev E.D. Surface quality of tungstenfree hard alloys after diamond machining 20

Bratan S.M., Sazonov S.E., Kolesov A.G. Modeling of processes of finishing by abrasive pastes 25

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Chudin V.N. Gas forming of body embossing-stringer panels at short-term creep 30

PROCESSING ON NC MACHINE TOOLS

AND MACHINING CENTERS

Makarov V.F., Turanskyi R.A., Grigor'yeva A.V. Technological support of production accuracy of nozzle blades of turbines at deep multi-axial grinding on NC machine 34

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OFF INISHING

AND HARDENING PROCESSING

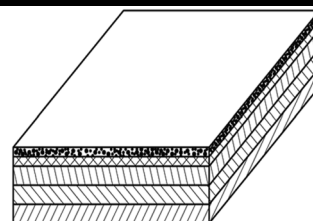
Kirichek A.V., Solov'yov D.L., Medvedev M.N. Experimental research of static-impulse deformative drawing 43

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Science intensive technology of burr formation decrease at pulse laser cutting of sheet material 43

Journal is included into the list approved by The State Commission for academic degrees and titles under the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

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



УДК 621.793.1
DOI: 10.12737/17315

Т.Д. Кожина, д.т.н.
(Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева,
152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53)
E-mail: proectnir@rgata.ru

Расчет функциональных наноструктур покрытий на основе моделирования процесса их синтеза*

Представлена физическая модель ядерной теории распада относительно взаимодействия имплантируемых ионов наноструктурированных покрытий, осаждаемого конденсата и основы. Предложен способ создания модели и математического аппарата расчета оптимального количества слоев функциональных наноструктурированных покрытий инструментальных материалов. Расчет является основой и позволяет определить исходные данные для моделирования и управления процессом синтеза композиционных покрытий различного функционального назначения.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия; ядерная теория распада; метод ионно-плазменного напыления; инструмент.

T.D. Kozhina, d.en.s.,
(P.A. Solov'ev Rybinsk State Aviation Technical University,
152934, Yaroslavl region, Rybinsk, Pushkin street, 53)

Calculation of functional nanostructures of coatings, based on modeling of their synthesis

The physical model of nuclear decay theory, regarding the interaction of implanted ions of nanostructured coatings, the deposited condensate and basis. The way to create model and mathematical tool that delivers calculation of optimal quantity of layers of functional nanostructured coatings of tool materials. The calculation is a basis and allows to determine initial data for modeling and control of synthesis of compositional coatings for various functionality.

Keywords: nanostructured coatings; nuclear theory of decay; ion plasma coating method; tool.

Наиболее эффективным путем повышения износостойкости режущего инструмента является использование композиционных инструментальных материалов с функциональными покрытиями. Работа режущего инструмента происходит в условиях, характеризующихся высоким уровнем термодинамических воздействий, а также в условиях интенсивного абразивного, диффузионного и адгезионного изна-

шивания. Поэтому нанесение на его поверхность многослойных покрытий с нанометрической структурой существенно увеличивает срок службы инструмента и производительность обработки.

Наибольший потенциал для повышения эксплуатационных свойств инструмента заключается в правильном выборе и расчете свойств химического состава и структуры покрытия для конкретных условий работы, а также совершенствовании технологии формирования наноструктурированных износостойких покрытий. Данный тип покрытий формируется таким образом, чтобы внутри многомикронной пленки находилась кристаллическая структура с характерным размером кристаллов.

* Публикация подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 941 «Методологические основы разработки и создания функциональных наноструктур поверхностей и покрытий деталей ГТД, инструмента и технологической оснастки» в рамках базовой части государственного задания.

Вакуумные методы создания функциональных наноструктурированных покрытий на основе процессов конденсации атомов ионной бомбардировкой в сопровождении пучка ионов в последнее время широко используются при производстве высоконагруженных изделий, работающих в условиях интенсивного износа, в частности для изготовления режущего инструмента. Однако при использовании стандартных технологий плазменно-дугового осаждения покрытий возникает несколько проблем, главным образом связанных с качеством и эксплуатационными свойствами режущего инструмента с покрытиями различного состава. Во многих случаях стандартная технология синтеза не обеспечивает достаточной прочности сцепления покрытия с основой, что приводит к интенсивному преждевременному разрушению покрытия.

Проведенные в РГАТУ исследования по идентификации структуры и состава износостойких покрытий позволили создать эффективную технологию формирования покрытия однородной толщины без сколов и дефектов методом дуального магнетронного распыления с высокой ионизацией плазмы. Технология позволяет практически полностью устранить недостатки стандартных вакуумно-дуговых процессов, связанных с формированием микрокапельной составляющей и микродуг.

Синтез наноструктурированных покрытий реализуется поэтапно при использовании гаммы технологических средств на базе вакуумной камеры UniCoat 400: бомбардировки осаждаемого конденсата металло-газовыми ионами; смешивания частиц осаждаемого конденсата воздействием ассистирующего потока высокоэнергетических газометаллических ионов; понижения температуры синтеза покрытия и соответствующего сдерживания роста его зерен за счет увеличения степени ионизации металло-газовых ионов конденсируемого потока; изменения времени при планетарном перемещении рабочих поверхностей изделия относительно осаждаемого потока металло-газовых ионов.

Технология является окончательной операцией и применяется для готового к работе инструмента. После переточки инструмента его режущие свойства в определенной степени сохраняются, покрытие полностью восстанавливается при повторном проведении процесса его формирования. Снижаются затраты на приобретение нового режущего инструмента

за счет повышения его стойкости, увеличения ресурса. Появилась возможность работать на интенсивных режимах обработки, повышая тем самым производительность станочного парка. Решается проблема СОЖ за счет применения режимов сухого резания. Повышается качество обрабатываемой поверхности. Технология наиболее эффективна для труднообрабатываемых материалов. Однако и при ее реализации так же возникает ряд проблем.

Наиболее проблемным является формирование характерной для процессов конденсации ионной бомбардировкой столбчатой структуры покрытия, так как подобные покрытия относительно плохо сопротивляются изнашиванию в условиях внешнего нагружения контактных площадок инструмента для достаточно широкого диапазона условий резания. В связи с этим являются актуальными вопросы разработки и оптимизации технологии синтеза покрытий на основе процессов конденсации ионной бомбардировкой, отвечающих по составу, структуре и другим параметрам условиям термомеханического нагружения инструмента.

Управление структурой покрытий можно осуществлять путем ассистирующей импульсной бомбардировки осаждаемого конденсата ионами с энергией до 200 кэВ. При осаждении покрытий с одновременной непрерывной или импульсной бомбардировкой конденсата металлическими ионами может быть достигнуто несколько эффектов, связанных с термомеханической активацией поверхности основы (субстрата) и осаждаемого конденсата, а также перемешивания осаждаемых ионов бомбардирующими ионами, которые проявляются в виде возможностей: нанесения плотных покрытий с однородной структурой и высокой прочностью сцепления покрытия с основой, включая композитные и многослойные покрытия, без внешнего нагрева при умеренной температуре, что исключает отпуск, коробление, затупление режущих кромок инструмента; снижения внутренних напряжений в покрытии и на границах с основой; уменьшения размеров зерен материала покрытия; непрерывного легирования формируемого покрытия по всей толщине увеличения пластичности материала покрытия без изменения твердости.

Разработка модели процесса ассистируемого синтеза. Для выяснения влияния импульсного воздействия на осаждаемый конденсат высокоэнергетическими ионами металлов и газов рассмотрим физическую модель

ядерной теории распада относительно взаимодействия имплантируемых ионов, осаждаемого конденсата и основы (рис. 1).

В соответствие с принятой моделью процесса ассистируемого синтеза в результате ионной бомбардировки генерируемые ионы металла, имеющие высокую энергию, частично имплантируются в поверхность (в основу, формируемые слои покрытия и т.д.), частично распыляются по поверхности. Адсорбированные окружающие атомы газа могут десорбировать или стимулировать химическую реакцию с поверхностными атомами. При прохождении через окружающие газы некоторые из ионов нейтрализуются системой коллективных разрядов и, таким образом, не входят в эту систему. Бомбардирующий поток высокоэнергетических ионов также содержит электроны из нейтрализованного пространством разряда, которые отклоняются от пароионного потока электростатическим полем нейтрализатора в цилиндре Фарадея.

Представленная качественная физическая модель процесса ассистируемого синтеза дает возможность в первом приближении выявить основные причины и уровень влияния бомбардирующих ионов на формирование структуры слоев покрытия и состояние границ раздела основа—покрытие с учетом активного взаимодействия бомбардирующих ионов и осаждаемого конденсата.

Анализ представленной модели процесса ассистируемого синтеза позволяет оценить основные возможности процессов ассистируемого вакуумно-дугового синтеза в сравнении со стандартными процессами.

Процедуры нанесения покрытия повторяются с целью нанесения количества слоев покрытия, обеспечивающего получение объемно упорядоченной структуры. Поэтому актуальным является определение оптимального числа этих слоев. Для решения этой задачи необходимо разработать математическую модель формирования сплошности покрытия.

Разрушение газотермических покрытий происходит в основном по границе раздела покрытие—поверхность изделия или по границе между слоями, образованными за несколько проходов «распылителя». Таким образом, наиболее «слабым» является первый «монослой» покрытия, условия формирования которого характеризуются, в первую очередь, следующими средними параметрами: температурой основы; температурой и скоростью наносимых частиц.

Для вычисления указанных параметров необходимо иметь данные о вероятности попадания наносимых частиц в первый «монослой» покрытия.

Рассмотрим общий случай заполнения частицами какого-либо k -го монослоя покрытия. Получим выражение для расчета плотности ве-

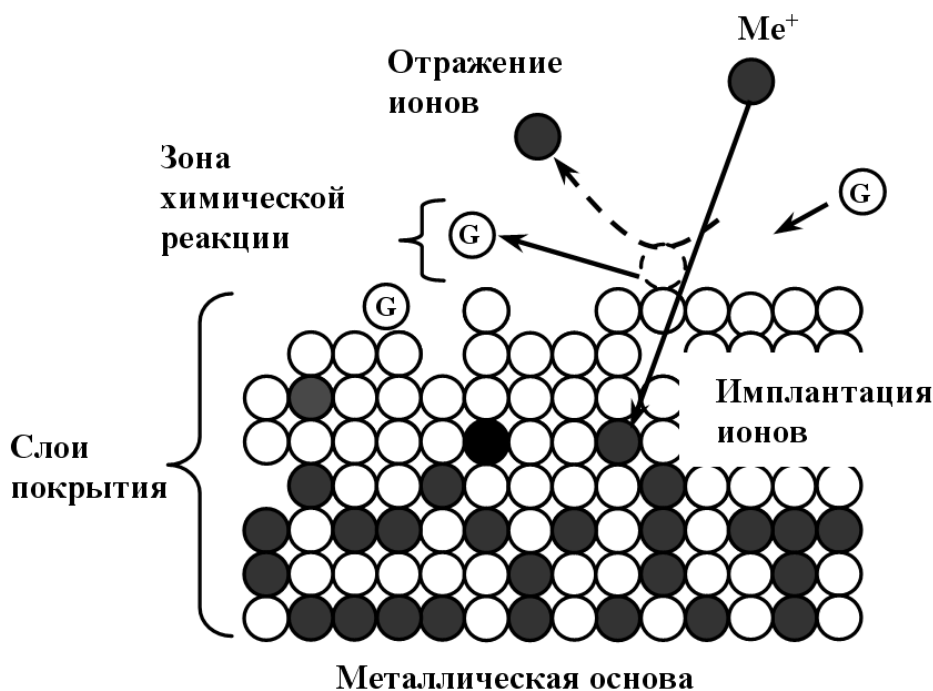


Рис. 1. Модель процесса ассистируемого синтеза: Me – ионы металла; G – атомы газа

роятности $P_{k-1}(x, y, t)$ того, что к моменту времени t попадания частицы в точку с координатами (x, y) в эту точку уже успели попасть $k-1$ частица.

Как известно, поток событий, связанный с попаданием частиц на поверхность, является стационарным пуассоновским. В результате, для вероятностей P_0, P_1, \dots, P_{k-1} в неподвижной системе координат справедлива система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -j_s P_0, \\ \frac{dP_1}{dt} = -j_s (P_0 - P_1), \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_{k-1}}{dt} = -j_s (P_{k-2} - P_{k-1}), \end{cases} \quad (1)$$

где j_s – средняя (за единицу времени) плотность числа событий, заключающихся в попадании частицы на подложку и занимаемая ею после затвердевания некоторой средней площади.

Обозначив через γ среднее число частиц, попадающих на основу в единицу времени, для j_s можно записать:

$$j_s(x, y, t) = \gamma \bar{S} \omega(x, y, t). \quad (2)$$

Рассмотрим установившийся режим. В этом случае удобно использовать движущуюся вместе с «распылителем» систему координат:

$$\frac{dP_i}{dt} = -\vartheta \frac{dP_i}{dx'} + \vartheta \frac{dP_i}{dt'}. \quad (3)$$

Таким образом, поскольку при установившемся режиме $\frac{dP_i}{dx'} = 0$ система уравнений (1) в подвижной системе принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dx'} = \frac{j_s P_0}{\vartheta}, \\ \frac{dP_1}{dx'} = \frac{j_s}{\vartheta} (P_0 - P_1), \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_{k-1}}{dx'} = \frac{j_s}{\vartheta} (P_{k-2} - P_{k-1}), \end{cases} \quad (4)$$

Для решения системы (4) воспользуемся следующими исходными условиями:

$$P_0|_{x \rightarrow \infty} = 1; \quad P_i|_{x \rightarrow \infty} = 0. \quad (5)$$

Физический смысл условия (5) очевиден: далеко впереди «распылителя» частицы, направляемые на поверхность обрабатываемого изделия отсутствуют. Последовательно интегрируя (4), с учетом (5), получаем:

$$P'_k = \frac{I'_k}{k!} \exp(-I), \quad (0 \leq k' \leq k-1) \quad (6)$$

$$I = \int_x^\infty \frac{j_s}{\vartheta} dx = \frac{\gamma \bar{S}}{2\sqrt{2\pi} \vartheta \sigma_p} \exp\left(\frac{-y'^2}{2\sigma_p^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{-x'}{\sigma_p \sqrt{2}}\right), \quad (7)$$

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - \operatorname{erfc}(z); \quad \operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z_1^2) dz_1, \quad (8)$$

где σ_p – эффективное сечение, характеризующее вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество происходит его реакция. Единица измерения эффективного сечения – барн (1 барн = 10^{-28} м²).

Применительно к первому монослою покрытия зависимость (6) упрощается и принимает вид:

$$P_0 = \exp\left\{-v \exp\left(\frac{-y'^2}{2\sigma_p^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{-x'}{\sigma_p \sqrt{2}}\right)\right\}, \quad (9)$$

$$\text{где } v = \frac{\vartheta_0}{\vartheta}; \quad \vartheta_0 = \frac{\gamma \bar{S}}{2\sqrt{2\pi} \vartheta \sigma_p}. \quad (10)$$

Для удобства последующего анализа условий формирования первого монослоя покрытия рассмотрим более подробно комплексный параметр ϑ_0 . Поскольку

$$\vartheta = \frac{G}{m}, \quad (11)$$

где m – средняя масса частиц, а G – производительность процесса их нанесения, перепишем в следующем виде:

$$\vartheta_0 = \frac{G \bar{S}}{2\sqrt{2\pi} \vartheta \sigma_p m}. \quad (12)$$

Далее предполагаем, что наносимая частица до соударения с основой представляла собой сферу диаметром d_p . А после деформации об основу и затвердевания стала цилиндром высотой h и диаметром D . В этом случае из равенства объемов сферы и цилиндра следует:

$$D = d \left(\frac{2D}{d}\right)^{1/3} \quad (13)$$

Экспериментально установлено, что

$$h/D = 0,05 \dots 0,2,$$

а, следовательно,

$$1,5 d_p < D < 2,4 d_p,$$

т.е. D меняется незначительно. Поэтому, полагая $D \approx 2d_p$, получаем

$$\frac{\bar{S}}{m} \approx \frac{6}{\rho_p d_p} \quad (14)$$

и для ϑ_0 имеем:

$$\vartheta_0 = 1,2 \frac{G}{\rho_p \bar{d}_p \sigma_p}, \quad (15)$$

где \bar{d}_p – средний диаметр наносимой частицы до соударения; ρ_p – плотность наносимого материала.

Выражение (15) содержит легко вычисляемые экспериментально параметры и позволяет с учетом (8) рассчитать вероятность того, что частица наносимого материала попадет на подложку и займет среднюю площадь \bar{S} . Это позволяет оценить сплошность слоя и посредством математической процедуры оптимизации по эффективному сечению определить количество слоев, необходимых для формирования гетерогенной структуры покрытия.

Моделирование и расчет структуры (в данном случае количества слоев) покрытий, наносимых в процессе асистируемого вакуумно-дугового синтеза, позволяет: легировать покрытие любыми элементами (внедрения) с образованием структур (сплавов), не предсказываемых равновесными диаграммами состояния; создавать условия для обеспечения прочных адгезионных связей в системе основа—покрытие и, таким образом, повышать качественные характеристики инструмента с покрытием; резко снижать температуру рабочих процессов синтеза покрытий, различных по составу и структуре, что заметно расширяет номенклатуру инструментальных материалов, на которые можно наносить покрытия; производить легирование покрытий с контролируруемыми параметрами свойствами.

Заключение

Представленная математическая модель может быть использована для различных типов наноструктурированных покрытий, в частности:

- металлических покрытий для упрочнения поверхности (например, Cr , Ni , Mo , Zr , Hf);
- сверхтвердых соединений металлов (нитриды Ti , CrN , HfN и др.), в том числе сложного состава и на основе интерметаллидов

$((TiAl)N+CrN)$; $(TiN + ZrN + CrN)$);

- композиционных многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины (подобные структуры наиболее адаптированы к сопротивлению микроразрушению в условиях повышенных термомеханических напряжений, действия активных физико-химических процессов и имеют лучшие показатели по сопротивляемости изнашиванию в указанных условиях);
- многослойных антифрикционных покрытий с подслоем из твердого материала (TiN и др.) и твердой смазкой на поверхности.

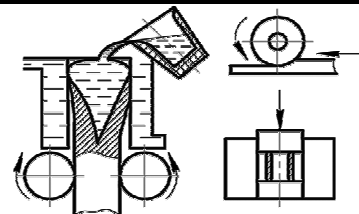
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кожина Т.Д.** Свойства нанокompозитных покрытий, полученных методом магнетронного распыления / Т.Д. Кожина, А.Е. Сергеев, В.Ю. Ерошков / АКТUALNI VYMOZENOST VEDY -2011/ Dil 20/ Technickevedy/ Moderniinformacnietechnologie, 2011. С. 11 – 15.
2. **Kozhina T.** Development of nanostructured coatings for tools and tooling applied in aircraft gas turbine engine part cutting / T. Kozhina, V. Eroshkov. Journal "Scientific Israel – Technological Advantages", Vol.12, 3, 2010.
3. **Richter A.** Aluminum-titanium-nitride tool coatings continue to evolve. Cutting tool engineering. 2003. Vol.55. №1.
4. **Lina J.** Surface & Coatings Technology / JianliangLina, John J. Moorea 1, BrajendraMishraa, MalkiPinkasa,d, William D. Sproulb, J.A. , 202 (2008). 1418 –1436.
5. **Суздаев И.П.** «Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. 592 с.

REFERENCES

1. Kozhina T.D., Sergeev A.E., Eroshkov V.Yu. Properties of nanocomposite coatings, obtained by magnetron sputtering. АКТUALNI VYMOZENOST VEDY – 2011. Dil 20. Technickevedy.Moderniinformacnietechnologie, 2011. Pp. 11–15.
2. Kozhina T. Development of nanostructured coatings for tools and tooling applied in aircraft gas turbine engine part cutting / T. Kozhina, V. Eroshkov/, Journal "Scientific Israel – Technological Advantages", Vol.12, 3, 2010.
3. Richter A. Aluminum-titanium-nitride tool coatings continue to evolve. Cutting tool engineering. 2003. Vol.55. №1.
4. Lina J. Surface & Coatings Technology / JianliangLina, John J. Moorea 1, BrajendraMishraa, MalkiPinkasa,d, William D. Sproulb, J.A. , 202 (2008). 1418 –1436.
5. Suzdalev I.P. Nanotechnology: physics and chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials. Moscow: KomKniga, 2006.592 p.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов



УДК 621.777.24
DOI: 10.12737/17316

А.М. Дмитриев, чл.-кор. РАН,
Н.В. Коробова, д.т.н.,
Н.С. Толмачев, заведующий научно-исследовательской лабораторией
(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 3а)
E-mail: mt-6@yandex.ru

Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью

Представлены методика и результаты исследования обратного выдавливания заготовки цилиндрическим пуансоном в конической расширяющейся матрице. Построена модель для определения удельной силы выдавливания. Описан разработанный технологический процесс и приведена конструкция штампа, специализированного на холодное выдавливание.

Ключевые слова: деталь типа стаканов с фланцем; внешняя поверхность расширяющаяся коническая; внутренняя поверхность цилиндрическая; сталь малоуглеродистая; выдавливание холодное двухходовое в одной матрице; штамп для холодного выдавливания.

A.M. Dmitriev, m.-cor. RAS,
N.V. Korobova, d.en.s.,
N.S. Tolmachev, head of scientific research laboratory
(Moscow State Technical University «STANKIN», 127055, Moscow, Vadkovskiy lane, 3a)

Cold extrusion of conical cups with cylindrical cavity

The method and results of the study of reverse extrusion of billet by cylindrical punch in a conical expanding matrix are described. The mathematical model, which we developed for the determination of specific extrusion force, is described too. The study by statistical method verified the adequacy of the model. This model made possible to assess the resistance of punches and showed the ability to produce deformation of a billet made of low carbon steel without heating. The developed process includes the operation of segmenting of the cylindrical workpieces from bar, heat treatment, lubrication and extrusion of the workpieces. The two-way cold extrusion of a billet is produced in a matrix alternatively by two punches. The design of the stamp is described. The stamp is specialized for reverse extrusion of a billet. In its construction the moving mechanism of action of the two alternately punches in one matrix is used.

Keywords: parts of the type of cup with a flange; outer expanding conical surface; inner cylinder surface; low carbon steel; cold two-way extrusion in single matrix; stamp for cold extrusion.

В машиностроении применяются детали, для которых разработан процесс производства их поковок холодным выдавливанием [1]. Изготовленная штампованная поковка приведена на рис. 1. В МГТУ «СТАНКИН», на протяжении ряда лет проводятся научные исследования, позволяющие разрабатывать технологические процессы холодной объемной штамповки стальных заготовок выдавливанием [2 – 6].

В частности, установлено, что поковки рассматриваемого типа целесообразно штамповать с применением последовательности формоизменяющих операций, показанной на рис. 2.



Рис. 1. Поковка, изготовленная холодным выдавливанием
(материал – сталь 20 (ГОСТ 1050-74))

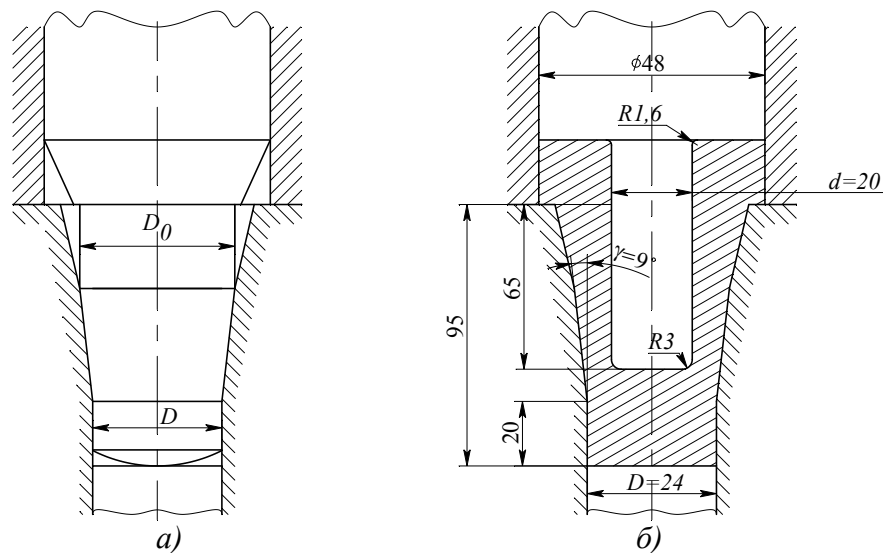


Рис. 2. Переходы штамповки поковки конического стакана с цилиндрической полостью

На первом переходе (рис. 2, а) проводят прямое выдавливание в конической матрице цилиндрической прутковой заготовки с уменьшением ее диаметра от D_0 до D . На втором переходе из показанного на рис. 2, а полуфабриката в той же матрице проводят обратное выдавливание стакана, которое завершается его закрытой объемной штамповкой. В результате (рис. 2, б) окончательно заполняется полость матрицы, высаживается фланец и оформляется верхний торец поковки.

Операция обратного выдавливания заготовки цилиндрическим пуансоном в конической расширяющейся матрице не нашла достаточного отражения в литературе. По результатам ранее проведенных исследований максимальная величина удельной силы, действующей на пуансон при выдавливании на этой операции существенно меньше, чем удельная сила при выдавливании стакана с цилиндрическими поверхностями, имеющими диаметры D и d [7].

Однако поскольку на заключительной стадии этого выдавливания осуществляется штамповка фланца (см. рис. 2, б), заключительная стадия штамповки характеризуется наибольшей величиной деформирующей заготовку силы.

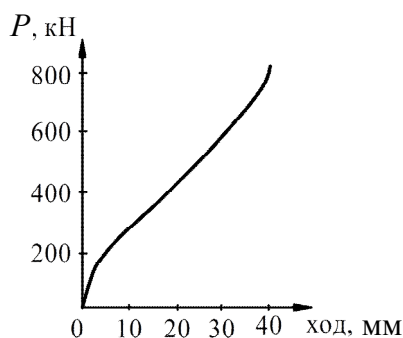


Рис. 3. График изменения силы по ходу внедрения пуансона в заготовку

Возрастающее в результате штамповки фланца гидростатическое давление в заготовке приводит к повышению силы, действующей на нижний торец пуансона (рис. 3). В качестве удельной силы q оценивают силу, действующую на нижний торец, деленную на площадь торца пуансона. Возможность реализации операции холодного выдавливания ограничивается усталостной прочностью пуансонов, которая связана с удельной силой, действующей на торец пуансона кривой, приведенной на рис. 4 [8].

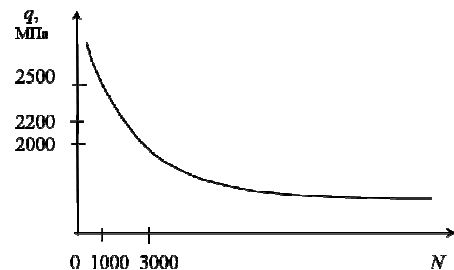


Рис. 4. Кривая усталостной прочности пуансонов из стали P6M5: q – удельная сила; N – число циклов штамповки до разрушения пуансона

В целях построения [9] математической модели, описывающей зависимость относительной (по отношению к напряжению текучести штампуемого материала) удельной силы выдавливания от относительного радиуса $R=D/d$, а также угла конусности матрицы γ , проведен следующий эксперимент. При постановке эксперимента факторы R и γ варьировали на трех уровнях каждый. Уровни варьирования факторов приведены в таблице. Был использован план главных эффектов, включающий в себя 9 опытов.

Заданная математическая модель имеет следующий вид:

$$q/\sigma_s = b_0 + b_1 R + b_2 \gamma + b_{11} R^2 + b_{22} \gamma^2. \quad (1)$$

План эксперимента в натуральном и кодированном масштабах и величины экспериментального и расчетного значений относительной удельной силы выдавливания

№ опыта	R	$\gamma, ^\circ$	x_0	x_1	x_2	z_1	z_2	q/σ_s	
								Экспериментальное	Расчетное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,2	7	1	-1	-1	1	1	3,6	3,8
2	1,6	7	1	0	-1	-2	1	3,3	3,27
3	2,0	7	1	1	-1	1	1	2,9	2,93
4	1,2	8	1	-1	0	1	-2	3,6	3,63
5	1,6	8	1	0	0	-2	-2	3,1	3,1
6	2,0	8	1	1	0	1	-2	2,9	2,77
7	1,2	9	1	-1	1	1	1	3,6	2,57
8	1,6	9	1	0	1	-2	1	3,0	3,03
9	2,0	9	1	1	1	1	1	2,7	2,7

Матрица плана эксперимента в натуральном масштабе приведена во 2-м и 3-м столбцах таблицы. Выдавливание проводили в штампе со сменными матрицами и пуансонами, установленном на универсальной испытательной машине INSTRON (600 кН), с осуществлением компьютерной записи изменения силы по ходу деформирования заготовки.

Удельную силу, действующую на торец пуансона, определяли компьютерным моделированием [4]. Также использовали подкладные рельефные датчики (такowymi являлись старые бронзовые монеты СССР).

Предварительно с помощью инструментального микроскопа на монете измеряли ширину букв какой-либо из надписей. Затем проводили тарировку датчиков. Для этого монеты осаживали между закаленными плитами с плоскими торцами. Осадку проводили до достижения величин сил, равных 50, 100, 150 кН и т.д. У каждой монеты, осаживаемой при заданной, одной из указанных, силе на инструментальном микроскопе вновь измеряли ширину букв той же надписи, для которой она была измерена до осадки монеты.

По результатам замеров был построен тарировочный график зависимости изменения ширины букв от величины удельной деформирующей силы. При этом удельную силу определяли как частное от деления полной силы осадки на площадь монеты в целом.

В дальнейшем по центру торца, выдавливающего полость пуансона, устанавливали такую же монету. После окончания выдавливания на стороне монеты, обращенной к торцу пуансона, на инструментальном микроскопе измеряли ширину букв той же надписи, что и при тарировке. Нанеся изменение, по сравнению с исходной монетой, этой измеренной ширины букв на соответствующую ось построенного ранее тарировочного графика, по проек-

ции соответствующей точки графика на другую его ось определяли величину действовавшей при выдавливании удельной силы.

Выдавливали заготовки с диаметрами $D_0 = 30$ мм и $D = 24$ мм и углами конусности γ , соответствующими матрице плана (см. таблицу). Заготовки из стали 20 были отожжены по режиму, указанному в статье далее. После отжига заготовки были протравлены в кислоте с целью удаления окалины, после чего осуществлялось их фосфатирование и омыливание. Напряжение текучести материала заготовок σ_s для определения удельных сил выдавливания установлены по диаграмме истинных напряжений, построенной по результатам испытания образцов на сжатие.

Результаты проведенных опытов приведены в 9-м столбце таблицы.

Для оценки воспроизводимости эксперимента 5-й опыт был продублирован четыре раза. Получены следующие результаты: 3,05; 3,1; 3,1; 3,15. Дисперсия опыта рассчитана по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{g=1}^n (y_g - \bar{y})^2}{f_1},$$

где y_g – результат g -ого повтора опыта; \bar{y} – среднее арифметическое значение зависимой переменной при n повторах опыта; число степеней свободы $f_1 = n - 1$. Получено $S_y^2 = 0,0017$ (при числе степеней свободы $f_1 = 3$).

Для обработки результатов эксперимента был совершен переход к кодированному масштабу, в котором матрица плана симметрична и ортогональна. В кодированном масштабе модель (1) имеет следующий вид:

$$\frac{q}{\sigma_s} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} z_1 + b_{22} z_2, \quad (2)$$

где x_1 – линейная функция от R ; x_2 – линейная функция от γ ; z_1 – квадратичная функция от R ;

z_2 – квадратичная функция от γ .

Формулы, связывающие R и γ с x_1, x_2, z_1 и z_2 , следующие:

$$x_1 = \frac{5(R-1,6)}{2}; \quad x_2 = \gamma - 8; \quad z_1 = 3\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right); \quad (3)$$

$$z_2 = 3\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right).$$

План эксперимента в кодированном масштабе представлен в столбцах таблицы с 4-го по 8-й.

Коэффициенты модели (2) рассчитаны по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (4)$$

где i – номер фактора; u – номер опыта; N – число опытов плана.

Дисперсии оценок коэффициентов определены по формуле

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N \sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (5)$$

где i – индекс коэффициента; u – номер опыта в матрице плана.

Получены следующие оценки коэффициентов:

$$b_0 = 3,2; \quad b_1 = -0,433; \quad b_2 = -0,117; \quad b_{11} = 0,033; \quad b_{22} = 0,017.$$

Их дисперсии:

$$S_{b_0}^2 = 0,00019; \quad S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = 0,00028;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = 0,000094,$$

$$\text{откуда } S_{b_0} = 0,0138; \quad S_{b_1} = S_{b_2} = 0,0167;$$

$$S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = 0,0097.$$

Доверительные интервалы оценок коэффициентов определены по формуле

$$\Delta_{bi} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{bi}, \quad (6)$$

где $t_{\alpha; f_1}$ – табличное значение критерия Стьюдента, взятое в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы при определении дисперсии опыта.

В нашем случае $t_{0,05; 3} = 3,182$, поэтому:

$$\Delta_{b_0} = 0,044; \quad \Delta_{b_1} = \Delta_{b_2} = 0,053; \quad \Delta_{b_{11}} = \Delta_{b_{22}} = 0,0031.$$

Поскольку все коэффициенты по абсолютной величине больше своих доверительных интервалов, они признаны статистически значимыми и оставлены в модели (2).

Таким образом, получено следующее

уравнение:

$$\frac{q}{\sigma_s} = 3,2 - 0,433x_1 - 0,117x_2 + 0,033z_1 + 0,017z_2. \quad (7)$$

Рассчитанные по этой модели величины q/σ_s для значений факторов, соответствующих каждому из 9 опытов, приведены в 10-м столбце таблицы.

Дисперсия неадекватности для модели (7) оценена по формуле

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2} \quad (8)$$

в которой

$$SS_{\text{неад}} = n_5 (y_{5\text{расч}} - y_{5\text{эксп}})^2 + \sum_{u=1}^4 (y_{u\text{расч}} - y_{u\text{эксп}})^2 + \sum_{u=6}^9 (y_{u\text{расч}} - y_{u\text{эксп}})^2,$$

где u – номер опыта; n_5 – количество повторов 5-го опыта; $y_{u\text{расч}}$ – значения, приведенные в 10-м столбце таблицы; $y_{u\text{эксп}}$ – значения, приведенные в 9-м столбце таблицы; $f = N - k$, где N – количество строк в матрице плана; k – количество признанных значимыми коэффициентов модели (7).

Таким способом определено, что $S_{\text{неад}}^2 = 0,00135$.

Расчетное значение статистического критерия Фишера, применяемого при оценке адекватности моделей, определено по формуле

$$F_{f_2; f_1} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}, \quad (9)$$

оно равно $F_{\text{расч}} = 0,79$.

Табличное значение F -критерия для принятого 5 %-ного уровня значимости и чисел степеней свободы $f_1 = 3$ и $f_2 = 4$ равно 9,12. Поскольку расчетное значение F -критерия не превышает табличного, гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Переход к натуральным значениям факторов осуществлен подстановкой формул (3) в модель (7), раскрытием скобок и приведением подобных членов. При натуральных значениях факторов модель (7) приняла следующий вид:

$$\frac{q}{\sigma_s} = 10,63 + 0,625R^2 + 0,051\gamma^2 - 3,08R - 0,933\gamma. \quad (10)$$

С использованием построенной математической модели определена удельная сила выдавливания штампованной поковки, показанной на рис. 1.

Относительная удельная сила q/σ_s составила 3,57. Напряжение текучести материала заготовки было определено по диаграмме истинных напряжений для стали 20 при степени обжатия, рассчитанной по формуле

$$\frac{[F_{\text{заг}} - (F_{\text{заг}} - F_{\text{пол}})]}{F_{\text{заг}}} = \frac{d^2}{D_0^2}, \quad (11)$$

где $F_{\text{заг}}$ – площадь поперечного сечения заготовки; $F_{\text{пол}}$ – площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана; D_0 – диаметр заготовки; d – внутренний диаметр стакана. Рассчитанное значение составило 0,694.

Величина напряжения текучести для отожженной стали 20 при этой степени обжатия равна 700 МПа. Следовательно, q равно 2500 МПа. При такой величине удельной силы стойкость пуансонов из стали Р6М5 (ГОСТ 19205-73) оценена по кривой, приведенной на рис. 4.

В данном случае $N > 1000$. При такой прогнозируемой стойкости пуансонов для производства рассматриваемых поковок признана целесообразной реализация процесса холодного обратного выдавливания.

Разработанный технологический процесс состоит из следующих этапов.

1. Изготовление отрезкой от прутка на отрезных токарных станках исходных цилиндрических заготовок.

2. Термообработка заготовок. Производится отжиг по режиму: нагрев до 680...700 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с печью.

3. Травление заготовок, их фосфатирование и омыливание. Для травления применяется 30 %-ный раствор соляной кислоты. После травления заготовки промывают в холодной и горячей воде. Для фосфатирования применяется раствор, состоящий из монофосфата цинка в концентрации 70 г/л и нитрита натрия – 35 г/л. Температура раствора 70...80 °С, время травления 10...15 мин. Фосфатированные заготовки после промывки омыливают. Концентрация мыльного раствора 50...70 г/л 72 %-ного хозяйственного мыла, температура около 80 °С, время омыливания 10...15 мин.

4. Выдавливание. Осуществляется за 2 перехода (см. рис. 2).

Технология реализована с применением штампа, схема которого приведена на рис. 5.

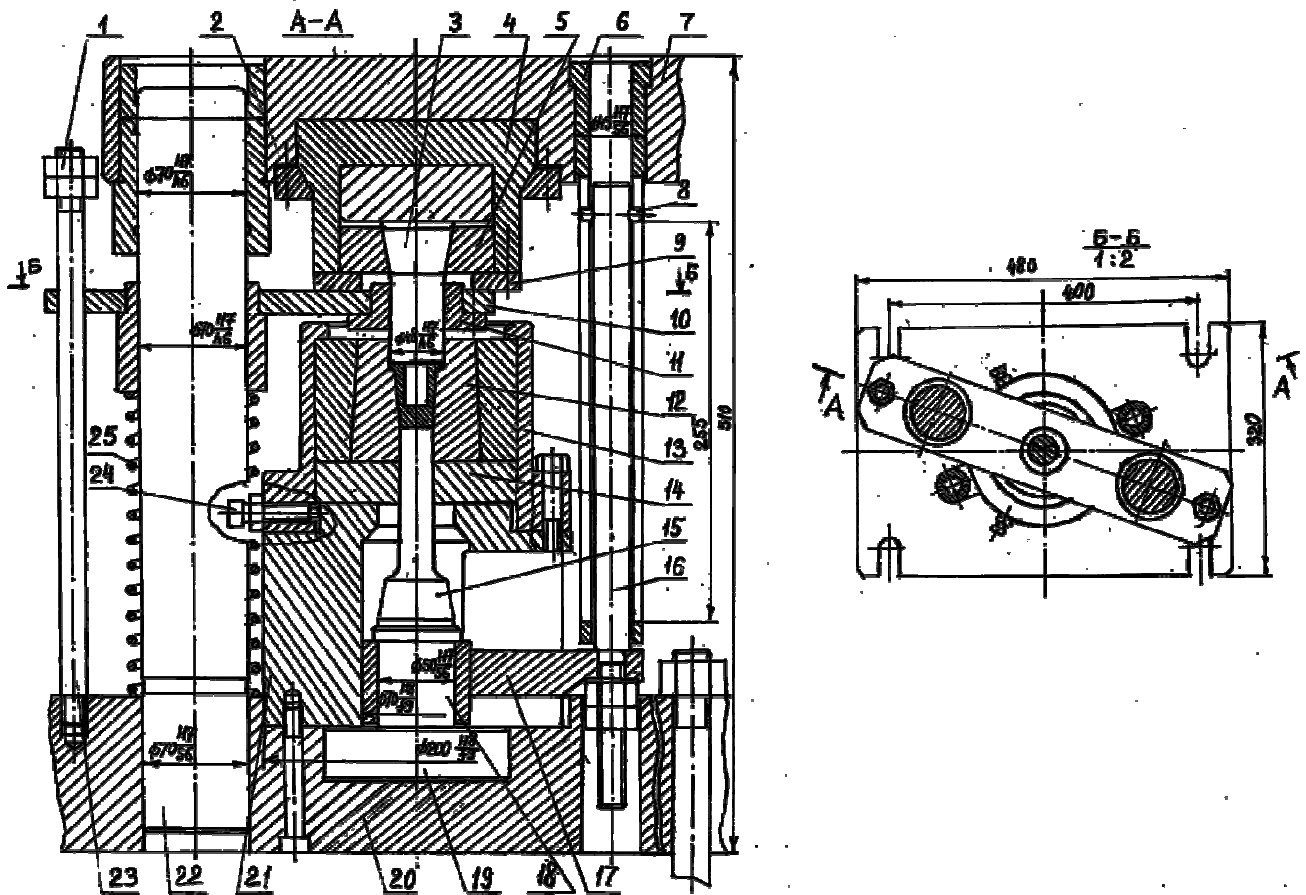


Рис. 5. Схема штампа для выдавливания

В штампе верхняя плита 7 с направляющими втулками 2 направляется по двум колонкам 22, запрессованным в нижнюю плиту 20. На нижней плите установлена опора 21, на которую через закаленную прокладку 14 опирается бандажированная матрица 12. Матрица размещена в матрицедержателе 13, который с помощью установочных винтов 24 может смещаться в радиальном направлении. Это предусмотрено для регулировки соосности матрицы и пуансона 3.

В пуансонодержателе 4 с помощью прижимной плиты 5 и прижимных планок 9 установлены два пуансона: первого и второго переходов штамповки. Пуансонодержатель закреплён на верхней плите штампа с помощью направляющих планок и имеет возможность перемещения.

Внутри опоры 21 расположено коромысло 17, на котором установлен выталкиватель 15. Последний через закаленные прокладки 18 и 19 опирается на нижнюю плиту. Выталкивание штампованной поковки из матрицы осуществляется следующим образом. При ходе ползуна прессы вверх втулка 6 через штифты 8 передает силу тягам 16. Тяги поднимают коромысло с

установленным на нем выталкивателем. Последний выталкивает поковку из матрицы. Величина хода выталкивателя регулируется гайками на тягах.

Для съема детали с пуансона предусмотрен съемник 10 со сменной направляющей втулкой 11. Съём детали осуществляется при упоре съемника в гайки 1, ограничивающие перемещение съемника вверх. Гайки 1 навинчены на шпильки 23, ввернутые в нижнюю плиту 20 штампа. Чтобы обеспечить упор поковки во втулку 11 при ходе пуансона вверх, на цилиндрической направляющей части пуансона выполнены две продольные канавки (на рис. 5 не показаны). Напротив них на внутренней поверхности втулки 11 предусмотрены выступы. Поскольку поковка имеет цилиндрический фланец без канавок, то выступы втулки упираются во фланец поковки и снимают последнюю с пуансона.

Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя показана на рис. 6.

После выполнения штамповки пуансоном первого перехода оператор сжимает рычаги 3 и 4, перемещая, таким образом, тягу 5. Тяга раз-

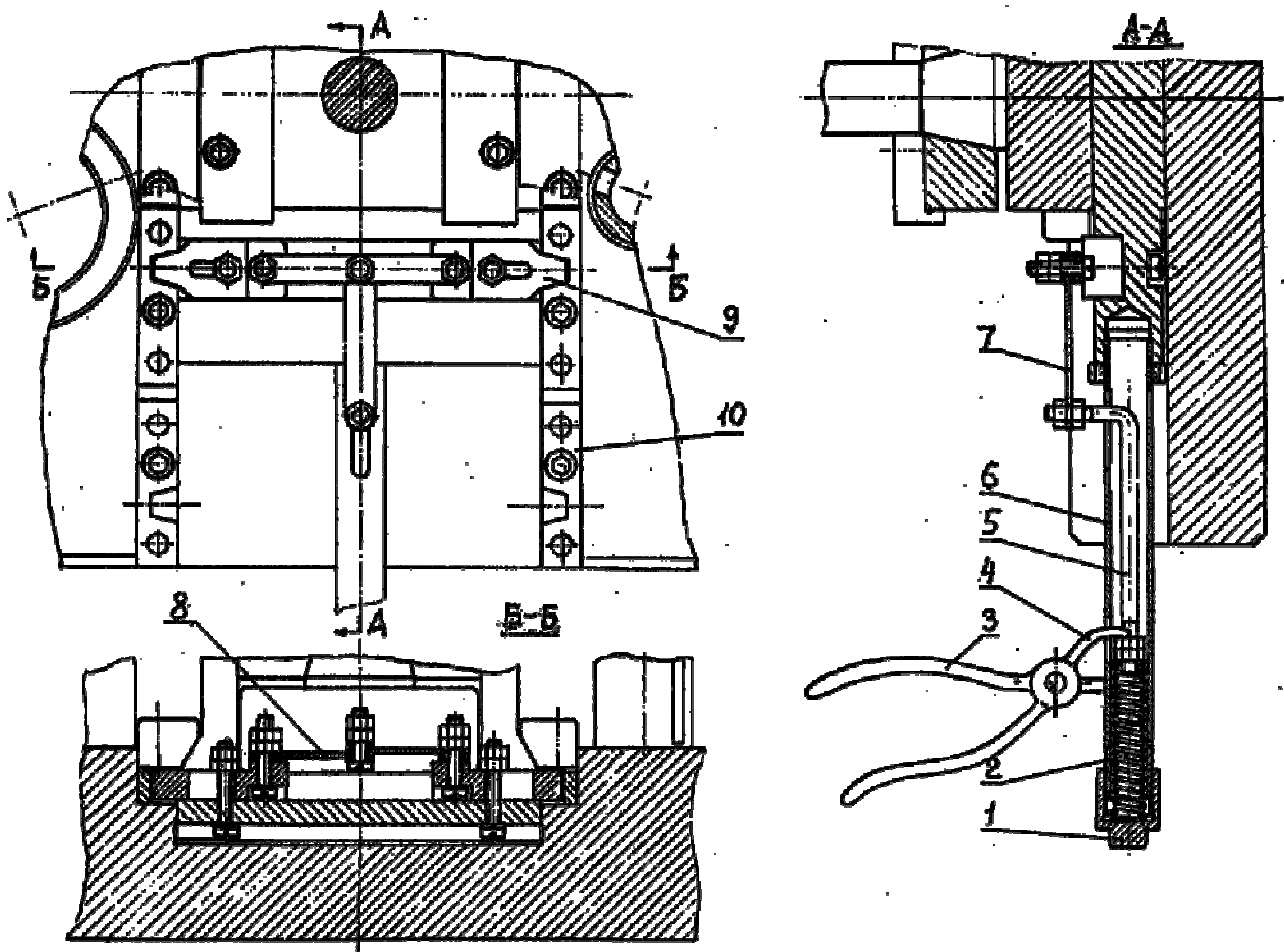


Рис. 6. Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя

мешена внутри трубы *б* и подпружинена в направлении сжатия пружины регулируется гайкой *1*. Тяга передает силу руки оператора на систему тянущих планок *7* и *8*. Тянущие планки выводят ползушки *9* из гнезд в неподвижно закрепленных фиксаторах *10*. Положение фиксаторов выверяется при сборке штампа.

При сжатых рычагах *3* и *4* пуансонодержатель получает возможность свободно перемещаться вдоль оси паза в верхней плите штампа. Оператор устанавливает пуансон второго перехода в рабочую позицию и отпускает рычаги *3* и *4*. При этом под действием пружины *2* под действием тяг ползушки *9* вводятся в гнезда на другой паре фиксаторов *10*. Включается пресс, и выполняется второй переход штамповки.

При отладке штампа практически не требуется доводочных операций. Штмп надежен и удобен в работе.

Таким образом, в результате проведенного исследования показана целесообразность производства рассматриваемых стальных поковок холодным обратным выдавливанием цилиндрическим пуансоном в матрице с расширяющейся полостью.

При небольших сериях производства таких деталей целесообразно использовать конструкцию описанного штампа, чтобы не скапливать контейнеры с полуфабрикатами, прошедшими первую и ожидающими вторую операцию выдавливания и не допускать упрочнения заготовок в межоперационный интервал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дмитриев А.М., Демин В.А.** Современные конкурентоспособные технологии, оборудование и оснастка при производстве заготовок давлением // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 5. С. 34-38.
2. **Григорьев С.Н., Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Механические характеристики конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке и их описание аппроксимирующими зависимостями // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 12. С. 23-26.
3. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Расширение области применения холодной объемной штамповки созданием активных сил контактного трения // Трение и износ. 2013. № 3. С. 306–314.
4. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 2 (29). С. 44-49.
5. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник

МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 41-44.

6. **Аксененко А.Ю., Коробова Н.В., Дмитриев А.М.** Анализ различных методов разработки процесса изготовления корпусных деталей комбинированным выдавливанием // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 967-974.

7. **Ковка и штамповка:** Справочник. В 4-х т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ.ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение. 2010. 352 с.

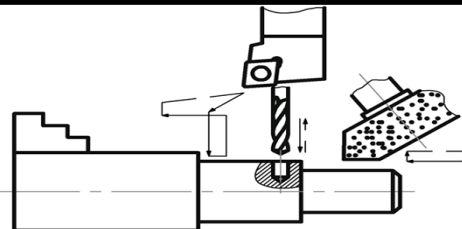
8. **Научноёмкие технологии в машиностроении /** А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

9. **Кузнечно-штамповочное** оборудование. Ч. 2. Выбор технологических параметров для специализированного оборудования: учеб.для вузов / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова. Самара: Изд-во СГАУ, 2015. 168 с.

REFERENCES

1. Dmitriev A.M., Demin V.A. Modern competitive technologies, equipment and fitment at production workpieces by plastic working. Handbook. An engineering journal. 2011. No 5. Pp. 34–38.
2. Grigor'ev S.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V. Mechanical characteristics of construction carbon steels at cold die forging and their description by approximate dependences. Handbook. An engineering journal. 2011. No 12. Pp. 23-26.
3. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Expansion of application field of cold die forging by creation of active forces of contact friction. Friction and wear. 2013. No 3. Pp. 306–314.
4. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Tolmachev N.S. Experimental verification of results of computer simulation of stresses on element of deforming tool. Vestnik of MSTU "Stankin". 2014. No 2(29). Pp. 44–49.
5. Practical application of changing mechanical properties of construction steels at cold die forging. A.M. Dmitriev, F.V. Grechnikov, N.V. Korobova, N.S. Tolmachev. Vestnik of MSTU "Stankin". 2014. No. 4(31). Pp. 41–44.
6. Aksenenko A.Yu., Korobova N.V., Dmitriev A.M. Analysis of various methods of development of production of box-like parts by combined extrusion. Computer research and simulation. 2014. V. 26. No 6. Pp. 967–974.
7. Forging and die forging: handbook. In 4 v. V. 3. Cold die forging. Forging of metallic powders.ed. by A.M. Dmitriev; general editorship by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie. 2010. 352 p.
8. Science intensive technologies in mechanical engineering. A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezyazhichnyy et al.; ed. by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 528 p.
9. Press-forging equipment. P.2. Selection of technological parameters for specialized equipment: textbook. A.M. Dmitriev, F.V. Grechnikov, N.V. Korobova. Samara: SSTU publishers, 2015. 168 p.

Рецензент д.т.н. В.А. Демин



УДК 621.923
DOI: 10.12737/17317

В.А. Полетаев, д.т.н.

(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.53),

Е.В. Цветков, к.т.н.

(НПО «Сатурн», Ярославская область, 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, д.163)

E-mail: poletaev@rsatu.ru, egor.tsvetkov@npo-saturn.ru

Профильное и контурное шлифование хвостовиков лопаток компрессора

Представлены технологические схемы автоматизированного шлифования хвостовиков лопаток компрессора. Описаны оригинальные технологии автоматизированного профильного шлифования рабочих лопаток ротора, а также плоского врезного контурного шлифования направляющих лопаток статора компрессора.

Ключевые слова: лопатка компрессора; шлифование кругами из CBN; многокоординатная обработка за один установ детали.

V.A. Poletaev, d.en.s.

(Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solov'yov,
53 Pushkin Street, Rybinsk, 152934, Yaroslavl region, Russia),

E.V. Tsvetkov, s.en.s.

(“Saturn” Scientific production association,
163 Lenin Ave., Rybinsk, 152903, Yaroslavl region, Russia)

Profile and contour grinding of compressor blade butts

The existing technologies of production of compressor blade butts related with traditional machining methods, including broaching and milling. Application of these machining methods requires further superfinishing operations to ensure the required quality of compressor blades. The automated highly-productive grinding of blade butts is an effective method to improve performance and quality of blade production. The technologies of profile and contour grinding of blades of a rotor and a compressor stator provide an automated machining of the outer parts contour in the same coordinate system, implement machining based on 3-D models of theoretical blade surfaces, ensure the required quality parameters of the part surface layer without additional finishing operations.

Keywords: compressor blade; grinding by CBN wheels; multi-coordinate processing at one setting of part.

Технологические процессы изготовления хвостовиков лопаток компрессоров, схемы и способы шлифования определяются конструктивным исполнением обрабатываемых поверхностей. При обработке хвостовиков рабочих лопаток ротора компрессора преобладают схемы профильного врезного шлифования, где образующие инструмента формируют геометрические размеры и форму обрабатываемой поверхности.

В этом случае для обработки наружного

контура хвостовика используют несколько инструментов оригинальной формы, которые по мере обработки постепенно приближают технологическую поверхность детали к теоретической [1].

При обработке хвостовиков направляющих лопаток статора компрессора преобладают схемы плоского врезного шлифования, осуществляемого последовательно по всем поверхностям контура детали.

В этом случае используют один режущий

инструмент с прямолинейной образующей режущей поверхностью.

Более детально особенности этих технологических схем обработки могут быть проиллюстрированы примерами схем обработки рабочих и направляющих лопаток компрессора.

Так, схемы обработки рабочей лопатки компрессора, дополненные компоновочными схемами технологической оснастки и управляемых опций технологического оборудования, представлены на рис. 1, 2.

Технологические схемы взаимных переме-

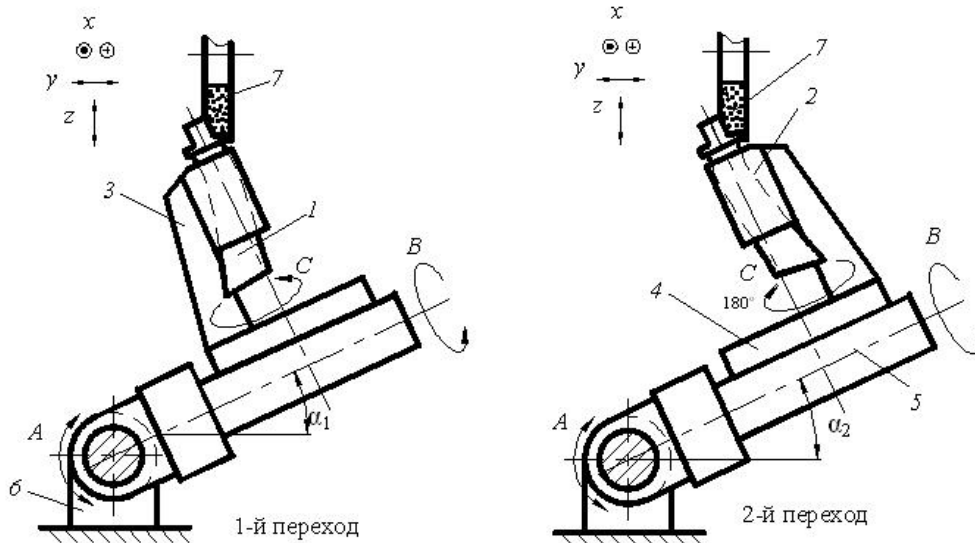


Рис. 1. Схема взаимных перемещений инструментов и заготовки при шлифовании хвостовика рабочей лопатки 1-й ступени компрессора двигателя SaM-146 (1 и 2 переходы)

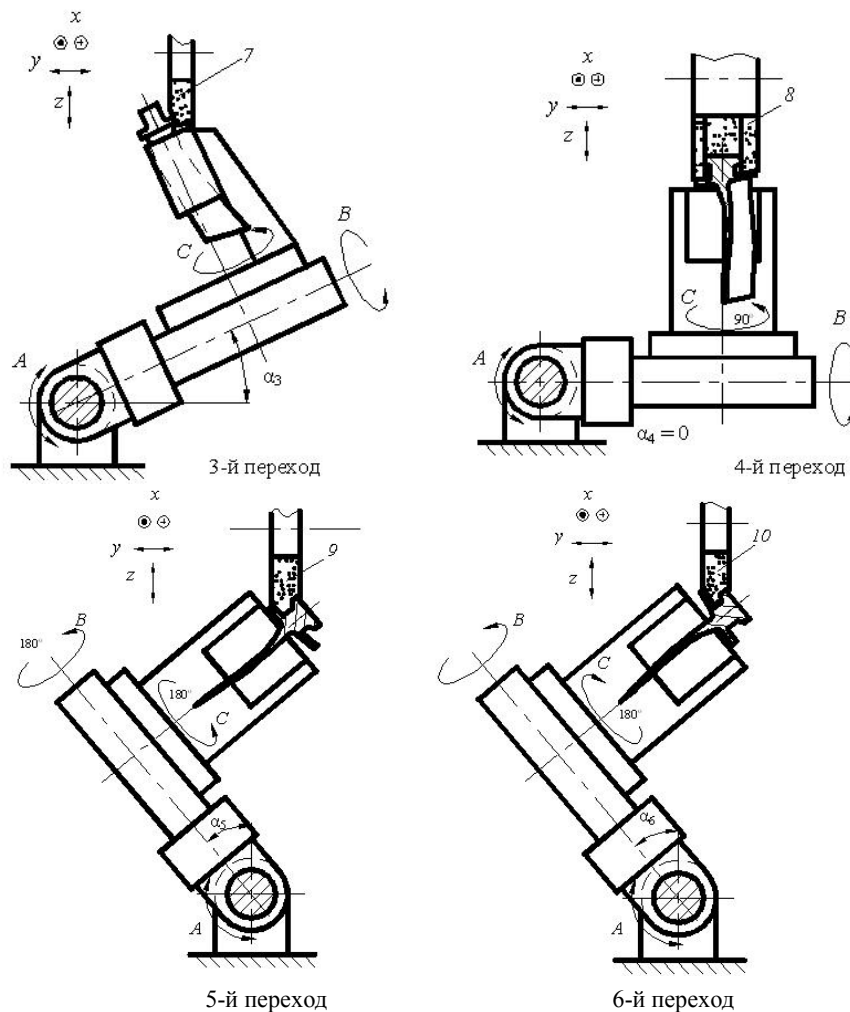


Рис. 2. Схема взаимных перемещений инструментов и заготовки при шлифовании хвостовика рабочей лопатки 1 ступени компрессора двигателя SaM-146 (3 – 6 переходы)

щений инструмента и опций станка, несущих заготовку, наиболее полно представляют обработку хвостовика рабочей лопатки компрессора. Здесь деталь 1, установлена в приспособление-спутник 2, которое в свою очередь механически закреплено в наладку 3, установленную вертикально на круговом столе 4. При этом ось проточной части лопатки совпадает с осью кругового стола, имеющей возможность перемещения вокруг оси Z на 360°. То есть круговой стол 4 является осью C, управляемой в непрерывном режиме. Круговой стол является частью двухкоординатного глобусного стола и установлен на поворотной платформе (качалке) 5. Качалка 5 управляется непрерывно, осуществляет поворот вокруг оси Y на угол $\pm 90^\circ$, т.е. является осью B.

В свою очередь, глобусный стол установлен на делительном столе б, расположенном на станине (или на продольном столе станка) горизонтально. Стол б имеет возможность углового перемещения вокруг оси X, т.е. является осью A. Управление этой осью, в данном случае, осуществляется дискретно. То есть она наклоняет глобусный стол (оси B и C) не в процессе обработки, а только при смене переходов, принимая последовательно значение $\alpha_1 \dots \alpha_6$.

Инструмент (абразивный круг) в процессе обработки перемещается по координатам X, Y, Z. В этом технологическом процессе обработки хвостовика задействовано шесть управляемых осей, пять из них управляются непрерывно, а шестая дискретно (в режиме наладки). При обработке торцов хвостовика со стороны входной

и выходной кромок — переходы 1, 2, 3, используют режущий инструмент 7 с одинаковой рабочей поверхностью. При обработке подошвы хвостовика и рабочих поверхностей замка, близких к конструкции «ласточкин хвост», используют различные режущие инструменты 8, 9, 10, причем инструмент 8 представляет собой набор трех шлифовальных кругов разной толщины.

Из представленного примера следует, что при обработке хвостовика используется несколько кругов с различными профильными поверхностями рабочей поверхности круга. Совокупность образующих режущих инструментов в итоге и формирует профильные поверхности наружного контура детали.

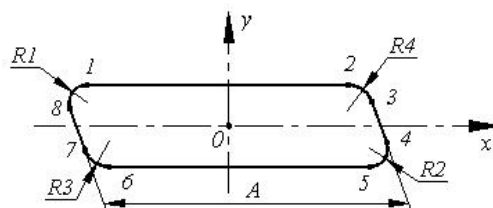
При обработке поверхностей хвостовиков статорных лопаток используют иные технологические схемы. Наиболее полно это иллюстрирует покадровая схема перемещений инструмента и детали при шлифовании контура хвостовика лопатки статора двигателя SaM-146.

На рис. 3 представлен наружный контур хвостовика лопатки статора двигателя SaM-146. По этому контуру лопатка устанавливается в соответствующие пазы кольца направляющего аппарата и соединяется с ним с помощью электронно-лучевой сварки. Зазоры при сварке хвостовика в лопаточное колесо не должны превышать 0,1 мм. Таким образом, контур хвостовика должен быть выполнен с высокой геометрической точностью, в том числе по взаимному расположению смежных поверхностей [2].

Программа перемещений инструмента и за-



a)



б)

Рис. 3. Хвостовик лопатки направляющего аппарата двигателя SaM-146: а – фотография; б – схема наружного контура хвостовика

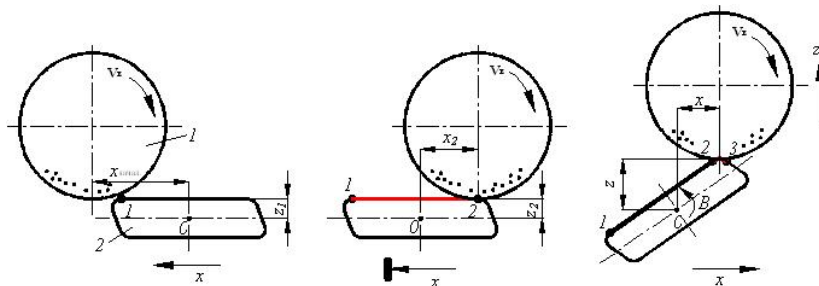


Рис. 4. Покадровое перемещение инструмента и заготовки при формировании наружного контура хвостовика (начало)

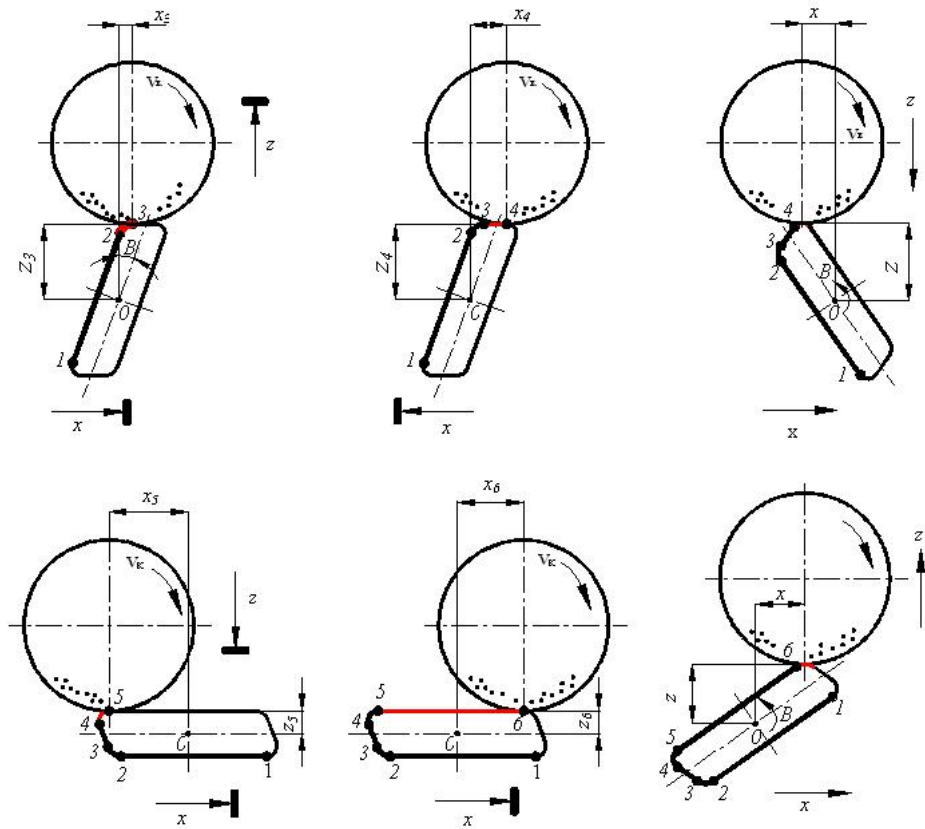


Рис. 5. Покадровое перемещение инструмента и заготовки при формировании наружного контура хвостовика (продолжение)

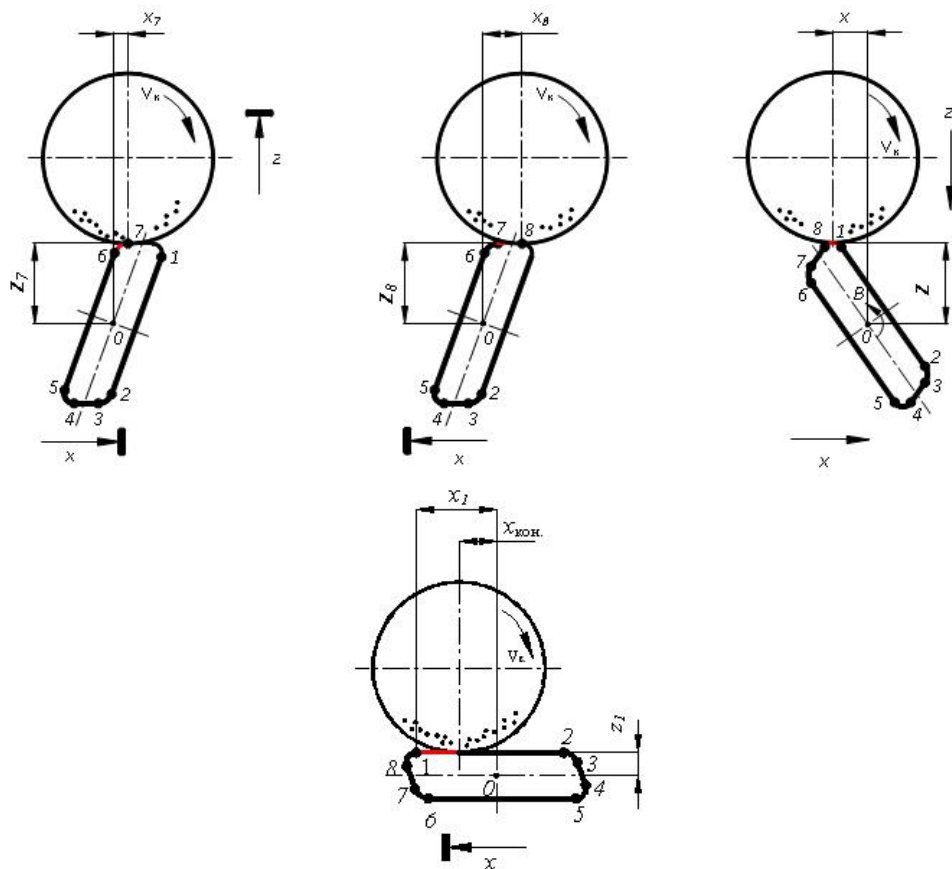


Рис. 6. Покадровое перемещение инструмента и заготовки при формировании наружного контура хвостовика (окончание)

готовки при формировании контура хвостовика акцентируется на достижении координат восьми опорных точек в плоскости XOY , характеризующих участки перехода криволинейных поверхностей хвостовика в прямолинейные (рис. 4, 5, 6).

Здесь точка 1 формируется на поверхности хвостовика за счет нахождения в ней в момент шлифования рабочей поверхности круга на высоте z_1 от оси OX в плоскости симметрии хвостовика XOY . Боковая поверхность хвостовика формируется при перемещении детали в направлении X . Точка 2 достигается при перемещении стола станка до координаты x_2 и инструмента до координаты z_2 , которая должна совпадать с координатой z_1 , т.е. координатой первого кадра. Дальнейший переход к точке 3 осуществляется за счет перемещений трех координат X, Y, B , таким образом, деталь перемещается по оси X и поворачивается по оси Y (ось B), а инструмент поднимается вверх по оси Z .

Точка 3 формируется при достижении управляемыми координатами станка значений x_3, y_3, B_3 . Точка 4 формируется за счет перемещений продольного суппорта станка (оси X). Перемещения по оси Z и B отсутствуют. Продольное перемещение детали заканчивается на точке 4 с координатами x_4, z_4 . Дальнейший переход по радиусу контура к точке 5 осуществляется при перемещении инструмента и детали по осям X, Z и B . Точка 5 формируется при достижении продольным и вертикальным суппортами точки 5 с координатами x_5, z_5 и осью B угла в 0° . Аналогично описанным ранее переходам происходит дальнейшее перемещение инструмента и детали к остальным опорным точкам, т.е. 6, 7 и 8. При переходе от точки 8 к точке 1, т.е. при замыкании контура, положение координат перемещаемых узлов должно быть x_1, z_1 и $B = 0$.

Приведенные выше схемы обработки хвостовиков лопаток компрессоров в условиях автоматизированной обработки, требуют использования многоцелевого технологического оборудования с большим числом одновременно управляемых координат. Таким оборудованием является многоцелевой обрабатывающий центр мод. SXS735-TC2 CNC, фирма «Станковендт» (РФ). Оборудование создано по заказу НПО «Сатурн», используется при обработке хвостовиков лопаток компрессоров двигателей нового поколения, в том числе SaM-146, ПД-14 и других рис. 7.

Данное технологическое оборудование позволяет вести обработку лопаток компрессора с размерами проточной части до 400 мм, с приз-



Рис. 7. Многоцелевой шлифовальный станок мод. SXS735-TC2 CNC

матической формой хвостовиков типа «ласточкин хвост», имеющих как прямолинейную, так и криволинейную образующие поверхностей сопряжения лопатки и дисков ротора компрессора. Обработка осуществляется в автоматическом цикле, она носит комплексный характер. Обрабатывают все поверхности наружного контура свободные от мест ее установки и закрепления, обработка осуществляется за один установ. Используют высокопроизводительные методы глубинного и скоростного шлифования как абразивными кругами в условиях непрерывной правки, так и кругами из кубического нитрида бора на керамической связке. Данная технология является альтернативой процессам протягивания и фрезерования хвостовиков; по сравнению с ними является наиболее производительной; более гибка и универсальна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полетаев В.А., Цветков Е.В. Автоматизированные технологические процессы изготовления хвостовиков лопаток компрессоров // СТИН. № 6. 2015. С. 34–36.
2. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.

REFERENCES

1. Poletaev V.A., Tsvetkov E.V. Automated technological processes of production of compressor blade butts. STIN.No.6. 2015. Pp. 34–36.
2. Poletaev V.A. Technology of automated production of blades of gas turbine engines. Moscow: Mashinostrojenie, 2006. 256 p.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров

УДК 621.923.6.025
DOI: 10.12737/17318

А.С. Янышкин, д.т.н., **П.В. Архипов**, к.т.н.,
Д.В. Лобанов, д.т.н., **В.Ю. Попов**, к.т.н.,
Е.Д. Лосев, старший преподаватель
(Братский государственный университет, 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40)
E-mail: yanyushkin@brstu.ru

Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов*

Рассмотрены основные преимущества и перспективы применения безвольфрамовых твердых сплавов в различных отраслях промышленности. Отмечены проблемы, связанные со сложностями их качественной обработки абразивными инструментами для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделий. Представлены результаты экспериментальных исследований качественного состояния поверхностных слоев твердосплавных изделий после комбинированной электроалмазной обработки материала марки ТН-20.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы; шлифование; алмазный круг; металлическая связка; комбинированная обработка; инструментальные материалы.

A.S. Yanyushkin, d.en.s., **P.V. Arkhipov**, c.en.s.,
D.V. Lobanov, d.en.s., **V.Yu. Popov**, c.en.s.
E.D. Losev, senior lecturer
(Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, 665709, Russia)

Surface quality of tungstenfree hard alloys after diamond machining

The quality parameters of TN-20 hard alloy after the diamond machining are determined. The technology of combined electro-diamond grinding, which allows resolving the problems of equipment modernization and definition of optimal machining conditions of tungstenfree hard alloys, is developed. The methods of metallographic and spectral analysis, which determined the reasons of low quality of surfaces of tungstenfree hard alloys after abrasive machining, are used. Based on the analysis of the research results, the combined electro-diamond grinding technology for improving the machining performance of parts from tungstenfree hard alloys, is recommended.

Keywords: tungstenfreehard alloys; grinding; diamond wheel; metallic bond; combined machining; tool materials.

В связи с дефицитом вольфрама, как альтернатива вольфрамосодержащим, разработаны безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС). Они имеют ряд преимуществ по сравнению с вольфрамосодержащими твердыми сплавами по параметрам твердости, окалиностойкости, износостойкости при высоких температурах.

Безвольфрамовые твердые сплавы подразделяются на две группы:

– *первая* состоит из карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой. Они обозначаются буквами ТНМ или КТНМ, за которыми проставляется цифра, указывающая на содержание связки (ТНМ-20, ТНМ-25, КТНМ-30 и др.);

– *вторая* – карбидохромистые сплавы с никелевой связкой. Маркируются они буквами КХН с последующей цифрой, соответствующей содержанию никеля в процентах (КХН-20, КХН-30, КХН-35, КХН-40). Эти сплавы не окисляются на воздухе при нагреве до 1100 °С, хорошо сопротивляются износу, коррозионно-стойкие, обладают низкой склонностью к схватыванию.

Промышленность выпускает стандартные марки безвольфрамовых сплавов в соответствии с ГОСТ 26530-85. Наибольшее распространение получили БВТС марок ТН20 (на основе TiC) и КНТ16 (на основе TiCN), главным недостатком которых была невысокая прочность и нестабильность свойств.

В настоящее время для металлообработки

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-50624

создан целый ряд безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида и карбонитрида титана, которые применяют в различных сферах производства. Широко используют твердые безвольфрамовые сплавы марок ТН20, ТН50, КТН16, ЛЦК20, ТВ4.

С учетом относительно низких значений теплостойкости и пластической прочности БВТС проведены исследовательские работы по улучшению их свойств за счет упрочнения связки или карбо-нитридной фазы. Результатом таких разработок стало появление новых марок БВТС с повышенными свойствами по хрупкой и пластической прочности.

Примером совершенствования БВТС могут служить сплавы ЛЦК20, карбо-нитридная фаза которых легирована цирконием, сплавы ТВ4, ЦТУ и НТН30, связки которых имеют заметно более высокую прочность и теплостойкость за счет легирования соответственно карбидом вольфрама, вольфрамом и карбидами титана и ниобия. Новая группа сплавов этого типа имеет повышенную эксплуатационную надежность и расширенную область применения.

Важной отличительной особенностью БВТС является их микроструктура, а именно присутствие так называемой К-фазы, представляющей собой сложный карбид, образующий оболочечную структуру вокруг каждой частицы карбонитрида и обеспечивающий прочную связь этих твердых частиц с пластичной металлической связкой. Также следует отметить низкий удельный вес этих материалов в сравнении с вольфрамовыми твердыми сплавами.

Появлению сплавов способствовали научные исследования, установившие благоприятное влияние на свойства сплавов мелкозернистой структуры, получаемой при добавлении молибдена.

В научной литературе практически отсутствует обоснование причин, по которым в качестве цементирующего металла для карбида титана вместо широко применяющегося в других сплавах кобальта был выбран именно никель. Известно, что в ряде металлов Fe, Co, Ni, никель в большей степени смачивает карбид титана.

В том, что касается выбора в качестве составляющей сплавов молибдена, следует заметить, что из исследованных добавок различных металлов к никелю, только молибден снижает краевой угол смачивания карбида титана никелем до нуля. Совершенная смачиваемость карбида титана сплавом *Ni-Mo* обеспечивает образование мелкозернистой структуры сплавов.

Разработана технология производства высококачественных трибологических керметов ма-

рок КНТ16Трибо и КНТ20Трибо, отличающихся содержанием металлической связки и, как следствие, твердостью, износостойкостью и прочностью [1]. Они предназначены, прежде всего, для радиальных подшипников трения в насосах по перекачке разнообразных жидкостей, как при низких температурах, так и при температурах близких к кипению: морской воды, пластовой жидкости при добыче нефти и газа, загрязненной воды абразивными частицами, различных солевых растворов при условии относительно невысоких рабочих нагрузок.

Однако уже созданные материалы типа ТН20, КНТ16 и другие обладают рядом недостатков по сравнению с традиционными твердыми сплавами. В частности при абразивной обработке на поверхности появляются микро- и макротрещины, и другие дефекты, снижающие их надежность и эксплуатационные свойства. Поэтому изучение БВТС, а также исследование качества поверхностей изделий из этих материалов после обработки имеет научно-практическое значение [1, 2].

Материал и методика исследования. В настоящей работе представлены экспериментальные исследования качества поверхностных слоев твердосплавных изделий после комбинированной электроалмазной обработки материала марки ТН20.

Электроалмазная обработка проводилась при следующих параметрах: скорость резания $v = 35$ м/с; продольная подача $S = 2,0$ м/мин; глубина резания $t = 0,03$ мм/дв.ход; плотность тока электрохимического травления детали $i_{тр} = 20$ А/см²; плотность тока электрохимической правки круга $i_{пр} = 0,2$ А/см². Обработывались быстросменные пластины алмазным кругом 1А1 200×10×76×5 АС6 D107 100 М 40 м/с. В качестве электролита использовался состав: NaNO₃ – 3 %, NaNO₂ – 2 %, NaCO₃ – 1 %, H₂O – остальное. Подробно условия исследований представлены в работах [3, 4, 5]

Металлографические исследования с использованием микроанализатора Link-860, позволили выполнить локальный анализ химического состава образцов. При исследованиях микротвердости изучаемых поверхностей использованы особенности наконечника Кнуппа твердомера малых нагрузок фирмы Wolpert.

Результаты и их обсуждение. Во время металлографических исследований, с целью выявления качества обработки поверхностей, обнаружены кривые полосы («хвосты»), которые четко выделились на пластине (рис.1). В литературе аналогичное явление упоминается как неравномерное распределение цементирующей фазы [3].

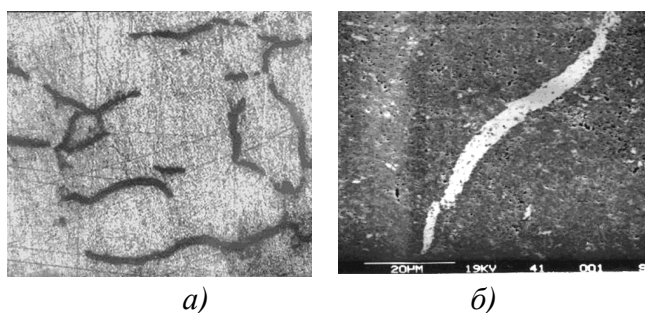


Рис. 1. Обработанная поверхность пластины ТН-20 ($v = 35$ м/с; $S = 2$ м/мин; $t = 0,03$ мм/дв.ход; $i_{тр} = 20$ А/см²; $i_{пр} = 0,2$ А/см²): *a* – после травления, $\times 100$; *б* – вид «хвоста», $\times 850$

Были проведены детальные исследования названных «хвостов». Важно было выяснить причину их появления, фазовый, химический состав, сравнить эти данные с физико-химическими свойствами основного материала и влияние их на качество изделий.

Применение специального травителя (смесь плавиковой и азотной кислот) [3, 4] позволило установить четкие контуры и расположение «хвостов».

При более широком металлографическом исследовании было отмечено, что характерным месторасположением «хвостов» является область вдоль края пластины. В середине их, как правило, нет, или их количество и размеры минимальны.

Необходимо отметить также тот факт, что на образцах, обработанных на разных режимах, количество и размеры «хвостов» существенно отличаются. Так как количественный критерий оценки подобрать трудно, то зависимость установленных «хвостов» от режимов резания невозможно представить в виде графика или таблицы. Поэтому на данном этапе выполнен лишь сравнительный качественный анализ.

В связи с этим стоит упомянуть известный факт, что при увеличении параметров шлифования: скорости круга, продольной и поперечной подач в зоне обработки возрастает контактная температура [3, 4, 5]. Вполне возможно, что именно она ответственна за образование наблюдаемых «хвостов», хотя здесь возможно и проявление других эффектов и контактных процессов.

Целью дальнейших исследований стало изучение состояния обнаруженных «хвостов», их химического состава, прочности и объяснение природы их появления.

Определение микротвердости «хвоста» и исходной поверхности производилось по Вик-

керсу. Этот способ несет определенную информацию, но дает большую погрешность, т.к. размеры диагонали отпечатка пирамиды получаются искаженными из-за того, что «хвост» слишком узок, пирамида упирается в твердосплавную основу и она сдерживает распространение отпечатка (рис. 2, *a*). Поэтому более информативные результаты получены с помощью наконечника Кнуппа твердомера малых нагрузок фирмы Wolpert (рис. 2, *б*). Из рисунков видно, что микротвердость материала «хвоста» ниже микротвердости исходной пластины более чем в 2 раза.

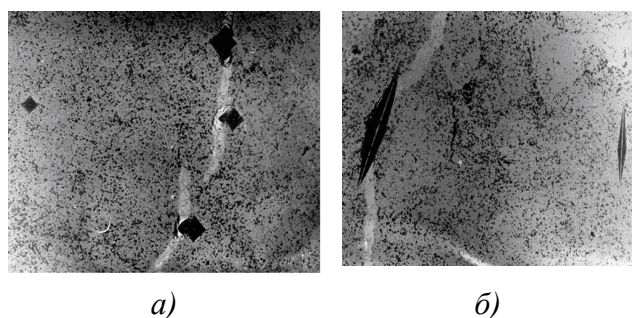


Рис. 2. Микротвердость на различных участках пластины ТН-20:

a – отпечатки пирамиды Виккерса, $\times 400$;
б – отпечатки наконечника Кнуппа, $\times 850$

Известно, что карбид титана имеет невысокую прочность на скалывание, а инструментальные материалы с высоким содержанием карбида титана хрупки и склонны к излому [3]. Поэтому неравномерное содержание связки по объему обработанной пластины из твердого сплава будет создавать наиболее слабые области, снижающие эксплуатационные свойства изделия (рис. 3). Кроме того, высокие температуры, сопровождающие процесс лезвийной обработки, приводят к возникновению внутренних напряжений [3]. Так как коэффициенты линейного расширения карбидов и цементирующей фазы различны между собой, возникают объемные изменения по глубине пластины и, как следствие этого, высокие напряжения, являющиеся причиной трещинообразования. Вышеперечисленные дефекты не позволяют формировать режущие элементы инструмента требуемого качества.

Обработка таких инструментальных материалов даже на щадящих режимах шлифования не позволяет обеспечить качественного режущего лезвия (см. рис. 3), что в дальнейшем снижает эксплуатационные характеристики инструмента и сказывается на эффективности его применения.

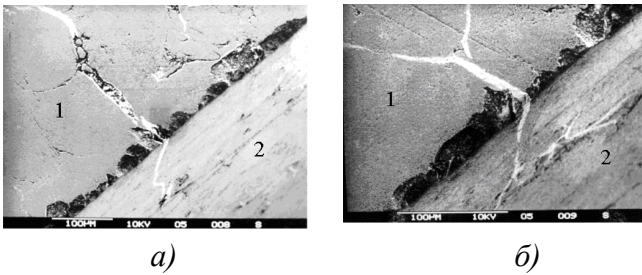


Рис. 3. Вид «хвостов» и состояние режущей кромки, отображенных на передней и задней поверхностях:

1 – передняя поверхность, $\times 200$; 2 – задняя шлифованная поверхность, $\times 300$

Для определения химического состава «хвостов» проводился спектральный анализ с помощью микроанализатора Ling-860, который показал, что их основу составляет компонент связки твердого сплава – никель (рис. 4).

На спектре, снятом с «хвоста», пик никеля находится на максимуме, а линии титана и молибдена на минимальном уровне. Спектр, снятый с соседней с «хвостом» области, показывает нормальное содержание титана и молибдена, а количество никеля резко снижено и находится на нулевом уровне.

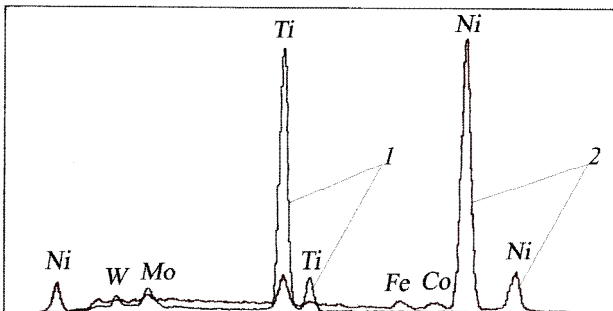


Рис. 4. Спектр с поверхности сплава ТН-20:

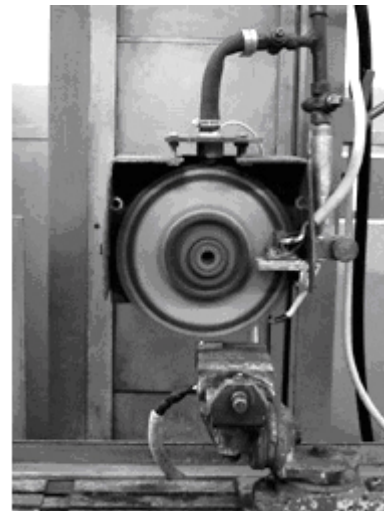
1 – «хвост»; 2 – основа

Следовательно, никель, который должен быть равномерно распределенным в исследованных образцах, служащий связкой карбидам титана и частично образовавшимся карбидам молибдена, выделился в самостоятельные образования, ослабив при этом близлежащие области твердого сплава.

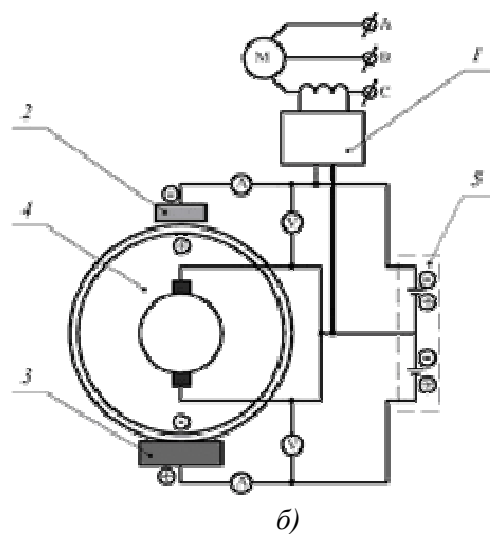
Использование технологий электрохимической обработки, комплексной абразивно-упрочняющей или нанесение покрытий на поверхности изделий из безвольфрамовых твердых сплавов также не всегда обеспечивают высокие точностные и эксплуатационные показатели [6, 7]. Необходимо применение технологии, позволяющей обеспечить невысокие температуры и усилия в зоне резания, в сочетании с повышенной эффективностью обработки высокопрочных материалов.

Таким требованиям удовлетворяет разработанная авторами технология комбинированной электроалмазной обработки, сочетающая в себе электрохимическое алмазное шлифование и одновременную электрохимическую правку поверхности алмазного круга на металлической связке [8]. Для практического применения имеются рекомендации по реализации технологии на различных видах шлифовального оборудования [9]. В качестве примера представлены схема процесса комбинированной обработки и общий вид узлов плоскошлифовального станка 3E711 с модернизацией под предложенную технологию (рис. 5, а).

Комбинированная обработка включает в себя анодное растворение обрабатываемого материала и одновременную непрерывную электрохимическую правку круга на металлической связке (рис. 5, б) [10].



а)



б)

Рис. 5. Общий вид модернизированных узлов станка 3E711 (а, $\times 200$) и схема процесса комбинированной обработки (б, $\times 300$)

Выводы

Реализация предлагаемой технологии при обработке безвольфрамовых твердых сплавов позволяет свести к минимуму образование дефектов, снижающих эксплуатационные свойства изделий без потери качества и с высокой производительностью процесса.

Таким образом, в ходе исследований микроструктуры БВТС после электроалмазного шлифования установлены дефекты в виде полос, представляющие собой скопления связки твердого сплава, что, очевидно, и является одной из причин низкой стабильности свойств и работоспособности БВТС. Для увеличения эксплуатационных свойств изделий рекомендуется использовать технологию комбинированной электроалмазной обработки, сочетающую в себе электрохимическое алмазное шлифование обрабатываемого материала с одновременной электрохимической правкой поверхности алмазного круга на металлической связке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Вирнал» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.virial.ru/materials/93>. Дата обращения 05.10.2015.
2. Шлишевский Б.Э., Ларина Т.В. Безвольфрамовые твердые сплавы и перспектива их использования в оптической отрасли приборостроения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. Т. 4. № 1. С. 133–138.
3. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного заточивания режущих инструментов и методы ее реализации. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. 336 с.
4. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Петров Н.П., Архипов П.В. Исследование поверхности безвольфрамового твердого сплава, шлифованного комбинированным методом // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 70–77.
5. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Ереско С.П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 26–31.
6. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 3. С. 3–7.
7. Верещака А.А., Хожаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 20–25.
8. Пат. 2304504 РФ. № 2005102264/02. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления

// А.С. Янюшкин, А.А. Сурьев, Р.А. Иващенко, П.В. Архипов, С.А. Якимов, А.Б. Лосев: заявл. 31.01.2005; опубл. 20.08.2007. Бюл. № 23.

9. Архипов, П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. 2013. № 2 (22). С.32–37.

10. Абсадыков Б.Н., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Повышение эффективности обработки высокопрочных твердосплавных материалов алмазным инструментом на металлической связке // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (25). С. 30–37.

REFERENCES

1. «Virial» [Electronic resource]. <http://www.virial.ru/materials/93>. Date of access: 05.10.2015.
2. Shlishevskiy B.E., Larina T.V. Tungstenfreehard alloys and the prospects of their application in optical field of instrument-making industry. Interekspo Geo-Sibir'. 2007, Vol. 4, No. 1, pp. 133 – 138.
3. Yanyushkin A.S. Technology of electro-diamond sharpening of cutting tools and methods of its implementation. Star'yiOskol: TNT, 2013. 336 p.
4. Yanyushkin A.S., Yakimov S.A., Petrov N.P., Arkhipov P.V. Research of surface of tungstenfreehard alloys, polished by combined method. Systems. Methods. Technologies. 2009. No. 2. Pp. 70 – 77.
5. Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V., Eresko S.P. Surface quality of carbide material in combined electric diamond grinding with continuous dressing. Science intensive technologies in mechanical engineering. 2012. No 5. Pp. 26 – 31.
6. Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A., Yanpol'skiy V.V., Krasil'nikov D.B. Electrochemical processing of tungsten-freehard alloys. Metal working (technology, equipment, tools). 2010. No. 3., Pp. 3 – 7.
7. Vereshchaka A.A., Khozhaev O. Improvement of performance characteristics of tool from tungstenfreehard alloys using nanostructured multilayer composite coatings. Vestnik of Bryansk State Technical University. 2014. No. 3. Pp. 20 – 25.
8. Patent of Russian Federation 2304504. A method of automatic process control continuous electrochemical wheel dressing and device for its implementation. Yanyushkin A.S., Sur'ev A.A., Ivashchenko R.A., Arkhipov P.V., Yakimov S.A., Losev A.B. № 2005102264; declared 31.01.2005; published 20.08.2007, Bulletin № 23.
9. Arkhipov P.V., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Improvement of equipment for combined machining processes. Vestnik of Tadjikistan Technological University. 2013. No. 2 (22). Pp. 32 – 37.
10. Absadykov B.N., Arkhipov P.V., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Improving of processing efficiency of high-strength hard alloys materials by diamond tool on metal bond. Systems. Methods. Technologies. 2015. No. 1 (25). Pp. 30 – 37.

Рецензент д.т.н. В.В. Иванцовский

УДК 621.923
DOI: 10.12737/17319

С.М. Братан, д.т.н.,
С.Е. Сазонов, к.т.н.,
А.Г. Колесов, преподаватель
(ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет)
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Моделирование процессов доводки абразивными пастами

На основе положений теории абразивной обработки предложены зависимости для вычисления вероятности удаления материала, сил прижима и шероховатости поверхности. Они позволяют прогнозировать съём материала, дифференцированно оценивать влияние отдельных факторов на параметры качества детали и скорость протекания процесса.

Ключевые слова: доводка; абразивные зерна; вероятность удаления материала; сила прижима; составляющие силы резания.

S.M. Bratan, d.en.s.,
S.E. Sazonov, c.en.s.,
A.G. Kolesov, lecturer
(FSAEI HE Sevastopol State University)

Modeling of processes of finishing by abrasive pastes

The results of modeling of finishing process are given in this article. At modeling it is taking into account, that the process of removal of material, arising from contact of rough surfaces of workpiece and lap with lapping compound, which contains the aggregate of grains of different sizes and shapes, is a stochastic process. The obtained dependences allow to predict material removal, differentially assess the impact of individual factors on parameters of quality of parts and speed of the process.

Keywords: finishing; abrasive grains; probability of material removing; pressing force; cutting force components.

Научно-технический прогресс в машиностроении сопровождается повышением мощности и скорости машин с одновременным ростом их надежности, точности и долговечности. Непрерывное развитие многих областей техники, в частности приборостроительной, автомобильной, сельскохозяйственной, станкостроительной и других, связано с использованием большого количества ответственных деталей, например, таких как подшипники качения, плунжерные пары, различные опоры колебательных или вращательных механизмов. В большинстве случаев качество функционирования всего устройства неразрывно связано с показателями качества и эксплуатационными характеристиками деталей. Требования к качеству изготовления ответственных деталей и их эксплуатационным показателям непрерывно возрастают, что требует постоянного совершенствования методов финишной обработки, к числу которых относятся процессы доводки.

Особенностью процесса доводки является то, что абразивные зерна под действием сил резания шаржируют поверхность инструмента.

Зерна абразивной пасты, которые расположены между микронеровностями заготовки и инструмента, вдавливаются в поверхность инструмента. При этом их вершины царапают обрабатываемую поверхность.

Абразивные зерна и порошки из синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов, используемых для приготовления доводочных паст и суспензий, представляют собой совокупность зерен различной величины и формы: монокристаллы, осколки, сростки и поликристаллы. При производстве и контроле порошок подразделяют на фракции.

Получить абразивный порошок, состоящий только из зерен одного размера, не представляется возможным, поэтому, кроме основной фракции в составе порошков содержатся побочные фракции, которые крупнее или мельче основной. В табл. 1 (см. обложку) приведены данные объединения Европейских производителей абразивных материалов и компании «Винтертур» (сайт FEPA), отражающие состав алмазных микропорошков и закон распределения размеров абразивных зерен при получении

нии микропорошков методами отслаивания [1].

Поскольку паста, наносимая ровным слоем на поверхность доводочного инструмента, тщательно перемешана, то число зерен в единице объема равно

$$n_3 = \frac{\chi}{l_0^2}, \quad (1)$$

где l_0 – размер зерна в поперечнике; χ – коэффициент учитывающий долю прочих компонентов пасты.

По данным работы [2]

$$\chi = \frac{1,55}{\left(1 + \frac{1-\xi}{\xi} \frac{\gamma_3}{1-\gamma_3}\right)}, \quad (2)$$

где γ_3 – объемный вес зерен; ξ – часть веса зерен в единице веса пасты.

Параметры внедрения единичного зерна в поверхности заготовки и инструмента определяются с помощью расчетной модели (рис. 1, см. обложку).

В работе [3] показано, что нормальная сила резания P_H единичным зерном характеризуется соотношением

$$P_{Hi} = 11,8\tau_{сдв.и} a_i^2 \frac{(1 + \xi_c)^3}{\xi_c}, \quad (3)$$

$$\forall i = \{ \text{притир, заготовка} \}, \{ \text{и, з} \},$$

где $\tau_{сдв.и}$ – величина касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига материала; ξ_c – коэффициент усадки стружки; a_i – глубина внедрения зерна в притир или заготовку соответственно.

Для взаимодействия каждого абразивного зерна с материалом заготовки и доводочного инструмента справедливо очевидное равенство

$$P_{Hi} = P_{Hз} \quad (4)$$

где P_{Hi} , $P_{Hз}$ – силы реакций, возникающих при внедрении единичного зерна в материал инструмента и заготовки, соответственно.

С учетом зависимостей (3) и (4):

$$11,8\tau_{сдв.з} a_3^2 = 11,8\tau_{сдв.и} a_u^2. \quad (5)$$

Обозначив сумму внедрений зерна в материалы заготовки и инструмента через $\Delta = a_3 + a_u = d - L$, из пропорции (5) получим:

$$\Delta = \left(\frac{\sqrt{\tau_{сдв.з}} + \sqrt{\tau_{сдв.и}}}{\sqrt{\tau_{сдв.з}}} \right) a_3. \quad (6)$$

Откуда

$$a_3 = \mu(d - L), \quad (7)$$

где $\mu = \left(\frac{\sqrt{\tau_{сдв.и}}}{\sqrt{\tau_{сдв.и}} + \sqrt{\tau_{сдв.з}}} \right)$, $\tau_{сдв.з}$, $\tau_{сдв.и}$ – величины

касательных напряжений вдоль условных плоскостей сдвига материалов заготовки и инструмента; a_3 – глубина внедрения зерна в материал заготовки.

В силу того, что для доводки используются микропорошки с зернистостью от 14/10, у которых закон распределения величин диаметров зерен близок к нормальному [1], запишем:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(d - m_d)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (8)$$

где $m_d = \frac{d_{Hз}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \frac{d_{Hз}^3 P_{FRi}^{\%}}{d_{Fpi}^3 100}}}$,

$\sigma_d = m_d \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\frac{d_{Fpi}}{m_d} - 1\right)^2 \frac{m_d^3 P_{FRi}^{\%}}{d_{Fpi}^3 100}}$ – математическое

ожидание и среднеквадратическое отклонение размера абразивных зерен, соответственно; $d_{Hз}$ – диаметральный размер зерен, соответствующий номеру зернистости; d_{Fpi} – средний размер зерен i -й фракции; $P_{Fpi}^{\%}$ – процентное содержание i -й фракции по весу.

Неровности доводочного инструмента и заготовки подчиняются независимым гауссовским распределениям [4]. Поэтому расстояние между инструментом и заготовкой имеет нормальный закон распределения с функцией плотности

$$f_L = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2}} \exp\left[-\frac{[(u_1 + u_2) - (m_{u1} + m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2)}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\sigma_L^2}} \exp\left[-\frac{[L - m_L]^2}{2\sigma_L^2}\right], \quad (9)$$

где u_1 и u_2 – величины, характеризующие неровности поверхности инструмента и заготовки, ($L = u_1 + u_2$); m_{u1} , m_{u2} – математические ожидания и σ_{u1} , σ_{u2} – среднеквадратические отклонения соответственно.

Зерно размером d может оставлять риск на поверхности заготовки, если выполняется условие $(d - L) > 0$. При этом внедрение зерен в заготовку определяется вероятностным законом

$$fa_3(d, L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\mu}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2}} \times \exp\left[-\frac{[(d - u_1 - u_2) - (m_d - m_{u1} - m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2)}\right] = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a3}} \exp\left[-\frac{(a_3 - m_{a3})^2}{2\sigma_{a3}^2}\right]. \quad (10)$$

Таким образом, получена функция плотности распределения глубины внедрения зерен в материал заготовки, учитывающая шероховатость поверхности материалов заготовки и притира и их физико-механические свойства.

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съём материала, рассмотрим процесс взаимодействия инструмента с заготовкой на микроуровне. Удаление материала в зоне контакта можно рассматривать как случайное событие, характеризующее вероятностью удаления материала. Для установления связи вероятности удаления материала от числа и геометрии абразивных зерен, рассмотрим процесс обработки, когда вершины зерен расположены на одном уровне и внедряются в металл на одинаковую глубину.

Допустим, что случайное распределение царапин удовлетворяет следующим условиям:

1. Царапины распределяются на оси абсцисс независимо друг от друга, т.е. вероятность попадания того или другого числа зерен на заданный отрезок не зависит от того, сколько их попало на любой другой отрезок, не перекрывающийся с ним.

2. Вероятность попадания на малый участок Δx двух или более зерен стремится к нулю по сравнению с вероятностью попадания одного зерна. Рассмотрим на оси X малый участок Δx и вычислим вероятность того, что через этот участок пройдет хотя бы одно зерно.

Если две соседние царапины перекрывают друг друга на уровне y (рис. 2, см. обложку), то материал между ними будет удален полностью. Для любого уровня y это условие можно записать

$$0 \leq l_{\text{мп}} \leq 0,5(b_1(y) + b_2(y)), \quad (11)$$

где $l_{\text{мп}}$ – расстояние между двумя соседними траекториями на поверхности заготовки в сечении, перпендикулярном вектору скорости резания; $b_1(y)$ и $b_2(y)$ – ширины зерен, движущихся по соседним траекториям на уровне y .

Если ширины зерен для одного уровня y равны, то условие их перекрытия можно переписать: $0 \leq l_{\text{мп}} \leq b(y)$.

Вероятность удаления материала заготовки $P(y)$ на уровне y равна вероятности попадания случайной величины $l_{\text{мп}}$ на отрезок $[0, b(y)]$.

Обозначив плотность распределения вероятности случайной величины $l_{\text{мп}}$ через $f(l_{\text{мп}})$ запишем

$$P(y) = P(0 \leq l_{\text{мп}} \leq b(y)) = \int_0^{b(y)} f(l_{\text{мп}}) dl_{\text{мп}}. \quad (12)$$

Появление на поверхности заготовки царапин можно рассматривать, как результат воздействия потока зерен с ограниченным после-

действием. Из теории массового обслуживания следует, что его можно считать простейшим, с плотностью распределения [2]:

$$f(l_{\text{мп}}) = \lambda e^{-\lambda l_{\text{мп}}} \quad (13)$$

где λ – интенсивность прохождения зерен через поверхность заготовки на уровне y .

Для экспериментальной проверки зависимости (13) определили расстояния между единичными абразивными зернами на поверхности притира, шаржированного зернами из карбида кремния зеленого зернистостью 25 мкм. Расстояния вычислялись как разность координат вершин зерен, которые замерили на большом инструментальном микроскопе на участке инструмента шириной 1,8 мм, длиной 5 и 10 мм. Полученные экспериментальные данные по частоте расстояний приведены ломаными линиями (кривые 1 и 2 соответственно) (рис. 3, см. обложку). Статистическую проверку гипотезы о законе распределения расстояний $l_{\text{мп}}$ выполнили по критерию согласия χ^2 . При уровне доверительной вероятности 0,95 расчетные и табличные значения χ^2 соответственно равны: для кривой 1 – 13,11 и 16,9; для кривой 2 – 13,5 и 15,5.

Вероятность удаления материала с поверхности заготовки характеризуется

$$P(y) = \int_0^{b(y)} (\lambda \exp[-\lambda l_{\text{мп}}]) dl_{\text{мп}} = 1 - \exp[-\lambda b(y)] = 1 - \exp[-u_y] \quad (14)$$

Вероятность удаления $P(y)$ (или неудаления $P(\bar{y})$) материала заготовки на любом из рассматриваемых уровней y определяется шириной и интенсивностью прохождения зерен через рассматриваемое сечение.

В соответствии с (14) на уровне y

$$\Delta u_y = \Delta \lambda b_y. \quad (15)$$

Через единичное сечение поверхностного слоя заготовки $1 \cdot \Delta a_3 \cdot \Delta \tau \cdot v_u$ проходит $\Delta \lambda$ зерен:

$$\Delta \lambda = n_3 f a_3 (d, L) \Delta a_3 v_u \Delta \tau \quad (16)$$

где v_u – скорость зерен в материале заготовки.

При теоретических расчетах и моделировании сложная геометрическая форма реальных алмазных и абразивных зерен исследователями, в зависимости от решаемой задачи, заменяется упрощенным эквивалентом на базе трехосного эллипсоида: шаром или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением осей. Проведенные расчеты по изменению вероятности удаления материала по глубине слоя шероховатости при моделировании зерна (рис. 4, см. обложку) показали, что для микропорошков форма зерна оказывает незначительное влияние на вероятность удаления материала.

Использование модели зерна в виде трехосного эллипсоида и эллипсоида вращения с постоянным соотношением осей не улучшает точности расчета. Учитывая, что для достаточно большой выборки таких зерен их средняя форма будет асимптотически приближаться к шару с диаметром равным математическому ожиданию закона распределения размеров, то целесообразно использовать шар для моделирования эквивалентной формы зерен.

При аппроксимации профиля зерна шаром получаем:

$$b_3 = \sqrt{a_3 \cdot (d - a_3)}. \quad (17)$$

После подстановки (13) в (12), а затем (16), (17) в (15) и интегрирования по глубине внедрения зерна в материал заготовки a_3 и времени τ получим:

$$u_y(a_3, \tau) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_3}} \frac{\chi v_u}{l_0^2} (t - t_0) \times \int_0^{t_f - y} \left(\sqrt{a_3(d - a_3)} \exp\left[-\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2}\right] \right) da_3. \quad (18)$$

С учетом условия ($y = 0$) и вытекающего из него соотношения $P(y) = \beta_0$, уравнение (18) определяет выражение для расчета съема материала в зоне контакта заготовки с инструментом в виде:

$$1 - \beta = \exp\left[\frac{\mu}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_3}} \frac{\chi v_u}{l_0^2} (t - t_0) \times \int_0^{t_f - y} \left(\sqrt{a_3(d - a_3)} \exp\left[-\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2}\right] \right) da \right]. \quad (19)$$

Полученная зависимость (19) позволяет рассчитать относительную опорную длину профиля (рис. 5, см. обложку) $t_p(y) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$, путем расчета вероятности удаления материала на уровне $y = p$:

$$t_p(y) = P(\bar{y}). \quad (20)$$

Полагая, что профиль обработанной поверхности характеризуется случайной стационарной функцией с нормальным распределением ординат, что подтверждается данными [5], получим выражение для оценки значений среднего арифметического отклонения профиля Ra , связанное с относительной опорной длиной профиля

$$Ra = 2 \int_0^\infty t_p dy_m, \quad (21)$$

где y_m – расстояние от уровня до средней линии профиля.

Подстановка $P(y)$ в (21) позволяет получить выражение для расчета параметра Ra процесса доводки:

$$Ra = 2 \int_0^\infty P(\bar{y}) dy_m. \quad (22)$$

Параметр R_{max} , может быть рассчитан в соответствии с рекомендациями [4]

$$R_{max} \approx 12 \int_0^\infty P(\bar{y}) dy_m. \quad (23)$$

Для вывода математических зависимостей, позволяющих рассчитывать силу прижима, рассмотрим схему процесса доводки (рис. 6, см. обложку). Предварительно шаржированный притир, совершая вращательное движение с угловой скоростью ω , прижимается с усилием $P_{пр}$ к поверхности заготовки, при этом абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал на глубину a_3 .

На каждое абразивное зерно действуют тангенциальная P_{3z} и радиальная P_{3y} составляющие силы резания.

На основании положений теории пластичности С.Н. Корчаком были получены зависимости для расчета тангенциальной P_{3z} и радиальной P_{3y} составляющих сил при микрорезании единичным абразивным зерном, имеющим площадку износа

$$P_{3z} = \left(\frac{\sqrt{3,25} a_3 \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 \mu_{mp} b(z) \right) \tau_3, \quad (24)$$

$$P_{3y} = \left(\frac{\sqrt{3,25} a_3 \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 b(z) \right) \tau_3,$$

где a_3 – глубина микрорезания единичным абразивным зерном; β – угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания, $\beta = 34^\circ$; β_1 – угол сдвига, $\beta_1 = 22^\circ$; τ_3 – среднее касательное напряжение в плоскости сдвига; μ_{mp} – коэффициент трения; $b(z)$ – ширина площадки на вершине абразивного зерна в направлении скорости резания.

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать силу прижима при воздействии совокупности зерен, выделим в зоне контакта детали с притиром для момента времени τ элементарный объем с глубиной Δa_3 и шириной, равной длине контакта L_k по образующей притира с обрабатываемой поверхностью. Тогда число абразивных зерен $\Delta \lambda$ на длине дуги контакта притира с обрабатываемым материалом l , вершины которых одновременно находятся в выделенном микрообъеме, определяется по плотности распределения $f_{a_3}(d, L)$:

$$\Delta \lambda = L_k n_3 f_{a_3}(d, L) \Delta a_3 l, \quad (25)$$

где n_3 – количество абразивных зерен; Δa_3 – глубина внедрения зерна в материал заготовки для единичного сечения; $f_{a_3}(d, L)$ – плотность распределения абразивных зерен, которые внедрились в материал заготовки

$$f_{a_3}(d, L) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi\sigma_{a_3}}} \exp\left[-\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2}\right], \quad (26)$$

где m_{a_3} и σ_{a_3} – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины a_3 соответственно.

Длина дуги контакта притира с обрабатываемой поверхностью l определяется геометрически (рис. 6, см. обложку) и равна:

$$l = \frac{\pi}{180^\circ} r \psi = 0,03491 r \arcsin\left(\frac{\sqrt{h(2r-h)}}{r}\right), \quad (27)$$

где ψ – угол, для которого рассчитывается длина дуги контакта; h – глубина врезания притира в заготовку; r – радиус притира.

В формуле (24) величина $b(z)$ зависит от глубины микрорезания

$$h_i = h_{i-1} + a_{3i}, \quad (28)$$

где h_i и h_{i-1} – глубина врезания притира в заготовку на i -м и $i-1$ -м обороте притира соответственно; a_{3i} – глубина резания на i -м обороте притира.

С учетом уравнения (28) зависимость (27) глубины врезания притира в материал заготовки для i -го оборота запишется в виде:

$$l_i = 0,03491 r \arcsin\left(\frac{\sqrt{(h_{i-1} + a_{3i}) \cdot (2r - (h_{i-1} + a_{3i})))}}{r}\right).$$

Введем понятие условной длины режущей кромки абразивных зерен выделенного микрообъема b_Σ . Если бы все точки вершин абразивных зерен контактировали с обрабатываемым материалом, то условная длина режущей кромки микрообъема определялась бы произведением ширины площадки износа на число зерен $\Delta\lambda$. С учетом вероятности контакта запишем выражение для расчета условной длины режущей кромки

$$b_\Sigma = b P(y) \Delta\lambda, \quad (29)$$

где b_Σ – условная длина режущей кромки; $P(y)$ – вероятность контакта абразивных зерен с материалом заготовки, численно равная вероятности удаления материала; b – длина режущей кромки единичного зерна.

Величина суммарных сил, действующих на абразивные зерна, вершины которых расположены в выделенном микрообъеме, вычисляется произведением сил, рассчитываемых по уравнению (24), на длину условной режущей кромки микрообъема:

$$\Delta P_{\Sigma 3z} = P_{3z} b_\Sigma, \quad \Delta P_{\Sigma 3y} = P_{3y} b_\Sigma. \quad (30)$$

С учетом зависимостей (24), (25) и (29) уравнение (30) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma 3z} &= P_{3z} \cdot b \cdot P(y) \cdot L_k \cdot n_3 \cdot f_{a_3}(d, L) \cdot \Delta a_3 \cdot l, \\ \Delta P_{\Sigma 3y} &= P_{3y} \cdot b \cdot P(y) \cdot L_k \cdot n_3 \cdot f_{a_3}(d, L) \cdot \Delta a_3 \cdot l. \end{aligned} \quad (31)$$

Проинтегрировав уравнения (31) по глубине получим зависимости для расчета силы прижима и тангенциальной составляющей силы резания.

$$P_{\Sigma 3z} = \int_0^{t_f} P_{3z} b P(y) L_k n_3 f_{a_3}(d, L) l da_3, \quad (32)$$

$$P_{\Sigma 3y} = \int_0^{t_f} P_{3y} b P(y) L_k n_3 f_{a_3}(d, L) l da_3.$$

Полученные зависимости моделируют механизм изменения сил в процессе доводки деталей абразивными пастами и могут быть использованы при расчете режимов, прогнозировании качества обработанной поверхности при доводке из условий заданного состояния поверхностного слоя детали.

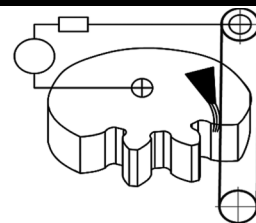
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доброскок В.Л., Гарашченко Я.Н. Выбор параметров размеров распределения зерен шлифпорошка в соответствии с заданными требованиями по содержанию фракций // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. тр., Харьков, 2000. Вып.1(3). С. 55–63.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
3. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов, 1975. 189 с.
4. Шероховатость поверхностей. Теоретиковероятностный подход / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. М.: Наука, 1975. 344 с.
5. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования. Дис... д-ра техн. наук: Одесса, 2006. 339с.

REFERENCES

1. Dobroskok V.L., Garashchenko Ya.N. Selection of parameters of dimensions of distribution of microgrit grains, according to specified requirements to fractions content. High Tech in mechanical engineering. Proceedings of scientific conference. Khar'kov. 2000. Iss. 1(3). Pp. 55-63.
2. Novoselov Yu.K. Dynamics of shaping of surfaces at abrasive treatment. Sevastopol: SevNTU publishers. 2012. 304 p.
3. Korolev A.V. Research of processes of generating surfaces of tool and part at abrasive treatment. Saratov, 1975.189 p.
4. Surface roughness. Probability-theoretical approach. A.P. Khusu, Yu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. Moscow: Nauka, 1975. 344 p.
5. Bratan S.M. Technological bases of support of quality and increase of stability of high performance of finish and fine grinding. Doctor of engineering science dissertation. Odessa, 2006. 339 p.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандоужко



УДК 621.98:539.376
DOI: 10.12737/17320

В.Н. Чудин, д.т.н.
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ))
E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru

Газоформовка корпусных гофро-стрингерных панелей при кратковременной ползучести

Предложены технология и расчеты режима горячего формообразования давлением газа гофро-стрингерных панелей. Принято состояние ползучести деформируемого материала. Даны оценки давления газа, локальной устойчивости деформаций, повреждаемости материала и длительности процесса. Представлены технологические данные и образцы изделий.

Ключевые слова: ползучесть; деформации; скорости деформаций; напряжения; время; давление; устойчивость деформаций.

V.N. Chudin, d.en.s.
(Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)).

Gas forming of body embossing-stringer panels at short-term creep

The technology and analysis of hot shape-forming mode by gas pressure of embossing-stringer panels are suggested. The creep state of a deformable material is assumed. The assessments of gas pressure, local stability of strain, material damageability and process duration are given. The technological data and samples of products are presented.

Keywords: creep; deformations; strain rates; stresses; time; pressure; strain stability.

Корпуса приборных отсеков ракетно-космических аппаратов имеют гофро-стрингерную конструкцию: две разнесенные оболочки, подкрепленные продольными ребрами между ними. Конструкция изготавливается из высокопрочных алюминиевых сплавов и обеспечивает необходимые механические характеристики. Традиционная технология их производства основана на процессах штамповки, сварки, клепки, что связано с большими трудозатратами и не всегда обеспечивает качество изделий.

В связи с этим предлагается технология, сочетающая сварку плавлением и формообразо-

вание газом. Газоформовка применительно к изготовлению радиаторных корпусных панелей топливных отсеков рассмотрена в работах [1, 2]. Показано, что технологические параметры процесса (давление, время, степень формообразования) определяют его стабильность и качество изделий. Схема изготовления гофро-стрингерной панели изображена на рис. 1.

На схеме процесса обозначено: l_0 , l – исходная и текущая длины растягиваемого участка внутреннего листа; Δl – текущее удлинение участка листа; δ_0 , δ – исходная и текущая толщины этого листа; h – высота панели; α – угол наклона внутренней стенки. При этом:

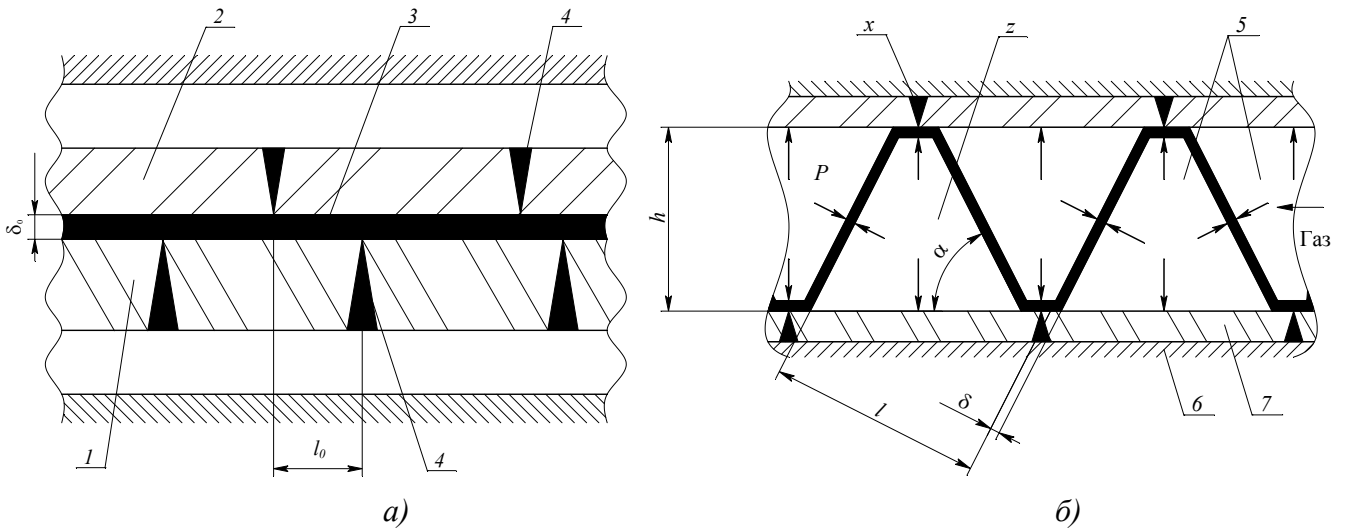


Рис. 1. Технологическая схема изготовления панели:

a – нагрев пакета заготовок; *б* – формирование панели газом; 1, 2 – наружные листы; 3 – внутренний лист; 4 – сварной шов; 5 – продольные полости; 6 – штамп; 7 – изделие

$$l = \frac{l_0}{\cos \alpha}, \quad \Delta l = l - l_0, \quad \alpha = \arctg \frac{h}{l_0}.$$

Три листа соединяют сваркой попарно продольными швами с обеих сторон. Полученный пакет заготовок герметизируют по периметру давлением гидропресса, нагревают и подают в пакет газ. Под давлением газа внешние листы раздвигаются, растягивая внутренний лист по свободным участкам с образованием продольных полостей. Получаемое изделие является гофро-стрингерной панелью.

Кинематика и деформации. Представим необходимые для расчета кинематические и деформационные зависимости в соответствии с технологической схемой процесса.

На произвольном этапе газотормовки скорости перемещения точек на растягиваемом участке внутреннего листа запишем функцией:

$$v = v_x = \frac{\Delta l}{l t} x, \quad (1)$$

где x – координата точки в зоне растяжения; t – время деформирования.

Функция (1) удовлетворяет граничным условиям:

$$x = 0, \quad v = 0, \quad x = \frac{l}{2}, \quad v = \frac{\Delta l}{2t}.$$

При условии плоской деформации компоненты скоростей деформаций, деформаций и их интенсивности представим, используя функцию (1), в виде

$$\xi_x = -\xi_z = \frac{dv}{dx} = \frac{\Delta l}{l t}, \quad \xi_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \xi_x = k \xi_x. \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_i = k \frac{\Delta l}{l}. \quad (3)$$

Используя условие несжимаемости:

$$d\varepsilon_x = -d\varepsilon_z = \frac{dl}{l} = -\frac{d\delta}{\delta},$$

получим текущую толщину растягиваемого листа, т.е.

$$\delta = \delta_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^{-1}. \quad (4)$$

Напряжение и давление газа. Деформируемый внутренний лист находится в состоянии ползучести, что определим уравнением состояния нелинейной вязкости материала [3]:

$$\sigma_i = A \xi_i^n = A (k \xi_x)^n, \quad (5)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A, n – константы материала.

Рассчитаем компоненты напряжений в области деформаций внутреннего листа. Условие текучести при плоской деформации [4] записывается как

$$\sigma_x - \sigma_z = k \sigma_i.$$

Для данной схемы операции $\sigma_z = 0$. Из этого условия получим, что

$$\sigma_x = k \sigma_i, \quad \sigma_y = \frac{1}{2} \sigma_x, \quad (6)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – напряжения в плоскости внутреннего листа и по нормали к нему соответственно.

При известном растягивающем напряжении (6) давление газа можно выразить соотношением:

$$p = m \frac{S_1}{S_2} \sigma_x \sin \alpha = A m k^{1+n} \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{\Delta l}{l t}\right)^n \sin \alpha. \quad (7)$$

Аналогичное выражение получим, используя уравнение баланса мощностей внешних и внутренних сил [5], т.е.

$$p = \frac{ml}{2v_1} \frac{S_1}{S_2} \sigma_i \xi_i \sin \alpha, \quad (8)$$

где m – количество гофр; $S_1 = \delta L$ – площадь продольного сечения гофры; $S_2 = aL$ – площадь поверхности панели; a, L – ширина и длина панели соответственно.

Давление, как это следует из соотношений (7) и (8), нелинейно зависит от времени и его величина тем меньше, чем больше длительность операции.

Устойчивость деформаций. Растяжение внутреннего листа лимитируется возможной потерей устойчивости деформаций. На основе энергетического критерия устойчивость локальных деформаций при плоской схеме нагружения (6) выражена в работе [2] следующим условием:

$$\frac{1}{z_1 z_2} + b \xi_i \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - b \xi_i \right) \geq t. \quad (9)$$

При этом $\sigma_z = 0, \xi_y = 0, \varepsilon_y = 0$, что соответствует данной схеме процесса; z_1, z_2 – подкасательные к кривым $\sigma_i(t), \xi_i(t)$ соответственно;

$$b = \left[1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \sigma_x, \sigma_y - \text{компоненты напряжений (6)}.$$

Запишем выражения для подкасательных, используя соотношения (2) и (5). Получим:

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{dt} = -\frac{n}{t}, \quad \frac{1}{z_2} = \frac{1}{\xi_i} \frac{d\xi_i}{dt} = -\frac{1}{t}.$$

Внеся эти выражения в зависимость (9), получим условие устойчивости в виде:

$$t_{кр} \leq \left\{ \left\{ n + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \left[(1-n) \frac{l}{\Delta l} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (10)$$

Условие (10) устанавливает критическое время $t_{кр}$ (длительность) формообразования без локализации деформаций.

Повреждаемость материала. Оценку повреждаемости материала растягиваемого листа панели можно сделать по уравнениям теории прочности при ползучести [2, 3]. Зададим, используя выражения (2), (3), (5), функции

$$\varepsilon_i = \frac{k \Delta l t}{l t_k} = \frac{k t}{t_k} (1 - \cos \alpha), \quad \xi_i = \frac{\varepsilon_i}{t}, \quad \sigma_i = A \xi_i^n,$$

где t, t_k – текущее и конечное время соответственно.

По уравнению энергетической теории прочности получим, используя эти функции, следующее:

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int_t \sigma_i \xi_i dt = \frac{A}{A_{пр}} [k(1 - \cos \alpha)]^{1+n} t_k^{-n}. \quad (11)$$

По уравнению деформационной теории

$$\omega = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ипр}} = \frac{k}{\varepsilon_{ипр}} (1 - \cos \alpha), \quad (12)$$

где ω – повреждаемость материала; $A_{пр}, \varepsilon_{ипр}$ – предельная удельная работа в момент разрушения и предельная интенсивность деформаций.

Соотношение (11) применяется при зависимости повреждаемости от времени операции; соотношение (12) – при зависимости только от величины деформации. Критическое состояние определяется условием $\omega = 1$.

Технологические данные. Отработку технологии проводили применительно к изготовлению панелей из мелкозернистых алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1911. Размеры панелей: габариты 300×500 мм; $h = 25$ мм; $l_0 = 25$ мм; $\alpha = 45^\circ$. Толщина внешних листов 2 мм; внутреннего листа $\delta_0 = 1$ мм. Заготовки соединяли различными видами сварки: электронно-лучевая и лазерная сварки обеспечивают, в отличие от роликовой, узкий герметичный сварной шов на заданную глубину.

Закрытый штамп с пакетом заготовок нагревали и подавали в пакет аргон для формообразования изделия. Формообразование проводили на гидропрессе с системами нагрева и подачи аргона от баллона (рис.2). Для расчета использовали константы уравнений состояния, приведенные в работе [2].

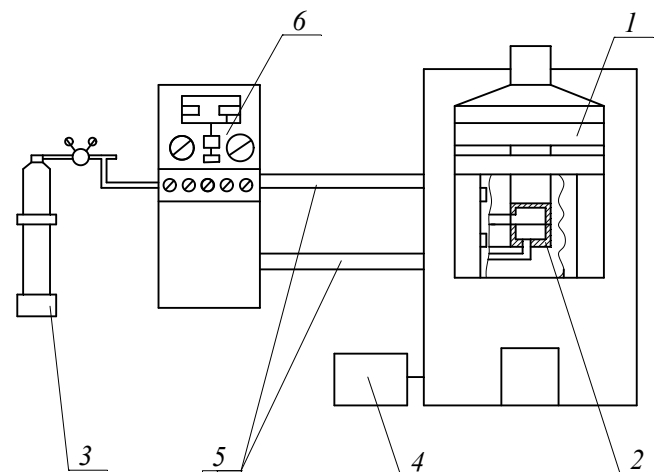


Рис. 2. Установка для формообразования панелей: 1 – гидропресс мод. ДБ2432; 2 – штамповый блок; 3 – баллон аргона; 4 – трансформатор системы нагрева; 5 – трубопроводы; 6 – пульт управления

Технологические режимы, полученные на основе расчетных и экспериментальных данных

Номер п/п	Операции	Технологические режимы		
		Температура, °С	Давление, МПа	Время, мин
1	Электронно-лучевая сварка трех листов в пакете с глубиной шва на две заготовки с переворотом пакета заготовок	По отдельному технологическому процессу		
2	Установка пакета в штамп. Нагрев. Закрытие штампа и герметизация пакета по контуру прессовым давлением	450...500	10...12	До 150
3	Подача газа в пакет. Формообразование	— —	1,0...1,2	12...15
4	Выдержка под давлением газа (калибровка)	— —	2,0...2,5	10...15
5	Охлаждение в закрытом штампе при постепенном сбросе давления газа. Раскрытие штампа. Съем изделия	100...120	50...70	120

При формообразовании панелей давление газа не превышало 1,2 МПа, что соответствовало расчету. Утонение внутреннего листа составляло 50...60 %. Расчетная величина повреждаемости не превышала 0,6...0,7 при устойчивой деформации. Увеличение угла конуса полости более 60° приводило к разрыву внутреннего листа. Технологические режимы, полученные на основе расчетных и экспериментальных данных, приведены в таблице.

Механическими испытаниями установлено, что предел прочности сплавов 1201, 1911 после формообразования панелей составлял 280...300 МПа; сплава АМг6 – 200...230 МПа. Термообработка сплавов 1201, 1911 повышала предел прочности до 350 МПа. Образцы гофрстрингерных панелей представлены на рис. 3.

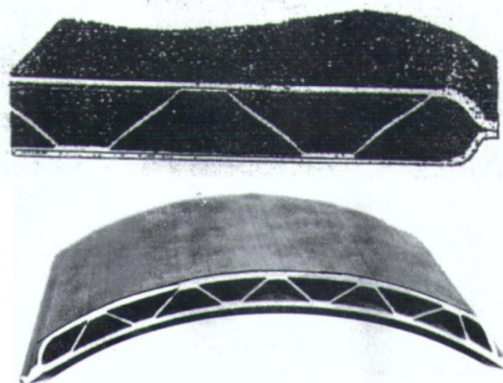


Рис. 3. Образцы изделий

Выводы

1. Технологический режим газоперформовки панелей определяется температурно-скоростными условиями обработки, при которых развивается ползучесть. Увеличение длительности (времени) процесса способствует уменьшению давления.

2. Повреждаемость материала растягиваемого листа панели увеличивается в процессе его растяжения. Для данных алюминиевых сплавов она зависит от времени формообразования. При этом возможна локальная неустойчивость деформаций. В связи с этим время процесса деформирования должно быть ограничено «снизу» и «сверху».

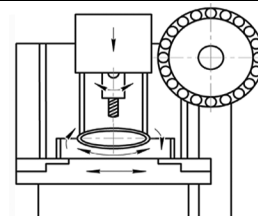
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудин В.Н. Формообразование газом корпусных ячеистых панелей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 9(51). С. 35–38.
2. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов/ С.С. Яковлев и др. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
3. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение. 1986. 216 с.
4. Теория обработки металлов давлением / В.А. Голенков и др. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УПИ, 2001. 836 с.

REFERENCES

1. Chudin V.N. Shape forming by gas of body cell panels. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. № 9(51). Pp. 35–38.
2. Isothermal pneumatic forming of anisotropic high-strength sheet materials. S.S. Yakovlev et al. Moscow: Mashinostroyenie, 2009. 352 p.
3. Malinin N.N. Creep in metal working. Moscow: Mashinostroyenie, 1986. 216 p.
4. Theory of metal forming. V.A. Golentkov et al. Moscow: Mashinostroyenie, 2009. 442 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Ekaterinburg: UPI, 2001. 386 p.

Рецензент д.т.н. С.С. Яковлев



УДК 621.92
DOI: 10.12737/17321

В.Ф. Макаров, д.т.н.,
Р.А. Туранский, магистрант,
А.В. Григорьева, магистрант
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
E-mail: makarovv@pstu.ru

Технологическое обеспечение точности изготовления сопловых лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ*

Приведены результаты разработки и применения специального программного обеспечения для учета отклонения литейных поверхностей профиля пера лопаток и расчета площади проходного сечения путем введения файла коррекции в стойку ЧПУ многоосевого шлифовального станка.

Ключевые слова: проходное сечение; лопатка турбины; глубинное шлифование; профильные поверхности; шлифовальный круг.

V.F. Makarov, d.en.s.,
R.A. Turanskiy, undergraduate,
A.V. Grigor'eva, undergraduate
(Perm National Research Polytechnic University, Perm)

Technological support of production accuracy of nozzle blades of turbines at deep multi-axial grinding on NC machine*

At assembly of a nozzle diaphragm the accuracy of flow area depends on manufacturing accuracy of foundry surfaces of blades profile and accuracy of reference mounting surfaces of each individual nozzle blade. The existing grinding technology of reference surfaces of blades did not consider an error of blades casting, which required longtime adjustment of blades for maintenance of flow area. To solve this problem, the software for data preparation for blades grinding, which includes special software for the automated calculation of displacement values and rotation angles of nozzle and operating blades, is developed.

Keywords: flow area; turbine blade; deep grinding; profile surfaces; grinding wheel.

Особенности обработки сопловых лопаток. Известно, что при изготовлении сопловых и рабочих лопаток турбин используется литье методом направленной кристаллизации. В связи с недостаточной точностью данного метода

в настоящее время на производстве существует проблема компенсации погрешности литья при дальнейшей механической обработке изделий [1]. Для того чтобы произвести механическую обработку, в первую очередь необходимо правильно установить заготовку, т. е. придать ей правильное положение относительно выбранной системы. Для сопловых или рабочих лопаток такое положение определяется по шести базовым литейным точкам. Однако на практике, при таком варианте базирования сопловых

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.310016 от 12.02.13) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

или рабочих лопаток, а именно на их проточных частях возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с погрешностью литья отливок (рис. 1) [3, 4].

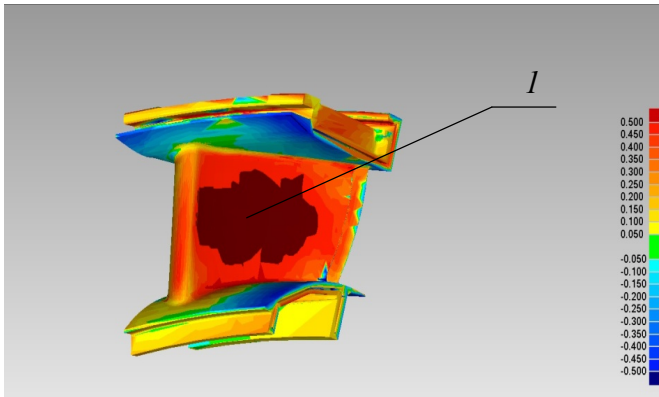


Рис.1. Погрешность литья (*I*) на проточной части сопловой лопатки

Одной из важных точностных характеристик сопловых лопаток является обеспечение точности проходного сечения.

Площадь проходного сечения является одним из ключевых параметров, характеризующих КПД газогенератора и газотурбинного двигателя. Он представляет собой площадь сечения межлопаточного канала соплового аппарата, направляющего поток раскаленного газа на лопатки ротора турбины для создания крутящего момента на валу ГТД [5, 6]. Разработчиками двигателя закладывается величина площади проходного сечения соплового аппарата, при которой достигаются оптимальные КПД и тяга двигателя.

При сборке соплового аппарата точность проходного сечения зависит от качества изготовления литейных поверхностей профиля лопаток и базовых установочных поверхностей каждой сопловой лопатки [8]. Профиль лопатки после литья не обрабатывается (только полируется), поэтому на него невозможно ввести коррекцию с помощью механической обработки напрямую. Однако возможно косвенное воздействие путем шлифования установочных поверхностей отливки. Введя коррекцию при шлифовании данных поверхностей, можно развернуть профиль пера лопатки до номинального положения [9, 10].

Для получения величин коррекции разработано специальное программное обеспечение (СПО). Возможности СПО включают в себя: — автоматизированный расчет значений смещения и углов поворота сопловых и рабочих лопаток. Данные величины используются для компенсации погрешности литья лопаток;

— автоматизированное построение, анализ и редактирование проходного сечения лопаток.

Для решения приведенных задач спроектирован и изготовлен специальный профилишлифовальный пятиосевой станок с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D мод. MFP-050.65.65 фирмы MagerleAG (Швейцария), который имеет горизонтальное расположение шпинделя и поворотный стол (рис. 2).

Станок предназначен для комплексной обработки шлифованием сложных деталей с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат. Современная конструкция станка (рис. 3) и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства [7].



Рис. 2. Станок мод. MFP-050.65.65 для профильного глубинного шлифования лопаток турбины

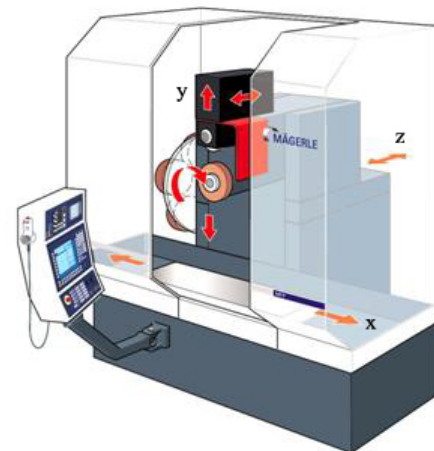


Рис.3. Схема осей станка мод. MFP-050.65.65

Исходные данные для работы СПО. Исходными данными для ПО являются:

— оцифрованные модели (ОМ) отливок сопловых лопаток в формате STL (фасетные тела). Оцифровка отливок производится с помощью бесконтактной оптической системы типа ATOS;

— геометрическая модель (ГМ) лопатки, созданная в CAD/CAM системе NX;

— данные о числе лопаток в колесе, а также номинальная площадь проходного сечения;

— значение припуска на обрабатываемые поверхности лопатки;

— максимальный угол поворота отливки при подгонке проходного сечения.

Порядок работы СПО для компенсации погрешностей литья лопатки. При сравнительном анализе оцифрованной и геометрической моделей придерживаются следующей последовательности действий.

1. Определяется шесть контрольных точек на оцифрованной модели отливки путем совмещения фасетного тела оцифрованной модели отливки с геометрической моделью лопатки (рис. 4, см. обложку).

2. По шести контрольным точкам ОМ совмещается с ГМ лопатки (рис. 5, см. обложку). При этом ОМ и связанная с ней система координат изменяет свое положение. Данное положение сохраняется для последующих расчетов. На рис. 5 видны участки с отклонениями (более темные), требующие дополнительного разворота моделей.

3. Далее проводится совмещение по наилучшему совпадению геометрии проточных частей ОМ и ГМ отливки (рис. 6, см. обложку). После данного совпадения также сохраняется положение ОМ и связанной с ней СК (рис. 7, см. обложку).

4. В результате совмещений в расчете присутствуют две системы координат: СК после совмещения по контрольным точкам и СК после совмещения по проточной части.

5. При загрузке двух и более отливок СПО дает возможность задания дополнительной коррекции на площадь проходного сечения. На основе совмещенных по проточной части моделей производится построение сборки сектора из нескольких лопаток или соплового аппарата в целом (рис. 8, см. обложку).

6. Между парами соседних лопаток строится поверхность для определения площади проходного сечения, проходящая через выходную кромку пера лопатки и перпендикуляр от ребра выходной кромки на перо соседней лопатки (рис. 9, см. обложку).

7. С учетом значения площади вычисляется угол, на который необходимо повернуть ОМ отливки относительно собственной оси так,

чтобы площадь проходного сечения находилась в заданном допуске. Максимальный угол поворота задается пользователем, например, не более 1° (рис. 10).

Если расчетный угол больше максимального, то он ограничивается задаваемым углом.

8. Рассмотренные данные о повороте преобразуются в матрицу трансформации и добавляются к матрице, полученной при компенсации погрешности литья.

9. В СПО заложена возможность анализа наличия или отсутствия припуска на механическую обработку. Технолог может задать необходимое значение припуска на обрабатываемые поверхности, и СПО учтет эти данные в процессе совмещения.

Если на поверхности не хватило припуска на обработку, СПО покажет данные места и ограничит совмещение таким образом, чтобы не выходить за пределы припуска ОМ.

10. По разнице между положениями ОМ отливки после совмещения по контрольным точкам и проточной части находится матрица трансформации.

11. Далее, из матрицы извлекаются значения смещений (3 угловые координаты и 3 линейные координаты), которые загружаются в стойку станка в виде специального файла и учитываются при обработке лопаток на первом установе.

12. Полученные для каждой отливки значения сохраняются и при обработке отливки на шлифовальном станке используются для смещения системы координат паллеты.

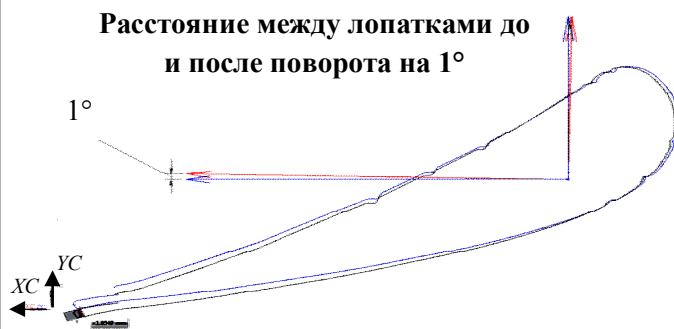


Рис. 10. Схема разворота ОМ

СПО автоматизирует процесс получения значений компенсации смещения и углов поворота, который включает в себя пакетную обработку комплекта лопаток. Выходными данными после работы данного СПО являются:

— фасетные тела отливок в файле детали NX, полученные после совмещения отливок по проточной части с номинальной ГМ лопатки.

— текстовый файл со значениями смещений и

углов поворотов для применения на станке.

Далее проводится расчет фактической площади проходного сечения и необходимой дополнительной коррекции установки лопатки перед операцией шлифования базовых поверхностей лопаток.

Расчет площади проходного сечения проводится также с помощью разработанного СПО.

Испытание СПО на станке. В процессе внедрения проверялись алгоритмы СПО, включающие следующие пункты:

— проверка работоспособности алгоритмов совмещения геометрических моделей по трем вариантам: по базовым точкам, по выбранным поверхностям и по телу в целом;

— проверка проходного сечения, получаемого при совмещении по проточной части лопатки.

В результате испытаний и внедрения СПО на станке установлено, что качество и точность проходного сечения значительно повысились. Как следствие, увеличился КПД газотурбинного двигателя.

Выводы

1. Применение технологии глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток турбин на пятиосевом обрабатывающем центре фирмы Magerle мод. MFP-050.65.65 позволяет производить обработку с минимальным количеством установок, лучшим качеством и с большей производительностью.

2. Благодаря использованию специального программного обеспечения стало возможным определение значений смещений и углов поворота, обеспечивающих компенсацию погрешностей литья и учет проходного сечения в лопатках.

3. Результатом совместного использования нового оборудования и разработанного СПО стало снижение разброса значений площади проходного сечения в сопловом аппарате. Как следствие, повысился КПД двигателя и снизилась вероятность появления нежелательных вибраций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Козлов Д.А.** ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [электронный ресурс]. URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 15.09.2015.

2. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь: 2006. 1195 с.

3. **Конструкция** основных узлов двигателя ПС-90А: учеб.пособие; 2-е изд. испр. и доп. / М.А. Нихамкин,

М.М. Зальцман. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2002. 108 с.

4. **Макаров В.Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учеб.пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 320 с.

5. **Макаров В.Ф.** Выбор высокоэффективных абразивных инструментов и режимов резания для различных видов шлифовальных заготовок: учеб.пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 276 с.

6. **Поletaев В.А., Волков Д.И.** Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.

7. **Рекламные материалы** фирмы «Mägerle».

8. **ГП «Ивченко-Прогресс».** Обработка лопаток на профилешлифовальном станке фирмы Mägerle // Промышленность в фокусе. 2013. № 1.

9. **Научноёмкая технология** глубинного шлифования профильных поверхностей лопаток турбин / В.Ф. Макаров, А.Х. Сакаев // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012. № 3(9). С. 15-22.

10. **Макаров В.Ф., Никитин С.П.** Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 8(50). С. 38-44

REFERENCES

1. Kozlov D.A. PD-14 is produced by all Russian aircraft engine [Electronic resource]. URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>.

2. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gas turbine engines. Perm, 2006. 1195 p.

3. The design of the basic units of the PS-90A. M.A. Nihamkin, M.M. Zaltsman. Perm: Perm State Technical University, 2002. 108 p.

4. Makarov V.F. Modern methods of highly abrasion resistant steels and alloys. St. Petersburg: Publishing house «Lan», 2013. 320 p.

5. Makarov V.F. Selection of highly abrasive tools and cutting conditions for different types of grinding workpieces. StarOskol: TNT, 2011. 276 p.

6. Poletaev V.A., Volkov D.I. Deep grinding of turbine blades. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 272 p.

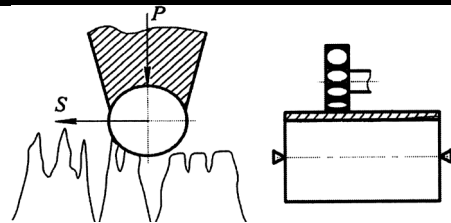
7. Mägerle promotional materials.

8. GP «Ivchenko-Progress»: Processing blades on the profile grinding machine Magerle. Industry in focus. 2013. No. 1.

9. Science intensive technology of deep grinding profiled surfaces of turbine blades. V.F. Makarov, A.Kh. Sahaev. *Science intensive in mechanical engineering*. 2012. No. 3(9). Pp. 15—22.

10. Makarov V.F. Influence of geometry generation conditions on surface layer quality of blade at deep profile grinding. V.F. Makarov, S.P. Nikitin. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. No. 8(50). Pp. 38—44.

Рецензент д.т.н. В.А. Поletaев



УДК 621.787.6
DOI: 10.12737/17322

А.В. Киричек, д.т.н.

(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7)

Д.Л. Соловьев, д.т.н.,

М.Н. Медведев, старший преподаватель
(Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»)

E-mail: avk.57@yandex.ru

Экспериментальные исследования статико-импульсного деформационного протягивания*

Представлена новая схема деформационного упрочнения отверстий с использованием комбинированной статической и импульсной нагрузки. Разработан экспериментальный комплекс, предназначенный для статико-импульсного деформационного протягивания отверстий деталей машин, который позволяет осуществлять исследования влияния энергетических параметров процесса, с учетом жесткости технологической системы, на шероховатость, глубину и степень упрочнения поверхности отверстий.

Ключевые слова: упрочнение; пластическая деформация; жесткость; статическая сила; энергия удара; поверхностный слой; глубина упрочнения; дорнование.

A.V. Kirichek, d.en.s.

(Bryansk State Technical University, Bryansk, boulevard of the 50th anniversary of October, 7),

D.L. Solov'yov, d.en.s.,

M.N. Medvedev, senior lecturer
(Murom Institute of Vladimir State University)

Experimental research of static-impulse deformative drawing

The new method of deformative strengthening of holes using combined static and impulse loading is presented. Partial replacement of static load, used in classical burnishing, by impact impulses allows decreasing energy intensity of strengthening process and expanding the technological capabilities of the method. The method allows strengthening of small diameter and long length holes. The high depth and degree of strengthening can be obtained; the surface roughness can be decreased. The experimental complex for research of static-impulse parameters of deformative drawing of holes of machine parts, which allows determining the influence of energy parameters of the process taking into account stiffness of technological system on roughness, depth and degree of strengthening of holes surfaces, is developed.

Keywords: strengthening; plastic deformation; stiffness; static force; impact energy; surface layer; strengthening depth; burnishing.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта УМНИК (№ 1772ГУ1/2014).

Для повышения долговечности деталей машин успешно применяется упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющее увеличивать твердость поверхностного слоя и снижать шероховатость поверхности.

Кроме того, энергоёмкость обработки ППД ниже по сравнению с другими способами упрочнения и, как правило, не требует применения сложного и дорогого технологического оборудования.

Для упрочнения отверстий малого диаметра (до 100...120 мм) применение большинства способов ППД затруднено. Это обусловлено их закрытостью и связанными с этим трудностями ориентации инструмента относительно обрабатываемой поверхности, подвода смазочно-охлаждающих технологических средств, измерения и контроля микрогеометрии и размеров, наблюдения процесса, использования более сложной конструкции инструмента и т.д.

Особенно остро эта проблема возникает при необходимости обеспечения большой глубины упрочненного поверхностного слоя, которая должна перекрывать глубину залегания подповерхностных критических напряжений, предотвращая зарождение усталостных трещин и разрушение. Так, например, при упрочнении корпусов гидро- и пневмоцилиндров, втулок для базирования пакетов дисковых фрез, траков гусеничных машин, труб буровых установок и др. требуемая глубина упрочненного поверхностного слоя должна достигать порядка 5...6 мм, а иногда и больше [1].

Наиболее распространенным способом деформационного упрочнения отверстий малого диаметра является дорнование, при котором инструмент – дорн (деформирующая протяжка) проходит вдоль отверстия, под действием толкающей (схема прошивания), либо тянущей (схема протягивания) статической нагрузки, формируя наклепанный слой с высокой твердостью. Диаметр дорна выполняют больше диаметра упрочняемого отверстия на величину натяга.

Дорнованием обычно получают глубину упрочнения 1...2 мм, что недостаточно для тяжело нагруженных деталей [2]. Получение большей глубины упрочнения достигается при дорновании с большими натягами и, соответственно, с большими силами, прикладываемыми к дорну (до 800 кН и выше). При этом требуется использование более габаритного и дорогостоящего оборудования, что приводит к снижению энергетической и экономической эффективности процесса.

Для снижения энергоёмкости процесса предлагается частичная замена статической нагрузки ударными импульсами. При статико-импульсном дорновании дорн проходит вдоль упрочняемого отверстия под действием комбинированной толкающей статической и ударной нагрузки, причем ударная нагрузка преимущественно определяет параметры наклепанного слоя, а статическая – предназначена для более полного использования импульсной. В результате может быть получена большая глубина упрочненного поверхностного слоя и значительно (до 2 раз) снижены энергозатраты. Однако упрочнение при статико-импульсном дорновании происходило только по схеме прошивания и, во избежание снижения точности обработки, могло использоваться только для коротких отверстий (до 150 мм) [3, 4].

Для решения данной проблемы, авторами предложен новый способ упрочнения отверстий – статико-импульсное деформационное протягивание, особенностью которого является то, что при обработке на инструменте не возникает изгибающего момента, поэтому способ позволяет обрабатывать отверстия любой длины [5 – 7]. Основными параметрами статико-импульсного деформационного протягивания, аналогично с дорнованием, являются натяг (разность диаметров инструмента и отверстия до обработки), толщина стенки упрочняемой детали, конструкция, форма и размеры дорна.

Ранее использование подобного способа затруднялось отсутствием конструктивных решений по его реализации, т.к. наиболее широкое распространение при деформационном упрочнении получили ударные системы (в том числе и при статико-импульсном дорновании), где используется торцовое соударение бойка и волновода [4].

Авторами разработан экспериментальный комплекс с комбинированным статическим и ударным воздействием, который позволяет проанализировать влияние ударных импульсов на состояние предложенной технологической системы и на показатели качества упрочненных деталей (рис. 1). Для приложения ударной нагрузки используется неторцовое соударение бойка с волноводом. При этом впервые для процесса статико-импульсного деформационного упрочнения отверстий было учтено влияние жесткости технологической системы. Экспериментальный комплекс для статико-импульсного протягивания представляет собой стенд, состоящий из плиты 1, установленной на опорах 2 в верхней части корпуса 3 стенда, на которую устанавливается заготовка 4 в виде

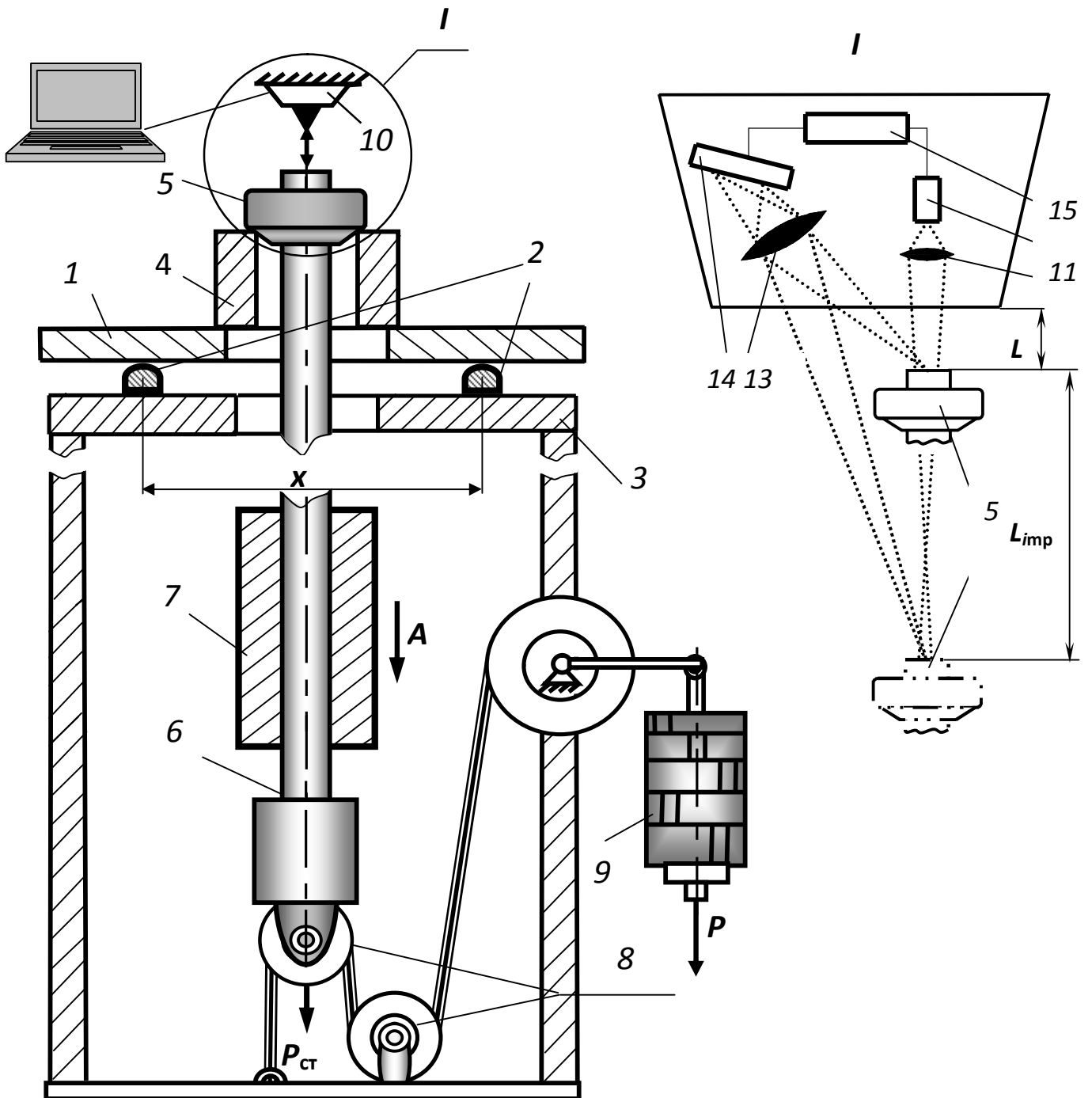


Рис. 1. Стенд для статико-импульсного деформационного протягивания:

x – величина перемещения опор, для регулировки жесткости технологической системы;
 $P_{ст}$ – сила статического поджатия; A – энергия ударного импульса; P – сила на рычаге, требуемая для создания статического поджатия; L – базовое расстояние (максимально возможное приближение объекта измерения к датчику); L_{imp} – перемещение инструмента под действием импульсной нагрузки

втулки со сквозным отверстием в центре. Через заготовку проходит инструмент 5 – дорн с одним, либо несколькими кольцами. Снизу к дорну крепится штанга волновода 6 с отметками по высоте падения бойка 7, который имеет форму гильзы и перемещается вдоль штанги. Боек 7 падает вниз под действием силы тяжести, ударяя по уступу волновода 6. При этом в ударной системе возникают ударные волны деформации, под действием которых дорн осуществляет пластическое деформирование упрочняемого отверстия.

При этом технологическая система станда, и в первую очередь плита 1, будет испытывать затухающие колебания. Амплитуда колебаний, в основном, будет зависеть от жесткости плиты 1, энергии ударных импульсов A и силы статического поджатия инструмента $P_{ст}$. Амплитуда первого полупериода колебаний будет являться следствием упругих смещений инструмента от воздействия статической и ударной нагрузки. Амплитуда второго полупериода колебаний возникает в результате реакции технологической системы после удара. Амплитуда колебания направлена в сторону обратную приложению нагрузки и, если величина перемещения инструмента превосходит расстояние, на которое он был предварительно смещен под действием статической силы, происходит его отрыв от упрочняемой поверхности, что приводит к потере энергии отраженных волн деформации и снижению КПД процесса.

Чтобы более полно передавать энергию удара в очаг деформации необходимо создавать неразрывный контакт между волноводом 6 с инструментом 5 и упрочняемой поверхностью заготовки 4 в процессе всей обработки. Это обеспечивается подбором рационального соотношения статической и ударной нагрузки для различных условий нагружения.

Статическая нагрузка создается специальным устройством, представляющим собой барабан, на который наматывается трос, идущий через систему полиспастов 8 и закрепленный к нижнему концу волновода 6. К катушке с тросом прикреплен рычаг, на который вешается груз 9, с помощью которого можно изменять силу статического поджатия инструмента.

Для контроля неразрывности контакта, экспериментальный комплекс предусматривает использование триангуляционного лазерного датчика 10, которым регистрируется перемещение инструмента при его статическом поджатии к заготовке и после удара бойком по торцу уступа волновода. Датчик закреплен независимо от станда на специальном, подвиж-

ном кронштейне.

В основу работы датчика положен принцип оптической триангуляции. Излучение полупроводникового лазера 11 фокусируется объективом 12 на торце дорна 5. Рассеянное на объекте излучение объективом 13 собирается на CMOS-линейке 14. Перемещение объекта 5 – 5' вызывает соответствующее перемещение изображения. Процессор сигналов 15 рассчитывает расстояние до объекта по положению изображения светового пятна на линейке 14.

Испытания осуществляются следующим образом. Посредством перемещения опор 2 на расстояние x , в направлении перпендикулярном оси инструмента, регулируется жесткость технологической системы. Перед упрочнением инструмента частично вводится в отверстие заготовки 4, которая свободно устанавливается на плиту 1. С помощью подвижного крепления луч лазерного датчика ориентируется на верхний торец дорна. Для создания предварительного статического поджатия дорна к упрочняемой заготовке нижний торец волновода через систему полиспастов 8 закрепляется к основанию станда, а возможность регулирования статической силы осуществляется изменением массы грузов 9. Боек взводится вверх до отметки шкалы на линейке, соответствующей требуемой энергии ударных импульсов и отпускается. При этом энергия ударного импульса задается высотой падения бойка и его массой. Во время и после удара, на компьютере отображаются результаты показания лазерного датчика, фиксирующего колебания системы.

Расположение и конструкция механизма приложения статической силы позволяет обеспечить дополнительную точность при любой длине обрабатываемых отверстий, предварительно убрать все зазоры в местах соединения ударной системы и инструмента. Для использования данной схемы упрочнения в промышленном производстве взвод бойка ударной системы может быть механизирован.

Исследования по упрочнению стали 45, проведенные на разработанном экспериментальном комплексе, показали следующие результаты:

- параметр шероховатости упрочненной поверхности Ra снижается при любых режимах статико-импульсного деформационного протягивания и достигает $Ra = 1,43 \dots 0,63$ мкм;
- твердость увеличивается по всей толщине стенки образца, которая выбиралась из диапазона 6...12 мм;
- максимальная степень упрочнения достигает 60...90 %.

Технические характеристики стенда для исследования процесса статико-импульсного деформационного протягивания внутренних цилиндрических поверхностей

Габаритные размеры, мм.....	320/2300/320
Энергия ударного импульса, Дж.....	2,5...50
Масса бойка, кг.....	3...5
Рабочий ход бойка, мм.....	до 1000
Статический поджим инструмента, кН	1,5...15
Количество деформирующих колец на инструменте, шт.....	1...7
Натяг (разница диаметров инструмента и обрабатываемого отверстия) при обработке, мм.....	0,1...0,8
Жесткость технологической системы, кН/мм.....	10...100
Длина обрабатываемого отверстия, мм.....	4...500
Диаметр обрабатываемого отверстия, мм.....	23...100

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

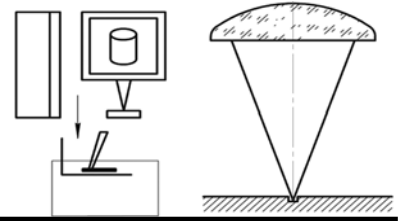
1. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л.** Статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей // В кн. «Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки». Колл. монография под ред. А.В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. С. 299–323.
2. **Проскуряков Ю.Г.** Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
3. **Статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004. № 3. С. 16–17.**
4. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Поляков А.В.** Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 6. С. 14–16.
5. **Соловьев Д.Л., Киричек А.В., Медведев М.Н.** Возможности повышения долговечности траков гусеничных машин деформационным упрочнением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2 (286). С. 89–92.
6. **Исследование энергетических параметров процесса деформационного упрочнения отверстий статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, М.Н. Медведев // Машиностроение – основа технологического развития России: Сб. научн. ст. V Междунар. научн.-техн. конф./ Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. С. 543–547.**
7. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Медведев М.Н.** Деформационное упрочнение ударными волнами внутренних

цилиндрических поверхностей // Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: Сб. трудов междунар. научн. симпозиума технологов-машиностроителей и механиков. Ростов-н-Д: ДГТУ, 2014. С. 18–22.

REFERENCES

1. Kirichek A.V., Solov'yov D.L. Static-impulse processing of internal cylindrical surfaces. Effective technologies of burnishing, drawing and deformative-cutting processing. Mos-cow, Spektr. 2011. Pp. 299–303.
2. Proskuryakov Yu.G. Technology of strengthening-calibrating and shape forming processing of metals. Moscow, Mashinostroenie. 1971, 208 p.
3. Static-impulse processing of internal cylindrical surfaces. A.V. Kirichek, A.G. Lazutkin., D.L. Solov'yov, S.A. Silant'yev. *Izvestiya OryolGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie.* 2004. No.3. Pp. 16–17.
4. Kirichek A.V., Solov'yov D.L., Polyakov A.V. Strengthening of holes by static-impulse burnishing. Strengthening technologies and coatings. 2009. No. 6. Pp. 14–16.
5. Solov'yov D.L., Kirichek A.V., Medvedev M.N. Capabilities of improvement of durability of caterpillar tracks by deformative strengthening. *Fundamental and applied problems of technics and technology.* 2011. No.2(286). Pp. 89–92.
6. Research of energy parameters of deformative strengthening process of holes by static-impulse processing. A.V. Kirichek, D.L. Solov'yov, S.A. Silant'yev, M.N. Medvedev. Mechanical engineering – a base of Russian technological development. Proceedings of V International scientific technical conference. Southwest State University, Kursk, 2013. Pp. 543–547.
7. Kirichek A.V., Solov'yov D.L., Medvedev M.N. Deformative strengthening by impact waves of internal cylindrical surfaces. Wave, vibrowave technologies in mechanical engineering, metalwork and other fields. Proceedings of international scientific symposium of technologists and mechanical engineers. Rostov-na-Donu, DGTU, 2014. Pp. 18–22

Рецензент д.т.н. Л.А. Савин



УДК 921.9.048.7
DOI: 10.12737/17323

С.А. Кочергин, начальник лаборатории
(ФГУП «НПО «Техномаш», Москва),
Ю.А. Моргунов, к.т.н.,
Б.П. Саушкин, д.т.н.
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: sbp47@mail.ru

Научоёмкая технология снижения гратообразования при импульсной лазерной резке листового материала

Выявлены условия и предложены средства минимизации грата при резке листового материала из титанового сплава BTI-0 и стали 12X18H10T. Исследовано влияние наложения колебаний ультразвукового (УЗ) диапазона на гратообразование, влияние смачиваемости нижней кромки расплавом металла на качество реза, влияние давления вспомогательного газа на снижение гратообразования. Полученные результаты позволяют на 30...60 % снизить объем грата.

Ключевые слова: величина грата; ультразвуковые колебания; ширина реза; лазерное излучение; давление газа; скорость резки.

S.A. Kochergin, laboratory head
(FSUE «Research and Manufacturing Association «Technomash»,
Yu.A. Morgunov, c.en.s.,
B.P. Saushkin, d.en.s.
(Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI))

Science intensive technology of burr formation decrease at pulse laser cutting of sheet material

Conditions are revealed and means are offered for minimizing burr formation at cutting of sheet material made of titanium alloy BTI-0 and steel 12X18H10T. The influence of imposing of mechanical vibrations in ultrasound range on burr formation was investigated and the possibility of reducing the amount of burr with ultrasonic influence was showed. The influence of wetting of a lower edge of molten metal on a cutting quality was investigated, the possibility of reducing the burr amount using coating was showed. The influence of pressure of an auxiliary gas on reducing the amount of burr was investigated and importance of this parameter was confirmed. The results allow 30-60 % reduction in the amount of burr under otherwise equal conditions.

Keywords: amount of burr; ultrasonic vibrations; cutting width; laser beam; gas pressure; cutting speed.

В работе [1] рассмотрены схема действующих сил и вытекающее из нее выражение, описывающее условие равновесия капли расплава на нижней кромке реза (рис. 1). Отмечено, что отрыв жидкой фазы или формирование элемента грата на кромке зависят от баланса сил, действующих на каплю.

Показано, что капля остается на образце при соблюдении условия равновесия действующих

сил, которое можно представить в виде

$$F_{\text{пн}} \sin \theta = mg + F_{\text{Т}}, \quad (1)$$

где $F_m = mg$ – сила тяжести; $F_{\text{пн}}$, $F_{\text{Т}}$ – силы соответственно поверхностного натяжения и трения при контакте капли с потоком газа; θ – краевой угол смачивания.

Расчеты, основанные на статистических исследованиях геометрических размеров грата, показали, что силы $F_{\text{пн}}$ и $F_{\text{Т}}$ имеют один порядок

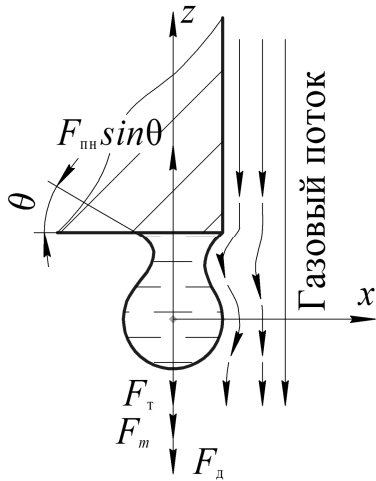


Рис. 1. Модель формирования капли грата в поперечном сечении

величины ($\sim 10^{-3}$ Н) и значительно превышают гравитационную силу. На основании условия (1) рассмотрены следующие пути снижения объема грата:

- наложение на каплю расплава дополнительной силы F_d с нарушением условия равновесия;
- снижение краевого угла смачивания нижней

кромки реза расплавом путем нанесения специальной обмазки;
 – увеличения газодинамической силы F_T за счет увеличения скорости прокачки газа.

В основе сделанных далее расчетов и рассуждений лежит гипотеза о возможности интенсификации удаления капель расплава с нижней кромки поверхности реза за счёт использования силы инерции. Для реализации этой гипотезы к поверхности разрезаемого материала в окрестностях контакта излучения с веществом подводились механические колебания ультразвукового диапазона. Схемы подвода УЗ-колебаний представлены на рис. 2.

Использовали магнитострикционную головку с концентратором, обеспечивающими следующие параметры колебаний на торце концентратора: частота 18 кГц, амплитуда 10...20 мкм. Предварительные эксперименты показали, что схема рис. 2, *г* подвода звуковой энергии является наиболее эффективной. Результаты экспериментов, полученные при использовании этой схемы, представлены на рис. 3. Видно, что наложение УЗ-колебаний приводит к снижению размеров частиц грата и, судя по микрофотографиям нижней кромки – к уменьшению массы грата.

Однако радикального устранения гратообра-

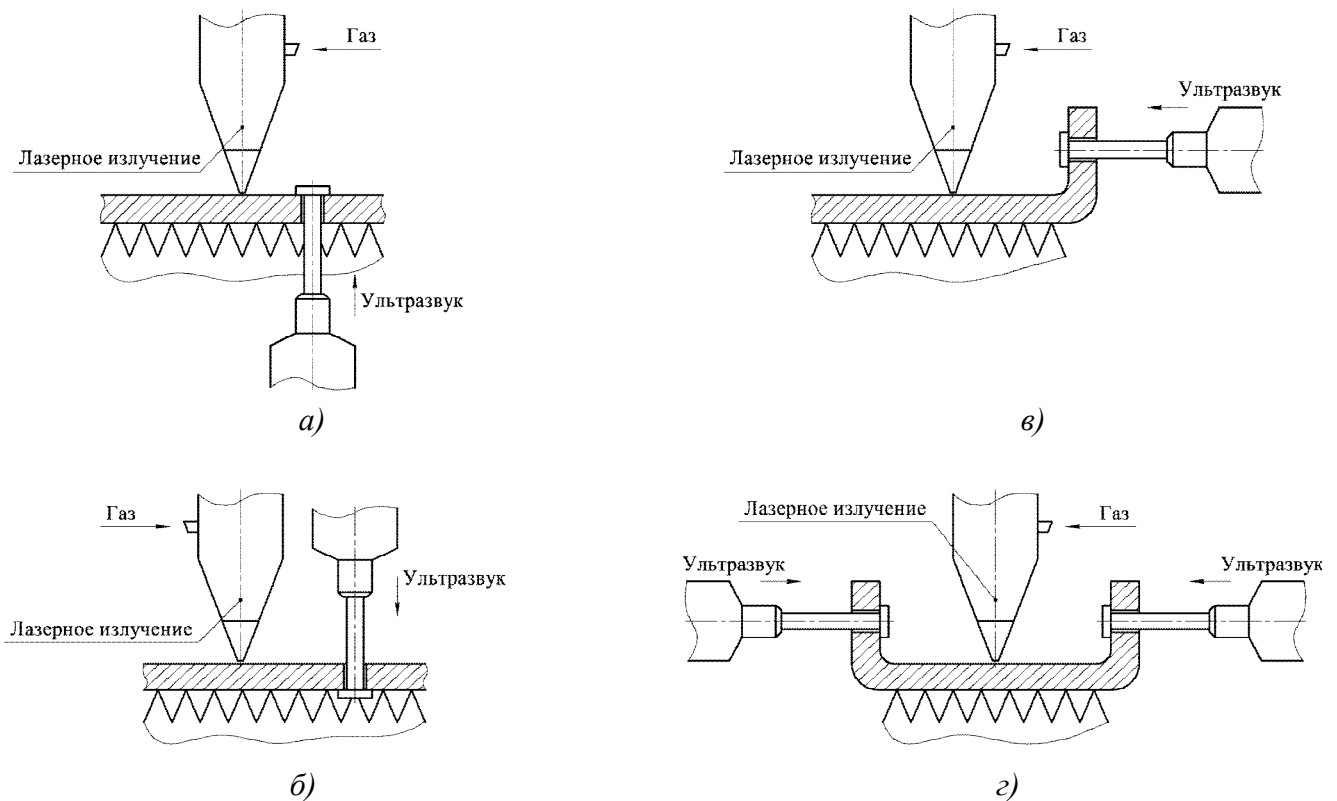


Рис. 2. Экспериментальные схемы лазерной резки с наложением механических колебаний ультразвукового диапазона частот: *а* – с нижней части образца; *б* – с верхней части образца; *в* – с торцевой части образца; *г* – с торцев образца

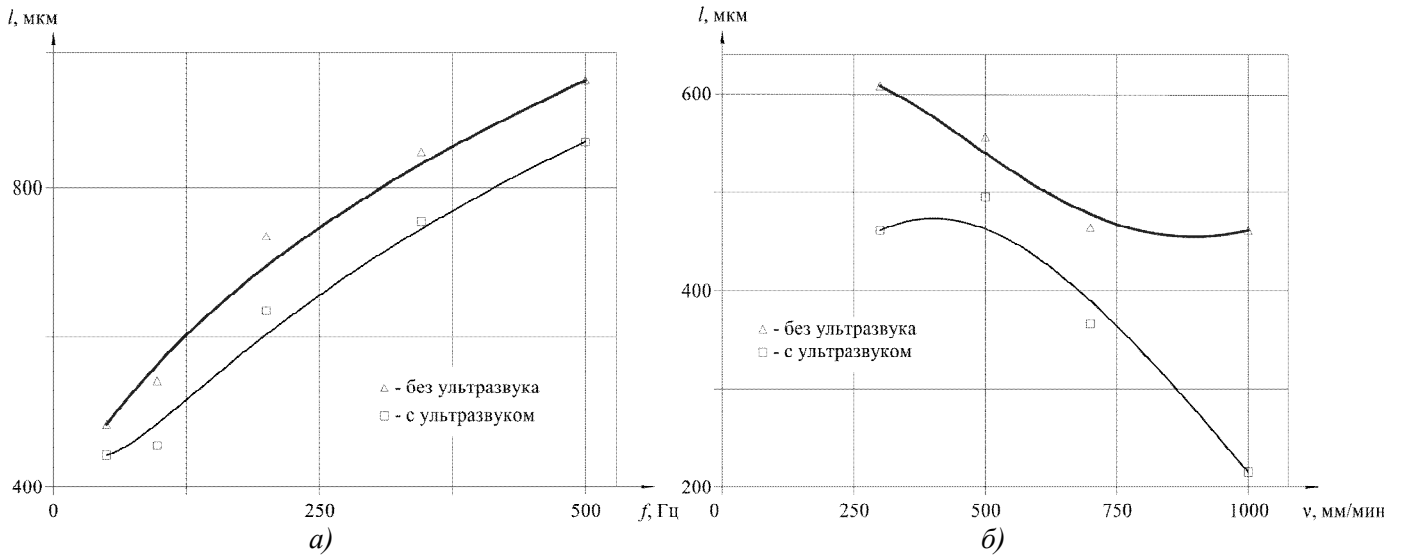


Рис. 3. Зависимость высоты грата: *a* – от частоты следования импульсов ($P = 1$ кВт; $p = 1,0$ МПа; $v = 500$ мм/мин; $f_{y3} = 20 \dots 22$ кГц); *б* – от скорости резки ($P = 1$ кВт; $f = 100$ Гц; $p = 1,0$ МПа; $f_{y3} = 20 \dots 22$ кГц)

зования в наших экспериментах не наблюдалось. Чтобы выяснить причину наблюдаемого явления произведём оценку сил, действующих на каплю расплава.

По имеющимся микрофотографиям находим близкий к максимальному объём единицы грата $V = 0,072$ мм³. При плотности коррозионно-стойкой стали $\rho = 8$ г/см³ находим близкую к максимальной массу капли грата, г.:

$$m_0 = \rho V = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,072 = 5,8 \cdot 10^{-4}$$

Тогда гравитационная сила, Н, действующая на единичный элемент грата:

$$F_{гp} = m_0 g = 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 9,8 = 5,6 \cdot 10^{-6}$$

Оценим величину силы инерции при наложении на каплю расплава УЗ-колебаний, описываемых синусоидальной функцией:

$$y = A \sin \omega t, \tag{2}$$

где A – амплитуда; ω – круговая частота.

Дважды дифференцируя, получаем:

$$y'' = -A \omega^2 \sin \omega t, \tag{3}$$

где знак минус означает, что ускорение направлено в сторону, обратную направлению перемещения. Анализируя это уравнение, получаем, что максимальное ускорение соответствует моменту изменения знака перемещения, т.е. в нижней и верхней точках колебаний.

Оценивая величину силы инерции при максимальном ускорении ($A = 10$ мкм, $f = 18$ кГц), получаем $F_{и} = 0,074$ Н.

Сила сцепления капли с металлической подложкой определяется, как

$$F_{пн} = \sigma P, \tag{4}$$

где σ – поверхностное натяжение; P – периметр капли.

Периметр капли определяем по микрофотографии образца $P \approx 1 \dots 2$ мм.

Поверхностное натяжение расплава железа при 1550 °С по данным работы [2] составляет:

$$\sigma = 1,865 \text{ Н/м}, F_{пн} = 1,865 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,0037 \text{ Н.}$$

Из приведённых расчетов видно, что сила инерции, действующая на каплю расплава, на порядок выше силы поверхностного натяжения. Казалось бы, эффект инерционного «стряхивания» капель расплава при направлении колебаний параллельно оси лазерного луча должен проявиться в полной мере, что противоречит данным эксперимента.

Две причины выступают на первый план при объяснении данного противоречия. Первая из них заключается в том, что попадая на «холодную» поверхность нижней кромки, расплав очень быстро остывает (105...106 К/с), и принятое в расчете значение σ для расплава железа становится некорректным. Действительно, при частоте 20 кГц за характерное время (период колебания равный 50 мкс) поверхность остывает на 5...50 °С, что заметно снижает поверхностное натяжение расплава в условиях кристаллизации.

Вторая причина связана с тем, что УЗ-колебания передаются на жидкую каплю от твёрдой стенки со значительным затуханием из-за нежёсткой связи жидкой и твёрдой фаз. Поэтому, принятая выше оценка для макси-

мального ускорения является завышенной.

В связи со сказанным интересно рассмотреть возможность исследования резонансного эффекта для решения технологической задачи.

Для этого выполним оценку частоты собственных колебаний капли расплава. При сферической форме капли в соответствии со статистическими данными средний радиус капли $R = 50$ мкм. Коэффициент поверхностного натяжения расплава примем равным $1,865$ Н/м [2].

Воспользовавшись решением, приведенным в работе [3], для оценки частоты собственных колебаний сферической капли, получим

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho R^3} l(l-1)(l+2), \quad (5)$$

где l – натуральное число.

Показано, что наименьшая возможная собственная частота колебаний капли соответствует $l = 2$:

$$\omega_2^2 = \omega_{\min}^2 = \frac{8\sigma}{\rho R^3}. \quad (6)$$

Следующая частота при $l = 3$:

$$\omega_3^2 = \frac{30\sigma}{\rho R^3}. \quad (7)$$

При выбранных значениях R и σ значения ω_2 и ω_3 равны соответственно $1,2 \cdot 10^4$ Гц и $2,3 \cdot 10^4$ Гц, т.е. лежат на границе УЗ-диапазона (18 кГц). При использовании УЗ-генератора с функцией настройки частоты можно выходить на окорезонансный режим работы, усиливая эффект «стряхивания» капель.

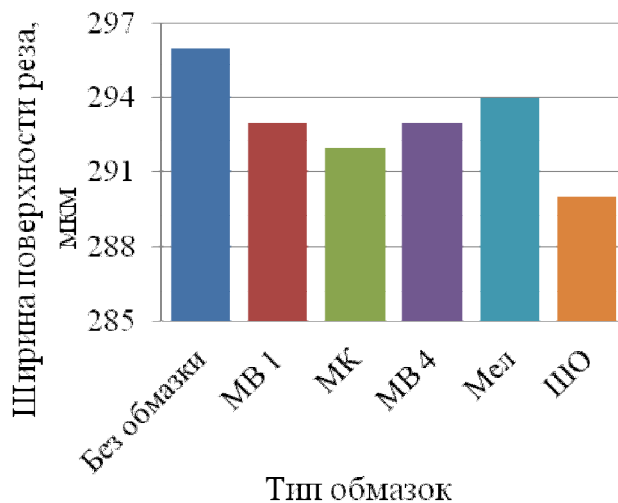
Представленная в [1] модель графообразования позволяет предположить, что уменьшение объема графа возможно за счет снижения смачиваемости нижней кромки реза.

Для проверки данной гипотезы были проведены экспериментальные исследования с использованием пяти видов обмазок: масло вакуумное ВМ1, ВМ4, масло компрессорное, суспензия мела, суспензия графита в вакуумном масле (обмазка штампов для горячей штамповки). Выбор обмазок носил случайный характер, так как в литературе практически отсутствуют какие-либо рекомендации по использованию обмазок для повышения качества резки.

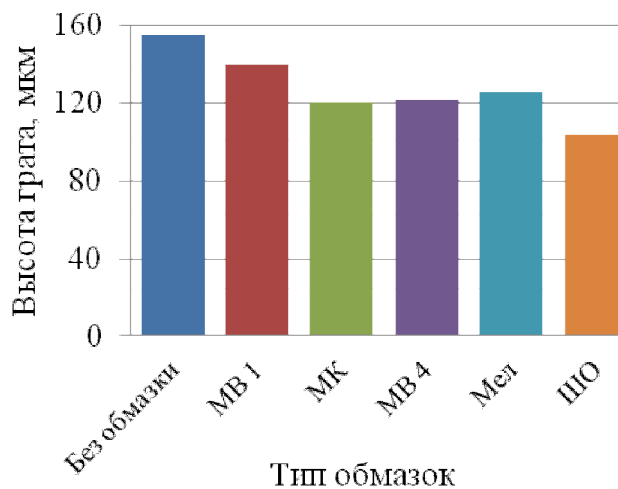
Для реализации этой гипотезы на нижнюю поверхность листового материала из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т наносилась обмазка.

Резка выполнялась при одинаковых параметрах режима: мощность излучения 700 Вт; скорость резки 1,0 м/мин; давление газа 1,0 МПа.

В качестве вспомогательного газа использовался азот. Проведенный анализ показал, что, использование обмазок приводит к некоторому уменьшению ширины реза (рис. 4, а), что, вероятно, связано с охлаждающим воздействием обмазок на стенки реза.



а)



б)

Рис. 4. Ширина реза (а) и высота графа (б) при резке коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т при использовании обмазок

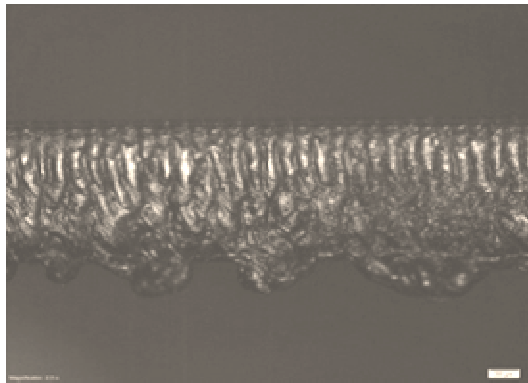
Из рис. 4, б видно, что использование обмазок приводит к снижению высоты графа на 30...40 %, за счет снижения краевого угла смачивания твердой фазы расплавом металла и соответствующего уменьшения силы поверхностного натяжения. На рис. 5 представлены фотографии поверхностей реза в зависимости от вида обмазки.

Лучшие результаты получены при использовании штамповой обмазки.

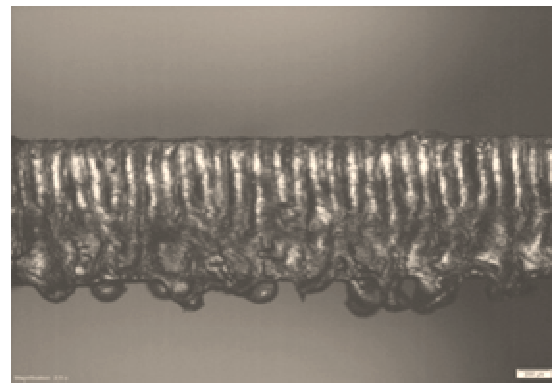
При анализе влияния вспомогательного газа на характеристики реза выполнены эксперименты по резанию пластины из титанового сплава BT1-0 толщиной 2 мм. Эксперименты проведены при фокусном расстоянии 150 мм, мощности излучения 700 Вт, скорости резки 2,5 м/мин.

Как видно из графиков (рис.6), ширина реза уменьшается с возрастанием давления вспомо-

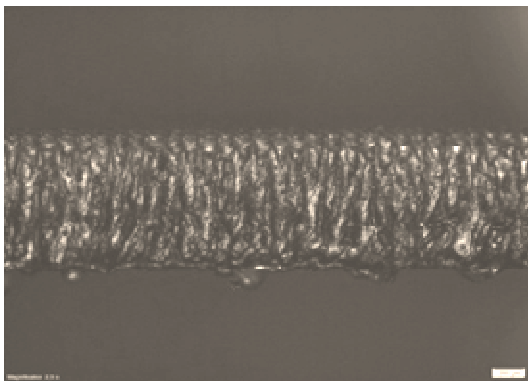
гательного газа, однако шероховатость поверхности реза повышается. Снижение ширины реза можно объяснить охлаждающим действием газа на стенки реза, а некоторое повышение шероховатости газодинамическим (турбулизация) воздействием газовой струи на жидкую пристеночную фазу. Количество и величина грата снижаются при увеличении давления, однако полностью ликвидировать грат не удастся (рис.7).



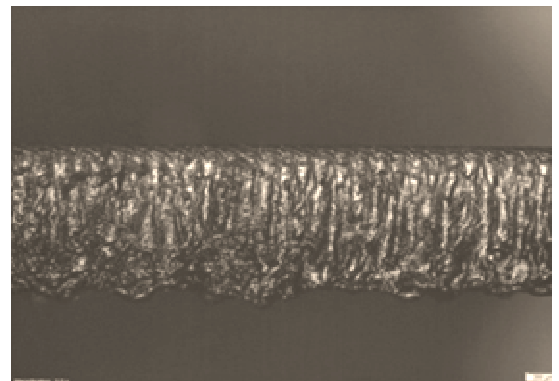
a)



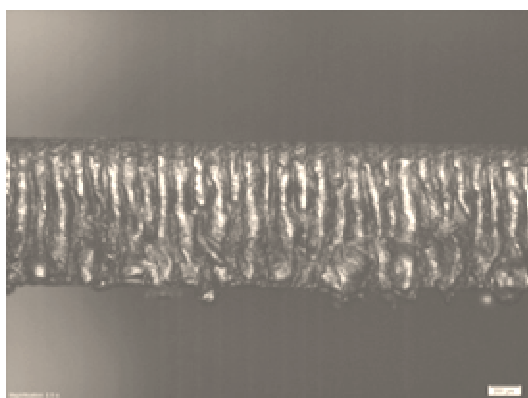
б)



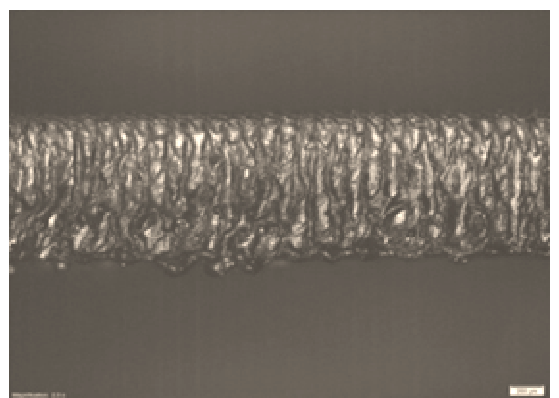
в)



z)



д)



e)

Рис. 5. Влияние обмазок на величину грата:

a – без обмазок; *б* – масло вакуумное MB1; *в* – масло компрессорное; *z* – масло вакуумное MB 4; *д* – суспензия мела; *e* – графит с вакуумным маслом MB4

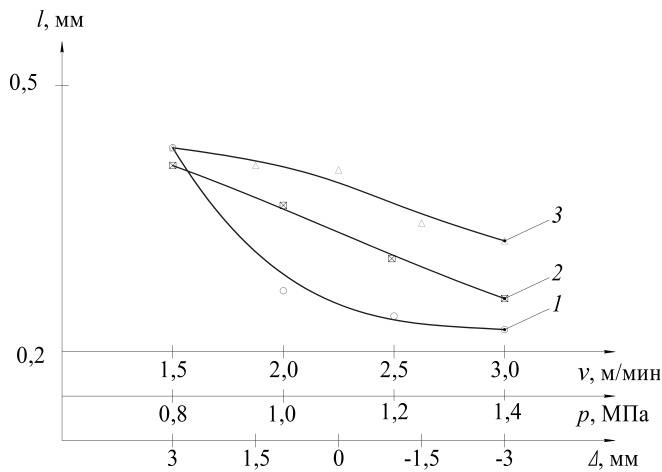


Рис. 6. Зависимость средней величины элементарного гратта от положения фокального пятна (1), давления (2), скорости (3)

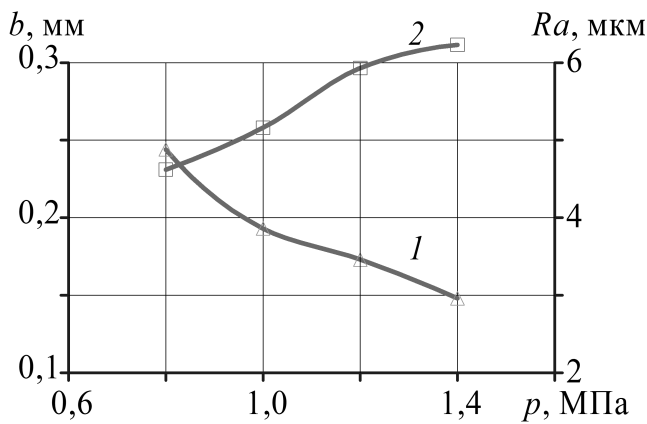


Рис. 7. Зависимости ширины реза (1) и параметра шероховатости (2) от давления вспомогательного газа

Заключение

В результате проведенных исследований выявлена возможность снижения объема гратта при ультразвуковом воздействии и предложены мероприятия по усилению этого эффекта. Показана возможность снижения объема гратта при использовании обмазок и предложена эффективная обмазка – суспензия графита в вакуумном масле. Подтверждено влияние давления вспомогательного газа на снижение объема граттообразования при лазерной резке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочергин С.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности формирования гратта при импульсной лазерной резке тонкостенных заготовок // СТИН. 2015. №10. С. 33–36.
2. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. М.: Metallurgy, 1978. 248 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.

REFERENCES

1. Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Features of formation of burr under pulsed laser cutting of thin-walled workpieces. STIN. 2015, no. 10. Pp. 33–36.
2. Ershov G.S., Chernyakov V.A. The structure and properties of liquid and solid metals. Moscow: Metallurgy, 1978. 248 p.
3. Kukhling Kh. Handbook of physics. Moscow: Mir, 1982. 520 p.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

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. Дюбокова.

Сдано в набор 04.12.2015. Подписано в печать 20.01.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7