

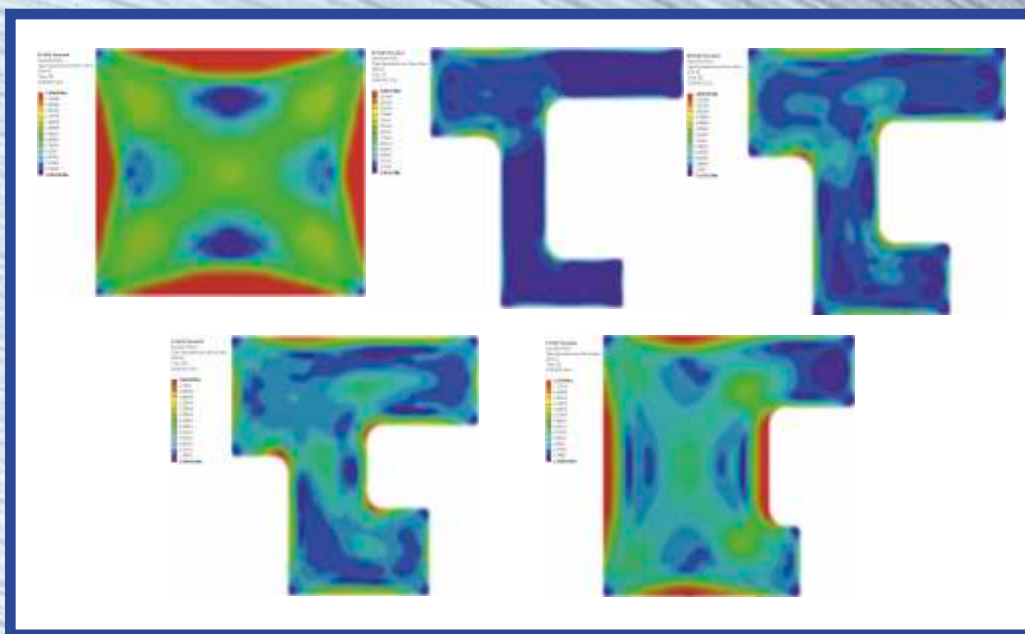
# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 3 (60) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2013 г. научно-технический и производственный журнал

## Технология Оборудование Инструменты Материаловедение



Распределение эквивалентных напряжений по сечению заготовки при закалке алюминиевого сплава АК6

НОВОСИБИРСК

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 3 (60) ИЮЛЬ—СЕНТЯБРЬ 2013 г.

научно-технический и производственный журнал

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

### Председатель совета

**Пустовой Николай Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

### Члены совета

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Афанасьев В.К.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев А.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ ССО РАН, г. Томск, **Смольников Н.Я.**, доктор техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград, **Суслов А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки и техники РФ, МГИУ, г. Москва, **Татаркин Е.Ю.**, доктор техн. наук, профессор, АлтГТУ, г. Барнаул.

Журнал входит в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий*, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

### СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный  
технический университет»  
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Батаев Анатолий Андреевич** – профессор,  
доктор технических наук

### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Атапин Владимир Григорьевич** – профессор,  
доктор технических наук

**Буров Владимир Григорьевич** – профессор,  
кандидат технических наук  
(технология, материаловедение)

**Скиба Вадим Юрьевич** – доцент, кандидат технических наук  
(оборудование, инструменты)

**Ложкина Елена Алексеевна** – редактор перевода текста  
на английский язык,  
кандидат технических наук

### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

### Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

E-mail: metal\_working@mail.ru

www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

## СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕХНОЛОГИЯ

**Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Иванова А.С., Орманов Б.К.** Влияние геометрических параметров заготовок на процесс дорнования ..... 4

**Богданова Н.А., Черномас В.В., Соснин А.А.** Моделирование процесса деформации при осадке неоднородного материала в закрытом штампе ..... 9

**Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Дмитриев В.В., Санников И.И., Безбородов В.П., Григорьева А.А.** Исследование влияния адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и остаточные напряжения сварных соединений стали марки 09Г2С ..... 19

**Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В.** Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки ..... 25

**Бачурин А.С., Бобин К.Н., Матвеев К.А., Рынгач Н.А., Курлаев Н.В.** Влияние величины припуска на остаточные закалочные напряжения деталей самолета ..... 31

**Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Козич Т.В.** Особенности электроалмазного шлифования деталей с покрытием на основе порошкового материала ПС12НВК ..... 36

## ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

**Андросов С.П., Визигин Д.В.** Моделирование затывания зубьев червячной модульной фрезы... 41

**Хейфец А.Л.** 3D-Модель червячной фрезы ..... 47

**Атапин В.Г.** О применении методов оптимизации в проектировании тяжелых многоцелевых станков ..... 54

**Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н., Вахрушев Н.В., Корнев Д.Ю., Зайцев Е.К.** Определение основных параметров технологического оборудования ..... 68

**Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Леонтьев И.А., Никитенко М.И.** Проектирование мощной машины с автоматическим циклом для удаления СОЖ и стружки после механической обработки длинномерных деталей ..... 74

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Райков С.В., Ващук Е.С., Кобзарева Т.Ю., Будовских Е.А., Громов В.Е.** Структура и микротвердостьизносостойкихпокрытий,наплавленных электродуговым методом на сталь с мартенситной структурой ..... 80

## TECHNOLOGY

**Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Ivanova A.S., Ormanov B.K.** Influence of the geometric parameters of workpieces on the process of mandrelling ..... 4

**Bogdanova N.A., Chernomas V.V., Sosnin A.A.** Simulation of heterogeneous material deformation process during shortening in the closed die ..... 9

**Saraev Yu.N., Golikov N.I., Dmitriev V.V., Sannikov I.I., Bezborodov V.P., Grigorieva A.A.** Investigation of adaptive pulse-arc welding influence on mechanical properties and residual stresses of welded joints in steel grade 09Г2С ..... 19

**Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Nikitin Yu.V.,** Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting technologies ..... 25

**Bachurin A.S., Bobin K.N, Matveev K.A., Ryngach N.A., Kurlaev N.V.** The effect of the allowance for residual stress hardening of aircraft components ..... 31

**Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolskiy V.V., Kozich T.V.** Features of electric powered diamond grinding of workpieces with powder coating material through PS12NVK ..... 36

## EQUIPMENT. INSTRUMENTS

**Androsov S.P., Vizigin D.V.** Modeling relieving teeth of worm module milling cutter ..... 41

**Kheyfets A.L.** 3D-model of a milling cutter ..... 47

**Atapin V.G.** About application of optimization methods at design of heavy multi-purpose machines ..... 54

**Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Pushnin V.N., Vahrushev N.V., Kornev D.Yu., Zaycev E.K.** Determination of the main parameters of the processing equipment ..... 68

**Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Leontyev I.A., Nikitenko M.I.** Design of washing machine with automatic cycle for removal of coolant and swarf after machining of long workpieces ..... 74

## MATERIAL SCIENCE

**Raykov S.V., Vashchuk E.S., Kobzareva T.Yu., Budovskikh E.A., Gromov V.E.** Structure and microhardness wear resistant coatings welding by the electric arc method on martensitic steel ..... 80

<b>Фирхова Е.Б., Попова Н.А., Лямина Г.В., Даулет М., Смирнов А.И., Курзина И.А.</b> Влияние легирования ионами алюминия на структурно-фазовое состояние и коррозионные свойства ультрамелкозернистого титана. Часть 2. Механические и коррозионные свойства ..... 84	<b>Firkhova E.B., Popova N.A., Lyamina G.V., Daulet M., Smirnov A.I., Kurzina I.A.</b> The effect of doping with aluminum ions on the structural-phase state and the corrosion properties of ultrafine titanium. Part 2. Mechanical and corrosion properties ..... 84
<b>Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А., Ващук Е.С., Громов В.Е.</b> Структура износостойких покрытий системы TiC-Mo, полученных электровзрывным напылением ..... 90	<b>Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A., Vaschuk E.S., Gromov V.E.</b> Structure of wear resistant coatings TiC-Mo, received electric-explosive spraying ..... 90
<b>Бачурин А.С., Бобин К.Н., Матвеев К.А., Рынгач Н.А., Курлаев Н.В.</b> Численное моделирование процесса закалки алюминиевых деталей ..... 94	<b>Bachurin A.S., Bobin K.N., Matveev K.A., Ryn-gach N.A., Kurlaev N.V.</b> Numerical simulation of aluminum alloy parts quenching process ..... 94
<b>Топякова М.В., Величко А.А.</b> Исследование механизмов травления ионным пучком материалов, используемых в микро- и нанотехнологиях ..... 98	<b>Topyakova M.V., Velichko A.A.</b> Investigation of the ion beam etching of the materials used in micro- and nanotechnologies ..... 98
<b>Ленивцева О.Г., Батаев И.А., Голковский М.Г., Самойленко В.В., Достовалов Р.А.</b> Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки ..... 103	<b>Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovsky M.G., Samoilenko V.V., Dostovalov R.A.</b> Production of wear-resistance coatings on titanium alloys by the method of non-vacuum electron-beam cladding ..... 103
<b>Ложкин В.С.</b> Структура и свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых пластин из сталей 20 и H18K9M5T ..... 110	<b>Lozhkin V.S.</b> Structure and properties of multilayered composite, formed by explosive welding of steel 20 and steel H18K9M5T thin plates ..... 110
<b>Муль Д.О., Дробяз Е.А., Чакин И.К., Самойленко В.В., Ложкин В.С., Достовалов Р.А.</b> Структура и свойства стали после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков титана, тантала, молибдена и графита ..... 115	<b>Mul D.O., Drobyaz E.A., Chakin I.K., Samoilenko V.V., Lozhkin V.S., Dostovalov R.A.</b> Structure and properties of steel under non-vacuum electron-beam welding deposition of titanium, tantalum, molybdenum and graphite powders ..... 115
<b>Степанова Н.В., Кузнецов В.А., Малютина Ю.Н., Терентьев Д.С., Ложкин В.С., Разумаков А.А.</b> Структура и механические свойства серого чугуна, модифицированного механоактивированной смесью карбида вольфрама и хрома ..... 121	<b>Stepanova N.V., Kuznetsov V.A., Malutina Y.N., Terent'ev D.S., Lozhkin V.S., Razumakov A.A.</b> Structure and mechanical properties of cast iron, inoculated by mechanically activated mixture of tungsten carbide and chromium carbide ..... 121
Рекомендации по написанию научной статьи ..... 127	Guidelines for Writing a Scientific Paper ..... 127
Подготовка аннотации ..... 129	Abstract requirements ..... 129
Правила для авторов ..... 131	Rules for authors ..... 131

Корректор *Л.Н. Ветчакова*  
Художник-дизайнер *А.В. Ладьяжская*  
Компьютерная верстка *В.Н. Зенина*

Подписано в печать 23.09.13. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ.л. 16,5. Уч.-изд. л. 30,69. Изд. № 192. Заказ 1149. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

# ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВОК НА ПРОЦЕСС ДОРНОВАНИЯ

*В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент*  
*И.С. ОХОТИН, канд. техн. наук, доцент*  
*А.С. ИВАНОВА, магистрант*  
*Б.К. ОРМАНОВ, магистрант*  
(ТПУ, г. Томск)

Поступила 20 мая 2013 года  
Рецензирование 30 июня 2013 года  
Принята к печати 10 июля 2013 года

Скворцов В.Ф. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Томский политехнический университет,  
e-mail: TMRI@tpu.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния степени толстостенности и относительной высоты заготовок из стали 30, изменяющихся соответственно в диапазонах 2...10 и 0,6...10, на их остаточные деформации и деформирующие усилия при одноцикловом дорновании отверстий диаметром 5 мм, выполняемом по схеме сжатия с натягами от 1,9 до 13,7 % от этого диаметра. Установлено, что при малой относительной высоте заготовок из-за снижения сопротивления деформированию вытесняемый при дорновании из отверстия металл смещается только на их выходной торец и наружную поверхность, а окружная остаточная деформация на этой поверхности, возрастая с увеличением натяга и уменьшением степени толстостенности заготовок, практически не зависит от их относительной высоты. Показано, что по мере увеличения натяга дорнования все более толстостенные заготовки (в диапазоне степеней толстостенности 2...5) претерпевают сквозные пластические деформации.

**Ключевые слова:** дорнование отверстий, остаточные деформации заготовок, деформирующие усилия.

## Введение

Основными геометрическими параметрами обрабатываемых дорнованием заготовок являются степень их толстостенности, характеризуемая отношением диаметра наружной поверхности к диаметру отверстия  $D/d$ , и относительная высота  $L/d$ . Установлено, что с увеличением  $D/d$  возрастают деформирующие усилия и контактные давления, происходит более интенсивное сглаживание исходных микронеровностей и деформационное упрочнение металла поверхностного слоя и имеет место тенденция формирования в нем сжимающих остаточных напряжений [1, 2].

Авторы работ [3, 4], основываясь на результатах экспериментов, выполненных при малых (около 1 % от  $d$ ) натягах на заготовках с относительной высотой  $L/d \approx 2$ , считают, что увеличение усилий и контактных давлений происходит при  $D/d < 3$ ; при  $D/d \geq 3$  они сохраняются неизменными; наружная область заготовок с  $D/d \geq 3$  всегда находится в упругом состоянии, а вытесняемый из их отверстий металл в основном смещается в виде наплывов на торцы заготовок. В соответствии с изложенными представле-

ниями о влиянии степени толстостенности заготовок на процесс дорнования предложено обрабатываемые дорнованием заготовки разделять на два типа: с «конечной» ( $D/d < 3$ ) и «бесконечной» ( $D/d \geq 3$ ) толщиной стенок [3, 4].

Эксперименты, проведенные нами при натягах дорнования от 3 до 19 % от  $d$ , показали следующее [5, 6]. Увеличение степени толстостенности заготовок (при  $D/d \geq 3$ ) при указанных натягах дорнования приводит к росту деформирующих усилий и контактных давлений. С повышением натяга все более толстостенные заготовки (вплоть до имеющих  $D/d = 7,5$ ) из углеродистых и легированных сталей с  $\sigma_{0,2} \leq 450$  МПа претерпевают сквозные пластические деформации. Образование наплывов на торцах заготовок происходит при входе и выходе дорна из отверстия. При этом объем (и размеры) наплывов почти не зависит от относительной высоты заготовки.

Необходимо отметить, что результаты исследований [5, 6] справедливы при дорновании отверстий в заготовках с  $L/d \geq 2$  с использованием опоры с относительно большим диаметром отверстия, обеспечивающим практически свободное форми-

рование напыла металла на выходном торце заготовок. При  $L/d < 2$ , когда для исключения прогиба заготовок необходимо использовать опору с диаметром отверстия, близким к диаметру инструмента, процесс дорнования с большими натягами не исследован.

### Результаты и обсуждение

Для того чтобы восполнить этот пробел и получить более полную картину влияния геометрических параметров заготовок на процесс дорнования, были выполнены экспериментальные исследования. Их проводили на заготовках из стали 30 (HB 1230 МПа) с диаметром отверстий 5 мм, степенью толстостенности 2; 3; 5 и 10, относительной высотой 0,6; 1; 2; 4 и 10. Дорнование отверстий производили однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов  $6^\circ$  и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Обработку выполняли с использованием специального приспособления [6] на испытательной машине УМЭ-10ТМ при скорости 0,008 м/с и натягах  $a/d$  1,9 %, 4,7 %, 6,5 % и 13,7 %. В качестве смазочного материала при дорновании применяли жидкость МР-7.

В ходе экспериментов измеряли деформирующие усилия, диаметры отверстий и наружные диаметры заготовок, размеры и объем напылов металла на их торцах, а также осевую деформацию на наружной поверхности заготовок, которую находили по изменению расстояния между нанесенными на эту поверхность отпечатками конического индентора. Погрешность измерения деформирующих усилий составляла 10 Н; погрешность измерений геометрических параметров заготовок не превышала 0,002 мм. Объем напылов определяли путем построения их твердотельных моделей на ПК.

Сначала было изучено влияние диаметра отверстия опоры на образование напылов металла на выходном торце заготовок. Эксперименты проводились при разных натягах на заготовках с  $D/d = 10$  и  $L/d = 4$  при диаметре отверстия опоры 6; 7; 10 и 20 мм. Наибольший диаметр использованного дорна составлял 5,75 мм. Установлено, что если наибольший диаметр напыла  $d_{max}$  (рис. 1) превышает диаметр отверстия опоры  $d_0$ , то при дорновании заготовка приподнимается на образующемся напыле, на котором формируется кольцевая площадка контакта с опорой. Причем при  $d_0 \geq 7$  мм размеры напылов, возрастая с увеличением натяга дорнования, не зависят от диаметра отверстия опоры; при  $d_0 = 6$  мм в отдельных случаях наблюдалось явление среза дорном части

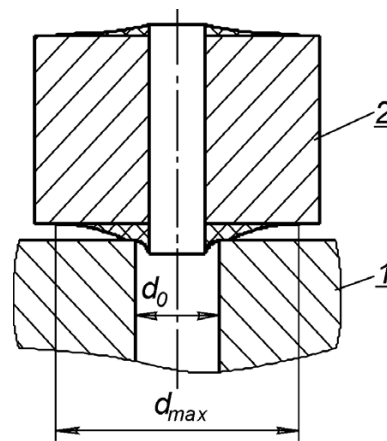


Рис. 1. Схема напылов металла на торцах заготовок, обработанных дорнованием:

1 – опора; 2 – заготовка

напыла, прилегающей к отверстию заготовки. Для исключения этого явления, а также прогибов заготовок малой высоты все дальнейшие опыты проводили на опоре с  $d_0 = 7$  мм, используя в каждом из них по три заготовки.

Исследования показали, что при уменьшении относительной высоты заготовок происходит снижение деформирующих усилий (рис. 2), а картина их остаточных деформаций при дорновании претерпевает существенные изменения. У заготовок малой относительной высоты ( $L/d \leq 1$ ) из-за пониженного сопротивления деформированию вытесняемый из отверстия металл смещается только на выходной торец и наружную поверхность. При этом на входном торце заготовок формируется впадина (утяжина). Сказанное подтверждают результаты экспериментов,

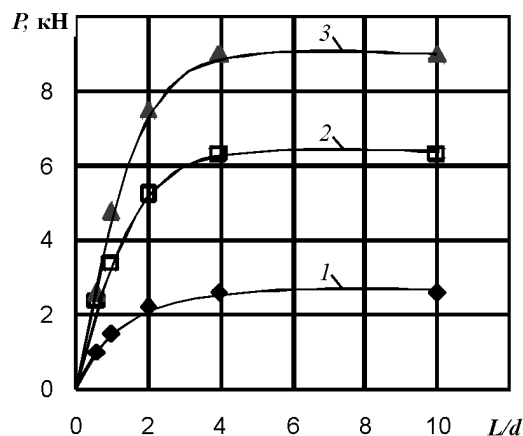


Рис. 2. Зависимости деформирующих усилий при дорновании отверстий в заготовках с  $D/d = 5$  от их относительной высоты при натягах:

1 –  $a/d = 1,9\%$ ; 2 –  $a/d = 6,5\%$ ; 3 –  $a/d = 13,7\%$

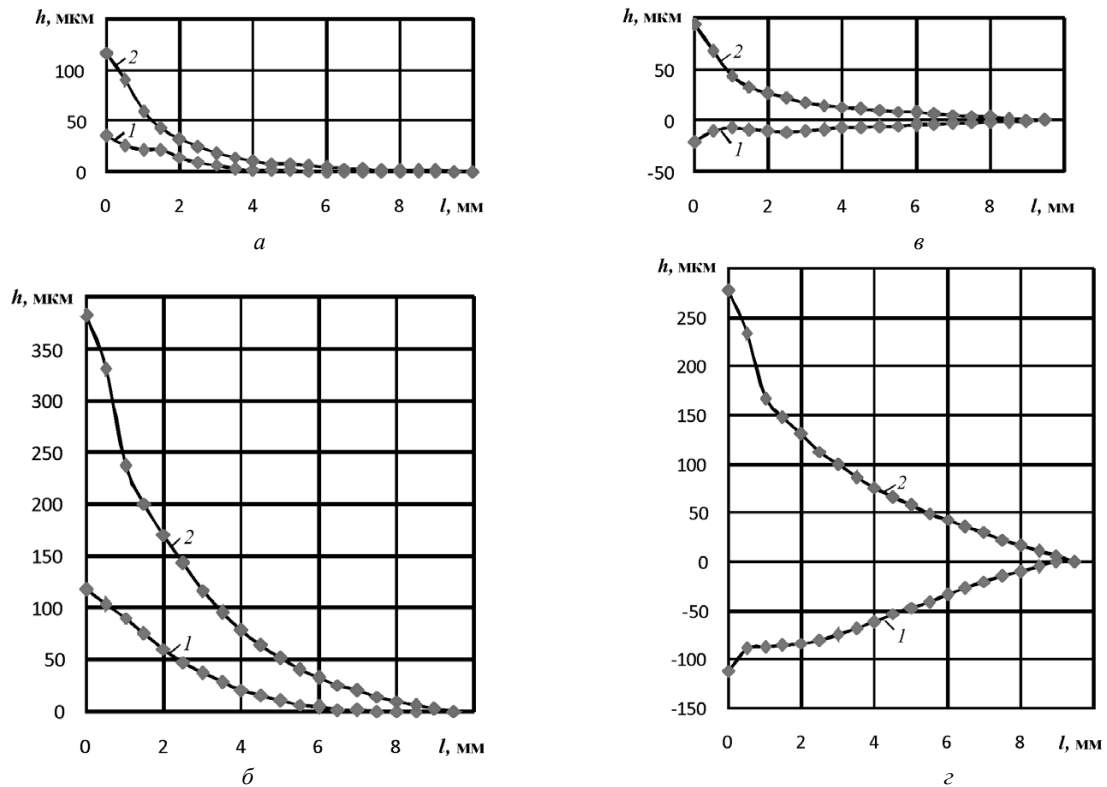


Рис. 3. Зависимости высоты наплывов (глубины впадин) металла на входном (1) и выходном (2) торцах заготовок с  $D/d = 5$ , формирующихся при дорновании, от расстояния до образующей отверстия:  
 а –  $L/d = 4, a/d = 1,9\%$ ; б –  $L/d = 4, a/d = 13,7\%$ ; в –  $L/d = 0,6, a/d = 1,9\%$ ; г –  $L/d = 0,6, a/d = 13,7\%$

приведенные на рис. 3. Если на заготовках с  $D/d = 5$  при  $L/d = 4$  в процессе дорнования на обоих торцах образуются наплывы металла (рис. 3, а и б), размеры и объем которых возрастает с увеличением натяга, то при  $L/d = 0,6$  на выходном торце образуется наплыв,

а на входном – впадина (рис. 3, в и г). При этом их размеры и объем также возрастают с увеличением натяга.

На рис. 4 показаны зависимости отношения суммарного объема металла, вытесненного на торцы ( $V_T$ ), к объему металла, вытесненного при дорновании из отверстия ( $V_d$ ), от относительной высоты заготовок (при образовании впадины на входном торце  $V_T$  определяли путем вычитания из объема наплыва на выходном торце объема впадины). Видно, что для заготовок с  $D/d \leq 5$  отношение  $V_T / V_d$  возрастает с увеличением степени толстостенности заготовок и уменьшением их относительной высоты и натяга дорнования, изменяется в широких пределах – от 0,92 до 0,02. При  $L/d = 10$  подавляющая часть металла, вытесняемого из отверстия, смещается на наружную поверхность заготовок.

Так как отношение  $V_T / V_d$  с уменьшением  $L/d$  возрастает (рис. 4), то казалось бы при этом должна снижаться окружная остаточная деформация на наружной поверхности заготовок  $\varepsilon_0$  ( $\varepsilon_0 = \Delta D/D$ , где  $\Delta D$  – приращение диаметра этой поверхности при дорновании). Однако, как показали эксперименты, с уменьшением  $L/d$  одновременно возрастает осевая остаточная деформация сжатия  $\varepsilon_z$  на наружной поверхности заготовок (рис. 5), которая увеличивает окружную остаточную деформацию  $\varepsilon_0$ . Вследствие этого окружная остаточная деформация на наружной

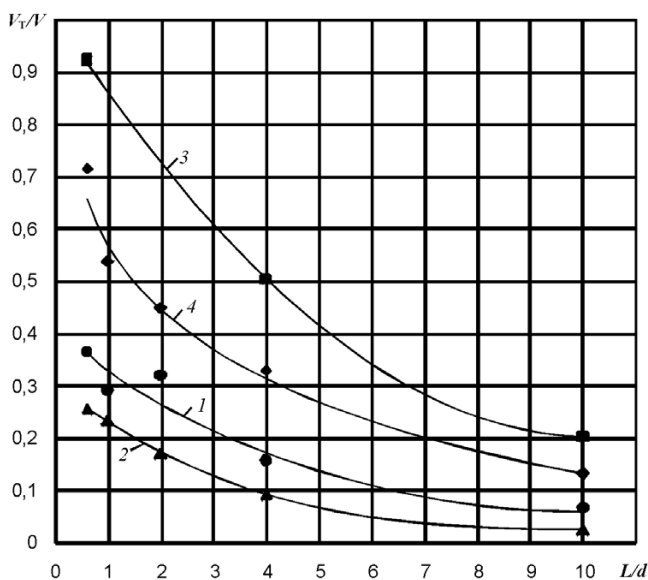


Рис. 4. Зависимости отношения объема металла, вытесненного на торцы, к объему металла, вытесненного при дорновании из отверстия, от относительной высоты заготовок:

1 –  $D/d = 3, a/d = 6,5\%$ ; 2 –  $D/d = 3, a/d = 13,7\%$ ;  
 3 –  $D/d = 5, a/d = 6,5\%$ ; 4 –  $D/d = 5, a/d = 13,7\%$

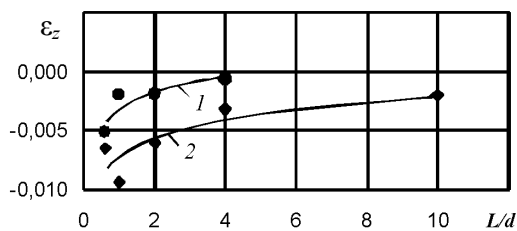


Рис. 5. Зависимости осевой остаточной деформации на наружной поверхности заготовок от их относительной высоты при натяге дорнования  $a/d = 13,7\%$ :

1 –  $D/d = 5$ ; 2 –  $D/d = 3$

поверхности заготовок, увеличиваясь с уменьшением степени их толстостенности и повышением натяга дорнования, оказывается практически независимой от их относительной высоты (рис. 6).

Если  $\epsilon_0 \geq 0,002$ , то можно считать, что пластические деформации достигли наружной поверхности заготовок [3], т. е. являются сквозными. Как видно

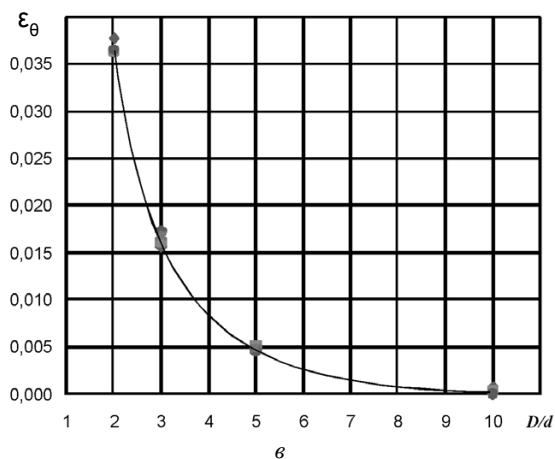
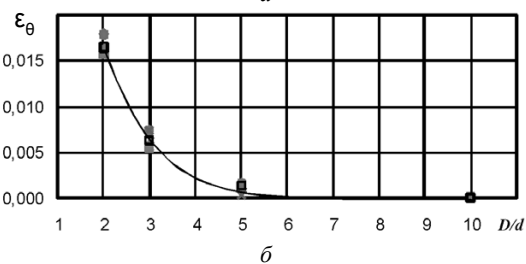
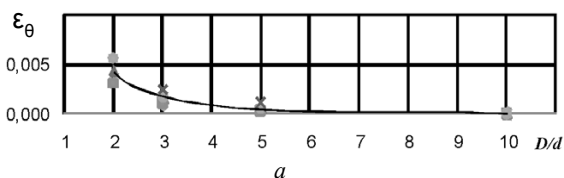


Рис. 6. Зависимости окружной остаточной деформации на наружной поверхности заготовок от степени их толстостенности при натягах дорнования:

$a/d = 1,9\%$  (а);  $a/d = 6,5\%$  (б) и  $a/d = 13,7\%$  (в).

Относительная высота заготовок:

$L/d = 10$  – ◆;  $L/d = 4$  – ▲;  $L/d = 2$  – ■;  $L/d = 1$  – ●;  
 $L/d = 0,6$  – ×

из рис. 6, при натяге  $a/d = 1,9\%$  сквозную пластическую деформацию претерпевают заготовки с  $D/d = 2$ ; при натяге  $a/d = 6,5\%$  – заготовки с  $D/d = 3$  и при натяге  $a/d = 13,7\%$  – заготовки с  $D/d = 5$ . Наружная область заготовок с  $D/d = 10$  даже при  $a/d = 13,7\%$  остается в упругом состоянии.

Таким образом, по мере увеличения натяга дорнования все более толстостенные заготовки (в диапазоне степеней толстостенности 2...5) независимо от их относительной высоты претерпевают сквозные пластические деформации. В связи с этим упомянутая выше классификация обрабатываемых дорнованием заготовок по степени толстостенности нуждается в уточнении.

### Выводы

При малой относительной высоте ( $L/d \leq 1$ ) заготовок с  $D/d \geq 3$ ) вытесняемый из отверстия при дорновании металл смещается только на их выходной торец и наружную поверхность. При этом на входном торце заготовок формируется впадина.

Окружная остаточная деформация на наружной поверхности обрабатываемых дорнованием заготовок, возрастая с уменьшением степени их толстостенности и увеличением натяга дорнования, практически не зависит от их относительной высоты.

По мере повышения натяга дорнования все более толстостенные заготовки (в диапазоне степеней толстостенности 2...5) независимо от их относительной высоты испытывают сквозные пластические деформации.

### Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – М.; Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.
3. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
4. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е. Технологическая механика деформирующего протягивания. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 203 с.
5. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Влияние степени толстостенности заготовок на процесс дорнования отверстий, выполняемый с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 2. – С. 62–65.
6. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 2. Приложение. – С. 1–24.



Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 3-8

### Influence of the geometric parameters of workpieces on the process of mandrelling

V.F. Skvortsov, I.S. Okhotin, A.S. Ivanova, B.K. Ormanov

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30,

Tomsk, 634050, Russia

E-mail: TMRI@tpu.ru

#### Abstract

Results of experimental studies of the influence of wall thickness ratio and relative height of workpieces (made of steel with 0.3% C), that vary in the ranges of 2...10 and 0.6...10 respectively, on the residual stresses and deforming forces of the single-cycle compression mandrelling of 5 mm diameter holes performed with allowances varied between 1.9 and 13.7% of the diameter are given. It is found that, due to lower resistance to deformation the metal forced out of the hole is moved to the external surface and outlet face of the workpiece when the height of workpiece is small. In this case, a depression is formed on the inlet face of the workpiece. It is revealed that the hoop residual strain on the external surface of the workpieces being mandrelled increases with the allowance increasing and ratio of wall thickness decreasing, and is almost independent of workpiece relative height. It is shown that workpieces with greater wall thickness ratio (in the range of wall thickness ratio mentioned above) undergo throughout plastic deformations with allowance increase. In this regard, it is noted that the current classification of mandrelled workpieces based on the wall thickness ratio is unreasonable.

Keywords: Hole mandrelling; Residual strains in workpieces; Deforming forces.

#### References

1. Proskurjakov Ju.G. *Dornovanie otverstij* (Mandrelling holes). Moscow – Sverdlovsk, Mashgiz, 1961. 192 p.
2. Proskurjakov Ju.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob#emnoe dornovanie otverstij* (Volume mandrelling holes). Moscow, Mashinostroenie, 1984. 223 p.
3. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mehanika plasticheskogo deformirovanija v processah rezanija i deformirujushhego protjagivaniija* (Mechanics of plastic deformation in the process of cutting and deforming broaching). Kiev, Naukova dumka, 1990. 320 p.
4. Rozenberg O.A., Cehanov Ju.A., Shejkin S.E. *Tehnologicheskaja mehanika deformirujushhego protjagivaniija* (Technological mechanics of deforming broaching). Voronezh, VSUET, 2001. 203 p.
5. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arljapov A.Ju. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2009, Vol. 314, no. 2, pp. 62-65.
6. Skvortsov V. F., Arljapov A. Ju., Okhotin I. S. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*, 2012, no. 2, Supplement, pp. 1-24.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАКРЫТОМ ШТАМПЕ\*

*Н.А. БОГДАНОВА, аспирант*

*В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, доцент*

*А.А. СОСНИН, канд. техн. наук*

*(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)*

Поступила 5 августа 2013 года

Рецензирование 25 августа 2013 года

Принята к печати 6 сентября 2013 года

**Богданова Н.А.** – 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1,  
Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,  
e-mail: joyful289@inbox.ru

Разработана методика, позволяющая зафиксировать изменение геометрических параметров неоднородного плоского образца в процессе его уплотнения в закрытой матрице при различных скоростях деформирования и условиях контакта в системе «образец – матрица – пуансон». Представлены кривые, характеризующие изменение геометрических параметров пор и углов поворотов наибольших осей эллипсов, вписанных в поры, а также движение фронта уплотнения и распределение усилий в процессе деформирования образцов. Получены линейные модели, описывающие характер изменения пор и энергосиловых характеристик процесса уплотнения. Представлены данные моделирования в программной среде «Q Form 3D» процесса осадки неоднородного плоского образца в закрытой матрице. Приведен анализ и сравнение результатов численного эксперимента с данными натурального эксперимента, полученными при физическом моделировании.

**Ключевые слова:** осадка, деформация, фронт уплотнения, пористый плоский образец.

## Введение

Современный этап развития материаловедения характеризуется появлением новых конструкционных материалов, физико-механические, эксплуатационные и технологические свойства которых значительно отличаются от традиционных материалов, применяемых в машиностроении. Выбор и разработка того или иного технологического процесса формирования изделий из конструкционных материалов (литье, обработка материалов давлением и резанием, порошковая металлургия и т. д.) напрямую связаны с определенными значениями (показателями) этих свойств с учетом экономической эффективности каждого из технологических процессов, которые в конечном итоге и определяют выбор того или иного способа для формообразования изделий. Одним из наиболее распространенных способов получения фасонных изделий из металлов и сплавов для нужд машиностроительной отрасли производства являются способы получения изделий методами литья и методами пластической деформации материала. Од-

нако комплекс свойств, которыми обладают новые материалы (например: пластические свойства – для технологий обработки металлов давлением; жидкотекучесть и склонность к ликвации – для технологий литейного производства), не всегда удовлетворяют требованиям традиционных технологий формообразования, что является сдерживающим фактором в широком применении данных материалов.

Поиск способов формирования изделий методами пластической деформации из таких материалов и повышение эффективности существующих процессов формообразования из традиционных конструкционных материалов в мировой практике ведется по нескольким направлениям. Среди этих направлений можно выделить: формирование изделий из материалов в твердожидком состоянии [1–6] и получение изделий из неоднородных, обычно пористых, материалов (аналог методов порошковой металлургии) [7–11].

Основной особенностью указанных процессов является то, что материал деформируемой заготовки, в отличие от традиционных процессов обработки ма-

\* Работа выполнена при поддержке грантов 12-I-ОЭМПУ-06 и 12-I-П25-02.

териалов давлением, имеет определенные значения исходной пористости. В первом случае материал заготовки представляет собой определенным образом структурированный каркас из твердого (твердофазного) материала, внутреннее пространство которого заполнено расплавленным металлом (жидкой фазой). Во втором случае – твердофазный материал с открытой, закрытой или смешанной газовой пористостью (вспененный материал).

Одними из основных требований, предъявляемых к процессам получения металлоизделий из таких заготовок, являются отсутствие (минимизация) пористости в конечном изделии и снижение удельных энергетических затрат на сам процесс деформирования. В связи с этим целью данного исследования является определение влияния скорости деформирования и условий контакта в системе «образец – матрица – пуансон» на характер уплотнения неоднородного материала с помощью физического моделирования процесса осадки пористого плоского образца в закрытой матрице, а также анализ и сравнение результатов численного эксперимента, полученных в программной среде «Q Form 3D» с данными натурального эксперимента, образовавшимися в результате физического моделирования.

### 1. Методика проведения исследований

Для физического моделирования процесса осадки пористого плоского образца была разработана методика, позволяющая зафиксировать динамику его уплотнения в закрытой матрице. В качестве материала для изготовления образцов использовали скульптурный пластилин «Люкс» по ТУ 2389–011–02954519–99. Соотношение размеров образца 2:1:0,15 (140×70××10,5 мм) выбирали исходя из условий моделирования плоской деформации [12].

Неоднородность образца (открытую пористость, равную 0,25) задавали с помощью равномерно распределенных по фронтальной плоскости отверстий диаметром 4 мм (рис. 1).

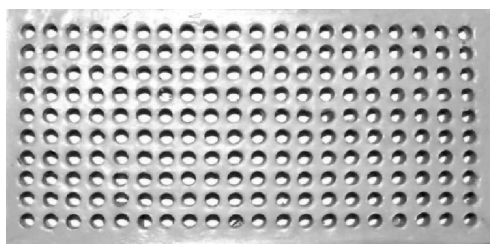


Рис. 1. Внешний вид образца

Сборную закрытую матрицу выполняли из прозрачного материала (оргстекло марки ТОСН по ГОСТ 17622–72) с толщиной стенки 10 мм. Фиксирование процесса уплотнения производили высоко-

скоростной видеосъемкой через переднюю фронтальную стенку матрицы, подсвеченную контрольным светом через заднюю фронтальную стенку для исключения образования контурных теней и бликов на кадрах видеозаписи. По раскадровке видеосъемки, произведенной с помощью программного пакета «Adobe Premiere Pro CS6», в дальнейшем оценивали изменение геометрических размеров пор и их взаимного расположения в процессе деформации (площадь поперечного сечения, положение центров отверстий в декартовых координатах, величины главных осей деформированных отверстий и углы поворотов наибольших главных осей относительно вертикали).

Измерение и запись величин перемещений пуансона и значений силовых параметров процесса уплотнения образца проводили с помощью блока автоматической регистрации данных на экспериментальном стенде, оборудованном на базе испытательной электромеханической машины Instron 3382 (рис. 2).

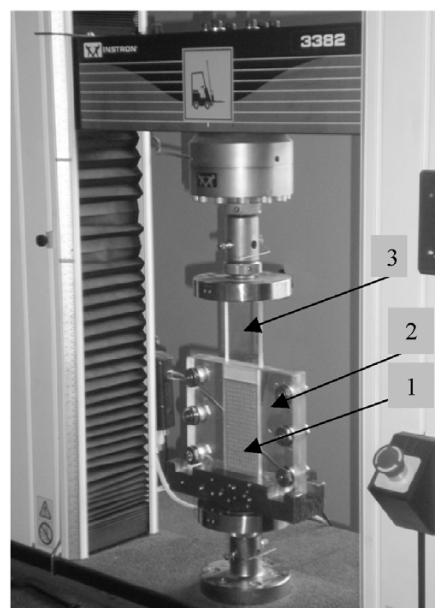


Рис. 2. Стенд для проведения испытаний:

1 – образец; 2 – матрица; 3 – пуансон

Условия контакта поверхностей образца со стенками закрытой матрицы и плоскостью пуансона оценивали через идеальные значения фактора трения (0 и 1), максимальное значение которого соответствовало идеальному контакту, а минимальное – контакту через слой силиконовой смазки по ТУ 2384–032–56751830–2007. Идеализация условий контакта при физическом моделировании связана с двухуровневым изменением независимого фактора. Его фактические значения могут быть рассчитаны с использованием закона трения Зибеля с уточнениями, характеризующими свойства материала и схему его деформирования [13].

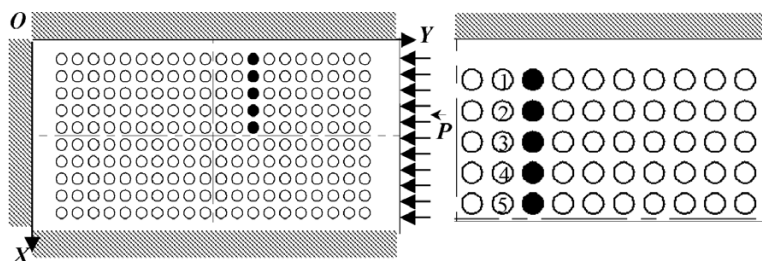


Рис. 3. Схема для оценки изменения геометрических параметров отверстий

Скорость деформирования при проведении испытаний выбрали из рекомендуемого интервала скоростей деформирования, характерных для обработки материалов давлением, и устанавливали на двух уровнях – минимальной (0,5 мм/с) и максимальной (5 мм/с) с помощью управления скоростью перемещения подвижной цапги узла нагружения испытательной машины Instron 3382.

Откликами эксперимента являлись данные в виде кривой в координатах «нагрузка – перемещение», синхронизированные с раскадровой видеосъемки, а также изменение геометрических размеров пор и их взаимное расположение.

Связь значений отклика с независимыми факторами (скоростью деформирования, величиной фактора трения и степенью деформации (0,03...0,3)) устанавливали с помощью линейных моделей, построенных на основе статистической обработки экспериментальных данных, полученных по плану полного факторного эксперимента типа 2<sup>x</sup>.

Экспериментальные данные изменения геометрических параметров пор (отверстий) и их взаимного расположения фиксировали для рядов отверстий, расположенных вблизи продольной оси симметрии образцов по схеме, представленной на рис. 3. При этом точка отсчета (центр координат), относительно которой определяли линейные смещения центров анализируемых пор (на рис. 3 зачернены и обозначены цифрами) в направлении осей *OX* и *OY*, находилась в верхнем левом углу образца. Угловые отклонения наибольших осей деформированных пор отсчитывали относительно оси *OY*.

Изображения, полученные при раскадровке видеосъемки с шагом, кратным перемещению пуансона, масштабировали и в среде программного пакета Image-Pro. Plus, производили измерения указанных выше геометрических параметров с точностью, равной 0,01 мм по линейным размерам и 0,1 градуса по угловым размерам.

На рис. 4 представлена схема измерения геометрических параметров пор. В контуры исходных пор (рис. 4, а) вписывалась окружность диаметром  $d_0 = l_{min} = l_{max}$ , где  $l_{min}$  – длина минимальной оси эллипса;  $l_{max}$  – длина максимальной оси эллипса. Принимали, что направление максимальной оси эллипса исходных отверстий совпадает с направлением оси *OX*. Отсчет угла поворота максимальной оси эллипса  $\alpha$  производили от направления оси *OY* (для исходных отверстий  $\alpha_0 = 90^\circ$ ).

Относительные отклонения размеров осей эллипсов и изменение площадей пор ( $\Delta S$ ) определяли из соотношений:  $\Delta l_{min} = d_0 - l_{min}$ ;  $\Delta l_{max} = l_{max} - d_0$ ;  $\Delta S = (S - S_0)/S \cdot 100\%$ , где  $S_0$  и  $S$  – соответственно площади вписанных в поры эллипсов до и после деформации.

Для моделирования процесса деформации необходимо задать свойства материала образцов (скульптурный пластилин «Люкс»). С целью получения сведений о механических свойствах были проведены испытания на сжатие предварительно изготовленных цилиндрических образцов. Высота  $h$  и диаметр  $d$  образцов подбирались в соответствии с ГОСТ 4651–82 и составляли  $h = 30$  мм и  $d = 20$  мм. Испытания проводили с помощью электромеханической испытательной машины INSTRON 3382 при скорости испытания  $v_0 = 0,5$  мм/с. По результатам испытаний цилиндрических образцов по ГОСТ 9550-81 определялся модуль Юнга и условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Для численного моделирования процесса осадки неоднородного плоского образца использовалась программная среда «Q Form 3D». Конфигурацию исследуемого объекта (заготовки) и формообразующего инструмента создавали в программной среде «T-Flex».

При разработке конфигурации формообразующего инструмента (матрицы и пуансона) выбирали посадку с зазором, равным 0,05 мм, что соответствовало реальной посадке пуансона в эксперименталь-

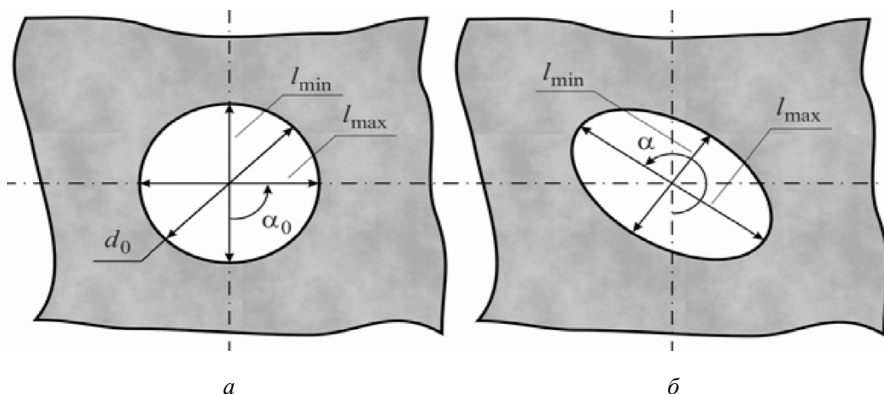


Рис. 4. Схема определения геометрических параметров пор:

а – до деформации; б – после деформации

ной матрице, используемой при физическом моделировании процесса. Моделировался процесс холодной объемной штамповки на гидравлическом прессе с максимальным усилием 50 МН. Свойства материала образца задавали в виде функции, полученной в результате аппроксимации экспериментальных данных испытаний материала образцов на сжатие.

В качестве анализируемых изображений использовали изображения, полученные в ходе расчета по шагам, соответствующим степеням деформации исходной заготовки:  $\varepsilon_1 = 0,03$ ,  $\varepsilon_2 = 0,1$ ,  $\varepsilon_3 = 0,17$ ,  $\varepsilon_4 = 0,25$ .

## 2. Результаты исследований

Физическое моделирование процесса деформирования неоднородного материала проводили для четырех серий экспериментов, отличающихся между собой скоростью деформирования и условиями контакта образцов со стенками матрицы и пуансоном (табл. 1).

Таблица 1

Номер серии эксперимента	Скорость деформирования, мм/с	Фактор трения
1	0,5	1
2	5	1
3	0,5	0
4	5	0

На рис. 5 представлены кривые, характеризующие перемещение центров ряда пор (отверстия 1–5) в направлении осей  $OX$  и  $OY$  в процессе деформирования образцов для четырех серий экспериментов.

Степень деформации образцов  $\varepsilon_i$  при перемещении пуансона на 0, 5, 15, 25 и 35 мм соответственно составляла  $\varepsilon_0 = 0$ ,  $\varepsilon_1 = 0,03$ ,  $\varepsilon_2 = 0,1$ ,  $\varepsilon_3 = 0,17$ ,  $\varepsilon_4 = 0,25$ . Указанные кривые, опорные точки которых соответствуют средним значениям для трех экспериментов в каждой из серий, характеризуют движение фронта уплотнения в процессе деформирования образца. Начальное (до деформации) расположение центров пор описывается для каждой из серии экспериментов кривыми  $\varepsilon_0$ , остальные кривые определяют динамику процесса уплотнения материала образца до конечной степени деформации  $\varepsilon_4$ . Характер перемещения центров пор свидетельствует о влиянии фактора трения и скорости деформи-

рования на формирование фронта уплотнения материала в процессе осадки, причем оно наиболее ярко выражено при максимальной степени деформации. На начальных стадиях деформирования смещение центров рядов пор по координате  $Y$  имеет практически линейный характер. При степенях деформации больше 0,1 ( $\varepsilon_2$ ) изменяются условия контакта образца со стенками матрицы, связанные с уплотнением материала в верхней части образца. Это приводит к увеличению сопротивления деформации материала в этой области, что подтверждается уменьшением смещения центров пор вблизи контактной поверхности (отверстия 1, 2) по сравнению с остальными (отверстия 3–5). Фронт уплотнения приобретает параболический характер. С увеличением скорости деформирования в условиях идеального контакта образца со стенками матрицы (рис. 5, а, б) характер фронта уплотнения приобретает более ярко выраженный параболический характер с вершиной параболы, соответствующей  $X(\varepsilon_4) = 68,1$  мм. В условиях контакта через слой силиконовой смазки наблюдается аналогичная картина (рис. 5, в, г). Вершина параболы соответствует значению  $X(\varepsilon_4) = 67,4$  мм.

Процесс осадки образцов в зависимости от условий трения на контактных поверхностях и скорости деформирования характеризуется различным распределением усилий, определяющих энергосиловые затраты на процесс деформирования. Распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов представлено на рис. 6.

Условия идеального контакта образца со стенками матрицы характеризуются более высокими энергетическими затратами на процесс деформирования

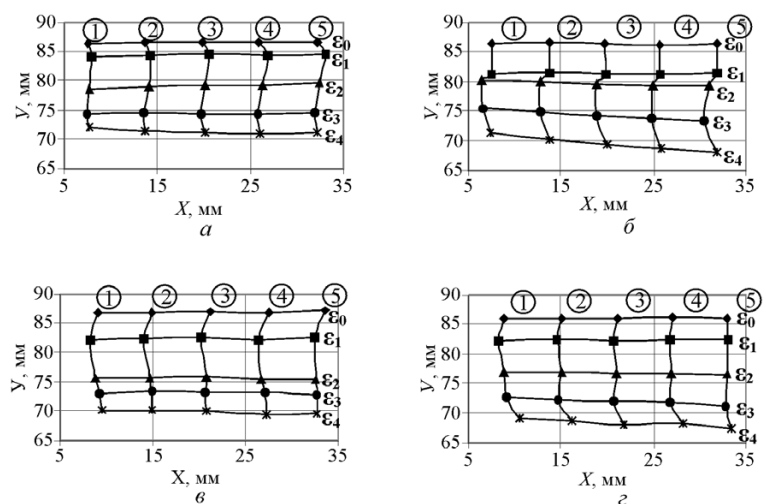


Рис. 5. Перемещение центров пор образцов в процессе деформации по сериям экспериментов:

а – 1-я серия, б – 2-я серия, в – 3-я серия, г – 4-я серия; ①–⑤ номера отверстий;  $\varepsilon_i$  – степень деформации

Таблица 2

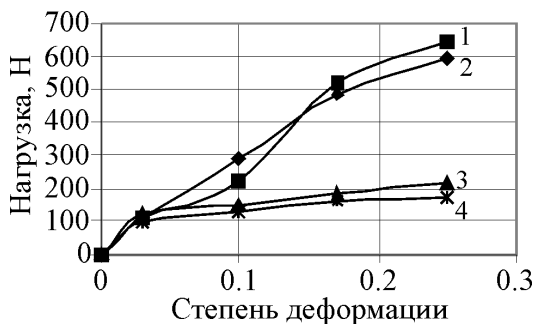


Рис. 6. Распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов:

1 – первая серия; 2 – вторая серия; 3 – третья серия; 4 – четвертая серия

Степень деформации	Номер серии*			
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4
$\epsilon_1$	0,74/1,75	0/0	0,6/1,5	0/0
$\epsilon_2$	0,25/1,34	0,92/0,85	2,01/1,48	1,13/1,89
$\epsilon_3$	0,39/1,73	0/0,1	2,28/1,72	1,49/3,09
$\epsilon_4$	3,56/3,3	0,95/1,85	0,72/2,18	0,65/1,65

\* в числителе  $\Delta l_{max}$ , мм; в знаменателе  $\Delta l_{min}$ , мм

(рис. 6, кривые 1, 2), чем при деформировании со смазкой (рис. 6, кривые 3, 4). Максимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования составляет 645,95 Н и соответствует 1-й серии экспериментов. Минимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования, составляет 176,46 Н и соответствует 4-й серии экспериментов. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформации зависит от условий контакта образца со стенками матрицы. При значениях фактора трения  $f = 1$  сопротивление деформации с увеличением скорости уменьшается, что приводит к снижению усилия с 645,95 Н до 593 Н, а при значении фактора трения  $f = 0$  – к уменьшению усилия с 216 Н до 176,46 Н.

При проведении серий экспериментов было установлено, что наибольшему формоизменению в процессе деформации подвержена пора, находящаяся вблизи боковой контактной поверхности образца со стенкой матрицы – отверстие № 1 (рис. 3).

В табл. 2 представлены результаты изменения размеров осей эллипсов  $\Delta l_{min}$  и  $\Delta l_{max}$  в процессе деформирования поры, характеризующие изменение ее геометрических параметров. Аналогичные данные получены для остальных рассматриваемых пор.

На рис. 7 показано изменение углов поворота наибольших осей эллипсов, вписанных в деформированные поры для четырех серий экспериментов. Представленные данные совместно с данными табл. 2 характеризуют формоизменение пор в процессе деформирования.

Характер изменения геометрических размеров пор зависит от их расположения (удаленности от боковой контактной поверхности образца с матрицей) и фактора трения. Наибольшему формоизменению подвергаются поры, расположенные вблизи контактной поверхности (отверстия 1, 2), причем при степенях деформации больше 0,15 наибольшие оси формирующихся эллипсов меняют свое направление, а их оси в конце деформирования изменяются на наибольшую величину. Для первых двух серий экспериментов  $\Delta l_{max}$  составляют соответственно 3,56 и 0,95 мм. Очевидно, что увеличение скорости деформирования при значении фактора трения  $f = 1$  уменьшают  $\Delta l_{max}$ . При факторе трения  $f = 0$   $\Delta l_{max}$  составляют соответственно 0,72 мм и 0,65 мм. Аналогично увеличение скорости деформирования уменьшают  $\Delta l_{max}$ . Уменьшение фактора трения независимо от скорости

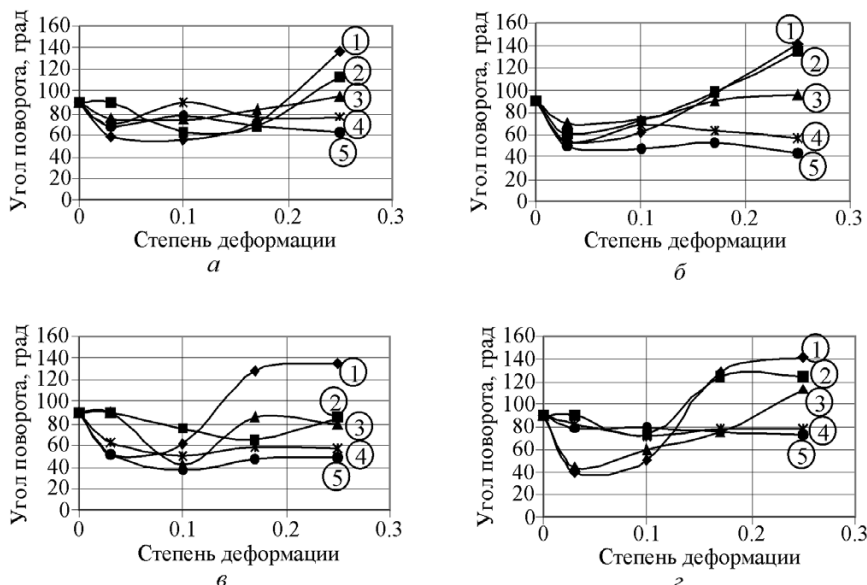


Рис. 7. Изменение углов поворотов наибольших осей эллипсов, вписанных в поры в процессе деформации по сериям экспериментов:

а – 1-я серия; б – 2-я серия; в – 3-я серия; г – 4-я серия; ①–⑤ номера отверстий

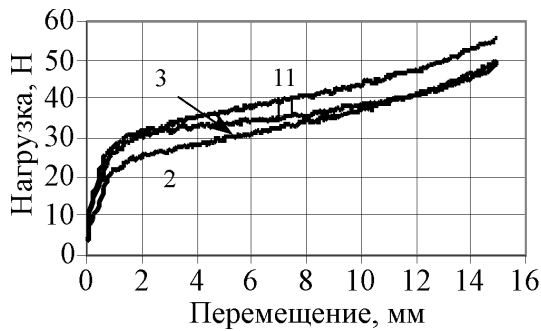


Рис. 8. График зависимостей нагрузки  $P$  от перемещения верхнего торца образца ( $\Delta l$ ):

1, 2, 3 – номера образцов

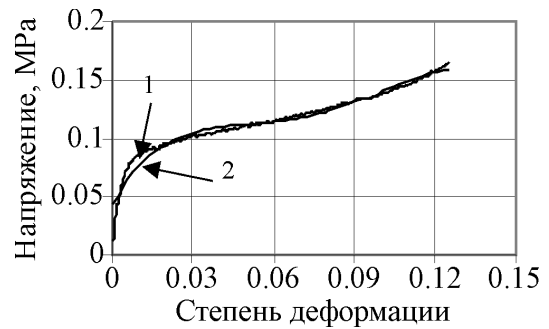


Рис. 9. Кривая « $\sigma$ – $\epsilon$ »:

1 – экспериментальные данные;  
2 – аппроксимирующая кривая

деформирования приводит к уменьшению  $\Delta l_{\max}$ , что связано с увеличением сопротивления деформации. В результате испытания образцов из скульптурного пластилина «Люкс» получены данные по перемещениям верхнего торца образцов и соответствующим нагрузкам (рис. 8). Усредняя данные по результатам испытания трех образцов, получили диаграмму сжатия материала в координатах « $\sigma$ – $\epsilon$ » (рис. 9), исходя из которой был определен условный предел текучести материала образцов  $\sigma_{0,2} = 0,047$  МПа, модуль Юнга который составляет 5,46 МПа.

Экспериментальные данные  $\sigma = f(\epsilon)$  были аппроксимированы полиномом четвертой степени, описывающим свойства материала:

$$\sigma = 0,04 + 4,09 \cdot \epsilon - 92,81 \cdot \epsilon^2 + 921,02 \cdot \epsilon^3 - 3049,12 \cdot \epsilon^4, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – степень деформации. Средняя относительная ошибка аппроксимации составляет 2,2 %, коэффициент корреляции  $R^2 = 0,972$ .

На рис. 10 и 11 в качестве примера представлены изображения, полученные в результате моделирования в программной среде «Q Form 3D» процесса осадки неоднородной пластины для первой ( $\nu = 0,5$  мм/с,  $f = 1$ ) и третьей ( $\nu = 0,5$  мм/с,  $f = 0$ ) серии экспериментов.

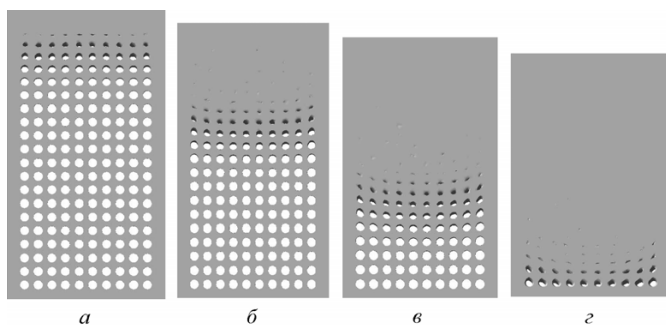


Рис. 10. Изображения расчетных моделей «Q-Form» при различных степенях деформации ( $f = 1$ ):

$a - \epsilon_1 = 0,03$ ;  $b - \epsilon_2 = 0,1$ ;  $v - \epsilon_3 = 0,17$ ;  $z - \epsilon_4 = 0,25$

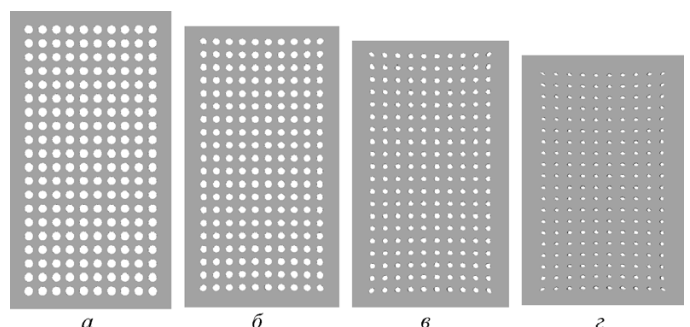


Рис. 11. Изображения расчетных моделей «Q-Form» при различных степенях деформации ( $f = 0$ ):

$a - \epsilon_1 = 0,03$ ;  $b - \epsilon_2 = 0,1$ ;  $в - \epsilon_3 = 0,17$ ;  $z - \epsilon_4 = 0,25$

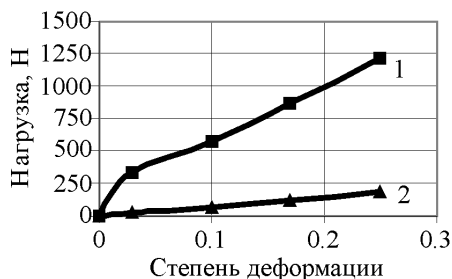


Рис. 12. Кривые расчетных нагрузок:  
1 – нагрузка при  $f=1$ ; 2 – нагрузка при  $f=0$

щественно различаются между собой. При  $f=1$  максимальное усилие в конце цикла осадки ( $\epsilon_4 = 0,25$ ) составляет 1210 Н, а при  $f=0$  – в 6,7 раза меньше (180 Н).

Аналогичные данные были получены и для второй и четвертой серии экспериментов.

### 3. Обсуждение результатов

Из представленных на рис. 5–7 и табл. 2 результатов экспериментальных исследований видно, что однозначно сделать вывод о преимущественном влиянии того или иного фактора на процесс достаточно сложно. Для описания совместного влияния всех факторов на поведение материала образца при его осадке был реализован полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . В табл. 3 представлены данные откликов эксперимента, полученные после обработки всех серий экспериментов на примере эволюции поры (отверстия) № 1 (рис. 3).

Таблица 3

№ п/п	Значения факторов			Значения откликов				
	$\epsilon$	$v$ , мм/с	$f$	$\alpha$ , град	$\Delta l_{max}$ , мм	$\Delta l_{min}$ , мм	$\Delta S$ , %	$P$ , Н
1	0,03	0,5	0	58,4	0	0	0	96
2	0,25	0,5	0	135,8	0,72	2,18	23,31	176,46
3	0,03	5	0	54,7	0,60	1,5	27,10	122,01
4	0,25	5	0	140,9	0,65	1,65	1,77	216,26
5	0,03	0,5	1	52,1	0,74	1,75	29,49	108,18
6	0,25	0,5	1	134,4	3,56	3,30	84,72	593,31
7	0,03	5	1	39,4	0	0	0	108,79
8	0,25	5	1	140,7	0,95	1,85	11,24	645,95

После статистической обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов в программной среде «Statan» были получены линейные модели в виде уравнений регрессии следующего вида:

$$\alpha = 50,4 + 333,2\epsilon - 1,8v - 9,8f + 14\epsilon v + 45,5\epsilon f - 0,9vf; \quad (2)$$

$$\Delta l_{max} = 0,6 + 0,2\epsilon + 9,9\epsilon v + 45,5\epsilon f - 0,3vf; \quad (3)$$

$$\Delta l_{min} = 1 + 3,5\epsilon + 9,9\epsilon v + 6\epsilon f - 0,3vf; \quad (4)$$

$$\Delta S = -0,6 + 124,1\epsilon + 7,1v + 29,7f - 46,8\epsilon v + 155,7\epsilon f - 12,1vf; \quad (5)$$

$$P = 90,2 + 302,9\epsilon + 2,5v - 55f + 34,3\epsilon v + 1931\epsilon f - 1,6vf. \quad (6)$$

Область определения значений факторов, входящих в уравнения (2)–(6):

$$\epsilon = [0,03; 0,25]; v = [0,5; 5]; f = [0; 1].$$

Адекватность полученных линейных моделей оценивали по критерию Фишера ( $F_{табл} \geq F_{расч}$ ), а статистическую значимость коэффициентов уравнений регрессии по критерию Стьюдента ( $t_{расч} \geq t_{табл}$ ). Дополнительно анализировали относительную ошибку аппроксимации и коэффициент корреляции. Все полученные уравнения адекватны, статистически незначимые члены уравнений регрессии были исключены. Относительная ошибка аппроксимации не превышала 12 % при коэффициенте корреляции не ниже 0,91 при доверительной вероятности 0,95.

Используя линейные модели (2) – (6) в пределах области определения значений факторов, можно оценить энергосиловые характеристики и проследить эволюцию пор при осадке неоднородного материала.

Единственная функциональная зависимость, которая описывает свойства деформируемого материала и может быть задана в пакете прикладных программ «Q Form 3D», имеет вид

$$\sigma = A\epsilon^{-m_1}\epsilon^{m_2}\exp(-m_3\epsilon)\xi^{m_4}, \quad (7)$$

где  $\theta$  – температура;  $\epsilon$  – степень деформации;  $\xi$  – скорость деформации. В связи с этим дополнительно была решена задача по аппроксимации экспериментальных данных этой зависимостью. Так как не имеется данных по температурным показателям процесса деформации скульптурного пластилина, то принимали, что  $m_1 = 0$ , а коэффициенты  $m_2, m_3, m_4$  и  $A$  находили путем минимизации функционала метода наименьших квадратов [14]. В результате получили зависимость

$$\sigma = 2,11\epsilon^{0,39}\exp(-4,1\epsilon)\xi^{0,56}. \quad (8)$$

Поскольку средняя относительная ошибка аппроксимации функции (8) не превышает 2,4 % при степенях деформирования до 0,25, то ее можно использовать в программной среде «Q Form 3D» для описания свойств деформируемого материала.



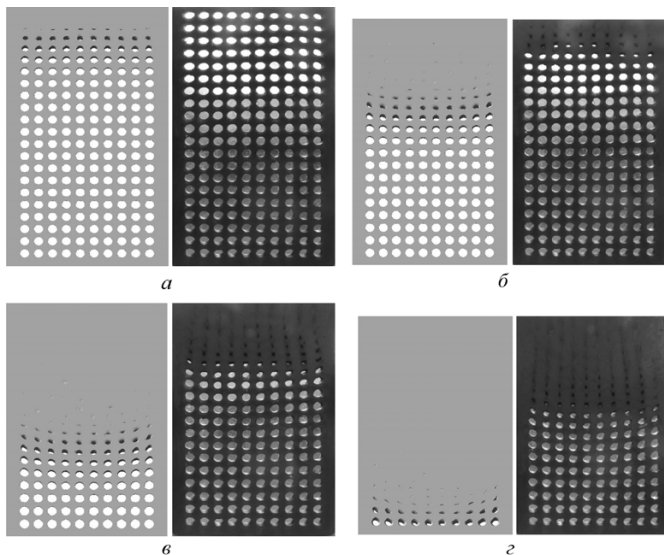


Рис. 13. Сравнение изображений экспериментальных образцов с расчетными моделями Q-Form при различных степенях деформации ( $f=1$ ):

$$a - \varepsilon_1 = 0,03; \quad б - \varepsilon_2 = 0,1; \quad в - \varepsilon_3 = 0,17; \quad г - \varepsilon_4 = 0,25$$

На рис. 13 и 14 представлены результаты сравнения расчетных моделей, полученных в программной среде «Q Form 3D» с данными физического моделирования.

При максимальном значении фактора трения (рис. 13) при физическом моделировании наблюдали формирование ярко выраженного фронта уплотнения материала при степенях деформации свыше 0,1, в то время как в расчетной модели он формируется значительно раньше ( $\varepsilon \geq 0,03$ ). Искажение геометрических параметров пор анализируемого ряда по окончании цикла осадки в эксперименте ( $\varepsilon_4 = 0,25$ ) характерно для степени деформации 0,03 в расчетной модели.

При минимальном значении фактора трения (рис. 14) различия становятся более очевидными.

В экспериментальных образцах наблюдается наличие четкого фронта уплотнения материала, который в расчетной модели отсутствует.

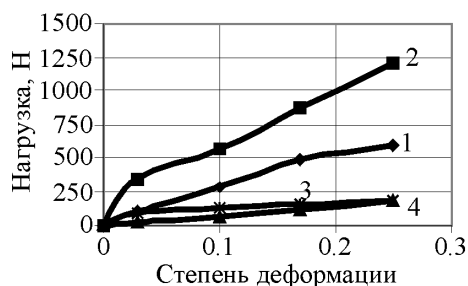


Рис. 15. Кривые расчетных и экспериментальных нагрузок:

1 – экспериментальная нагрузка при  $f=1$ ; 2 – расчетная нагрузка при  $f=1$ ; 3 – экспериментальная нагрузка при  $f=0$ ; 4 – расчетная нагрузка при  $f=0$

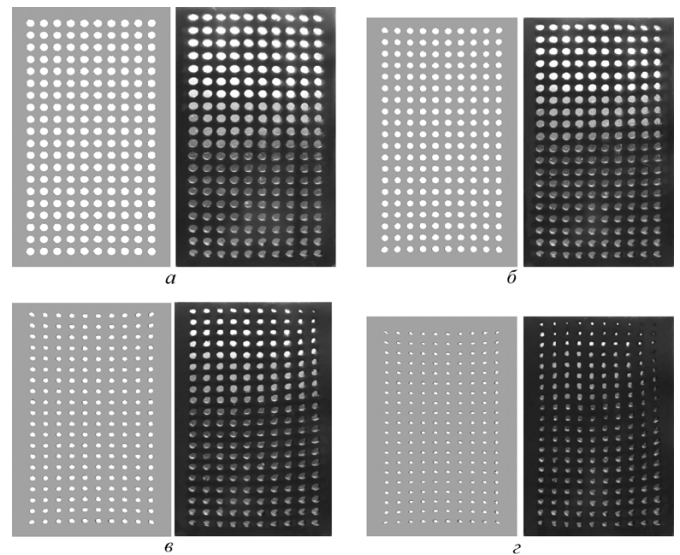


Рис. 14. Сравнение изображений экспериментальных образцов с расчетными моделями Q-Form при различных степенях деформации ( $f=0$ ):

$$a - \varepsilon_1 = 0,03; \quad б - \varepsilon_2 = 0,1; \quad в - \varepsilon_3 = 0,17; \quad г - \varepsilon_4 = 0,25$$

Поскольку изображения, полученные с использованием расчетных моделей по шагам деформирования, существенно отличаются от изображений, полученных в результате физического моделирования, то анализ изменения геометрических параметров пор для них не проводили.

Сравнение результатов распределения усилий в процессе деформирования (рис. 15) показывает, что расчетные значения усилия в конце цикла обжатия превышают в 2 раза (соответственно 1210 Н и 593 Н) экспериментальные значения при факторе трения, равном 1, и практически совпадают при факторе трения, равном 0 (соответственно 180 Н и 176 Н).

## Выводы

В результате экспериментального исследования процесса осадки неоднородного материала в закрытой матрице получены линейные модели, описывающие формоизменение пор и распределение усилий в зависимости от фактора трения, скорости деформирования и степени деформации. Предложена методика оценки изменения геометрических параметров пор в процессе деформирования, позволяющая определить фронт уплотнения материала. Из испытаний материала на сжатие предложены три варианта функции с той или иной точностью, описывающие свойства деформируемого материала. Полученные экспериментальные данные использованы для построения модели, описывающей деформацию неоднородной среды с учетом сжимаемости материала. В результате сравнения данных физического и численного моделирования процесса осадки неоднород-

ного материала в закрытой матрице можно сделать вывод о некорректности, полученной в программной среде «Q Form 3D» модели. Наиболее наглядно это демонстрируется при  $f = 0$ . Полученная расчетная модель близка к схемам деформирования образцов в условиях всестороннего сжатия и неадекватна данным, полученным при физическом моделировании процесса. Очевидно, что для расчетного моделирования процесса деформирования неоднородных материалов необходимо уточнение параметров модели с учетом сжимаемости неоднородного материала в процессе его деформирования.

### Список литературы

1. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223 с.
2. Тиксоштамповка и тиксолитье – современные технологии формообразования алюминиевых и других сплавов в твердожидком состоянии / Б.И. Семенов, Ю.А. Бочаров, К.М. Куштаров, Ю.А. Гладков, Л.В. Хижнякова // Технология легких сплавов. – 2010. – № 1. – С. 129–150.
3. Бочаров Ю.А., Хижнякова Л.В. Параметры тиксоштамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 10. – С. 36–40.
4. Бочаров Ю.А., Койдан И.М. Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в тиксотехнологиях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 69–74.
5. Тиксоформинг высокопрочных сплавов Al–Zn–Mg–Cu / Т.Б. Нго, Н.А. Джиндо, А.Б. Семенов, Б.И. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2012. – СВ-3. – С. 148–165.
6. Иванова Е.В., Тагиров Д.В., Кайбышев Р.О. Влияние жидкофазного горячего изостатического прессования на свойства литых алюминиевых сплавов. Часть 1. Структура и свойства сплава АК7Ч, полученного литьем в песчаные формы // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 2. – С. 11–17.
7. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М.: Физматлит, 2009. – 265 с.
8. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Пластическая деформация пористых материалов. – М.: МГИУ, 2008. – 276 с.
9. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Власов Д.А. Расчетный метод построения истинных кривых упрочнения пористых и композиционных материалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 10. – С. 15–20.
10. Исследование уплотнения при деформации пористых материалов / Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, А.Е. Максименко, М.В. Лысюк // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Вып. 3 (Ч. 1). – 2011. – С. 440–448.
11. Власов А.В., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3. – С. 31–35.
12. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
13. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спасский. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
14. Севастьянов Г.М. Об одном способе задания определяющих зависимостей «напряжения – скорости деформаций» в условиях активного пластического течения по опытным данным // Дальневосточный математический журнал. – 2011. – Том 11, № 1. – С. 88–92.

Obработка metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 9-18

### Simulation of heterogeneous material deformation process during shortening in the closed die

N.A. Bogdanova, V.V. Chernomas, A.A. Sosnin

Institute of Machinery and Metallurgy, Metallurgov st., 1,  
Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russia  
E-mail: joyful289@inbox.ru

### Abstract

The technique allowing to detect a change of geometrical parameters of the heterogeneous plane sample, in the course of its compression in the closed matrix at various speeds of deformation and contact conditions in system «a sample – a matrix – a punch» is developed. The curves, describing change of pores geometrical parameters and angles of rotation greatest axes of ellipse inscribed in the pores, and also movement of the compression front and force distribution in the deformation process of samples are presented. The linear models describing the behavior of the pores and energy-power characteristics of the compression process are found. The data of modeling in software environment «Q Form 3D» of the compression process

of the heterogeneous plane sample in the closed die is presented. The analysis and comparison of the results numerical experiment with the data of natural experiment, obtained by physical modeling, is submitted.

**Keywords:** compression, deformation, compression front, heterogeneous plane sample

### References

1. Semenov B.I., Kushtarov K.M. *Proizvodstvo izdelij iz metalla v tverdozhidkom sostojanii. Novye promyshlennye tehnologii* (Manufacture of metal in the solid-liquid state. New industrial technology). Moscow, BMSTU, 2010. 223 p.
2. Semjonov B.I., Bocharov Yu.A., Kushtarov K.M., Gladkov Yu.A., Hizhnjakova L.V. *Tehnologija legkih splavov*, 2010, no. 1, pp. 129-150.
3. Bocharov Yu.A., Hizhnjakova L.V. *Parametry tiksoštampovki osesimmetrichnyh pokovok iz aljuminievogo splava A356* [Aluminium alloy A356 thixoforging parameters for axis-symmetric components]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2008, no. 10, pp. 36-40.
4. Bocharov Yu.A., Kojdan I.M. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2012, no. 10, pp. 69-74.
5. Ngo T.B., Dzhindo N.A., Semenov A.B., Semenov B.I. *Tiksoforming vysokoprochnykh splavov Al – Zn – Mg – Cu* [Thixoforging high-strength alloy Al – Zn – Mg – Cu]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N. Je. Bauman. Serija: Mashinostroenie - Herald of BMSTU. Series "Mechanical engineering"*, 2012. special no. 3, pp. 148-165.
6. Ivanova E.V., Tagirov D.V., Kaibyshev R.O. *Vlijanie zhidkofaznogo go-rjachego izostatičeskogo pressovanija na svojstva lityh aljuminievych splavov. Čast' I. Struktura i svojstva splava AK7Ch, poluchennogo lit'em v pesčanye formy* [Effect of liquid-phase hot isostatic pressing on the properties of cast aluminum alloys. Part 1. Structure and properties of alloy AK7Ch obtained by casting into sand molds]. *Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov - Metal Science and Heat Treatment*, 2012, no. 2, pp. 11-17.
7. Shestakov N.A., Soubich V.N., Demin V.A. *Uplotnenie, konsolidacija i razrušenie poristykh materialov* (Compaction, consolidation and destruction of porous materials). Moscow, Fizmatlit, 2009. 265 p.
8. Shestakov N.A., Soubich V.N., Demin V.A. *Plastičeskaja deformacija poristykh materialov* (Plastic deformation of porous materials). Moscow, MSIU, 2008. 276 p.
9. Shestakov N.A., Soubich V.N., Vlasov D.A. *Rasčetnyj metod postroenija istinnykh krivykh uprochnenija poristykh i kompozicionnykh materialov* [Calculating Technique of Plotting True Curves of Porous and Composite Materials Hardening]. *Kuznečno-štampovočnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2010, no. 10, pp. 15-20.
10. Shestakov N.A., Soubich V.N., Maksimenko A.E., Lysjuk M.V. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehničeskije nauki*, 2011, Issue 3, part 1, pp. 440-448.
11. Vlasov A.V., Soubich V.N., Shestakov N.A. *Modelirovanie mehaničeskikh svojstv poristykh i kompozitnykh materialov* (Modelling of mechanical properties of porous and composite materials). *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2010, no. 3, pp. 31-35.
12. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastičnosti* (Fundamentals of the plasticity theory). Moscow, Nauka, 1969. 420 p.
13. Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P., Kartak B.R., Ashpur Yu.V., Spasskij Yu.I. *Kontaktnoe trenie v processe obrabotki metallov davleniem* (Contact friction in metal forming processes). Moscow, Metallurgija, 1976. 416 p.
14. Sevast'janov G.M. *Dal'nevostochnyj matematičeskij žurnal*, 2011, Vol.11, no.1, pp. 88–92.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АДАПТИВНОЙ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ МАРКИ 09Г2С\*

*Ю.Н. САРАЕВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук  
Н.И. ГОЛИКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук  
В.В. ДМИТРИЕВ<sup>2</sup>, инженер  
И.И. САННИКОВ<sup>2</sup>, аспирант  
В.П. БЕЗБОРОДОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
А.А. ГРИГОРЬЕВА<sup>1</sup>, инженер  
<sup>1</sup>(ИФПМ СО РАН, г. Томск)  
<sup>2</sup>(ИФТПС СО РАН, г. Якутск)*

Поступила 10 августа 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Сараев Ю.Н.** – 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4,  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
e-mail: litsin@ispms.tsc.ru

**Голиков Н. И.** – 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,  
e-mail: n.i.golikov@mail.ru

Исследуется влияние режимов адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и распределение остаточных напряжений сварных соединений пластин низколегированной стали 09Г2С. Определены оптимальные режимы сварки указанной стали. Рентгеновским методом установлено, что при адаптивном импульсно-дуговом режиме сварки формируется более благоприятное распределение остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. Уровень растягивающих напряжений в таких сварных соединениях не превышает 50 МПа. После импульсного режима сварки установлено повышение в 1,85 раза ударной вязкости металла шва при снижении температуры испытаний образцов до – 60 °С по сравнению со швом, полученным на стационарном режиме.

**Ключевые слова:** сварка, импульсный, низколегированная сталь, механические свойства, ударная вязкость, остаточные сварочные напряжения.

## Введение

Проблема повышения прочности и эксплуатационной надежности сварных соединений из низколегированных сталей связана с необходимостью обеспечения комплекса физико-механических свойств и равнопрочности зон соединения, предотвращения образования холодных трещин, а также структур, снижающих сопротивляемость соединений замед-

ленному и хрупкому разрушению, определяемой характером микрометаллургических процессов на этапе их формирования.

Одним из наиболее эффективных направлений управления характером протекания микрометаллургических процессов является применение адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки. Эти технологии через программируемый ввод тепла в

\* Работа выполнена в соответствии с заданиями и частичном финансировании работы за счет средств проекта СО РАН № 27, 2012 – 2014 гг. «Разработка научных основ повышения конструкционной прочности сварных металлоконструкций, эксплуатирующихся при низких климатических температурах» и проекта РФФИ № 13-08-90406 Укр\_ф\_а «Управление микрометаллургическими процессами на этапах плавления, переноса и кристаллизации металла при формировании сварных соединений в условиях импульсных изменений энергетических параметров и регулируемого тепло-массопереноса».

зону сварного соединения, управление процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, создание в зонах сварных соединений технических систем мелкодисперсной структуры в металле шва и зоне термического влияния позволяют существенно уменьшить степень остаточных деформаций сварных соединений, изготавливаемых из различных марок сталей, а также повысить их эксплуатационную надежность [1, 2].

В ранее проведенных работах исследовались механические свойства сварных соединений труб, где были получены следующие результаты:

- при переходе от стационарного режима к импульсному происходит возрастание относительного удлинения образцов в среднем на 20 % для стали марки Х67 производства ФРГ [3, 4];
- установлено повышение усталостной прочности сварных соединений образцов из стали 17Г1СУ после импульсно-дуговой сварки [3, 4], а также увеличение их ударной вязкости по сравнению со стационарным методом на 8...27 % при испытаниях при температуре +20 °С и на 15...24 % при –60 °С [5];
- установлено уменьшение разброса в значениях микротвердости для теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ [6].

Во всех рассмотренных работах обнаружено, что при использовании импульсной технологии сварки происходит уменьшение размеров зерен в зоне сварного соединения по сравнению со стационарным режимом. Размер зерен в металле шва и зоне термического влияния зависит от энергетических режимов сварки, которыми можно управлять, подбирая частотные диапазоны импульсов тока и паузы [7–10].

Цель работы: исследовать качественное влияние технологии адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и распределение остаточных напряжений сварных соединений пластин из конструкционной стали марки 09Г2С.

## 1. Методика исследований и результаты испытаний

Для приготовления образцов сварных соединений производилась сварка встык пластин в стационарном и импульсном режимах, с помощью созданного экс-

периментального исследовательского комплекса в составе: инверторного источника питания импульсно-дуговой сварки ФЕБ-315 «МАГМА», в котором был реализован способ адаптивной импульсно-дуговой сварки; регистратора параметров сварки AWR-224 МД; персонального ЭВМ и сварочного кондуктора. Использовались пластины размерами 100×200×6 мм. Односторонняя сварка листовых проб производилась в два слоя – корневой и облицовочный – электродами марки LB-52U. При сварке корневого шва использовался электрод диаметром 3,2 мм и для облицовочного – диаметром 4 мм. Параметры режима сварки при стационарном и импульсном режиме приведены в табл. 1 и 2. На рис. 1 и 2 показаны осциллограммы стационарного и импульсного режимов сварки.

Для определения пределов прочности, текучести и относительного удлинения при нагружении растяжением по ГОСТ 6996–66 из сварных соединений после каждого режима сварки были изготовлены по три плоских стандартных образца. Механические испытания образцов проводили при температуре 20 °С в соответствии с ГОСТ на машине «ZWICK/ROELL Z600».

Для определения ударной вязкости сварных соединений были изготовлены образцы с V-образными надрезами в областях металла шва (МШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ). Испытания проводили при температурах +20 °С, –20 °С, –40 °С, –60 °С, на инструментированном маятниковом копре «Amsler RKP450». Образцы на ударный изгиб изготовили поперек шва, а надрезы наносили в соответствии с ГОСТ 6996–66 по центру шва для МШ и по зоне сплавления для ЗТВ (рис. 3).

Исследование остаточных сварочных напряжений (ОСН) проводилось рентгеновским методом, который позволяет определить ОСН с тонкого поверхностного слоя. Измерение остаточных напряжений проводилось с облицовочной и корневой стороны пластины в продольном и поперечном направлении на различном удалении от центра шва. Перед измерением ОСН производится подготовка поверхности образца, которая состоит из следующих этапов:

- снятие усиления шва механическим способом;

Таблица 2

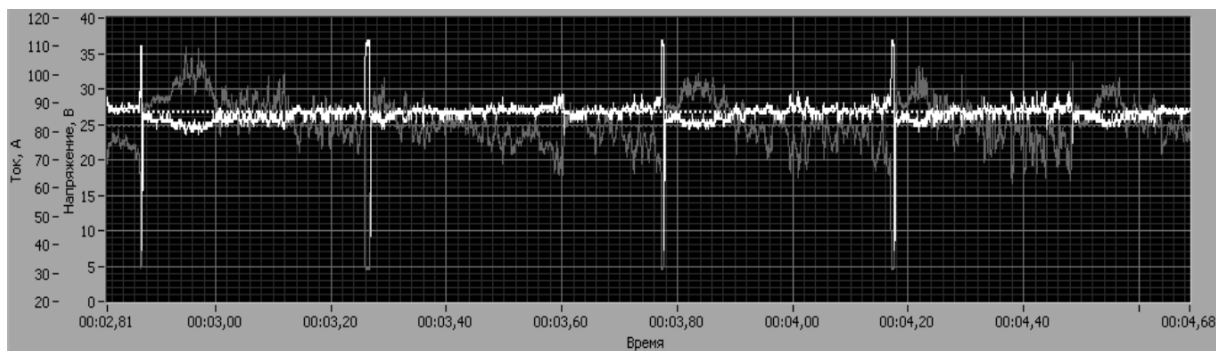
Параметры импульсного режима сварки

Слой	$I_n$ , А	$I_p$ , А	$t_n$ , с	$t_p$ , с	$U$ , В	$V_{св}$ , м/ч	Уровень погонной энергии, кДж/м
Корневой	90	40	0,3	0,3	20	4,29	1017
Облицовочный	180	50	0,3	0,3	24	6	1606

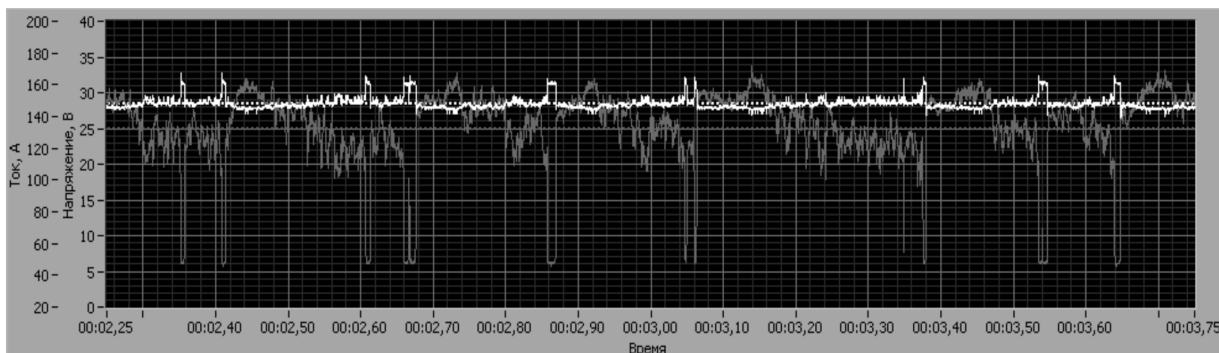
Таблица 1

Параметры стационарного режима сварки

Слой	$I$ , А	$U$ , В	$V_{св}$ , м/ч	Уровень погонной энергии, кДж/м
Корневой	90	25	4,9	1405
Облицовочный	150	25	6,99	1642



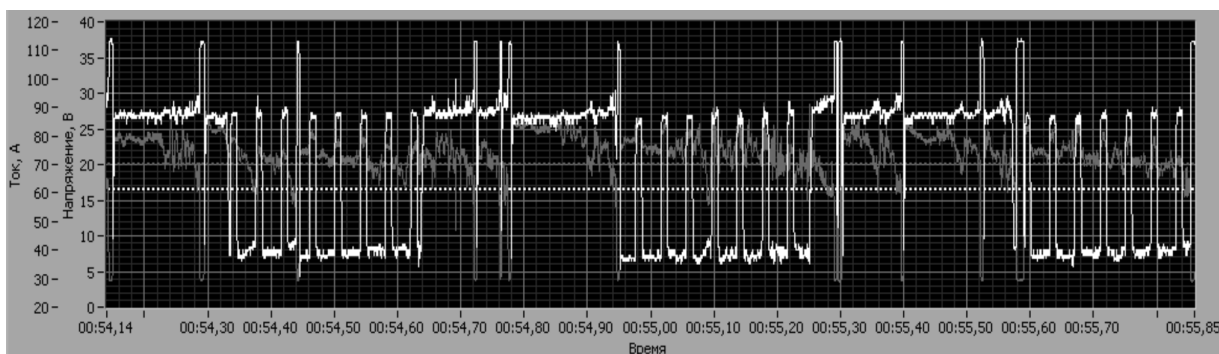
*a*



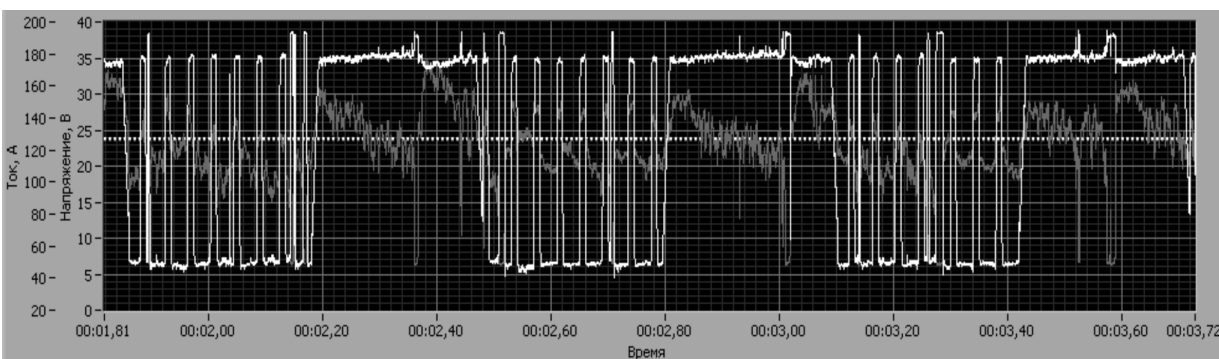
*б*

Рис. 1. Осциллограммы стационарного режима сварки:

*a* – корневой слой; *б* – облицовочный слой



*a*



*б*

Рис. 2. Осциллограммы импульсного режима сварки:

*a* – корневой слой; *б* – облицовочный слой

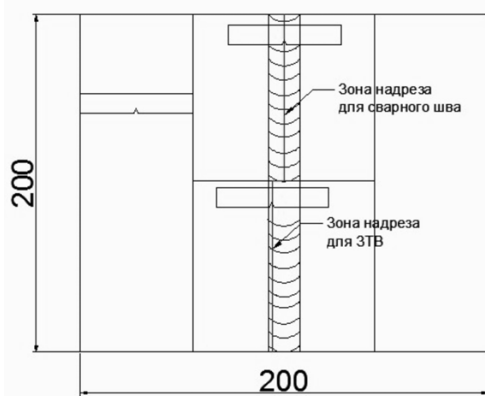


Рис. 3. Схема вырезки образцов на ударный изгиб основного металла, МШ и ЗТВ

- шлифовка мелкой наждачной бумагой участка вокруг выбранной точки рентгеносъемки от краски и окалины;

- химическое травление поверхности выбранного участка смесью азотной и соляной кислот на глубину в пределах около 100 мкм для удаления нанесенного пластически деформированного слоя в объекте съемки. Затем травленный участок обильно промывается водой и обрабатывается спиртом.

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

Испытания образцов при статическом нагружении растяжением показали высокую прочность сварных швов, сформированных по обоим технологиям. Образование шейки и разрушение образцов происходило во всех случаях по основному металлу. Средние значения предела прочности ( $\sigma_B$ ), предела текучести ( $\sigma_T$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ) сварных соединений представлены в табл. 3. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при переходе от стационарного режима сварки к импульсному механические свойства практически не изменились при выбранном режиме сварки. Возможно, что для количественной оценки влияния процесса адаптивной импульсно-дуговой сварки на основные физико-механические и специальные свойства сварных соединений потребуются дополнительные исследования, которые позволят более точно обозначить границы оптимальных режимов адаптивной импульсно-дуговой сварки.

Ударная вязкость МШ сварных соединений при отрицательных температурах после стационарного и импульсного режимов сварки снижается по сравнению с основным металлом в среднем на 38 %, а ЗТВ – на 77 % (рис. 4). После импульсного режима сварки ударная вязкость МШ сварного соединения при температуре – 60 °С в 1,85 раза выше, чем после стационарного. Возможно, это повышение обе-

Таблица 3

### Механические свойства стали марки 09Г2С после стационарного и импульсного режимов сварки

Режимы	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
Импульсный	529	414	23,2
Стационарный	523	421	23,0

спечивается за счет получения дисперсных структур [1] в зонах сварных соединений при импульсном режиме сварки.

В сварном шве в продольном и поперечном направлениях действуют сжимающие напряжения после обоих режимов сварки. Максимальные значения сжимающих напряжений (продольные)

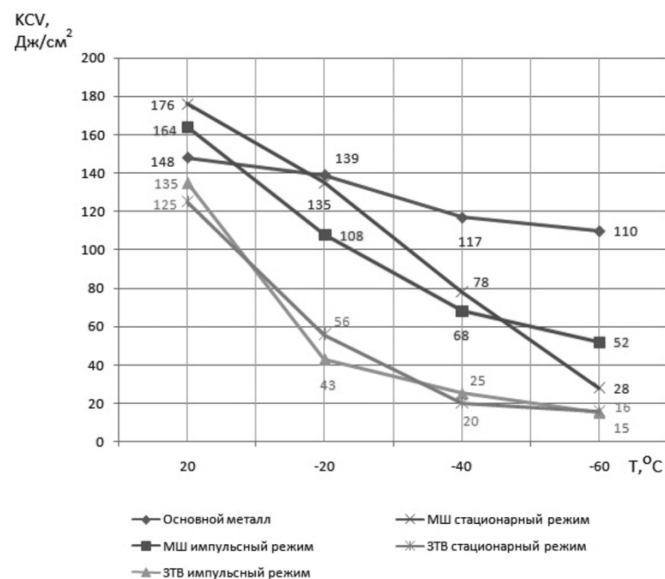


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости зон сварных соединений стали 09Г2С от температуры испытаний

приходятся на середину металла шва и составляют более 200 МПа (рис. 5). Максимальное значение растягивающих напряжений – в зоне термического влияния, и достигают они 100 МПа после стационарного режима сварки. При сварке на стационарном режиме наблюдается более высокий уровень растягивающих остаточных напряжений, чем после импульсного режима. Высокие растягивающие напряжения после стационарного режима, вероятно, объясняются тем, что уровень погонной энергии при сварке корневого слоя в импульсном режиме меньше примерно на 10 %. Это позволяет снизить уровень структурной неоднородности в металле шва и зоне термического влияния и, как следствие, обеспечить снижение уровня остаточных напряжений.

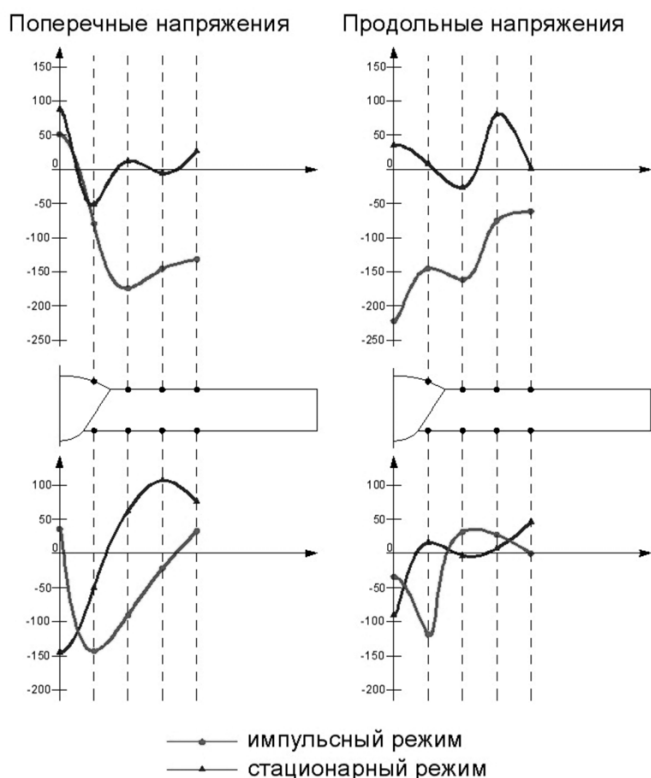


Рис. 5. Распределение продольных и поперечных остаточных сварочных напряжений с облицовочной и корневой стороны пластины

## Выводы

1. Проведенные исследования позволили определить качественное влияние процесса адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства сварных соединений из стали 09Г2С, которые во всем исследуемом диапазоне остаются практически одинаковыми.

2. Установлено, что режим адаптивной импульсно-дуговой сварки по сравнению со стационарным режимом обеспечивает повышение в 1,85 раза ударной вязкости металла шва при снижении температуры испытаний образцов до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

3. Выявлено, что при переходе от стационарного режима сварки к адаптивному импульсно-дуговому формируется более благоприятное распределение ОСН в сварном соединении стали 09Г2С.

Обработка металлов  
N 3 (60), July–September 2013, Pages 19-24

## Investigation of adaptive pulse-arc welding influence on mechanical properties and residual stresses of welded joints in steel grade 09Г2С

<sup>1</sup>Yu.N. Saraev, <sup>2</sup>N.I. Golikov, <sup>2</sup>V.V. Dmitriev, <sup>2</sup>I.I. Sannikov, <sup>1</sup>V.P. Bezborodov, <sup>1</sup>A.A. Grigorieva

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk, 634021, Russia

## Список литературы

1. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера. На основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 14–19.
2. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Повышение безопасности конструкций улучшением механических и эксплуатационных свойств сварных соединений // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 30–32.
3. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Полетика И.М. и др. Улучшение структуры и свойств сварных соединений труб большого диаметра из низколегированной стали при импульсно-дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 34–38.
4. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Тютев А.В., Никонова И.В. Влияние режима сварки на формирование структуры и свойства сварных соединений // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 1. – С. 25–26.
5. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I., Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements // Rare Metals. 2009. V.28, Spec. Issue. October, p. 906 – 908.
6. Сараев Ю.Н., Макарова Л.И., Кирилова Н.В., Николаев А.С., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Влияние локализации пластической деформации на кинетику разрушения образцов сварных соединений // Сварочное производство. – 2000. – № 6. – С. 20–24.
7. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – С. 137–140.
8. Dmitriev A.I., Psakhie S.G. Multi-scale study of low-density layer formation and lifting force effects under contact impact // Frontiers of Eng. Mech. Res. // 2012, Vol.1, Iss.1, Pp. 17–22.
9. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Кирилова Н.В., Никонова И.В., Перовская М.В., Екимов В.С., Салько А.Е. Формирование структуры и свойств сварных соединений при адаптивной импульсно-дуговой сварке покрытыми электродами ответственных конструкций, работающих в условиях низкочастотного термоциклирования // Сварочное производство. – 2004. – № 1. – С. 22–27.
10. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Влияние энергетических параметров процессов сварки на структуру и свойства зон сварных соединений низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2012. – № 8. – С. 3–5.



<sup>2</sup>Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Oktyabrskaya st., 1, Yakutsk, 677891, Russia

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru, n.i.golikov@mail.ru

### Abstract

The influence of modes of adaptive pulse-arc welding on mechanical properties and distribution of residual stress of welded connections of plates from the low-alloyed steel grade 09Г2С is investigated in this paper. The optimum modes of welding for this steel are defined. By X-ray method it is established that at the adaptive pulse-arc mode of welding more favorable distribution of residual welding tension in welded connections is formed. The level of the stretching tension in such welded connections doesn't exceed 50 MPa. After the pulse mode of welding the impact strength of seam metal is increased by 1.85 times during descent of the samples' tests temperature to – 60 °С in comparison with a seam received on a stationary mode.

Keywords: welding, pulsed, low-alloy steel, mechanical properties, impact strength, residual welding stresses

### References

1. Saraev Yu.H. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 8, pp. 14-19.
2. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 11, pp. 30-32.
3. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Poletika I. M., Tjutev A. V., Nikonova I. V., Kirilova N. V. and Sevast'janov S. P. *Uluchshenie struktury i svoystv svarnyh soedinenij nefte-, gazoprovodnyh trub bol'shogo dimetra* [Improvement of the structure and properties of welded joints in large-diameter oil and gas pipes]. *Avtomaticeskaja svarka - Paton Welding Journal*, 2004, no.12, pp. 34-38.
4. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Tjutev A.V., Nikonova I.V. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2005, no. 1, pp. 25-26.
5. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I, Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements. *Rare Metals*, 2009, Vol. 28, Spec. Issue, pp. 906 – 908.
6. Saraev Yu.N., Makarova L.I., Kirilova N.V., Nikolaev A.S., Kozlov A.V., Khomchenko E.G. *Vlijanie lokalizacii plasticheskoj deformacii na kinetiku razrushenija obrazcov svarnyh soedinenij* [Effect of localisation of plastic deformation on the kinetics of failure of specimens of welded joints]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2000, no. 6, pp. 20-24.
7. Saraev Yu.N., Poletika I.M. Kozlov A.V., Homchenko E.G. *Formirovanie struktury i svoystv svarnyh soedinenij v uslovijah reguliruemogo teplovlozhenija pri impul'sno-dugovoj svarke* [Formation of structure and properties of welds in the conditions of heat input during pulse welding]. *Fizicheskaja mezomehanika - Physical Mesomechanics*, 2005, Vol.8, Spec. Issue, pp.137-140.
8. Dmitriev A.I., Psakhie S.G. Multi-scale study of low-density layer formation and lifting force effects under contact impact. *Frontiers of Eng. Mech. Res*, 2012, Vol.1, Iss.1, pp. 17-22.
9. Saraev Yu.N., Poletika I.M. Kozlov A.V., Kirilova N.V., Nikonova I.V., Perovskaja M.V., Ekimov V.S., Sal'ko A.E. *Formirovanie struktury i svoystv svarnyh soedinenij pri adaptivnoj impul'sno-dugovoj svarke pokrytymi jelektrodami otvetstvennyh konstrukcij, rabotajushhij v uslovijah nizkochastotnogo termociklirovanija* [Formation of the structure and properties of welded joints in adaptive pulsed-arc coated electrode welding of important structures working on the conditions of low frequency thermal cycling]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2004, no. 1, pp. 22-27.
10. Saraev Yu. N., Bezborodov V.P. *Vlijanie jenergeticheskikh parametrov processov svarki na strukturu i svoystva zon svarnyh soedinenij nizkolegirovannyh stalej* [Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2012, no. 8, pp. 3-5.



УДК 621.9.01; 621.791.947.55

# ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ РЕЗА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ\*

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*А.А. ЛОКТИОНОВ, аспирант*  
*Ю.В. НИКИТИН, канд. техн. наук, доцент*  
*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 15 июня 2013 года  
Рецензирование 15 августа 2013 года  
Принята к печати 25 августа 2013 года

**Локтионов А.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: pushkin-lok@mail.ru

Проводятся исследования по оценке геометрической точности реза листовых материалов в соответствии с ISO 9013:2002. Для исследования выбран листовой прокат из конструкционной стали марки Ст. 3. Выбраны предельные значения толщин исходя из условия его гарантированной пробивки и раскроя согласно исследуемым технологиям. Показана геометрия реза для технологий тонкоструйной плазменной резки – HiFocus; HiFocus<sup>plus</sup>; HiFocus F для различных толщин. Проведена сравнительная оценка перпендикулярности кромок реза для отмеченных технологий. Даны рекомендации по применению технологий тонкоструйной плазменной резки в зависимости от толщины и требуемой геометрии реза.

**Ключевые слова:** тонкоструйная плазменная резка, рез, формообразование, перпендикулярность, точность, качество, геометрия, сопло, катод.

## Введение

Выбор заготовительной операции при создании технологического процесса обработки любой детали играет важную роль. От ее правильного выбора будет зависеть количество необходимых операций и себестоимость выпускаемой детали или узла.

В современном машиностроении заготовки делятся на три вида: штампованные, литые и из сортового проката, к числу которого относится и листовой прокат. При этом доля деталей из листового проката составляет порядка 40 % от всех выпускаемых изделий машиностроительной отрасли. Это различного рода звездочки, кожуха, корпуса и т. д. В массовом и крупносерийном производстве, характеризуемом постоянной номенклатурой выпускаемых изделий, в качестве заготовительной операции для такого рода деталей зачастую используют штампы. В случае серийного производства, занимающего почти 60 % отрасли машиностроения, использование штампов

нецелесообразно, так как номенклатура изделий разнообразна, а обрабатываемые партии имеют небольшой размер. В таком типе производства в качестве заготовительных операций чаще всего используют механические методы резки материалов. В этом случае зачастую при обработке на металлорежущих станках деталей до 60 % [1] от их веса уходит в стружку. Тем не менее исследования в этой области показывают [2], что за последние 30 лет есть некоторое уменьшение доли стружки в металлоотходах, что говорит о медленном росте качества заготовительного производства. Это связано, в первую очередь, с применением альтернативных лезвийным методам резки материалов – электрофизических, к которым относится и тонкоструйная плазменная резка. Особенно этот метод применим для изделий, которые идут под последующую сварку невысокой степени точности, так как данный метод резки обеспечивает точность обработки по 12–14 качеству, но позволяет исключить последующую механическую обработку.

\* Исследования проведены при финансовой поддержке проекта, выполненного в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в 2013 г. и в плановом периоде в 2013–2014 гг. (Шифр заявки 7.759.2011 «Повышение конструктивной прочности материалов конструкционного и инструментального назначения методами, основанными на высокоэнергетическом воздействии»).

При этом под точностью формообразования при тонкоструйной плазменной резке, согласно данным работы [3], понимают точность полученных линейных размеров и перпендикулярность или угловатость кромок реза. Данная статья посвящена оценке состояния режущих кромок по отношению к плоскости разрезаемого материала, которое количественно можно определить перпендикулярностью или угловатостью кромок реза. При износе расходных составляющих плазматрона эти показатели могут отклоняться от тех, которые заявлены в паспортных данных установки, что подтверждается данными работ [4, 5], свидетельствующих о том, что по мере износа происходит постепенное снижение показателей точности. Исследования физики процесса тонкоструйной плазменной резки отражены в работах [6, 7], которые подтверждают, что по мере износа изменяется истечение плазменного потока, что, в свою очередь, приводит к изменению геометрии реза.

Производители установок тонкоструйной плазменной резки в технической документации зачастую указывают оценочные значения показателей точности реза. При этом совершенно не учитываются такие факторы, как степень износа расходных элементов плазматрона (катод, сопло, колпачок завихряющего газа).

Для существующего оборудования тонкоструйной обработки разработаны следующие технологии раскроя: HiFocus; HiFocus<sup>plus</sup>; HiFocus F. Технология HiFocus применима для небольших толщин от 1 до 8 мм из конструкционных и нержавеющей сталей и сплавов на основе алюминия. Технология HiFocus<sup>plus</sup> характеризуется большим диапазоном разрезаемых толщин (от 4 до 30 мм). Для отмеченных технологий характерна геометрия реза, представленная на рис. 1, а, причем скос наблюдается на левой кромке реза. Технология раскроя HiFocus F также применяется для раскроя конструкционных, нержавеющей

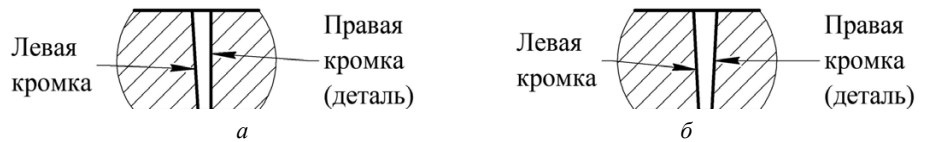


Рис. 1. Геометрия реза для разных технологий раскроя:  
а – технология HiFocus и HiFocus<sup>plus</sup>; б – технология HiFocus F

сталей и сплавов на основе алюминия в диапазоне от 2 до 25 мм. Причем для данной технологии характерен симметричный скос как на детали, так и на отходе (рис. 1, б).

Сравнительная оценка перпендикулярности кромок реза для технологий HiFocus, HiFocus<sup>plus</sup>, HiFocusF в данной работе производилась с расходными элементами плазматрона без износа для обеспечения идентичности физических процессов при резке. Экспериментальные исследования посвящены определению значений точности реза, в частности, перпендикулярности кромок для различных технологий при отсутствии износа расходных элементов.

### Методика экспериментального исследования

Для проведения эксперимента был выбран прокат из конструкционной стали марки Ст. 3 (ГОСТ 14637-89). Предельные значения толщин разрезаемого материала выбирались исходя из условия его гарантированной пробивки и раскроя согласно исследуемым технологиям. Так, для технологии HiFocus был выбран листовой прокат толщиной 3, 5, 8 мм, который включает в себя весь рекомендуемый производителем диапазон толщин разрезаемых материалов. Для технологии раскроя HiFocus<sup>plus</sup> толщины составляли 4, 10, 20 мм, для технологии HiFocusF – 3, 10, 20 мм.

Расходные элементы плазматрона были выбраны исходя из рекомендаций на данное оборудование и используемых технологий раскроя и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологии резки	Толщина, мм	Катод	Газификатор	Сопло	Колпачок сопла	Колпачок завихряющего газа	Защитный колпачок
HiFocus	3	S002	Z101	S2008	S3004	Z4020	Z501
	5						
	8						
HiFocus <sup>plus</sup>	4	S002	Z102	S2008	S3028	Z4020	Z501
	10			S2012		Z4022	
	20			Z4025			
HiFocus F	3	S012	Z111	S2114	S3008	Z4030	Z501
	10					Z4140	
	20					Z4140	

Таблица 2

Технологии резки	Толщина, мм	Ток, А	Скорость резки, м/мин	Время пробивки, с	Высота пробивки, мм	Высота реза, мм	Напряжение, В
HiFocus	3	50	2,2	0,1	2	2	110
	5	45	0,8	0,2	3,5	2	132
	8	45	0,55	0,2	4	2	130
HiFocus <sup>plus</sup>	4	50	2,2	0,2	3	1,5	119
	10	130	2,4	0,4	4	2	133
	20	130	1	0,6	6,5	2,5	150
HiFocus F	3	130	6	0,1	4	2	11
	10	130	2,3	0,3	5	3	127
	20	130	0,9	0,6	6	4	138

Кроме этого в соответствии с технологиями раскроя и разрезаемыми толщинами были использованы рекомендуемые изготовителем в технической документации режимы обработки, представленные в табл. 2.

При проведении эксперимента применялись газы с определенным давлением и расходом, приведенные в табл. 3.

Поскольку в исследованиях оценивается геометрическая точность при раскрое, то важным этапом является точность установки исследуемого образца. С этой целью был изготовлен специальный предметный столик, который обеспечивает базирование детали. Предметный столик устанавливался на стол машины термической резки (рис. 2).

Поверхность предметного столика была выставлена параллельно направляющим машины термической резки по координатам X и Y с целью

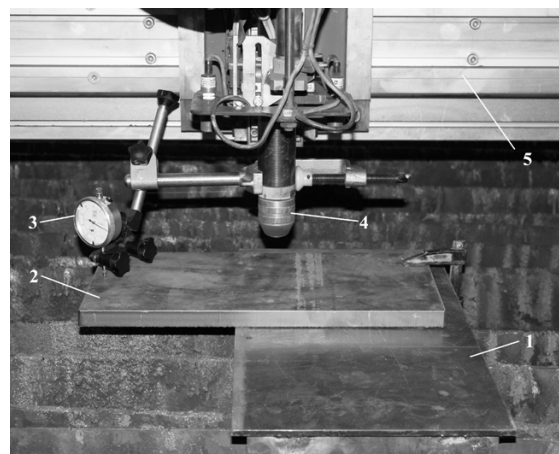


Рис. 2. Установка образца на предметный столик

- 1 – предметный столик; 2 – разрезаемый образец;
- 3 – индикатор часового типа; 4 – плазматрон;
- 5 – направляющая по координате Y

Таблица 3

Технологии резки	Толщина, мм	Зажигающий газ – воздух (давление/расход)	Режущий газ – кислород (давление/расход)	Завихряющий газ 1 – кислород (давление/расход)	Завихряющий газ 2 – азот (давление/расход)
HiFocus	3	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/25 дел. шкалы	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/10 дел. шкалы
	5	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/25 дел. шкалы	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/15 дел. шкалы
	8	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/30 дел. шкалы	5 бар/20 дел. шкалы	5 бар/15 дел. шкалы
HiFocus <sup>plus</sup>	4	5 бар/15 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	–	5 бар/50 дел. шкалы
	10	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	–	5 бар/45 дел. шкалы
	20	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	–	5 бар/90 дел. шкалы
HiFocus F	3	6 бар/20 дел. шкалы	6 бар/60 дел. шкалы	6 бар/10 дел. шкалы	6 бар/70 дел. шкалы
	10	6 бар/40 дел. шкалы	6 бар/70 дел. шкалы	6 бар/20 дел. шкалы	6 бар/75 дел. шкалы
	20	6 бар/40 дел. шкалы	6 бар/80 дел. шкалы	6 бар/20 дел. шкалы	6 бар/85 дел. шкалы

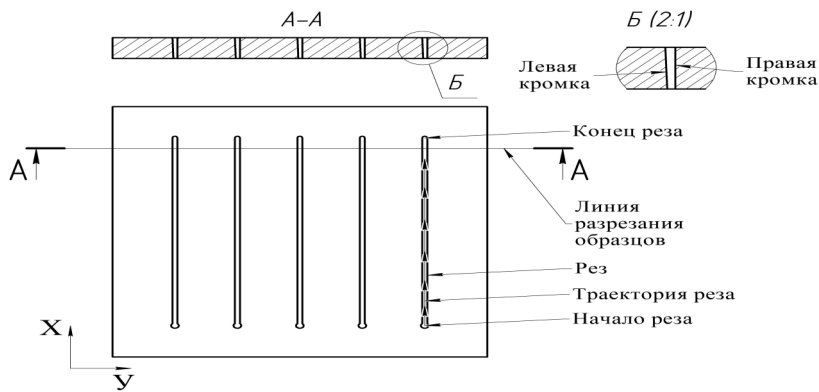


Рис. 3. Схема резки образцов

уменьшения погрешности установки разрезаемого образца. Оценка параллельности по указанным координатам осуществлялась с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Перемещение выполнялось по одной координате с фиксацией наибольшего и наименьшего отклонения показаний индикатора. В случае превышения суммы по модулю значения более 20 мкм на длине 200 мм, производилась корректировка положения предметного столика. Аналогичные действия осуществлялись для второй координаты.

С целью уменьшения погрешности установки самого плазмотрона осуществлялся контроль перпендикулярности его положения в двух направлениях по отношению к поверхности предметного столика. Контроль выполнялся при помощи механического угломера с ценой деления 2 мин. Производилось закрепление образцов на предметном столике.

На каждом образце для каждой толщины и выбранной технологии раскрытия материала с целью установления достоверности полученной геометрии реза производилось по пять разрезов (рис. 3).

Линия разрезания образцов для оценки геометрии реза была выбрана исходя из того, что процесс разделения происходил в квазистационарном режиме в отмеченной области. После осуществления пяти разрезов образец разрезался по указанной линии (рис. 3) и производилась его шлифовка.

Определение отклонения углов кромок реза от перпендикулярности выполнялось согласно методике, описанной в ISO 9013:2002.

## Результаты и обсуждение

Внешний вид образцов, разделенных по линии разреза А-А (рис. 3), представлен на рис. 4, 5 и 6 после различных технологий.

Для определения неперпендикулярности кромок реза осуществлялось сканирование поверхностей полученных образцов. Далее изображение обрабатывалось в графическом редакторе Компас-3D V13. В соответствии с ISO 9013:2002, как показано на рис. 7, измерение выполнялось на ограниченном участке поверхности реза.

От верхнего и нижнего краев поверхности реза отбрасывалась величина  $\Delta a$  в соответствии с разрезаемой толщиной. После этого производилось совмещение вспомогательной линии с кромкой реза. Далее осуществлялось измерение угла между совмещенной линией и горизонтальной, как показано на рис. 7. После этого определялась неперпендикулярность.

Численные значения отклонения от перпендикулярности кромок (правой и левой) для всех исследуемых технологий представлены на рис. 8.

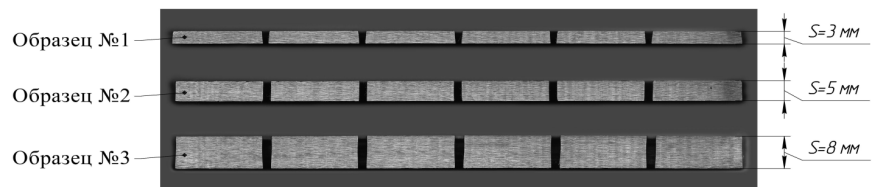


Рис. 4. Технология HiFocus

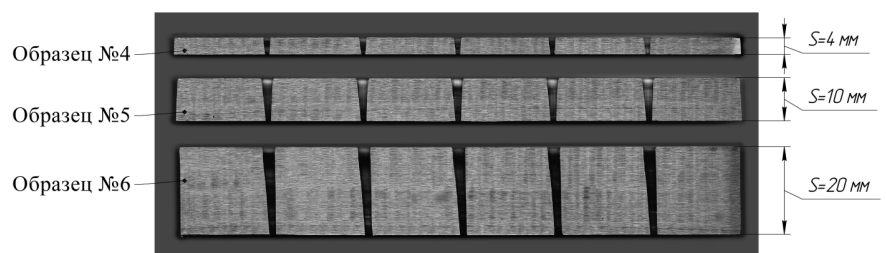
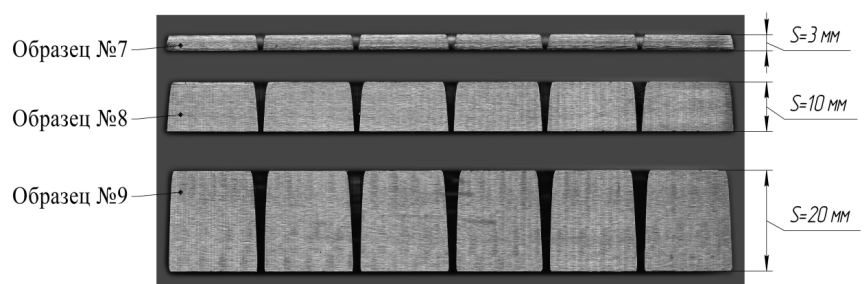

 Рис. 5. Технология HiFocus<sup>plus</sup>


Рис. 6. Технология HiFocus F

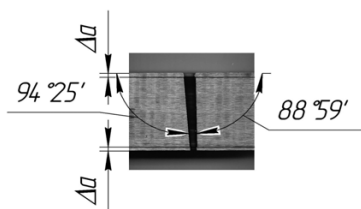


Рис. 7. Определение перпендикулярности

Анализ полученных данных показал, что наименьшее отклонение от перпендикулярности соответствует технологиям HiFocus и HiFocus<sup>plus</sup>. Причем для отмеченных технологий представляет интерес правая кромка по направлению реза, так как она является частью детали. Особенностью данных технологий является применение конструктивных решений в части расходных элементов плазматрона, а именно колпачка сопла, в котором отверстия для продувки завихряющих газов расположены под определенным углом к оси плазматрона.

Данное конструктивное решение обеспечивает перпендикулярность правой кромки (кромки детали) при условии, что для наружных контуров перемещение плазматрона осуществляется по часовой стрелке, для внутренних – против часовой стрелки. В этом случае достигается качество, регламентируемое производителем оборудования. Для технологии HiFocus<sup>plus</sup> неперпендикулярность варьируется от 3 до  $-1^\circ$  для правой кромки и от 6,5 до  $4,5^\circ$  – для левой. Для следующей технологии (HiFocusF) характерен симметричный скос как на левой, так и на правой кромке, варьируемый в диапазоне от 10 до  $4^\circ$ . В отличие от ранее рассмотренных технологий в данной технологии нет необходимости соблюдения правильности обхода разрезаемого контура. Это связано с тем, что неперпендикулярность кромок реза практически одинакова, что находит свое подтверждение на рис. 8.

### Выводы

Таким образом, технология резки HiFocus применима для разделения материалов толщиной до 8 мм, причем в области от 4 до 8 мм наблюдается наименьшее отклонение от перпендикулярности. Для технологии резки HiFocus<sup>plus</sup>, применяемой для раскроя толщин от 4 до 20 мм, требуется соблюдение правильности обхода контура для минимизации отклонения от перпендикулярности. Технология резки HiFocus F имеет большее значение отклонения от перпендикулярности как для правой, так и для левой

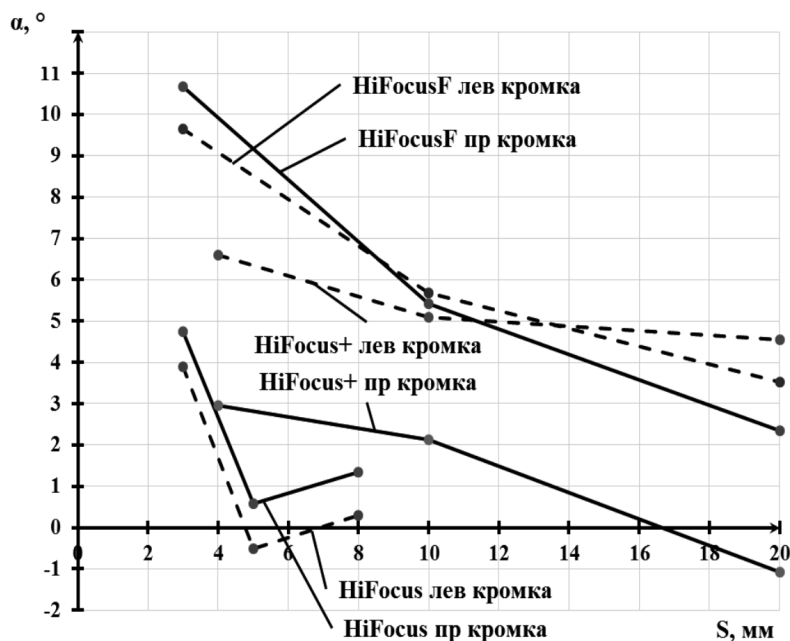


Рис. 8. Отклонение от перпендикулярности кромок реза для различных технологий резки HiFocus

кромки реза. Поскольку скос на кромках симметричен, то для данной технологии нет необходимости в соблюдении правильности обхода контура. Однако ввиду большого отклонения от перпендикулярности, достигающего  $10^\circ$ , данная технология потребует последующей механической обработки.

### Список литературы

1. Кован В.М. Расчет припусков на обработку в машиностроении. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. – 208 с.
2. Шмунк М.М. Оценка эффективности использования металла в Российском машиностроении // Вестник ОГУ. – 2008. – № 11. – С. 90–93.
3. ISO 9013:2002 «Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики».
4. Локтионов А.А. Износ расходных элементов плазматрона при термической резке листового материала / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов II Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. (Иркутск, 25-27 апреля 2012 г.) / под ред. профессора С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2012. – С. 61–65.
5. Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени износа их на точность формообразования / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-й Всероссийской науч.-практ. конф., 28 марта, г. Новосибирск. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 68–71.

6. *Моделирование* тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки. / А.Х. Рахимьянов, С.В. Лунин, Х.М. Рахимьянов // *Инновации в машиностроении* : труды 2-й междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6–8 окт. 2011. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 161–165.

7. *Моделирование* процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров. / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 4(37). – С. 123–134.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 25-30

### Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting technologies

Kh.M. Rakhimyanov, A.A. Loktionov, Yu.V. Nikitin

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: pushkin-lok@mail.ru

#### Abstract

Studies on evaluating geometric precision cutting of sheet materials in accordance to ISO 9013:2002 are presented. For the study, sheet material of structural steel St 37-3 is selected. Limits of thickness, based on the terms of sheet material guaranteed punching and cutting, according to the study of technologies are selected. The geometry of the high-precision plasma cutting technology cut - HiFocus; HiFocus<sup>plus</sup>; HiFocus F for different thicknesses is showed. A comparative evaluation of the perpendicularity of the cut edges for the marked technologies is carried out. Recommendations for use of the high-precision plasma cutting, depending on the thickness and the required geometry of the cut are given.

Keywords: the high-precision plasma cutting, cut, forming, perpendicularity, accuracy, quality, configuration, nozzle, cathode.

#### References

1. Kovan V.M. *Raschet pripuskov na obrabotku v mashinostroenii* (Calculation of machining allowances in mechanical engineering), Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj i sudostroitel'noj literatury, 1953. 208 p.

2. Shmunk M.M. *Vestnik OSU*, 2008, no. 11, pp. 90-93.

3. ISO 9013:2002 *Rezka teplovaja. Klassifikacija rezov, poluchennyh teplovyim sposobom. Geometricheskie harakteristiki izdelij i dopuski na harakteristiki* (Thermal cutting. Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances), 2002. 35 p.

4. Loktionov A.A., Rahimjanov H.M., Zhuravlev A.I. *Iznos rashodnyh jelementov plazmotrona pri termicheskoj rezke listovogo materiala* [Wear of consumable elements plasmatron at thermal cutting of a sheet material]. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot poluchenija do utilizacii): materialy dokladov II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem* [The life cycle of construction materials (from fabrication to utilization): Proceedings of the 2nd All-Russian scientific and technical Conference (with international participation)]. Irkutsk, ISTU, 2012, pp. 61-65.

5. Rahimjanov H.M., Loktionov A.A. *Raznovidnosti katodov, primenjaemyh dlja plazmennoj rezki, i vlijanie stepeni iznosa ih na tochnost' formoobrazovanija* [Varieties of the cathodes applied to a plasma cutting, and agency of their wear rate on exactitude of a morphogenesis]. *Problemy povyshenija jeffektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom jetape: materialy 10-oj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Problems of increasing the efficiency of metalworking in the industry at the present stage: Materials of the 10th All-Russian scientific-practical conference]. Novosibirsk, NSTU, 2012, pp. 68-71.

6. Rahimjanov A.H., Lunin S.V., Rahimjanov H.M. *Modelirovanie teplovyh processov tonkostrujnoj plazmennoj rezki* [Modeling of thermal processes at the high-precision plasma cutting]. *Innovacii v mashinostroenii : trudy 2-oj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference “Innovation in Engineering”]. Kemerovo, KuzSTU, 2011, pp. 161–165.

7. Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2009, no. 4(37), pp.123-134.

# ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРИПУСКА НА ОСТАТОЧНЫЕ ЗАКАЛОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ САМОЛЕТА\*

*А.С. БАЧУРИН, аспирант  
К.Н. БОБИН, канд. техн. наук, доцент  
К.А. МАТВЕЕВ, доктор техн. наук, профессор  
Н.А. РЫНГАЧ, канд. техн. наук, доцент  
Н.В. КУРЛАЕВ, доктор техн. наук, профессор  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 4 июля 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Бачурин А.С.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Исследуется влияние величины припуска, оставляемого на окончательную обработку детали, на остаточные закалочные напряжения. Моделирование производилось как связанная задача нестационарного теплообмена заготовки с закалочной средой и нахождение тепловых напряжений в заготовке. В модели учитывалась зависимость коэффициента теплообмена и характеристик материала от локальной температуры заготовки. В результате расчетов установлено, что максимальные напряжения, возникающие в заготовке при термической обработке, практически не зависят от величины припуска, однако величина припуска влияет на распределение напряжений внутри заготовки. Также в ходе расчетов выявлены места концентрации максимальных растягивающих напряжений и определена оптимальная величина припуска на чистовую обработку.

**Ключевые слова:** численное моделирование, закалочные напряжения, припуск.

## Введение

В современном самолетостроении предъявляются повышенные требования к точности деталей, имеющих в качестве одного из элемента поверхность, связанную с теоретическим контуром [4], поэтому при производстве деталей самолетов имеется ряд особенностей. Одной из таких особенностей является то, что чистовое фрезерование производится после термообработки [1, 5, 7, 9], однако такая обработка может привести к дополнительным деформациям детали [9], не обладающей достаточной жесткостью из-за нарушения равновесия в детали после удаления припуска. В литературе, посвященной обработке металлов резанием, при расчете припуска после термической обработки учитываются [6, 8]: глубина дефектов поверхности; толщина поврежденного поверхностного слоя и геометрические отклонения от заданной поверхности. Вопрос технологической наследственности [9], когда происходит перенос свойств (в том числе внутренних напряжений) от

предшествующих операций к последующим, не учитывается. Такой подход применим при производстве жестких деталей невысокой точности, однако при производстве высокоточных деталей возможно появление нежелательных деформаций после механической обработки.

В настоящей работе проводится исследование влияния величины припуска на остаточные закалочные напряжения заготовки и поиск оптимальных величин припуска для окончательной механической обработки.

## Моделирование влияния припуска на остаточные напряжения

В качестве объекта моделирования выбрано характерное сечение переплета фонаря кабины среднемагистрального пассажирского самолета (рис. 1).

Расчет напряжений проводился в двухмерной постановке в программе Ansys 14. В качестве рас-

\* Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ № 7.822.2011.



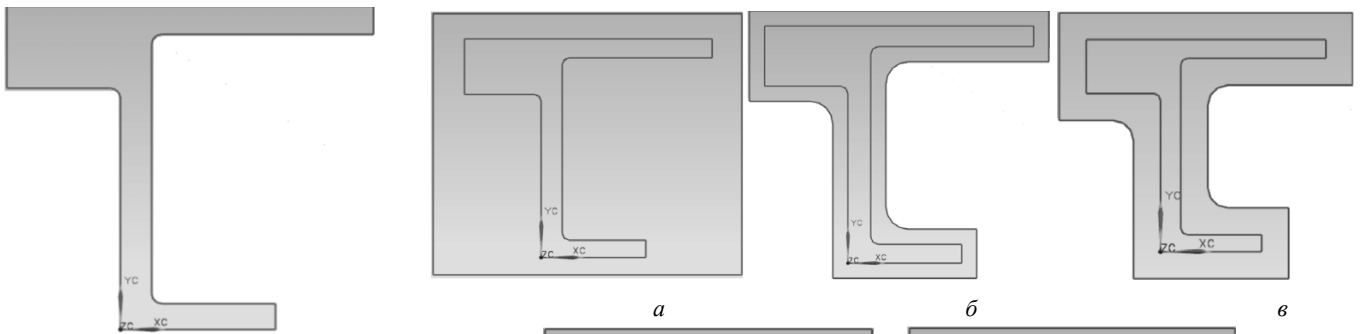


Рис. 1. Сечение переплета фонаря кабины среднемагистрального самолета

четных областей были рассмотрены следующие варианты величин припусков на заготовке (рис. 2, а–д):

– заготовка прямоугольной формы (неравномерный припуск);

- равномерный припуск 4 мм;
- равномерный припуск 8 мм;
- равномерный припуск 12 мм;
- неравномерный припуск 8–18 мм.

Внутренние углы имеют технологический радиус скругления 6 мм, который обеспечивается геометрией инструмента при черновой обработке.

Для нахождения тепловых напряжений необходимо сначала решить нестационарную тепловую задачу [10] с учетом зависимости коэффициента конвективного теплообмена от температуры поверхности [2]. Решение подобных задач и их сходимость с экспериментальными данными рассмотрены в [3].

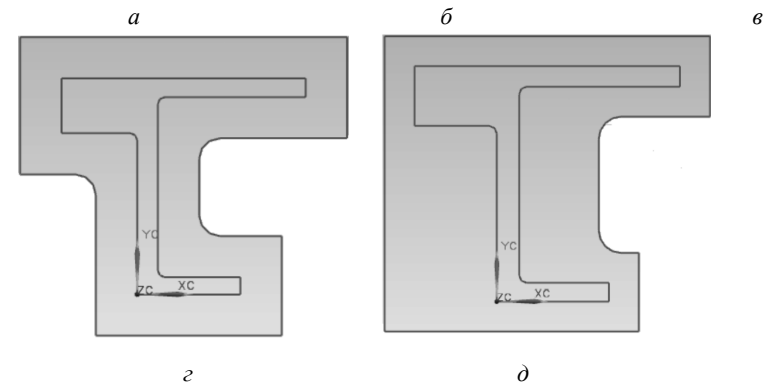


Рис. 2. Сечения заготовок с различными вариантами припуска

В качестве начальных условий для расчета были заданы: материал детали – алюминиевый сплав АК6, закалочная среда – вода, начальная температура стержня 515 °С, температура закалочной среды 27 °С.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных расчетов были получены значения внутренних напряжений для всех вариантов припуска (рис. 3), для которых максимальная величина эквивалентных напряжений различается незначительно (~180 МПа), но распределение напря-

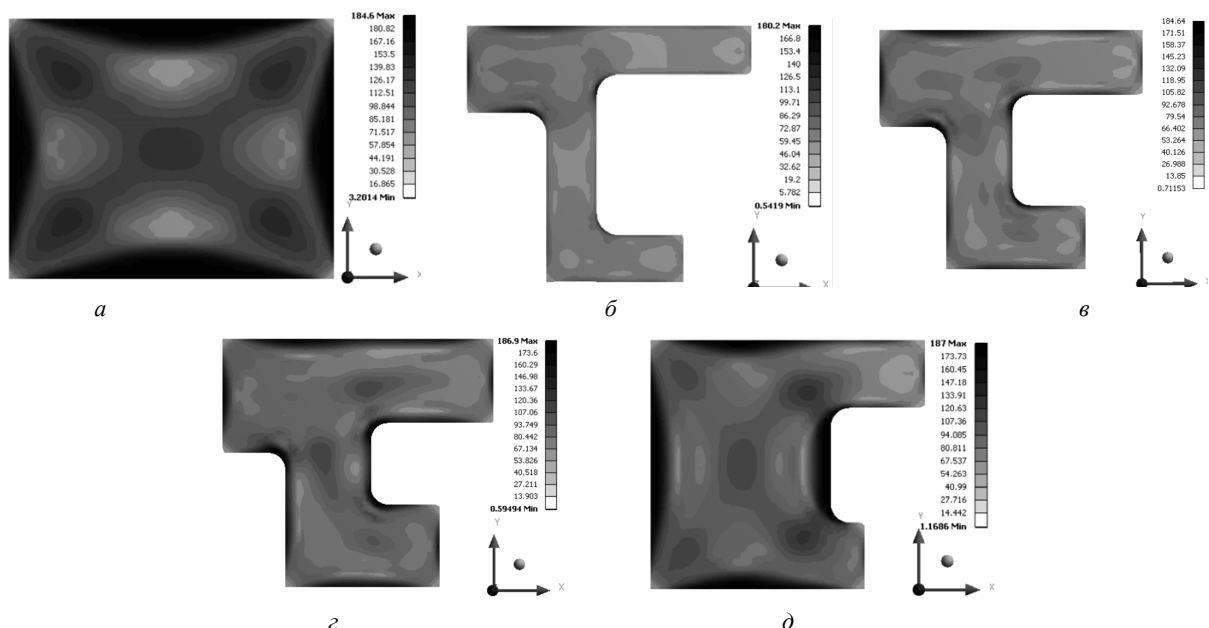


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по сечению заготовки

жений по сечению зависит от наименьшей толщины элемента детали. Наибольшие напряжения находятся на поверхности заготовки, при этом с ростом припуска растет область сечения, в которой напряжения превышают значения 100 МПа. В случае использования минимальных и умеренных значений припусков (4–8 мм) (рис. 3, б и 3, в) происходит концентрация максимальных напряжений в поверхностных слоях заготовки, которые будут удалены в процессе чистовой обработки.

Распределение нормальных напряжений (рис. 4) соответствует описанному в [9]: растягивающие напряжения на поверхности и сжимающие напряжения

внутри, а также концентрация напряжений на переходных поверхностях и массивных частях. Поэтому с ростом величины припуска глубина проникновения растягивающих напряжений в материал заготовки растет и достигает границ детали (рис. 4, а и 4, д). Удаление припуска, в котором находятся остаточные растягивающие напряжения, приводит к перераспределению внутренних напряжений и деформации детали. Для минимизации таких деформаций необходимо назначение минимальных (4–8 мм) припусков.

Максимальные величины пластических деформаций примерно одинаковы для всех вариантов (рис. 5), кроме заготовки прямоугольного сечения, однако их

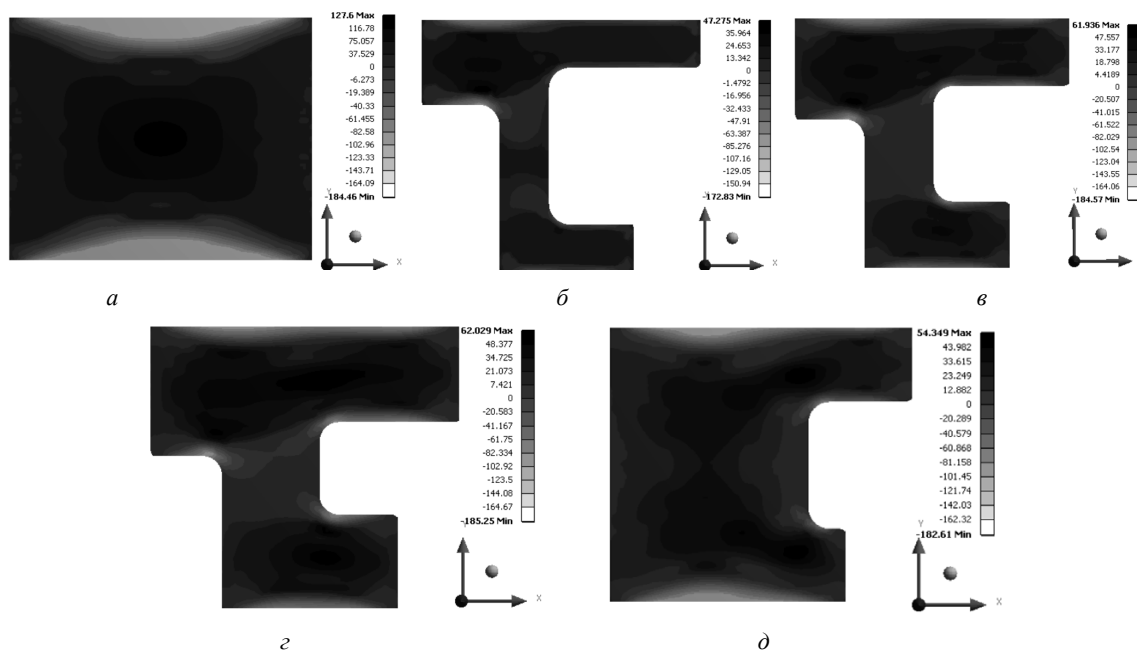


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по сечению заготовки

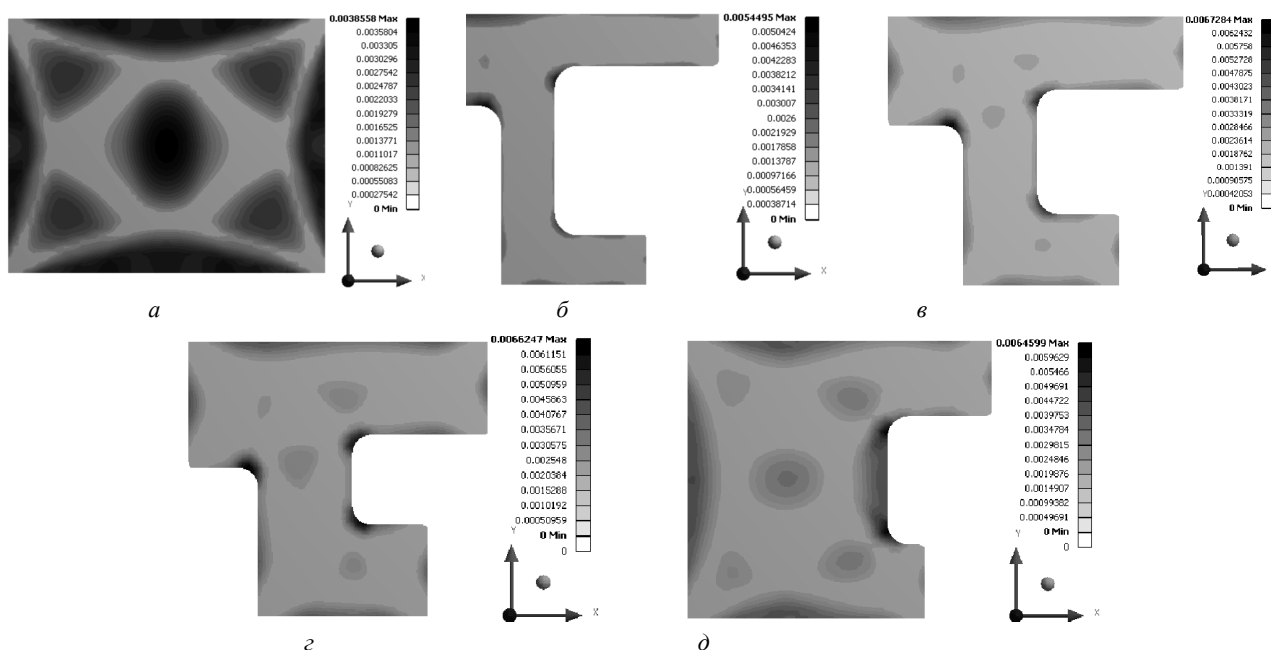


Рис. 5. Распределение пластических деформаций по сечению заготовки

распределение также зависит от величины припуска. Наибольшая глубина распространения пластических деформаций в глубь заготовки происходит в наиболее массивных частях сечения и в сопряжениях с закрытыми углами.

### Выводы

В результате проведенных исследований выявлена зависимость распределения внутренних напряжений от величины припуска. Установлено, что концентрация напряжений происходит в закрытых углах и вокруг открытых углов. Назначение минимально возможных величин припуска (4–8 мм) способствует уменьшению размеров областей, в которых действуют остаточные растягивающие напряжения и возникают пластические деформации.

### Список литературы

1. *Арендарчук А.В., Астафьев А.А., Башнин Ю.А.* Термическая обработка в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 776 с.
2. *Исаченко В.П.* Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

3. *Курлаев Н. В., Бачурин А. С., Слюняев А. Ю.* Оценка точности решения нестационарных тепловых задач и расчет процесса закалки с постепенным погружением в закалочную среду методом конечных элементов // «Наука. Промышленность. Оборона»: труды XIII Всерос. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 19–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск, 2012. – С. 64–68.

4. *Курлаев Н.В., Рынгач Н.А., Нарышева Г.Г.* Теоретические основы самолето- и вертолетостроения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 100 с.

5. *Лахтин Ю.М., Рахитадт А.Г.* Термическая обработка в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

6. *Панов А.А.* Обработка металлов резанием: справочник технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 724 с.

7. *Фиргер И.В.* Термическая обработка сплавов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 304 с.

8. *Харламов Г.А., Тарапанов А.С.* Припуски на механическую обработку: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

9. *Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченко В.И.* Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск.: Наука и техника, 1977. – 256 с.

10. *Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке / Делкам – Урал [Электронный ресурс].* URL: [http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij\\_analiz/sysweld\\_modelirovanie\\_zakalki/](http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/) (дата обращения 16.06.2013).

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 31–35

### The effect of the allowance for residual stress hardening of aircraft components

A.S. Bachurin, K.N Bobin, K.A. Matveev, N.A. Ryngach, N.V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Abstract

Finishing machining allowances do not take into account technological heredity, that in some cases leads to a significant percentage of defects in the production of precision parts, that don't have sufficient stiffness. The study of finishing machining allowance value influence on parts quenching stresses is considered in the paper. Modeling is performed as a coupled problem of unsteady heat transfer from the workpiece to the quenching medium and the presence of thermal stresses in the workpiece. The model takes into account the dependence of the heat transfer coefficient and material characteristics from the local temperature of the part section. The calculations revealed that the maximum stresses arising in the preform during thermal processing does not substantially depend on the allowance, but allowance value affects the distribution of stresses within the workpiece. Also calculations revealed areas of the maximum tensile stress concentration and determined the optimal value of the finishing allowance.

Keywords: numerical simulation, quenching stress, machining allowance.

### References

1. *Arendarchuk A.V., Astaf'ev A.A., Bashnin Yu.A.* *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: Spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1980. 776 p.



2. Isachenko V.P. *Teploperedacha: Uchebnik dlja VUZov* (Heat Transfer: A Textbook for High Schools.). Moscow, Jenergoizdat, 1981. 416 p.
3. Kurlaev N. V., Bachurin A. S., Sljunjaev A. Yu. *Ocenka tochnosti reshenija nestacionarnyh teplyyh zadach i raschet processa zakalki s postepennym pogruzeniem v zakalochnuju sredu metodom konechnyh jelementov* [Assessment of accuracy for the unsteady thermal problems and the calculation of the quenching process with gradual immersion in the quenching medium finite element method]. «Nauka. Promyshlennost'. Oborona»: trudy XIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Proceedings of the the 13th All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense” (NSTU, 19-20 April 2012) ]. Novosibirsk, 2012, pp. 64-68.
4. Kurlaev N.V., Ryngach N.A., Narysheva G.G. *Teoreticheskie osnovy samoletov i vertoletostroyeniya: Uchebnoe posobie* (Theoretical basis of aircraft and helicopter: Tutorial). Novosibirsk, NSTU, 2013. 100 p.
5. Lahtin Yu.M., Rahshtadt A.G. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroyenii: spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroyeniye, 1980. 783 p.
6. Panov A.A. *Obrabotka metallov rezaniem: spravochnik tehnologa* (Metal cutting: machine-shop manager’s guide). Moscow, Mashinostroyeniye, 2004. 724 p.
7. Firger V.I. *Termicheskaja obrabotka splavov: Spravochnik* (Heat treatment of alloys: Handbook). Leningrad, Mashinostroyeniye, 1982. 304 p.
8. Harlamov G.A., Tarapanov A.S. *Priputki na mekhanicheskuyu obrabotku: Spravochnik* (Machining allowance: Handbook). Moscow, Mashinostroyeniye, 2006. 256 p.
9. Jashhericyn P.I., Ryzhov Je.V., Averchenko V.I. *Tehnologicheskaja nasledstvennost' v mashinostroyenii* (Technological heredity in mechanical engineering). Minsk, Nauka i tehnika, 1977. 256 p.
10. *Primenenie SYSWELD dlja modelirovaniya zakalki v 2D postanovke* (Application SYSWELD for modeling hardening in 2D statement). Available at: [https://plmural.ru/cae/tehnologicheskij\\_analiz/sysweld\\_modelirovanie\\_zakalki](https://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki) (accessed 16 June 2013).

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПС12НВК\*

*Х.М. РАХИМЯНОВ, профессор, доктор техн. наук  
Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, профессор, канд. техн. наук  
В.В. ЯНПОЛЬСКИЙ, доцент, канд. техн. наук  
Т.В. КОЗИЧ, магистрант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 4 июля 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Рахимьянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: tms-ngtu@mail.ru

Представлены результаты поляризационных исследований электрохимического растворения покрытия на основе порошковой смеси ПС12НВК в водных растворах нейтральных солей  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$ . Установлено, что растворение указанного материала в выбранных составах электролитов происходит в активном состоянии в исследуемом диапазоне потенциалов анода от  $\varphi = 0$  В до  $\varphi = 4,5$  В. Рассмотрены особенности растворения покрытия на основе порошковой смеси ПС12НВК при фиксированных значениях потенциалов  $\varphi = 0,5$  В,  $\varphi = 2$  В и  $\varphi = 4$  В. Показано, что с увеличением времени протекания процесса электрохимического растворения при фиксированных значениях потенциала происходит рост плотности тока, что также подтверждает характер активного электрохимического растворения указанного материала в водных растворах нейтральных солей  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$ .

**Ключевые слова:** электроалмазное шлифование, электрохимическое растворение, поляризационные исследования, покрытия.

## Введение

Эксплуатационный срок службы детали во многом зависит от физико-механических свойств поверхностного слоя, сформированных в процессе механической обработки. С целью увеличения срока службы применяют различные методы как упрочнения поверхностных слоев детали, так и нанесения износостойких покрытий. Особый интерес в последнее время представляет формирование износостойкого поверхностного слоя детали за счет нанесения покрытий на основе порошковых материалов. В качестве порошкового материала износостойких покрытий наиболее часто используются смеси, в состав которых входят карбиды вольфрама, в частности порошок ПС12НВК, обеспечивающий требования, которые предъявляются к покрытиям данного класса. Благодаря использованию порошко-

вых материалов при нанесении покрытий возможно формирование поверхностного слоя, обладающего высокой твердостью. Однако при повышении твердости поверхностного слоя возникают сложности при выборе метода финишной механической обработки. Применение традиционных способов шлифования, таких как абразивное и алмазное, приводит к снижению физико-механических характеристик поверхностного слоя, достигнутых на этапе нанесения износостойкого покрытия. Снижение качества поверхностного слоя связано с тем, что твердость покрытий на основе порошковых материалов зачастую сопоставима с твердостью абразивного инструмента, что приводит к увеличению сил резания, а следовательно, и температуры в зоне обработки [1]. В этом случае высока вероятность появления дефектов, снижающих эксплуатационные характеристики поверхности детали, такие как прижоги и

\* Исследования проведены при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в 2013 г. и в плановом периоде в 2013-2014 гг. (Шифр заявки 7.759.2011 «Повышение конструктивной прочности материалов конструкционного и инструментального назначения методами, основанными на высокоэнергетическом воздействии»).

микротрещины, а в некоторых случаях и отслоение нанесенного покрытия. В работах [2, 3] показано, что одним из эффективных способов формирования поверхности детали с покрытием является электроалмазное шлифование (ЭАШ).

### Постановка задачи

Электроалмазное шлифование основано на совмещении процессов электрохимического растворения обрабатываемого материала и механического резания зернами алмазного круга. За счет такого совмещения в зоне обработки наблюдается существенное снижение режущих сил, что способствует уменьшению локальных температур и, как следствие, позволяет избежать образования на поверхности дефектов, характерных для традиционных методов обработки [4]. Однако применение этого метода обработки при шлифовании покрытий приводит к повышению шероховатости поверхности, что недопустимо в случае использования деталей в парах трения [5]. Вероятно, такое формирование микрорельефа поверхности в процессе электроалмазного шлифования связано с особенностями электрохимического растворения порошкового материала в выбранном составе электролита, поскольку при электроалмазном шлифовании электрохимическое растворение может происходить не только в зоне резания, но и в гидродинамических клиньях, образующихся при подаче электролита в зону резания (рис. 1) [6].

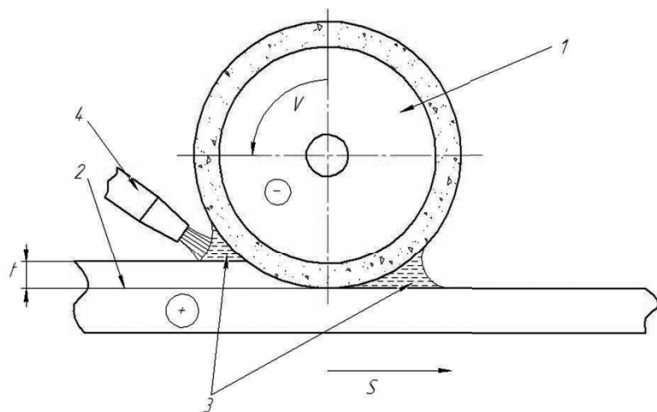


Рис. 1. Схема образования гидродинамических клиньев:

1 – алмазный круг на металлической связке; 2 – деталь;  
3 – гидродинамические клинья; 4 – сопло для подачи электролита

Поэтому для эффективного применения электроалмазного шлифования при обработке деталей с покрытиями на основе порошкового материала ПС12НВК необходимо произвести оценку особенностей электрохимического растворения указанного материала в выбранных составах электролита.

### Методика проведения экспериментов

Исследование особенностей электрохимического растворения металлов и сплавов в электролитах различного состава возможно при изучении анодных поляризационных характеристик [7].

Исследования проводились на потенциостате IPC Pro. Потенциал анода изменялся от 0 до 4,5 В. В качестве электрода сравнения использовали платиновый электрод. Перед погружением в ячейку образцы зачищали на наждачной бумаге и промывали дистиллированной водой. В качестве электролитов были использованы растворы нейтральных солей  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$  в воде. Электролиты готовили из солей марки «ч.д.а.» и «х.ч.».

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены поляризационные кривые электрохимического растворения покрытия ПС12НВК в водных растворах  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$  (рис. 2). Из рисунка видно, что растворение покрытия на основе порошка ПС12НВК происходит в активном состоянии, о чем свидетельствует непре-

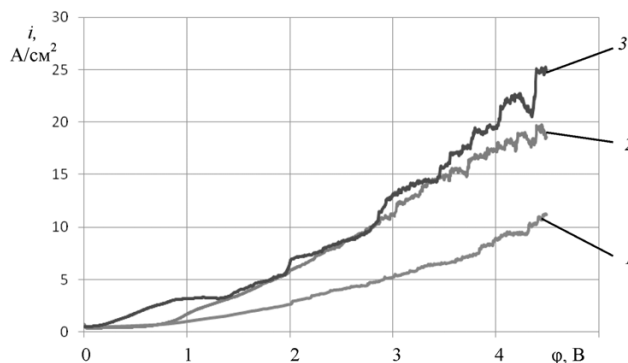


Рис. 2. Поляризационные кривые анодного растворения порошковой смеси ПС12НВК в водных растворах нейтральных солей:

1 – 10 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 2 – 10 %  $\text{NaNO}_3$ ; 3 – 10 %  $\text{NaCl}$

рывное увеличение плотности тока с повышением потенциала анода во всем исследуемом диапазоне от 0 до 4,5 В для исследуемых электролитов.

Данный факт также подтверждается результатами поляризационных исследований растворения порошковой смеси ПС12НВК при фиксированном значении потенциалов, а именно при  $\varphi = 0,5$  В,  $\varphi = 2$  В и  $\varphi = 4$  В (рис. 3).

С увеличением времени растворения при фиксированном значении потенциала практически не происходит снижения величины плотности тока, а при потенциалах  $\varphi = 2$  В и  $\varphi = 4$  В наблюдается повышение значения плотности тока, что и подтверждает

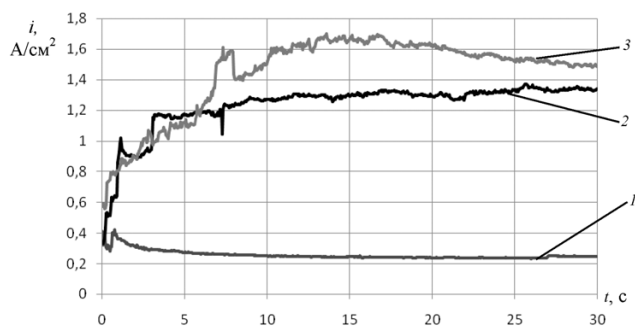


Рис. 3. Потенциостатические поляризационные кривые анодного растворения порошковой смеси ПС12НВК в водном растворе 10 %-го  $\text{NaNO}_3$ :

1 –  $\varphi = 0,5$  В; 2 –  $\varphi = 2$  В; 3 –  $\varphi = 4$  В

активное растворение материала ПС12НВК в водном растворе 10 %-го  $\text{NaNO}_3$ .

Аналогичная картина электрохимического растворения исследуемой порошковой смеси наблюдается и при проведении экспериментов в водных растворах  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$  (рис. 4, 5).

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что электрохимическое растворение порошковой смеси ПС12НВК в водных растворах нейтральных солей  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ , и  $\text{NaCl}$  происходит в активном состоянии. Вероятно, характер растворения указанного покрытия определяется характером электрохимического поведения таких элементов, как никель (Ni) и кобальт (Co), входящих в состав порошковой смеси. В работах [7, 8] установлено, что электрохимическое растворение указанных материалов происходит в активном состоянии в исследуемых растворах электролитов. Входящие в состав частицы карбидов вольфрама механически «выкрашиваются» из покрытия, что может приводить к неравномерному электрохимическому растворению поверхности детали и снижает качество обработки. Подобный механизм электрохимического растворения был рассмотрен в работе [9] на примере растворения хромоникелевых сплавов. Таким образом, для уменьшения влияния особенностей электрохимического растворения материалов, входящих в состав покрытия на основе порошковой смеси ПС12НВК, на формирование микрорельефа поверхности после электроалмазного шлифования необходимо выбирать пассивирующие составы электролитов. Однако это возможно в том случае, когда происходит обработка однокомпонентного материала. При шлифовании многокомпонентных сплавов, как и в случае формообразования покрытия на основе порошковой смеси ПС12НВК, подобрать пассивирующий состав электролита затруднительно, поскольку выбранный состав электролита может быть пассивирующим для одного элемента и активирующим для другого [10].

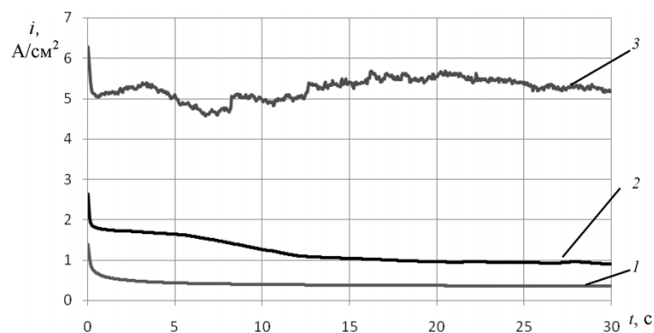


Рис. 4. Потенциостатические поляризационные кривые анодного растворения порошковой смеси ПС12НВК в водном растворе 10 %-го  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :

1 –  $\varphi = 0,5$  В; 2 –  $\varphi = 2$  В; 3 –  $\varphi = 4$  В.

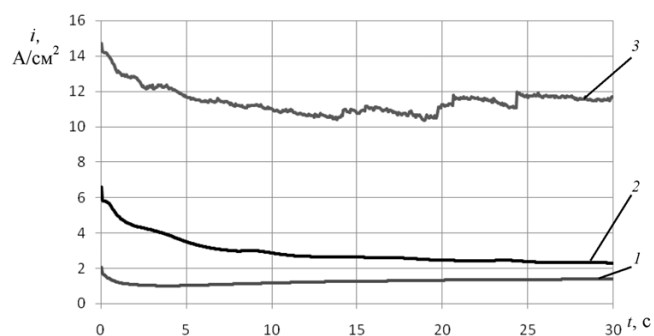


Рис. 5. Потенциостатические поляризационные кривые анодного растворения порошковой смеси ПС12НВК в водном растворе 10 %-го  $\text{NaCl}$ :

1 –  $\varphi = 0,5$  В; 2 –  $\varphi = 2$  В; 3 –  $\varphi = 4$  В

В этом случае уменьшение влияния особенностей электрохимического растворения указанного материала в выбранных составах электролитов на формирование микрорельефа поверхности после электроалмазного шлифования возможно за счет введения дополнительного технологического перехода, осуществляемого при отключенном источнике тока.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что электрохимическое растворение деталей с покрытиями на основе ПС12НВК происходит в активном состоянии во всем исследуемом диапазоне потенциалов в водных растворах нейтральных солей  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ , и  $\text{NaCl}$ . Характер растворения указанного покрытия определяется характером электрохимического растворения материалов, входящих в состав покрытия, а именно никелем (Ni) и кобальтом (Co). Активное растворение кобальта и никеля может приводить к неравномерному электрохимическому растворению поверхности анода, что снижает качество обработки. Повышение равномерности растворения указанного покрытия возможно за счет выбора пассивирующего



состава электролита по отношению к кобальтовой и никелевой составляющей, а также за счет введения дополнительного технологического перехода, осуществляемого при отключенном источнике тока.

### Список литературы

1. *Кремень З.И.* Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошин; под общей ред. З.И. Кременя. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
2. *Рахимьянов Х.М.* Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий / Х.М. Рахимьянов, В.В. Янпольский, А.Н. Моисеенко // Сб. тр. междунауд. науч.-практич. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». – Кемерово, 2009. – С. 365–368.
3. *Рахимьянов Х.М.* Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов. – 2011 – № 2(51) – С. 3–5.
4. *Янюшкин А.С.* Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. – М.: Машиностроение – № 1. – 2003. – 241 с.
5. *Рахимьянов Х.М.* Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, В.В. Янпольский, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов. – 2010. – № 4(49). – С. 22–26.

6. *Фомин Г.И.* Исследование факторов, влияющих на точность электрохимического формообразования вращающимся электродом / Г.И. Фомин, Ф.Н. Чикишев // Труды науч. конф. Электрофизические, электрохимические методы обработки материалов и другие вопросы технологии машиностроения. – Тюмень, 1974. – С. 59–62.

7. *Щербак М.В.* Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов / М.В. Щербак, М.А. Толстая, А.П. Анисимов, В.Х. Постановов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 263 с.

8. *Рахимьянов Х.М.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – Новосибирск, 2003. – С. 141–146.

9. *Петренко В.И.* Влияние концентрации упрочняющей  $\gamma$ -фазы в жаропрочных хромоникелевых сплавах на скорость их электрохимической обработки в растворах нитратов и хлоратов / В.И. Петренко, А.И. Дикусар, О.А. Аржигаль // Электронная обработка материалов. – 1976. – № 4. С. 14–17.

10. *Давыдов А.Д.* Закономерности электрохимического растворения сплавов при высоких плотностях тока. Тезисы докладов науч.-техн. конф. «Размерная электрохимическая обработка деталей машин». – Тула, 1980. – С. 95–9.

Obработка metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 36–40

### Features of electric powered diamond grinding of workpieces with powder coating material through PS12NVK

Kh.M. Rakhimyanov, B.A. Krasilnikov, V.V. Yanpolskiy, T.V. Kozich

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: tms-ngtu@mail.ru

### Abstract

The results of polarization studies of the electrochemical dissolution of the coating on the basis of the powder mixture PS12NVK in aqueous solutions of neutral salts,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and  $\text{NaCl}$  are presented. It is found that the dissolution of above-noted material in the electrolyte composition is selected in an active state in the test range of the anode potentials  $\varphi = 0 \text{ V}$   $\varphi = 4,5 \text{ V}$ . It is shown that with increasing of the electrochemical dissolution process time at fixed potential value there is the growth of the current density, that also confirms the nature of the active electrochemical dissolution of this material in aqueous solutions of neutral salts,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and  $\text{NaCl}$ .

Keywords: electric powered diamond grinding, electrochemical dissolution, polarization studies, coatings.

### References

1. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshin A.F. *Tehnologija shlifovaniya v mashinostroenii* (Grinding Technology in Mechanical Engineering). Saint Petersburg, Politehnika, 2007. 424 p.



2. Rahimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. *Jelektroalmaznaja obrabotka napylenykh iznosostojkikh pokrytij* [Electric powered diamond processing processing wear resistant coatings]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Inzhenerija poverhnostnogo sloja detalej mashin»* [Proceedings of the International Scientific Conference “Engineering surface layer of machine parts”]. Kemerovo, 2009, pp. 365 – 368.

3. Rahimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Nikitenko M.I., Moiseenko A.N. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2011, no. 2(51), pp. 3 – 5.

4. Yanyushkin A.S. *Tehnologija kombinirovannogo jelektroalmaznogo zatachivaniya tverdospaynykh instrumentov* (Technology combined electric powered diamond sharpening carbide tools). Moscow, Mashinostroenie – 1, 2003. 241 p.

5. Rahimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2010, no. 4(49), pp. 22 – 26.

6. Fomin G.I., Chikishev F.N. *Issledovanie faktorov, vlijajushhih na tochnost' jelektrohimicheskogo formoobrazovaniya vrashhajushhimsja jelektrodom* [The study of factors affecting the accuracy of the rotating electrode electrochemical formation]. *Trudy nauchnoj konferencii Jelektrofizicheskie, jelektrohimicheskie metody obrabotki materialov i drugie voprosy tehnologii mashinostroeniya* [Proceedings of the conference “Electro, electrochemical methods of data processing and other issues of Mechanical Engineering”]. Tyumen, 1974, pp. 59 – 62.

7. Shherbak M.V., Tolstaja M.A., Anisimov A.P., Postanogov V.H. *Osnovy teorii i praktiki jelektrohimicheskoy obrabotki metallov i spлавov* (Fundamentals of the theory and practice of electrochemical machining of metals and alloys). Moscow, Mashinostroenie, 1981. 263 p.

8. Rahimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A., Yanpolskiy V.V. *Anodnoe rastvorenie bystrorezhushhej stali R6M5 i ee sostavljajushhih v vodnykh rastvorah* (Anodic dissolution of high-speed steel R6M5 and its components in aqueous solutions). *Sbornik nauchnykh trudov NSTU*, 2003, no.4 (34), pp. 141 – 146.

9. Petrenko V.I., Dikusar A.I., Arzhintal' O.A. *Vlijanie koncentracii uprochnjajushhej  $\gamma$  - fazy v zharoprochnykh hromonikelevykh spлавah na skorost' ih jelektrohimicheskoy obrabotki v rastvorah nitratov i hloratov* [Influence of the concentration of the hardening  $\gamma$  - phase in the heat-resistant chromium-nickel alloys, the rate of electrochemical treatment in solutions of nitrate and chlorate]. *Jelektroonnaja obrabotka materialov - Soviet Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1976, no.4, pp. 14 – 17.

10. Davydov A.D. *Zakonomernosti jelektrohimicheskogo rastvorenija spлавov pri vysokih plotnostjakh toka* [Laws of electrochemical dissolution of alloys at high current densities.]. *Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii «Razmernaja jelektrohimicheskaja obrabotka detalej mashin»* [Abstracts of scientific and technical conference “The dimensional electrochemical machining of machine parts”]. Tula, 1980, pp. 95 – 99.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТЫЛОВАНИЯ ЗУБЬЕВ ЧЕРВЯЧНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ

*С.П. АНДРОСОВ, канд. техн. наук, доцент*  
*Д.В. ВИЗИГИН, магистрант*  
(ОмГТУ, г. Омск)

Поступила 16 мая 2013 года  
Рецензирование 20 июня 2013 года  
Принята к печати 25 июня 2013 года

**Андросов С.П.** – 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11,  
Омский государственный технический университет,  
e-mail: asp57@list.ru

Рассматриваются вопросы моделирования червячной модульной фрезы для нарезания цилиндрических зубчатых колес в пространственном отражении. Определено уравнение угла затылования зубьев фрезы. Получены уравнения винтовых затылованных поверхностей зубьев фрезы, выраженные параметрическими векторными функциями. Разработана компьютерная программа для расчета и построения модели фрезы с затылованными зубьями с использованием объектно-ориентированного языка *AchionScript 3*. Приводится пример расчета и построения 3D-модели червячной фрезы.

**Ключевые слова:** червячная фреза, затылованная поверхность зуба, моделирование, векторная функция.

## Введение

Проектирование червячных модульных фрез, предназначенных для обработки винтовых поверхностей косозубых цилиндрических зубчатых колес с учетом их конструктивных особенностей, требований к эксплуатации и производству представляет собой достаточно сложную и трудоемкую задачу. Решение такой задачи возможно только на основе широкого использования средств вычислительной техники и создания САПР режущего инструмента (РИ).

В работе [1] приводятся перспективные и актуальные направления САПР РИ, к которым наряду с другими относятся: использование методов математического моделирования и визуализация проектирования. Разработка пакетов прикладных программ для расчета сложного РИ на ЭВМ, как отмечено в работе [2], позволяет резко сократить затраты конструкторского труда и повысить качество проектирования РИ. Визуализация проектирования путем использования графических моделей и математических зависимостей делает процесс проектирования наглядным, а в некоторых случаях дает возможность быстро получать оптимальное решение.

Следует отметить, что несмотря на достаточно широкую теоретическую проработку процесса

зубофрезерования в настоящее время существует ряд нерешенных вопросов в моделировании формообразования зубчатых колес. Например: анализ геометрии зубьев червячной фрезы, кинематический анализ процесса зубообработки с учетом всех пространственных движений фрезы и заготовки, анализ силового нагружения режущих кромок фрезы. Это обусловлено тем, что теория формообразования основана на рассмотрении плоской задачи зацепления исходной производящей рейки фрезы и зубчатого колеса. Для исследования процесса формообразования в пространственном отражении требуются объемные модели как червячной фрезы, так и зубчатого колеса. В связи с этим разработка аналитической 3D-модели червячной фрезы, позволяющей воспроизводить точную геометрию, выполнять исследование кинематики и динамики, а также решать вопросы формообразования при зубофрезеровании, является актуальной задачей.

Данная работа является продолжением исследований [3–6] по созданию аналитической модели червячной модульной фрезы. Ее цель заключается в определении уравнений боковых затылованных поверхностей зубьев червячной фрезы в матрично-векторной форме и разработки компьютерной модели фрезы.

## Теория

Затылование зубьев червячной модульной фрезы производится для создания задних углов по всему контуру зубьев. Затылованные поверхности должны соответствовать следующим требованиям: проходить через режущие кромки; их винтовой шаг должен отличаться от винтового шага исходного основного червяка [7]. Для образования задней затылованной поверхности зубьев необходимо их режущим кромкам сообщить сложное движение, состоящее из равномерного вращения относительно оси фрезы и поступательного движения вдоль этой оси, а также равномерного поступательного радиального перемещения к центру фрезы. В результате происходит затылование по спирали Архимеда. Затылованная поверхность зуба фрезы описывается совокупностью кривых Архимеда. При этом обеспечивается образование задних углов во всех точках режущих кромок. При переточке по передней поверхности их форма в радиальном сечении будет оставаться неизменной. Этим объясняется основное достоинство фрезы, которое заключается в том, что она дает постоянный и идентичный профиль обрабатываемой детали за весь период своей эксплуатации.

Процесс затылования рассмотрим на примере архимедовой червячной фрезы, профиль зуба в осевом сечении которой показан на рис. 1.

Форма режущей кромки червячной модульной фрезы определяется как линия пересечения поверхности основного червяка и передней поверхности стружечной канавки, уравнения которых приведены в работах [3–4]. Уравнение режущих кромок зубьев фрезы имеет вид [6]

$$\vec{r}(i, j, k, n) = \begin{bmatrix} -R \sin \varphi_p \\ y(i, n) \left( \frac{a_k}{a_q + a_k} \right) \\ R \cos \varphi_p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\varphi_p$  – параметрический угол, определяющий положение точек режущих кромок;  $\varphi_p = -\frac{y(i, n)}{a_q + a_k}$ ;

$R$  – текущий радиус, изменяющийся в пределах от радиуса впадин  $R_{f0}$  до радиуса вершин  $R_{a0}$  (рис. 1);  $y(i, n)$  – текущая координата профиля вдоль оси фрезы  $O_0V_0$ ;  $a_k$  – винтовой параметр стружечной канавки;  $a_q$  – винтовой параметр основного червяка;  $i$  – номер вектора на зубе фрезы;  $j$  – номер зуба на рейке фрезы;  $k$  – номер рейки на фрезе;  $n$  – количество точек на векторе.

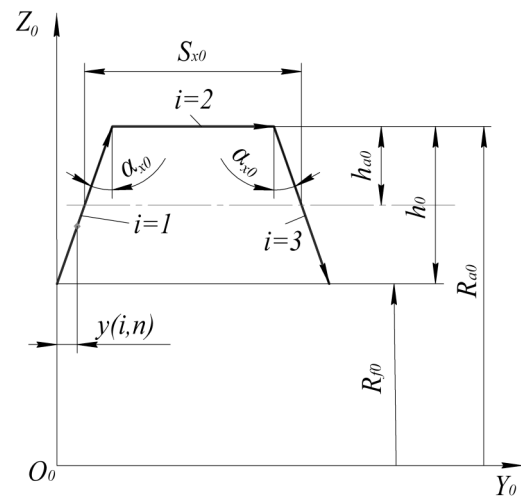


Рис. 1. Профиль зуба фрезы:

$\alpha_{x0}$  – угол профиля основного червяка;  $h_0$  – высота зуба фрезы;  $h_{a0}$  – высота головки зуба фрезы;  $S_{x0}$  – толщина зуба по делительной линии

Задние затылованные поверхности зубьев фрезы описываются векторной функцией

$$\vec{r}_3(i, j, k, n) = [M] \vec{r}(i, j, k, n), \quad (2)$$

где  $[M]$  – матрица преобразования поворотных движений против часовой стрелки вокруг оси  $O_0V_0$  и поступательных движений вдоль этой оси и радиальных перемещений к центру фрезы.

Матрица  $[M]$  имеет вид

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & 0 & -\sin \varphi_3 & \Delta k \sin \varphi_3 \\ 0 & 1 & 0 & a_3 \varphi_3 \\ \sin \varphi_3 & 0 & \cos \varphi_3 & -\Delta k \cos \varphi_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\Delta k$  – радиальное перемещение, соответствующее величине затылования поверхности зуба (рис. 2);  $\varphi_3$  – параметрический угол затылования,  $0 \leq \varphi_3 \leq \varphi$ .

Значение  $\Delta k$  для текущего значения радиуса определяется выражением

$$\Delta k = b_1 \varphi_3, \quad (4)$$

где  $b_1$  – постоянная затылования для текущего значения радиуса  $R$ . Параметр  $b_1$  вычисляется по формуле

$$b_1 = \frac{b}{\eta}, \quad (5)$$

где  $\eta = \frac{R_{a0}}{R}$ ;  $b$  – постоянная затылования для наружного цилиндра фрезы.

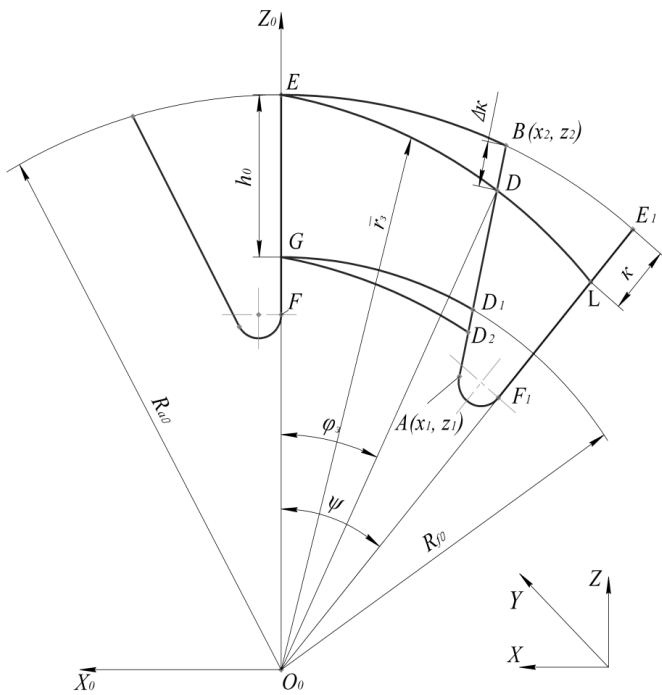


Рис. 2. Определение угла затылования:  $EBD_1G$  – незатылованный зуб;  $EDD_2G$  – затылованный зуб;  $BAF_1E_1$  – стружечная канавка

Постоянная  $b$  определяется по формуле

$$b = \frac{k}{\psi}, \tag{6}$$

где  $k$  – величина затылования, отнесенная к окружно-му шагу  $\psi$  зубьев фрезы.

Угол затылования  $\varphi_3$  для различных значений текущего радиуса фрезы определяется из уравнения [5]

$$(R - b_1 \varphi_3) \cos \varphi_3 = -c(R - b_1 \varphi_3) \sin \varphi_3 + c_1, \tag{7}$$

полученного при совместном решении уравнения кривой затылования  $EDL$  (рис. 2) и уравнения прямой, проходящей через две точки  $A_1(x_1, y_1)$  и  $B_1(x_2, y_2)$  профиля зуба фрезы в торцевом сечении.

Параметры  $c$  и  $c_1$  имеют следующие значения:

$$c = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}; \quad c_1 = z_1 - x_1 c. \tag{8}$$

Выражение  $a_3 \varphi_3$  в формуле (3) определяет проекцию вектора перемещения вдоль оси фрезы  $O_0Y_0$ . Величина  $a_3$  является винтовым параметром затылованной поверхности. Значение  $a_3$  вычисляется по формуле

$$a_3 = \frac{P_x}{2\pi}, \tag{9}$$

где  $P_x$  – шаг винтовой затылованной поверхности.

После перемножения матрицы (3) и функции (1) векторная функция (2) принимает вид

$$\vec{r}_3(i, j, k, n) = \begin{bmatrix} -R \sin \varphi_\phi + \Delta k \sin \varphi_3 \\ y(i, n) \left( \frac{a_k}{a_\psi + a_k} \right) + a_3 \varphi_3 \\ R \cos \varphi_\phi - \Delta k \sin \varphi_3 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

где  $\varphi_\phi$  – угол, определяющий положение точек на затылованной поверхности зубьев фрезы,  $\varphi_\phi = \varphi_p + \varphi_3$ .

Затылованные поверхности червячной фрезы, как известно, не совпадают с поверхностями основного червяка [7]. Профиль зуба в осевом сечении у фрез с винтовыми стружечными канавками является несимметричным. Углы профиля  $\alpha_{лев}$  и  $\alpha_{пр}$  левой и правой сторон имеют различные значения, причем они не равны углу профиля основного червяка  $\alpha_{x0}$ . Это объясняется тем, что затылование зубьев на обеих сторонах начинается и заканчивается неодновременно. Шаг затылованных поверхностей  $P_x$  для левой и правой сторон зуба также является различным. Для правозаходной фрезы шаги с левой и правой стороны определяются выражениями

$$P_{x\text{лев}} = P_{x0} - K_p \operatorname{tg} \alpha_{лев}; \tag{11}$$

$$P_{x\text{пр}} = P_{x0} + K_p \operatorname{tg} \alpha_{пр},$$

где  $P_{x0}$  – осевой шаг основного червяка;  $K_p$  – величина радиального перемещения затылованного резца за один оборот фрезы.

Значение радиального перемещения резца вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{P_{x0} + P_k}{P_k} K z_0, \tag{12}$$

где  $P_k$  – шаг винтовой стружечной канавки;  $z_0$  – число зубьев.

Из выражений (11) следует, что винтовой шаг затылованных поверхностей для левой стороны меньше, а для правой стороны больше шага основного червяка фрезы  $P_{x0}$ . В результате задние углы на боковых режущих кромках не равны между собой. Значения углов профиля зуба в осевом сечении определяются по формулам

$$\operatorname{ctg} \alpha_{лев} = \operatorname{ctg} \alpha_{x0} + \frac{K}{P_k} z_0; \tag{13}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_{пр} = \operatorname{ctg} \alpha_{x0} - \frac{K}{P_k} z_0.$$

В результате векторные функции, описывающие боковые винтовые затылованные поверхности зубьев фрезы, запишутся:

$$\bar{r}_{з.лев}(1, j, k, n) = \begin{bmatrix} -R \sin \varphi_{\Phi} + \Delta k \sin \varphi_3 \\ y(1, n) \left( \frac{a_k}{a_{\Phi} + a_k} \right) + \left( \frac{P_{x0} - \Delta P_{x.лев}}{2\pi} \right) \varphi_3 \\ R \sin \varphi_{\Phi} - \Delta k \sin \varphi_3 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\bar{r}_{з.пр}(3, j, k, n) = \begin{bmatrix} -R \sin \varphi_{\Phi} + \Delta k \sin \varphi_3 \\ y(3, n) \left( \frac{a_k}{a_{\Phi} + a_k} \right) + \left( \frac{P_{x0} + \Delta P_{x.пр}}{2\pi} \right) \varphi_3 \\ R \sin \varphi_{\Phi} - \Delta k \sin \varphi_3 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $\Delta P_{x.лев} = K_p \operatorname{tg} \alpha_{лев}$ ;  $\Delta P_{x.пр} = K_p \operatorname{tg} \alpha_{лев}$ .

Формулы (14) зубьев описывают боковые затылованные поверхности первой рейки. Поверхности зубьев последующих реек описываются векторными функциями:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{з.пр}^*(1, j, k, n) &= [M_1] \bar{r}_{з.пр}(1, j, k, n); \\ \bar{r}_{з.лев}^*(3, j, k, n) &= [M_1] \bar{r}_{з.лев}(3, j, k, n), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\delta(k) \delta(k)$  – смещение одноименных точек профиля каждой из реек по виткам спирали вдоль оси  $O_0 Y_0$ ;  $\xi(k)$  – угол между зубом первой рейки и зубьями последующих реек в торцевом сечении фрезы;  $[M_1]$  – матрица поворота против часовой стрелки и смещения вдоль оси  $O_0 Y_0$ :

$$[M_1] = \begin{bmatrix} \cos \xi(k) & 0 & -\sin \xi(k) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta(k) \\ \sin \xi(k) & 0 & \cos \xi(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Окончательно после необходимых преобразований векторные функции, описывающие боковые затылованные поверхности всех зубьев червячной фрезы, принимают вид

$$\begin{aligned} \bar{r}_{з.лев}^*(1, j, k, n) &= \\ &= \begin{bmatrix} -R \sin(\varphi_{\Phi} + \xi(k)) + \Delta k \sin(\varphi_3 + \xi(k)) \\ y(1, n) \left( \frac{a_k}{a_{\Phi} + a_k} \right) + \left( \frac{P_{x0} - \Delta P_{x.лев}}{2\pi} \right) \varphi_3 + \delta(k) \\ R \cos(\varphi_{\Phi} + \xi(k)) - \Delta k \cos(\varphi_3 + \xi(k)) \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\bar{r}_{з.пр}^*(3, j, k, n) =$$

$$= \begin{bmatrix} -R \sin(\varphi_{\Phi} + \xi(k)) + \Delta k \sin(\varphi_3 + \xi(k)) \\ y(3, n) \left( \frac{a_k}{a_{\Phi} + a_k} \right) + \left( \frac{P_{x0} + \Delta P_{x.пр}}{2\pi} \right) \varphi_3 + \delta(k) \\ R \cos(\varphi_{\Phi} + \xi(k)) - \Delta k \cos(\varphi_3 + \xi(k)) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

## Результаты моделирования и обсуждение

Для расчета и построения трехмерной модели червячной модульной фрезы с затылованными разработана компьютерная программа с использованием средств объектно-ориентированного языка *AchionScript 3*. На рис. 3 показаны затылованные зубья червячной фрезы. Главное окно компьютерной программы представлено на рис. 4. Блок-схема расчета и построения модели червячной фрезы приведена на рис. 5.

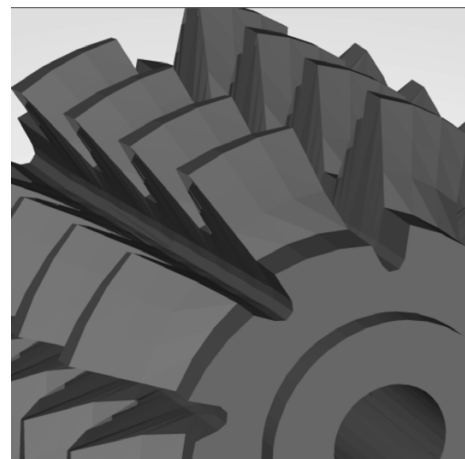


Рис. 3. Затылованные зубья червячной фрезы

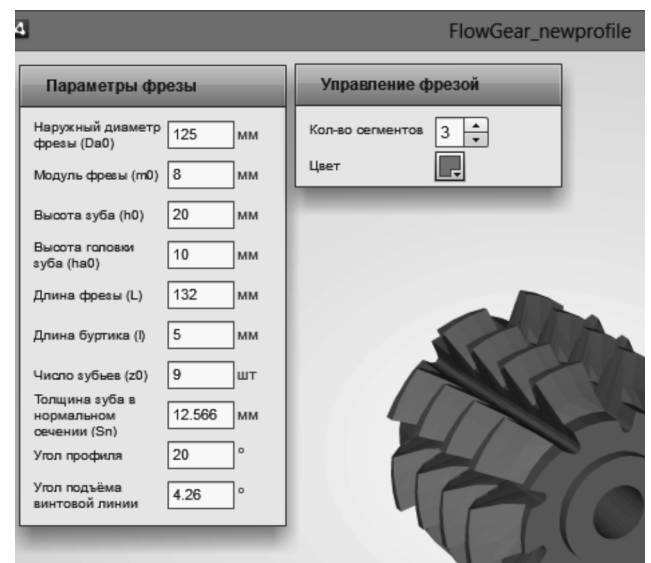


Рис. 4. Главное окно компьютерной программы для червячной фрезы

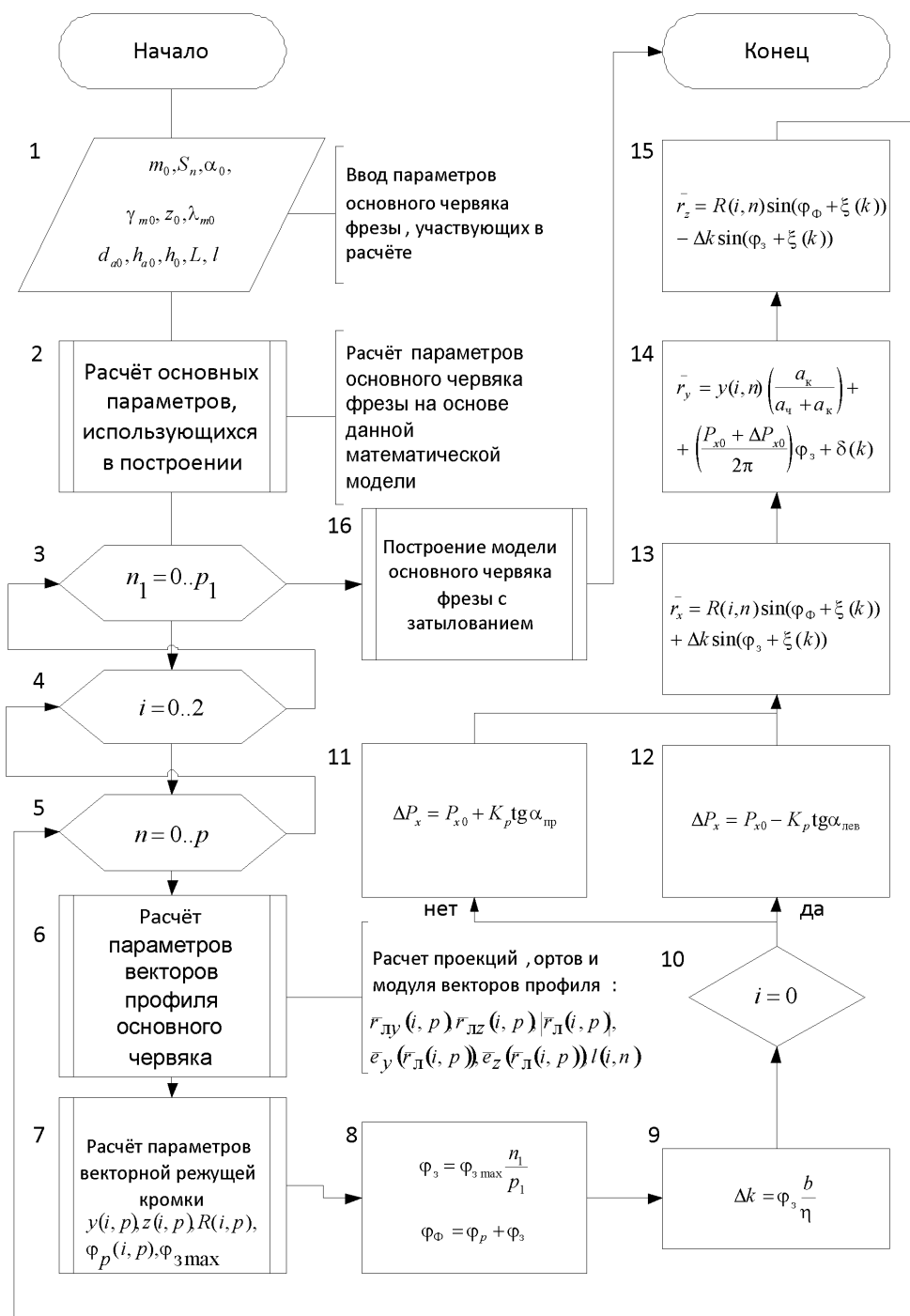


Рис. 5. Блок-схема расчета и построения модели червячной фрезы

Расчет и построение модели затылованных зубьев выполнялся по параметрам червячной фрезы 2510-4344, регламентируемым ГОСТ 9324-80. Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Исходные данные имеют значения: наружный диаметр фрезы  $d_{a0} = 125$  мм; модуль зубьев  $m_0 = 8$  мм; высота зуба  $h_0 = 20$  мм; высота головки зуба  $h_{a0} = 10$  мм; длина фрезы  $L = 132$  мм; длина буртика  $l = 5$  мм; число зубьев  $z_0 = 9$ ; толщина зуба в нормальном сечении

$S_{n0} = 12,566$  мм; угол профиля  $\alpha_0 = 20^\circ$ ; угол наклона стружечной канавки  $\lambda_{m0} = 4^\circ 26'$ ; угол подъема винтовой линии на делительном цилиндре  $\lambda_{m0} = 4^\circ 26'$ .

### Выводы

Таким образом, определены зависимости для описания боковых затылованных поверхностей зубьев червячной фрезы, выраженные параметрическими векторными функциями. Разработана компьютерная 3D-модель фрезы с затылованными зубьями. Ана-

литическое описание поверхностей зубьев фрезы, предложенное в работе, позволяет воспроизводить их точную геометрию, выполнять кинематический анализ процесса зубообработки, оценивать силовое нагружение режущих кромок фрезы. Результаты моделирования используются при исследовании процесса формообразования зубчатых колес в пространственном отражении.

### Список литературы

1. Петухов Ю.Е. Некоторые направления развития САПР режущего инструмента // СТИН. – 2003. – № 8. – С. 26–30.
2. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ: учеб. пособие для вузов / под ред. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2006. – 380 с.
3. Андросов С.П., Браилов И.Г., Визигин Д.В. Модель основного червяка фрезы для нарезания зубчатых колес //

Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. – 2012. – № 1(32). – С. 63–70.

4. Андросов С.П. Модель стружечной канавки червячной модульной фрезы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2(55). – С. 43–49.

5. Андросов С.П. Определение угла затылования зубьев червячной модульной фрезы // Образование и наука на XXI век: Материалы за 8-а международна научна практична конференция. Том 47. Технологии. – София. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – С. 71–74.

6. Андросов С.П. Уравнение режущих кромок червячной модульной фрезы // Приволжский научный вестник. – 2013. – 2(18). – С. 4–7.

7. Кожевников Д.В. и др. Режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 2007. – 526 с.

Obработка metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 41-46

### Modeling relieving teeth of worm module milling cutter

S.P. Androsov, D.V. Vizigin

Omsk State Technical University, pr. Mira, 11,  
Omsk, 644050, Russia  
E-mail: asp57@list.ru

### Abstract

The problems of simulation of gear hob cutter for cylindrical gearwheel machining are under consideration. A relieving work angle equation is defined. Equations of cutter bits skewed relief, expressed by parameter vector functions are obtained. A computer program for calculation and modeling of a form-relieved bits cutter with a use of object-oriented language AchionScript 3 is developed. An example of calculation and construction of hob cutter 3D model is given. Proposed 3D-model can reproduce the exact geometry of the cutter bit and performs the analysis of the kinematics of the process of formation at hobbing with all the spatial movements' cutter and workpiece gear, as well as an analysis of the power load cutting edge cutters.

Keywords: Worm milling cutter; Form-relieved surface of tooth; Modeling; Vector function.

### References

1. Petuhov Ju.E. *STIN*, 2003, no. 8, pp. 26–30.
2. Taratynov O.V., Aver'janov O.I., Zemskov G.G., Klepikov V.V., Koroleva E.M., Taramykin Ju.P., Shherbak E.G. *Proektirovanie i raschet metallorzhushhego instrumenta na JeVM: Uchebnoe posobie dlja vuzov* (Engineering and design of metal-cutting tools on the computer: A manual for institute of higher education). Moscow, MSIU, 2006. 380 p.
3. Androsov S.P., Braiлов I.G., Vizigin D.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvenno-go ajerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva*, 2012, no. 1(32), pp. 63–70.
4. Androsov S.P. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2012, no. 2(55), pp. 43–49.
5. Androsov S.P. *Opredelenie ugla zatylovaniya zub'ev chervjachnoj modul'noj frezy. Obrazovanie i nauka XXI veka: Materialy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (Determination of the angle relieving tooth worm gear-milling cutter. Education and Science of the XXI Century: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference), Sofia, «Bjal GRAD-BG» OOD, 2012, Vol. 47 (Technologies), pp.71–74.
6. Androsov S.P. *Privolzshkij nauchnyj vestnik*, 2013, no. 2(18), pp. 4–7.
7. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Shirtladze A.G. *Rezhushhij instrument* (Machining Tool). Moscow, Mashinostroenie, 2007. 526 p.

# 3D-МОДЕЛЬ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ

*А.Л. ХЕЙФЕЦ, канд. техн. наук, доцент  
(ЮУрГУ, г. Челябинск)*

Получена 15 июня 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Хейфец А.Л.** – 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76.  
Южно-Уральский государственный университет,  
e-mail: heifets@yandex.ru

Разработан алгоритм построения геометрически точной реалистичной компьютерной 3D-модели червячной затылованной фрезы. Модель предназначена на роль компьютерного шаблона для контроля точности изготовления фрезы. Алгоритм воспроизводит технологический процесс изготовления фрезы. Модель позволяет построить шаблоны для всех стандартных затылованных фрез при варьировании 25–30 параметров, а также отобразить технологические особенности изготовления фрез. Воспроизводит все известные формы поверхности зуба. Позволяет исследовать геометрические свойства фрез. Погрешность модели не превышает  $10^{-5}$ . Приведен пример исследования формы впадины фрезеруемого зубчатого колеса. Модель создана на языке AutoLisp применительно к пакету AutoCAD.

**Ключевые слова:** 3D-компьютерное геометрическое моделирование, затылованные фрезы, контроль параметров, компьютерный шаблон, программирование, AutoCAD, AutoLisp.

## Введение

Современные средства 3D-компьютерного моделирования позволяют создавать геометрически точные реалистичные модели [1], которые используются, в частности, в качестве компьютерных шаблонов при изготовлении и контроле деталей сложной формы [2, 3].

Примером детали сложной формы является червячная затылованная фреза. Как объект моделирования, она характеризуется большим количеством геометрических расчетов и параметров [4–6], а также сложных и трудоемких при “ручной” реализации 3D-построений. Поэтому основной вариант создания и исследования таких моделей – программная реализация.

В известных работах по автоматизации проектирования фрез [7–9] компьютерные 3D-модели применяются лишь для иллюстративных целей, не предназначены на роль компьютерных шаблонов, не приведена оценка их геометрической точности.

**Цель работы:** создание алгоритма и программы автоматизации построения 3D-модели червячной затылованной фрезы как компьютерного шаблона для контроля точности изготовления.

## Теория

Модель разработана применительно к пакету AutoCAD. Все геометрические расчеты и построения выполнены в автоматическом режиме программными средствами языка AutoLisp. В качестве иллюстративного примера (рис. 1, а) рассматривается модель фрезы № 2510-4223 [4], имеющая модуль  $m = 10$ .

Сложность модели фрезы связана с воспроизведением двух ее основных конструктивных элементов: продольных винтовых стружечных канавок (рис. 1, б, поз. 1) и боковой поверхности зубьев. Поверхность зуба создается технологическим процессом “затылования” [6, 9] и содержит две области. Область 1-го затылования (рис. 1, в, поз. 3) имеет постоянный профиль, который перемещается по винтовой линии (гелисе) фрезы и смещается к ее оси фрезы по спирали Архимеда. Режущая кромка (рис. 1, в, поз. 2) является линией пересечения канавки и поверхности зуба. Область 2-го затылования (поз. 4) может иметь различную кинематику формирования, определяемую производителем. Далее в иллюстрациях принимаем, что алгоритм ее построения тот же, что и поверхности первой области.

Весьма сложным и также зависящим от производителя является алгоритм построения неполных



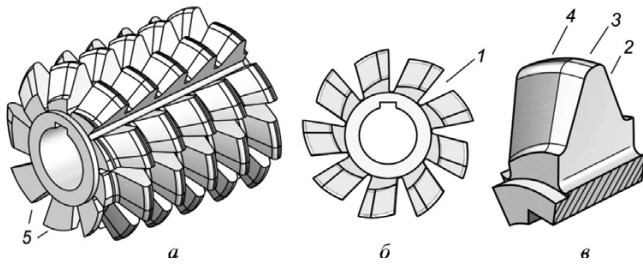


Рис. 1. Конструктивные элементы фрезы

витков (рис. 1, а, поз. 5), расположенных по торцам фрезы. Приведенный алгоритм является одним из возможных, он обеспечивает наглядность и точность модели в целом.

**Алгоритм построения модели** воспроизводит технологию изготовления фрезы [6, 9]. Модель формируется как твердотельный (solid) объект вычитанием объемов “металла” из цилиндрической заготовки. Создаем массив продольных винтовых стружечных канавок (рис. 2, а). Массив вычитаем из тела заготовки (рис. 2, б). Строим единичный объем затылования (рис. 2, в), состоящий из четырех элементов. Элементы 1, 2 формируют впадины соответственно 1-го и 2-го затылований, элементы 3, 4 формируют вершины зубьев. Создаем массив этих объемов (рис. 2, г) и вычитаем его из заготовки фрезы. В завершение реализуем алгоритм построения неполных витков (см. ниже).

Модель имеет 25 параметров (см. таблицу). В соответствии с блок-схемой (БС, рис. 3, поз. 1) программа считывает значения параметров из библиотеки. Основные значения заданы по ГОСТ [4, 5]; параметры, отмеченные “\*”, являются расчетными [6].

Далее (БС, поз. 2) по параметрам  $d_a, h_a, p_x$  (см. таблицу) выполняется расчет осевого  $s_x$  и кругового  $s_\alpha$  шага массива объемов затылования. Для этого (рис. 4, а) решается задача о пересечении двух гелис,

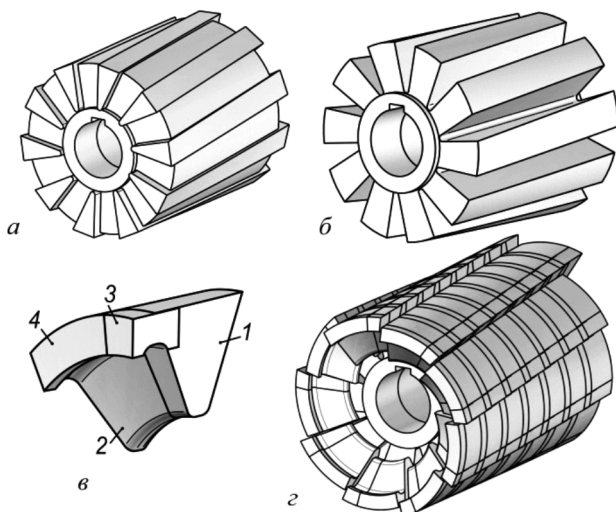


Рис. 2. Последовательность построения модели

Параметры фрезы

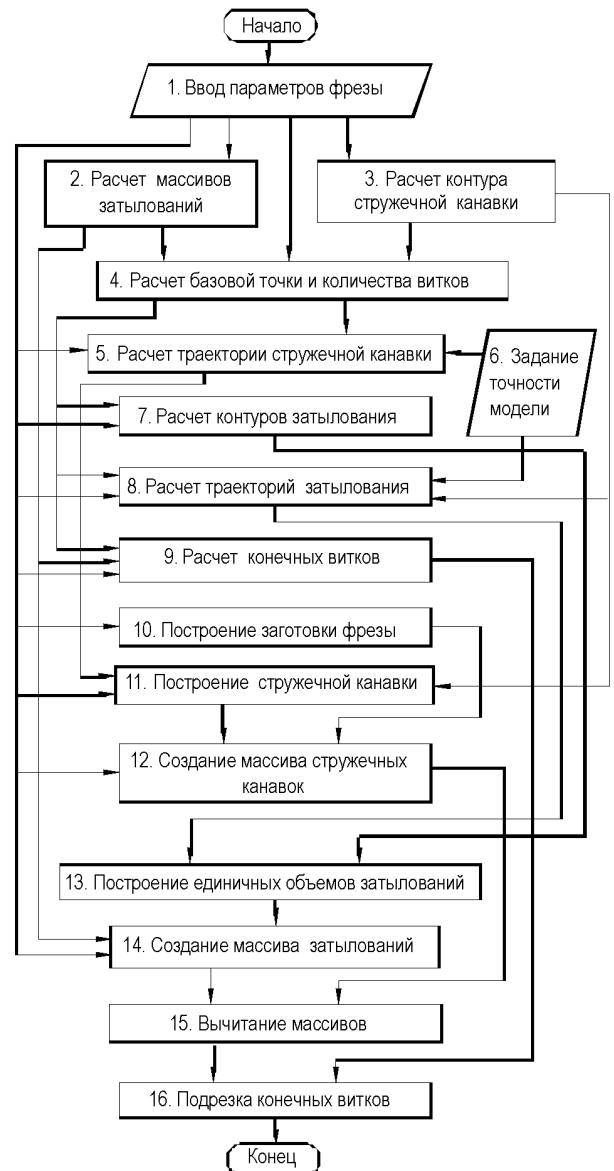


Рис. 3. Блок-схема алгоритма модели

расположенных на делительном цилиндре фрезы радиуса  $r = (0.5 \cdot d_a - h_a)$ . Первая – гелиса  $h$  имеет осевой шаг  $p_x$ . Для нее угол подъема витка  $\tau = \arctg(\frac{p_x}{2\pi r})$ . Вторая – гелиса  $h^*$  стружечной канавки задается как перпендикулярная гелисе  $h$  в точках пересечения с ней.

Исходя из этого условия для гелисы  $h^*$  шаг  $p_x^* = \frac{2\pi r}{\text{tg } \tau}$ . Значение  $s_x$  определяется как расстояние между двумя точками пересечения синусоид (рис. 4, в, д), имеющих шаги  $p_x, p_x^*$ , измеренное вдоль оси фрезы.

Значение  $s_\alpha$  по гелисе  $h$  составляет  $s_\alpha = \frac{s_x}{p_x} \cdot 2\pi$ ; по гелисе  $h^*$  окружной шаг  $s_\alpha^* = 2\pi - s_\alpha$ .

По параметрам  $v, H_{\kappa}, r_{\kappa}, d_a, r$  строим (БС, поз. 3, рис. 4, б) контур  $F$  стружечной канавки и определяем центральный его угол  $v^*$ .



Параметры фрезы

1	Модуль	$m$
2	Направление витков	$twist$
3	Диаметр выступов зубьев	$d_a$
4	Диаметр посадочного отверстия	$d_0$
5	Диаметр буртика	$d_1$
6	Длина фрезы	$L$
7	Длина буртика	$t$
8	Количество стружечных канавок	$z_0$
9	Высота зуба	$h_0$
10	Высота головки зуба	$h_a$
11	Радиус закругления головки	$r_a$
12	Радиус закругления впадины	$r_f$
13	Шаг в осевом сечении	$p_x$
14	Шаг в нормальном сечении	$p_n$
15	Ширина головки в нормальном сечении	$s_n$
16	Угол наклона боковой стороны зуба в нормальном сечении	$\alpha_n$
17	Вид канавки (винтовая, прямая)	$wint$
18	Первый “затылок”	$K_1$
19	Доля шлифованной части зуба	$k_{ш}$
20	Количество заходов (витков)	$n_b$
21	Передний угол зуба	$\gamma$
22	Второй “затылок”*	$K_2$
23	Угол стружечной канавки*	$\nu$
24	Радиус стружечной канавки*	$r_k$
25	Высота стружечной канавки*	$H_k$

$z_1 = \text{fix} \left( \frac{L^* - 2 \cdot s_1 - s_2}{s_x^*} \right)$ , здесь  $\text{fix}$  – целая часть;  
 $L^* = L - 2t$ ;  $s_3 = 0.5 \cdot (L^* - z_1 \cdot s_{x1} - 2s_1 - s_2)$ ;  
 $x_A = 0.5 \cdot L^* - s_1 - s_2 - s_3$ .

Задаем множество точек  $A'$ , расположенных на гелисе  $h^*$  (BC, поз. 5, рис. 4, б–д). Точки размещаются с осевым шагом  $s_{x1} = \frac{s_x}{n}$  и окружным шагом  $s_{\alpha 1} = \frac{s_a^*}{n}$ . Здесь  $n = 3 \dots 10$  – количество точек на интервале  $s_x$  задается (BC, поз. б) в соответствии с требуемой точностью модели.

Формируем объем  $V_K$  стружечной канавки (BC, поз. 5). Для этого контур  $F$  устанавливаем (рис. 4, з) в точках  $A'$  так, чтобы в каждой из них плоскость контура  $F \perp h^*$  и точка  $C$  перемещалась по оси фрезы  $X$ :  $A = A', F \perp X, C \subset X, \angle(F, X) = 90 - \tau$ . В этом случае поверхность, образуемая перемещением, образует прямой геликоид [4, 9]. По массиву контуров  $F$  (рис. 4, д), как по сечениям (Loft), строим  $V_K$  (рис. 4, е).

Вращением контура  $F_1$  (рис. 4, в) создаем цилиндрическую заготовку фрезы, затем строим круговой массив объемом  $V_K$  и вычитаем этот массив из заготовки (BC, поз. 10–12, см. рис. 2, а, б).

Боковую поверхность зубьев (BC, поз. 7, 8) воспроизводим в два этапа: строим впадины между зубьями и закругляем вершины зубьев. Объемы впадин и закруглений получаем перемещением

Определяем (BC, поз. 4) координату  $x_A$  базовой точки  $A(x_A, 0, r)$  относительно которой выполняются все последующие построения. Значение  $x_A$  находим (рис. 4, в) из условия размещения на длине рабочей части фрезы  $L^*$  максимального количества полных зубьев  $z_1$ , а также из условия, что первый (поз. 1) и последний (поз. 2) полные зубья должны располагаться на одинаковом расстоянии  $s_3$  от торцов фрезы. Расчет выполняется проецированием зубьев на ось фрезы, где  $s_1$  – проекция основания зуба в его нормальном сечении (поз. 3),  $s_2$  – проекция боковой стороны зуба. В результате расчета получаем значения  $x_A$  и  $z_1$ :

$$s_1 = \frac{(h_0 - h_a) \cdot \text{tg} \alpha_n + 0.5 \cdot s_n}{\cos \tau}, \quad \alpha = \frac{2\pi}{z_0};$$

$$s_2 = (\alpha - \nu^*) \cdot r \cdot \text{tg} \tau; \quad s_{x1} = \frac{s_x}{z_0}$$

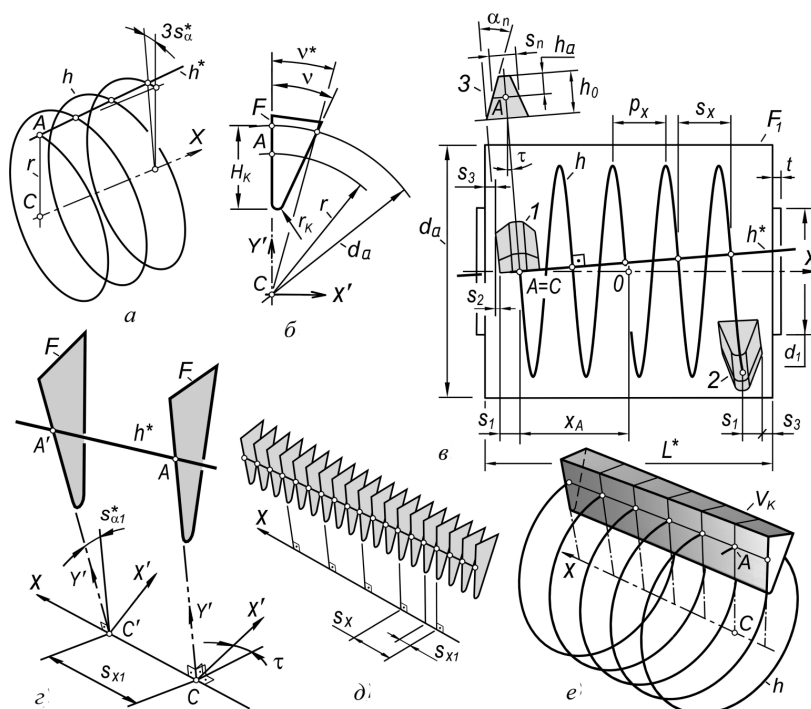


Рис. 4. Расчет и построение стружечной канавки

контуров нормального сечения впадин  $F_2$  и вершин  $F_3$  (рис. 5, а) по двум траекториям затылований. Для  $F_2$  ширина  $s_n^* = p_n - s_n$ . Траектории затылований – конические гелисы  $h'_1$  (рис. 5, б, з) и  $h'_2$  (рис. 5, в).

Для траектории  $h'_1$  (рис. 5, б) по значению  $K_1$  находим точку 1. Определяем угол сектора первого затылования  $\mu = k_{ш} \cdot (\alpha - v^*)$ . Решаем задачу о пересечении гелисы  $h_1(C, B, 1)$  с отрезком  $b$  и находим точку 3. Масштабируем точку 3 относительно

точки  $C$  с коэффициентом  $k_r = \frac{[AC]}{[BC]} = \frac{2r}{d_a}$  и получаем точку  $E$ . Сегмент  $AE$  является траекторией 1-го затылования. Шаг размещения контуров по траектории  $AE$  содержит окружную  $p_{\alpha}$ , осевую  $p_{x1}$  и радиальную  $p_r$  составляющие. Они определяются в зависимости от требуемой точности модели, задаваемой количеством  $n$  контуров на участке траектории:

$$p_{\alpha 1} = \frac{\mu}{n}; p_{x1} = \frac{\mu}{2\pi n} \cdot p_x; p_{r1} = \frac{K_1 \cdot k_r}{n}$$

Для траектории  $h'_2$  (рис. 5, в) находим  $k = \frac{\mu}{\alpha} \cdot K_2$  как долю затылка  $K_2$  относительно точки 3. Находим точки 4 и 5 гелисы  $h_2$ . После масштабирования точки 5 получаем точку  $D$  гелисы  $h'_2$ . Сектор  $ED$  является траекторией 2-го затылования с параметрами шага перемещения контура:

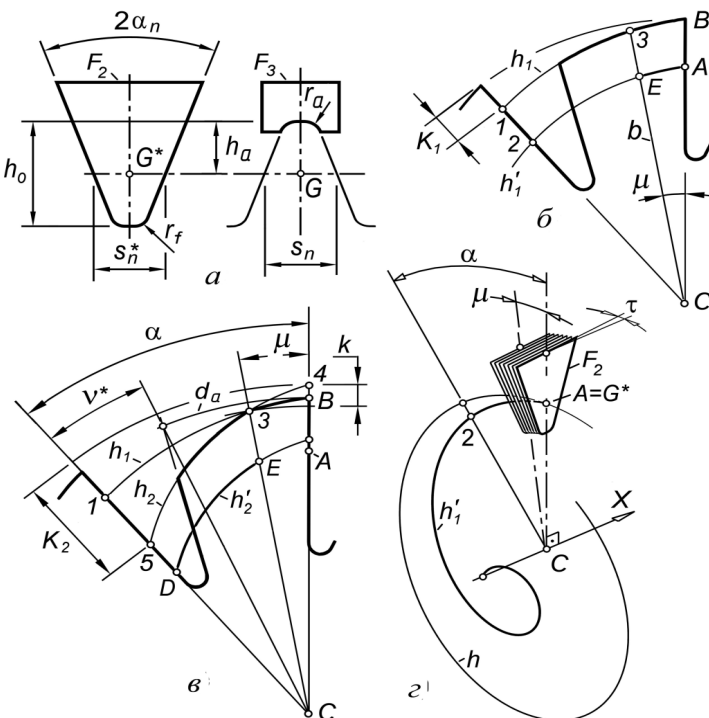


Рис. 5. Расчет и построение объемов затылований

$$\sigma = \alpha - \mu; p_{\alpha 2} = \frac{\sigma}{n}; p_{x2} = \frac{\sigma}{2\pi n} \cdot p_x; p_{r2} = \frac{K_2 \cdot k_r}{n}$$

Контур  $F_2, F_3$  своей базовой точкой  $G$  или  $G'$  совмещаются с текущей точкой траектории, ось контура перпендикулярна оси фрезы  $X$ , плоскость контура первоначально задается как  $(G, X)$  или  $(G', X)$ , затем поворачивается вокруг оси контура на угол  $\tau$ . В итоге контуры устанавливаются перпендикулярно траекториям, что соответствует конволютному затылованию.

Создаем ( $BC$ , поз. 13) четыре единичных объема затылования (поз. 1–4, см. рис. 2, в). Например, объем 1 образован перемещением контура впадины  $F_2$  по траектории  $AE$  гелисы  $h'_1$ . Объемы впадин 1, 2 необходимо после их построения сместить вдоль траектории стружечной канавки  $h^*$ , придав точке  $G'$  осевое  $0.5 \cdot s_x$  и окружное  $0.5 \cdot s_{\alpha}^*$  перемещения.

Перемещая объемы 1...4 с осевым шагом  $s_{x1}$  и окружным шагом  $\frac{s_{\alpha}}{n}$ , создаем массив ( $BC$ , поз. 14, см. рис. 2, е). Размер массива задаем как  $z_1 + 2 \cdot z_0$ .

Притупление неполных зубьев (витков), образующихся по торцам фрезы (поз. 1...5, рис. 6, а), должно обеспечить толщину этих зубьев не менее  $\delta = 0.5m$  по всей длине зуба. Если это условие не выполняется, то зуб срезают полностью. Поперечное сечение неполных зубьев, например сечение плоскостью, проходящей через ось фрезы  $X$  и точку  $U$  (рис. 6, а, б), выявляет в верхней части зуба недопустимую острую кромку.

Алгоритм подрезки ( $BC$ , поз. 9, 16) воспроизводит перемещение плоского резца, срезающего острую кромку зуба по траекториям затылований (см. рис. 5, з...е). Первоначально подрезка выполняется по траектории  $h'_1$ . В каждой узловой точке траектории рассматривается (рис. 6, в) контур полного зуба  $F_4$ . Определяется расстояние  $b$  от оси контура до плоскости торца фрезы. Из условия  $m' \parallel m$  находится высота зуба  $h_s$  в текущей точке траектории. Формируются прямоугольные контуры  $F_5$  с переменным уровнем  $h_s$ . По контурам  $F_5$  создаются объемы  $V_{s1} \dots V_{s5}$  (рис. 6, з), которые вычитаются из объема фрезы. Так же производится вторая подрезка по траектории  $h'_2$ .

Если в одном из сечений зуба  $b = b$  и  $h_s = 0$ , то зуб срезается полностью. При  $b = b''$  подрезка в этом сечении не производится. Так, объемы  $V_{s1}, V_{s2}$  срезают зуб полностью (поз. 1, 2, рис. 6, д). Зубья поз. 3, 4 равно-

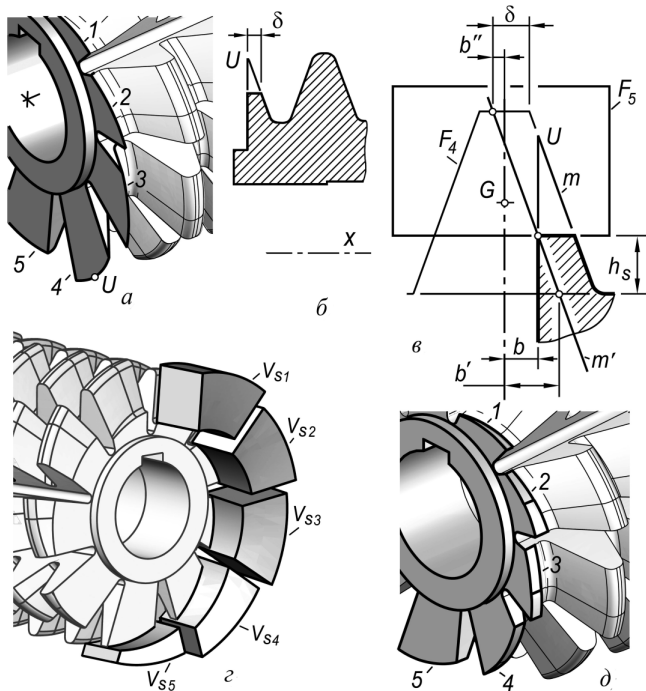


Рис. 6. Подрезка неполных зубьев

мерно подрезаны по всей длине на толщину  $\delta$ . Зуб поз. 5 срезан частично лишь там, где его толщина была менее допустимой.

**Геометрическая точность модели** определяется точностью алгоритма ее построения и точностью реализации алгоритма графическим пакетом. Разработанный алгоритм воспроизводит технологию изготовления фрезы, без каких-либо допущений. Операции, составляющие алгоритм, реализуются в пакете AutoCAD с погрешностью  $10^{-6} \dots 10^{-8}$ . Исключение составляет операция создания объекта по сечениям (так называемое “лофтирование”), погрешность которой зависит от количества сечений. Программная реализация модели позволяет неограниченно увеличивать количество сечений  $n$ . При  $n \geq 30 \dots 40$  погрешность этой операции снижается до  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ .

**Тестирование модели** показало, что при соответствующем задании контура впадины  $F_2$  (см. рис. 5, а) воспроизводятся фрезы со всевозможным модифицированным или эвольвентным профилем [1, стр. 428]. Если при размещении контуров не выполнять поворот их плоскости на угол  $\tau$  (см. рис. 4, з, 5, з), то получаем Архимедово затылование и прямолинейную стружечную канавку. Переопределяя профиль для последовательно расположенных зубьев, получаем фрезы с различной схемой резания [9]. Программная реализация позволяет отразить и технологические особенности изготовления фрез различными производителями.

### Результаты моделирования и обсуждение

Возможности программы показаны на примере трех фрез. Модель фрезы № 2510-4001 [4] (рис. 7, а) имеет 240 полных зубьев. Построение такой модели длится 10...15 мин и требует предельных ресурсов компьютера. Модель (рис. 7, б) – многозаходная фреза ( $n_B = 4$ , левозаходная). Модель (рис. 7, в) создана для фрезы с повышенным значением переднего угла  $\gamma = 15$ .

**Оценка точности фрезы** на основе полученной модели производится по алгоритму (рис. 8). Задаем базовую точку, в которой совмещаем цилиндрические системы координат фрезы и модели, например, точку  $D$  режущей кромки. Средствами контактно-измерительной машины (КИМ) определяем расстояние  $R$  от точки  $D$  до оси фрезы. Находим ответную точку  $D'$  модели на пересечении цилиндра радиуса  $R$ , с режущей кромкой модели.

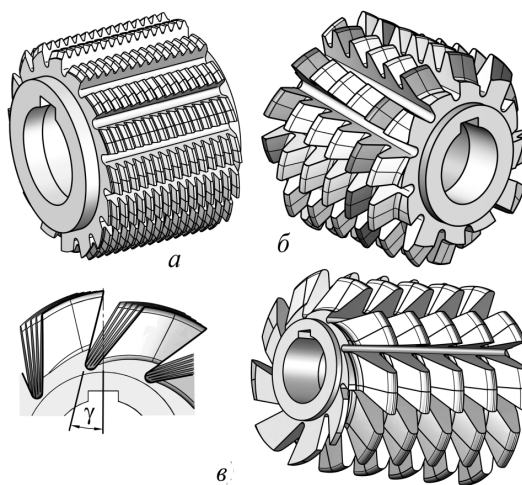


Рис. 7. Варианты фрез, воспроизводимые моделью

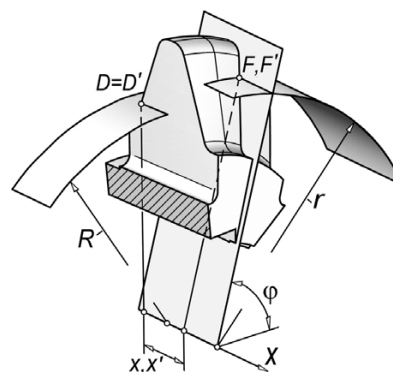


Рис. 8. Схема измерения погрешности

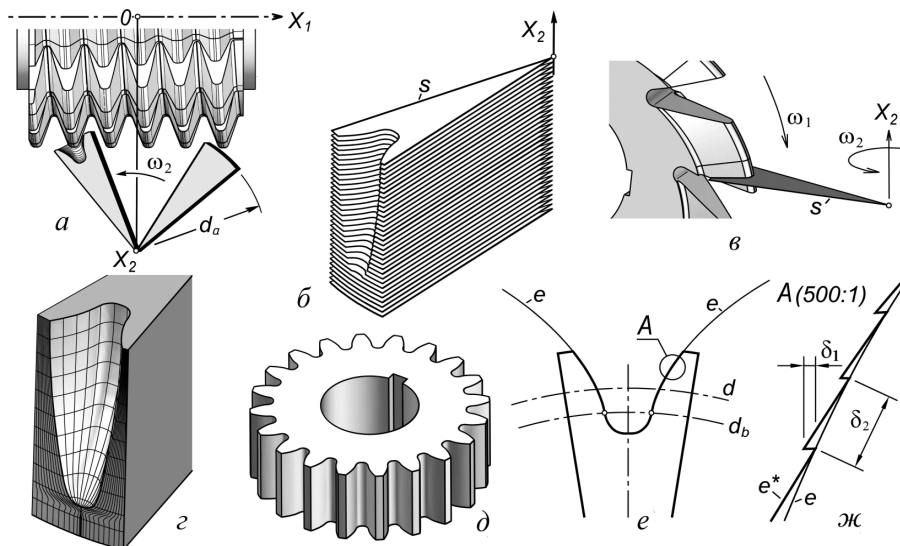


Рис. 9. Модель фрезерования

Пусть требуется оценить точность фрезы в некоторой точке  $F$ . Средствами КИМ определяем цилиндрические координаты точки  $F$  ( $r, \varphi, x$ ). В модели на пересечении цилиндра радиуса  $r$ , радиальной плоскости  $\varphi$  находим точку  $F'$  и определяем ее осевую координату  $x'$ . Значение  $del = x - x'$  является погрешностью формы фрезы в точке  $F$ .

**Исследование геометрии** нарезаемых зубчатых колес. Создаем сектор одной впадины (рис. 9, а). Сектор составлен из пакета тонких слоев (рис. 9, б). Фреза и сектор приведены в положение и согласованное дискретное вращение согласно кинематике зацепления [1, стр. 424-427]. В каждый момент вращения определяем сечение зубьев фрезы плоскостью слоя (рис. 9, в) и вычитаем сечения из контура этого слоя. В итоге для каждого слоя  $s$  воспроизводится процесс обкатки.

После выхода сектора из зацепления по слоям как по осевым сечениям колеса создается непрерывная поверхность впадины. Это может быть переходная (рис. 8, з) или завершающая форма зубчатого колеса (рис. 9, д).

Точность модели фрезерования оценивали по отклонению контура впадины от эвольвенты  $e$  (рис. 8, е), построенной для основной окружности колеса  $d_b$  [1, стр. 387]. Дискретность модели, задаваемая количеством шагов  $n$  на один оборот фрезы, приводит к “пилообразной” форме контура впадины  $e^*$  (рис. 9, ж). При  $n = (1...2) \cdot 10^3$  погрешность характеризуется значениями  $\delta_1 = (2...5) \cdot 10^{-3}$  и  $\delta_2 \approx 100 \cdot \delta_1$ .

### Выводы

Предложенный алгоритм и программа его реализации позволяют создавать реалистичные компьютерные высокоточные модели затылованных фрез всех типоразмеров и разновидностей.

Погрешность построения моделей не превышает  $10^{-5}$ . В сочетании с возможностью проведения геометрических измерений это позволяет рассматривать созданную и аналогичные ей модели как перспективную разработку по созданию высокоточных шаблонов для контроля и изготовления деталей сложной формы.

### Список литературы

1. Хейфец А.Л., Логиновский А.Н., Буторина И.В., Васильева В.Н. Инженерная 3d-компьютерная графика. – М.: Изд-во Юрайт, 2012. – 464 с.
2. Сурков И.В. Курочкин А.С., Красикова О.С. Координатные измерения геометрических параметров режущих инструментов на этапах изготовления и эксплуатации // Вестник ЮУрГУ. Серия “Машиностроение”. – 2010. – Вып. 16. – № 29(205). – С. 76–84.
3. Производство координатно-измерительных машин ООО «Лапик»: <http://www.lapic.ru/>
4. ГОСТ 9324-80. Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем.
5. ГОСТ 10331-81. Фрезы червячные мелко модульные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем.
6. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз. – 1963. – 952 с.
7. Щекин А., Митин Э., Сульдин С. Автоматизация проектирования червячных зуборезных фрез в системе КОМПАС // САПР и графика. – 2011. – № 12. – С. 101–104.
8. Борисенко О., Музычук Ю., Сытник В. Проектирование червячных фрез в среде КОМПАС-ГРАФИК // САПР и графика. – 2002. – № 6.
9. Токарев В.В., Г.Г. Скребнев, А.Т. Нарожных и др. Червячные зуборезные фрезы. – Волгоград: ВолгГТУ, 1998. – 136 с.

Obrabotka metallov  
N 3 (60), July–September 2013, Pages 47-53

### 3D model of a milling cutter

A.L. Kheyfets

South Ural State University, Lenin avenue, 76,  
Chelyabinsk, 454080, Russia  
E-mail: heifets@yandex.ru

#### Abstract

An algorithm for constructing geometrically accurate realistic computer 3d model of a form-relieved milling cutter is developed in the article. This model is used as a computer sample to check accuracy of milling cutter production. Algorithm simulates technological process of milling cutter production. The model gives possibility to build samples for all standard form-relieved milling cutters at variation of 25-30 parameters as well as to show technological features of milling cutters production. It simulates the known surface forms of a cutoff. It helps to analyze geometrical properties of milling cutters. Model inaccuracy is less than  $10^{-5}$ . The example of analysis of a cavity form of a milled gear wheel is given. The model is performed with AutoLisp with respect to AutoCAD package.

Keywords: 3d computer geometrical simulation, form-relieved milling cutters, parameters check, computer sample, programming, AutoCAD, AutoLisp.

#### References

1. Khejfec A.L., Loginovskij A.N., Butorina I.V., Vasil'eva V.N. *Inzhenernaja 3d-komp'yuternaja grafika* [Engineering 3d-computer graphics]. Uchebnoe posobie dlja bakalavrov [Tutorial for bachelors]. Moscow, Yurajt, 2012. 464 p.
2. Surkov I.V. Kurochkin A.S., Krasikova O.S. *Vestnik South Ural State University. Serija Mashinostroenie*, 2010, Issue 16, no. 29(205), pp. 76–84.
3. *Proizvodstvo koordinatno-izmeritel'nyh mashin OOO "Lapic"* (Design and production coordinate measuring machines and measuring equipment Lopic LLC) Available at: <http://www.lapic.ru/> (accessed 15 June 2013)
4. *GOST 9324-80. Frezy chervjachnye chistovye odnozahodnye dlja cilindricheskih zubchatyh koles s jevol'ventnym profilem* [State Standard 9324-80. Finishing single-start hobbing cutters for cylindrical involute gears], Moscow, Standartinform Publ., 1988. 51 p.
5. *GOST 10331-81. Frezy chervjachnye melkomodul'nye dlja cilindricheskih zubchatyh koles s jevol'ventnym profilem* [State Standard 10331-81. Fine module hobs for cylindrical involute gears], Moscow, Standartinform Publ., 1981. 27 p.
6. Semenchenko I.I., Matjushin V.M., Saharov G.N. *Proektirovanie metallovezhushhih instrumentov* (Design of metal-cutting tools). Moscow, Mashgiz, 1963. 952 p.
7. Shhjokin A., Mitin Je., Sul'din S. *Avtomatizacija proektirovanija chervjachnyh zuboreznyh frez v sisteme KOMPAS* [Computer-aided design of worm gear cutting cutters in the COMPAS]. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2011, no. 12, pp. 101-104.
8. Borisenko O., Muzychuk Yu., Sytnik V. *Proektirovanie chervjachnyh frez v srede KOMPAS-GRAFIK* [Designing hobs among KOMPAS-Graphic]. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2002, no. 6.
9. Tokarev V.V., Skrebnev G.G., Narozhnyh A.T. and al. *Chervjachnye zuboreznye frezy* (Hobbing cutters). Volgograd, Volgograd State Technical University, 1998. 136 p.

# О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЯЖЕЛЫХ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 10 марта 2013 г.

Рецензирование 23 июля 2013 г.

Принята к печати 25 августа 2013 г.

Атапин В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: metal\_working@mail.ru

Представлены результаты по применению интегрированной работы метода конечных элементов и методов оптимизации при проектировании тяжелых многоцелевых станков с массой несколько сотен тонн. Обоснован выбор массы несущих конструкций этих станков в качестве целевой функции в задаче оптимизации. Ограничения в задаче оптимального проектирования несущих конструкций формулируются на основе анализа возможных видов нарушения их работоспособности (прочность, жесткость, устойчивость, резонансные явления). Для решения задачи оптимизации применяется метод штрафных функций. Решение задачи получается безусловной минимизацией целевой функции методом Давидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП). В свою очередь, метод ДФП использует при одномерном поиске кубическую интерполяцию. Используется авторское программное обеспечение, эффективность которого подтверждена при решении известных в литературе функций, имеющих точное решение. Рассмотрена оптимизация паллеты несущей системы тяжелого поворотного-подвижного стола, входящего в состав многоцелевого станка массой 380 т, для случаев детерминированной и вероятностной моделей. В результате оптимального проектирования в случае детерминированной модели масса паллеты снижена на 35,5 % по сравнению с серийным вариантом. Оценка влияния ограничений задачи оптимизации на переменные проектирования подтверждает значимость критерия жесткости по отношению к другим критериям. Расчет по вероятностной модели позволяет уменьшить массу конструкции на 27 % в сравнении с детерминированной моделью при сохранении работоспособности. Учет собственной жесткости обрабатываемой детали на основе представительской корпусной детали минимальной жесткости приводит к снижению массы паллеты на 22,3 % в сравнении с детерминированной моделью.

**Ключевые слова:** многоцелевой станок, несущие конструкции, проектирование, метод конечных элементов, методы оптимизации.

## Введение

Основные параметры качества станка, как известно, закладываются на стадии проектирования. Рассмотрим сравнительный анализ технических характеристик ряда многоцелевых станков сверлильно-фрезерно-расточной группы, которые в той или иной мере отражают качество их проектирования. На рис. 1 показаны результаты анализа технических характеристик станков, приведенных в [1], которые показывают, что при практически одинаковых технических характеристиках станки существенно различаются по массе. На рис. 2 приведены результаты анализа характеристик двух отечественных станков – ИР1400ПМ1Ф4 (Ивановский завод тяжелого станкостроения) и ЛР500ПМФ4М (Ленинградский станкостроительный завод им. Я.М. Свердлова) [1]. Видно, что станок ЛР500ПМФ4М, обладая более высокими техническими характеристиками по сравнению со

станком ИР1400ПМ1Ф4, имеет в 2,8 раза меньшую массу. Таким образом, проведенный анализ технических характеристик многоцелевых станков показал, что станки одного класса точности имеют существенное различие по массе.

Несущие конструкции (базовые детали) по массе составляют 80–85 % от массы станка. Следовательно, технико-экономические показатели станка в большой мере определяются качеством проектирования несущих конструкций. Проектирование несущих конструкций (стойка, корпус шпиндельной бабки, станина и др.) связано с поиском компромиссного решения между противоречивыми требованиями [2]: создание конструкций жестких, но имеющих малую массу; простых по конфигурации, но обеспечивающих высокую точность; дающих экономию металла, но учитывающих возможности литейной технологии при проектировании литых конструкций и возможности технологии сварных конструкций.

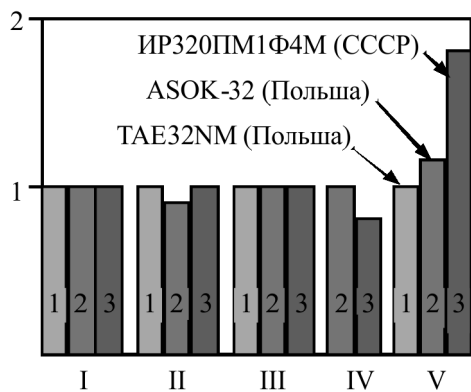


Рис. 1. Показатели (в условных единицах) станков по отношению к соответствующим показателям станка TAE32NM [1]:

I – ширина стола; II – частота вращения шпинделя; III – перемещение шпиндельной бабки; IV – перемещение стойки; V – масса станка

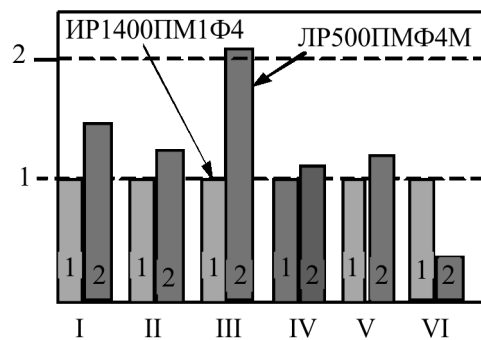


Рис. 2. Показатели (в условных единицах) станка LP500PMΦ4M по отношению к показателям станка IP1400PM1Φ4 [1]:

I – ширина стола; II – частота вращения шпинделя; III – перемещение шпиндельной бабки; IV – продольное перемещение стола; V – поперечное перемещение стола; VI – масса станка

За последние десятилетия в станкостроении при проектировании несущих конструкций широко применяется метод конечных элементов (МКЭ). В станкостроении МКЭ активно используется для статического и динамического анализа конструкций заданной геометрии [3–7]. Картины деформированного состояния, полученные расчетом МКЭ и экспериментом, качественно совпадают, количественные расхождения не превышают 16 % [5]. Однако в своей настоящей форме данный анализ используется лишь для идентификации технической задачи, но мало помогает конструктору в достижении действительно оптимальной конструкции, а также в определении способов модификации проекта с целью совершенствования рассматриваемых характеристик [8]. Лучшая конструкция выбирается на основе просчета МКЭ нескольких возможных вариантов. Однако в этом случае количество рассматриваемых вариантов ограничивается возможностью конструктора и значительно меньше общего числа вариантов, отвечающих всем сочетаниям варьируемых параметров. Поэтому вариант, признанный лучшим, является таковым не в абсолютном смысле, а лишь по сравнению с небольшим числом других рассмотренных вариантов.

Перспективные шаги в направлении рационального проектирования несущих конструкций станков связаны с использованием МКЭ в сочетании с методами одно- и многокритериальной оптимизации. Отметим следующие постановки задач оптимизации, встречающиеся в практике проектирования станков.

1. Минимизируется масса конструкции (станины токарного и фрезерного станков, траверса и колонна радиально-сверлильного станка) при выполнении ограничений по прочности, жесткости, низшим частотам собственных колебаний и устойчивости авто-

колебаний [9,10]. Расчетные схемы конструкций формируются по схеме МКЭ с использованием балочных элементов, задача оптимизации решается с помощью метода штрафных функций. При решении задач данного типа достигается снижение массы до 20 %.

2. Минимизируется стоимость изготовления (включается стоимость материала, сварки и механической обработки) несущих конструкций при ограничениях на точность и производительность механической обработки и на локальные деформации элементов конструкции [11]. В работе предложен многоэтапный метод проектирования, использующий упрощенные модели несущей системы (балочные элементы коробчатого типа) и включающий три этапа: упрощение конструкции, оптимизация и реализация. На последнем этапе определяются реальные формы и размеры несущих конструкций и методы их механической обработки. При решении задач оптимизации используется метод штрафных функций.

3. В работах [12, 13] рассматривается подход к параметрической оптимизации несущих конструкций на основе некоторого обобщенного критерия с весовыми коэффициентами. Стойка моделируется стержнем коробчатого прямоугольного поперечного сечения без перегородок. Основная трудность в применении данного подхода заключается в сложности определения весовых коэффициентов.

4. При решении задач многокритериальной оптимизации успешно применяется метод ЛП-поиск [14]. Однако применение этого метода сопровождается значительными затратами машинного времени. В работе [15] для оптимизации несущих конструкций одно-стоечного токарно-карусельного станка использован анализ чувствительности; здесь получены варианты стойки с уменьшенной массой (на 10 %) и податливостью в зоне обработки (более чем в два раза).



Подводя итог, можно отметить, что в станкостроении направление, связанное с интегрированной работой МКЭ и методов оптимизации, требует дополнительных исследований, особенно для тяжелых и уникальных станков, отличающихся большими габаритами и массой. Это связано, во-первых, со сложностью задачи – большая размерность системы, экспоненциальный рост объема вычислений при увеличении числа переменных проектирования, отсутствие объективной достоверности значений весовых коэффициентов в целевой функции, невозможность использования простых балочных конечных элементов при моделировании конструкций. Во-вторых, изменение в процессе оптимального поиска переменных проектирования (как правило, это геометрические параметры конструкции) требует, чтобы дискретизация конструкции была проделана заново на каждом шаге. При этом МКЭ требует полной смены сетки первоначальной области для новой развивающейся области, что существенно затрудняет оптимальный поиск.

За последние десятилетия широкое распространение получили многоцелевые станки (МС) колонкового типа (рис. 3) вследствие технологической способности обрабатывать деталь со всех сторон. Поворот детали в ранних моделях станков осуществлялся цеховым краном, при этом на установку детали для обработки с одной стороны требовалось 0,5...3 ч. В большинстве случаев обработка поверхностей одной стороны детали выполняется за время, меньшее длительности смены, что приводит к насыщенности крановых операций и снижению производительности. Применение поворотных столов позволяет устранить указанные недостатки. Деталь устанавливается на поворотную часть (паллету) стола и необходимая точность ее положения

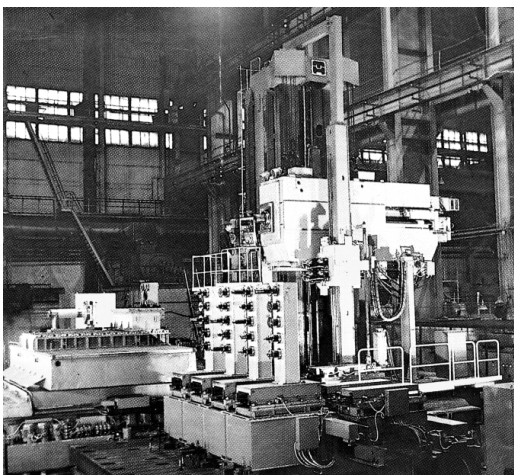


Рис. 3. Тяжелый многоцелевой станок сверлильно-фрезерно-расточной группы с поворотным-подвижным столом для обработки корпусных деталей массой до 200 т

относительно станка обеспечивается разворотом поворотной части.

Целью настоящей работы является рассмотрение перспективных разработок по совершенствованию оптимального проектирования несущих конструкций тяжелого МС для обработки корпусных деталей массой до 200 т (рис. 3). Масса серийного станка равна 380 т, длина, ширина, высота соответственно 21,9×16,5×10,9 м. Структурно МС имеет две не связанные между собой части – собственно станок и поворотный-подвижный стол, размещаемые на едином фундаменте. Это дает возможность на начальном этапе проектирования рассматривать станок и стол раздельно.

## 1. Теория и методы

### 1.1. Выбор целевой функции

Основной вопрос при постановке задач оптимизации – выбор целевой функции. В качестве целевой функции могут быть выбраны технико-экономические показатели станка: его производительность, точность обработки, масса, экономические показатели и др. Данные показатели являются конфликтными, так как улучшение одних показателей приводит к ухудшению других. Так, увеличение массы и, следовательно, повышение стоимости могут быть вызваны увеличением жесткости конструкции для получения большей точности и увеличения производительности механической обработки. Задачи такого типа, в которых качество конструкции требуется оценивать и улучшать по нескольким показателям одновременно, являются задачами многокритериальной оптимизации. Однако ранее было показано, что в литературе [9–11] имеются примеры успешного применения однокритериальной оптимизации при проектировании станков. В этой связи исследуем возможные варианты целевой функции на основе анализа технико-экономических показателей станков применительно к проектированию их несущих конструкций.

1. *Производительность механической обработки* чаще всего оценивают объемом металла, снимаемого в единицу времени цикла использования инструмента (объемная производительность):

$$П = V / (T + \tau_{см}), \quad (1)$$

где  $V$  – объем припуска, снятого за цикл использования инструмента ( $\text{мм}^3$ );  $T$  – период стойкости инструмента;  $\tau_{см}$  – время смены инструмента.

При проектировании несущих конструкций станка, т. е. силовых конструкций, целесообразно использовать  $П$ , положив  $\tau_{см} = 0$ , так как время смены ин-

струмента непосредственного влияния на качество силовой конструкции не оказывает. Тогда критерий объемной производительности (1) вырождается в критерий

$$\Pi_1 = bts, \quad (2)$$

где  $b$ ,  $t$  – ширина и глубина резания;  $s$  – подача. Оптимизация несущих конструкций в соответствии с критерием (2) связана с достижением максимально возможной подачи, которая непосредственно связана с силами резания. Например, окружная сила резания при фрезеровании определяется по формуле [19]

$$F_z = \frac{10C_p t^x s_z^y b^u z}{D^q n^w} K_{тр},$$

где  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $q$ ,  $w$  – показатели, берущиеся из справочника;  $t$  – глубина резания, мм;  $s_z$  – подача на зуб, мм;  $b$  – ширина обработки, мм;  $z$  – число зубьев фрезы;  $D$  – диаметр фрезы, мм;  $n$  – частота вращения инструмента, об/мин;  $K_{тр}$  – коэффициент.

Следовательно, критерий (2) участвует в проектировании несущих конструкций станка через силы резания, которые являются для них внешней нагрузкой.

2. *Точность обработки* изделий в основном определяется точностью станка. Все ошибки станка, влияющие на погрешность обработки, условно разделяют на несколько групп [20], из которых при оптимальном проектировании несущих конструкций интерес представляют следующие:

- *жесткость* станка несущих конструкций определяется отношением силы  $F$  к соответствующей упругой деформации  $\delta$  в том же направлении

$$j = F / \delta, \quad (3)$$

оптимизация несущих конструкций в соответствии с критерием (3) связана с достижением максимально возможной жесткости;

- *виброустойчивость* (динамическое качество) станка определяет его способность сопротивляться возникновению колебаний, снижающих точность и производительность станка; оптимизация несущих конструкций здесь связана с достижением максимально возможной виброустойчивости станка, что, в свою очередь, возможно при варьировании собственной жесткости элементов конструкции, т. е. существует связь с критерием (3).

3. *Масса* (или *вес*) является одной из основных характеристик конструкции, поэтому в большинстве работ по оптимальному проектированию этот показатель либо рассматривается в качестве целевой функции, либо фигурирует среди других принимаемых ограничений. Масса конструкции характеризует как

расход материалов, необходимых для ее создания, так и некоторые эксплуатационные свойства. Кроме того, затраты на материал, изготовление и транспортировку зависят также от массы конструкции.

В настоящей работе рассматривается масса конструкции, под которой понимается сумма масс, определенных на всей области  $V$ , состоящей из  $n$  элементов ( $\rho_i$  – плотность материала):

$$M = \sum_{i=1}^n m_i, \quad m_i = \rho_i \int_V dV. \quad (4)$$

Оптимальное проектирование несущих конструкций станка по критерию (4) связано с достижением минимально возможной массы конструкции. Для обеспечения последнего необходимо решить задачу об оптимальном распределении материала по конструкции.

4. *Условия прочности*, как и условия жесткости конструкции, относятся к основным ограничениям в оптимальном проектировании. Критерий прочности может быть записан в виде функции главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ :

$$\sigma_{\text{экр}}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq [\sigma], \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{экр}}$  – эквивалентное напряжение;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение.

С учетом критерия (5) наиболее часто решается задача минимизации массы конструкции при ограничении по прочности.

5. *Местная устойчивость*. При оптимальном проектировании тонкостенных конструкций, в частности несущих конструкций станка, возможно явление потери устойчивости на локальном участке деформируемой конструкции типа выпучивания. Задача устойчивости рассматривается в эйлеровой постановке и состоит в отыскании минимальной величины критического параметра внешнего воздействия  $\{F_{кр}^{(j)}\}$  на  $j$ -ю подконструкцию. Условие устойчивости записывается в форме

$$F_j \leq \min \{F_{кр}^{(j)}\}, \quad (6)$$

где  $F_j$  – параметр внешнего воздействия на  $j$ -ю подконструкцию.

При оптимальном проектировании конструкций наиболее часто решается задача минимизации массы при ограничении на местную устойчивость.

6. *Экономические показатели*. Такими показателями могут быть валовые капитальные затраты, прибыль, отношение затрат к прибыли, начальная стоимость (стоимость материала и изготовления) и др. Однако при выборе целевой функции следует иметь в виду то обстоятельство, что экономические показатели косвенно учитываются через другие критерии, например массу, производительность. Уменьшению, например стоимости изготовления станка, способ-

стует упрощение конструкции его элементов, являющееся следствием оптимального проектирования.

Из рассмотренных критериев в настоящей работе в качестве целевой функции принята масса конструкции (4). Остальные критерии вводятся в ограничения задачи. В пользу такого подхода говорит следующее:

- в работе рассматриваются вопросы проектирования тяжелых станков, масса которых составляет десятки и сотни тонн, при этом масса несущих конструкций достигает 80–85 % от массы станка;
- на все критерии, за исключением массы, можно назначить допускаемые значения (допускаемое напряжение, допускаемое перемещение и т. д.);
- проведенный ранее анализ технических характеристик серийных многоцелевых станков показал, что станки одной группы и одного класса точности существенно различаются по массе (до ~ 3 раз).

## 1.2. Математическая модель конструкции

Несущие конструкции МС представляют собой тонкостенные коробчатые структуры прямоугольной формы с ребрами жесткости, перегородками и т. д. Для моделирования геометрии такой конструкции на основе МКЭ используются пластинчатый четырехузловой и стержневой конечные элементы (КЭ). Математическая модель для оптимального проектирования такой конструкции записывается в следующем виде:

$$\text{минимизировать } \Psi_0 = \rho \left( \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{j=1}^m V_j \right) \quad (7)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \text{на перемещения} \quad & \psi_1 = 1 - \delta/[\delta] \geq 0, \\ \text{напряжения} \quad & \psi_2 = 1 - \sigma_{\text{экр}}/[\sigma] \geq 0, \\ \text{устойчивость} \quad & \psi_3 = 1 - n\sigma/\sigma_{\text{кр}} \geq 0, \\ \text{частоту} \quad & \psi_4 = p_1/[p_1] - 1 \geq 0 \\ \text{переменные} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{проектирования} \quad & \psi_5 = V_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, k, \\ & \psi_6 = V_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, m, \end{aligned}$$

где  $k$ ,  $m$  – число пластинчатых и стержневых КЭ;  $\rho$  – плотность материала;  $V$  – объем КЭ;  $\delta$ ,  $[\delta]$  – расчетная и допускаемая относительная деформация;  $\sigma_{\text{экр}}$ ,  $[\sigma]$  – эквивалентное и допускаемое напряжения;  $n$  – коэффициент запаса на устойчивость;  $\sigma$ ,  $\sigma_{\text{кр}}$  – сжимающее напряжение, действующее в плоскости КЭ, и критическое напряжение;  $p_1$ ,  $[p_1]$  – расчетное и допускаемое значение низшей (первой) собственной частоты.

Переменными проектирования являются толщина  $t_c$  стенки корпуса и толщина  $t_p$  ребра (при постоянной ширине). Габаритные размеры несущей конструкции (длина, ширина, высота) определяются техническим заданием и здесь не варьируются.

## 1.3. Методы оптимизации

Задача (7) относится к задаче оптимизации с ограничениями или задаче условной оптимизации. Для решения этой задачи в настоящей работе используется метод штрафных функций [16], в основе которого лежит преобразование условной задачи в задачу без ограничений. Преимущество такого подхода состоит в том, что поиск может осуществляться гораздо более простыми и хорошо разработанными методами безусловной оптимизации. Задача (7) решается методом штрафных функций в форме

$$\Phi = \Psi_0 / \Psi_0^H + r \sum_{i=1}^6 \frac{1}{\Psi_i}, \quad (8)$$

где  $\Psi_0^H$  – начальная масса несущей конструкции до оптимизации;  $r$  – малый положительный параметр. Решение задачи получено безусловной минимизацией функции (8) для убывающей последовательности значений параметра  $r$  методом Давидона–Флетчера–Пауэлла [16]. Согласно результатам численных экспериментов [16] три метода – Давидона–Флетчера–Пауэлла (ДФП), Бройдена–Флетчера–Шэнно (БФС) и прямого поиска Пауэлла показывают лучшие результаты в сравнении с другими методами. В настоящей работе используется авторское программное обеспечение, реализующее интегрированную работу МКЭ и методов оптимизации [20]. Для подтверждения адекватности выбранных методов оптимизации и их программной реализации далее приведены тестовые примеры и результаты расчетов.

1. При тестировании метод штрафных функций записывался в форме

$$\Phi(\mathbf{X}, r) = \Psi_0 + r \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{\Psi_j} \right),$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор переменных проектирования;  $\Psi_0$  – целевая функция;  $r$  – малый положительный параметр;  $\Psi_j$  – ограничения задачи. Итерационная процедура вычислительного метода штрафных функций на  $k$ -м шаге минимизирует функцию

$$\Phi(\mathbf{X}, r_k) = \Psi_0 + r_k \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{\Psi_j} \right)$$

методом Давидона–Флетчера–Пауэлла (ДФП). В свою очередь, метод ДФП использует при одномерном поиске кубическую интерполяцию. Для тестирования метода штрафных функций рассмотрена следующая задача [17], имеющая точное решение (табл. 1):

$$\begin{aligned} \text{минимизировать} \quad & \Psi_0 = (X_1 - 1)(X_1 - 2)(X_1 - 3) + X_3 \\ \text{при ограничениях} \quad & X_1 \geq 0, X_2 \geq 0, X_3 \geq 0, \\ & X_3^2 - X_1^2 - X_2^2 \geq 0, \\ & X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - 4 \geq 0, X_3 \leq 5. \end{aligned}$$



Таблица 1

Результаты тестирования метода штрафных функций (начальная точка  $X^{(0)} = [0,1; 2,0; 2,1]$ )

Метод	Число итераций	Значение $\psi_0$	Значения переменных		
			$X_1$	$X_2$	$X_3$
Точное решение (истинный минимум)	–	$-6 + \sqrt{2}$	0	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$
Решение [17]	48	-4,585752	1,619098E-06	1,414208	1,41423
Авторская программа	29	-4,585776	0,289638E-06	1,414223	1,41423

Преобразованная задача принимает следующий вид:

$$\varphi(\mathbf{X}, r) = \psi_0 + r \left[ \frac{1}{X_3^2 - X_1^2 - X_2^2} + \frac{1}{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - 4} + \frac{1}{5 - X_3} + \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} \right]$$

2. В табл. 2 приведены результаты тестирования метода Давидона–Флетчера–Пауэлла в сравнении с точным решением и решениями, приведенными в [16] (все методы используют кубическую интерполяцию при одномерном поиске) для функции Розенброка

$$\psi_0 = 100(X_2 - X_1^2)^2 + (1 - X_1)^2,$$

а в табл. 3 – для функции Пауэлла

$$\psi_0 = (X_1 + 10X_2)^2 + 5(X_3 - X_4)^2 + (X_2 - 2X_3)^4 + 10(X_1 - X_4)^4.$$

Тестирование методов оптимизации, применяемых в настоящей работе, показало, что разработанные автором вычислительные программы достаточно эффективны в работе.

## 2. Результаты и обсуждение

Рассмотрим вопросы оптимального проектирования на примере несущих конструкций тяжелого поворотно-подвижного стола (рис. 4). Частично предъявляемые повышенные требования (прочности, жесткости, виброустойчивости и других критериев работоспособности) к конструкции поворотных

Таблица 2

Результаты тестирования функции Розенброка (начальная точка  $X^{(0)} = [-1,2; 1,0]$ )

Метод	Значение $\psi_0$	Значения переменных		Количество вычислений $\psi_0$
		$X_1$	$X_2$	
Коши [16]	6,19E-9	–	–	10685
Флетчера-Ривса [16]	2,77E-7	–	–	273
ДФП [16]	4,30E-8	–	–	239
БФШ [16]	3,90E-9	–	–	204
ДФП (автор)	2,84E-9	1,0	1,0	99
Точное решение	0,0	1,0	1,0	-

Таблица 3

Результаты тестирования функции Пауэлла (начальная точка  $X^{(0)} = [3;-1;0;1]$ )

Метод	Значение $\psi_0$	Значения переменных			
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Точное решение	0,0	0	0	0	0
ДФП (автор)	2,27E-14 Итераций 29	1,62E-5	-1,62E-6	-1,65E-4	-1,65E-4

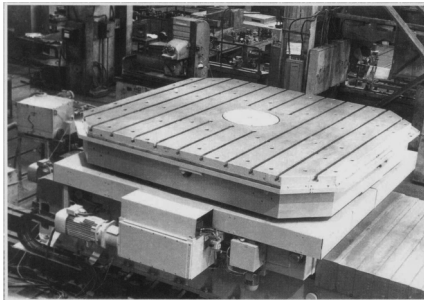


Рис. 4. Поворотно-подвижный стол

столов удовлетворяются конструктивными решениями, направленными на обеспечение симметрии схем нагружения, увеличение размеров опорных плоскостей, уменьшение расстояния между опорами, но в большей степени – за счет многократного увеличения моментов инерции поперечного сечения, т. е. габаритов и массы.

### 2.1. Постановка задачи

Изменение положения в пространстве любой точки обрабатываемой детали, установленной на поворотно-подвижном столе, в процессе ее переориентации в рабочей зоне зависит от жесткости стола и обрабатываемой детали, массы обрабатываемой детали и положения ее центра тяжести относительно оси поворота стола, величины и направления силы резания. Указанные параметры, кроме жесткости стола, являются исходными при проектировании: часть из них определяется номенклатурой обрабатываемых деталей, другие – характеристиками станка и режущего инструмента. Жесткость стола, зависящая от жесткости паллеты, корпуса саней и станины, необходимо обеспечить в процессе проектирования.

В компоновке стола реализованы такие решения несущей системы, при которых станина и сани под действием внешней нагрузки испытывают главным образом деформацию сжатия. Поэтому высота станины и саней назначается минимально допустимой по конструкторско-технологическим соображениям. Для паллеты стола характерно преобладание деформации изгиба. В связи с тем что перемещения при изгибе существенно больше перемещений при сжатии и, следовательно, жесткость несущей системы стола будет определяться в основном жесткостью паллеты, далее подробно рассматривается проектирование паллеты, как наиболее деформируемого элемента системы.

Серийная паллета представляет собой пространственную тонкостенную конструкцию прямоугольной формы ячеистой структуры с размерами  $L = 5,6$  м,  $B = 3,6$  м,  $H = 0,8$  м (рис. 5). По нижнему контуру паллеты расположены продольные и поперечные ребра прямоугольного поперечного сечения. Корпус паллеты опирается на направляющие саней

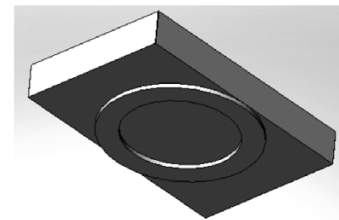
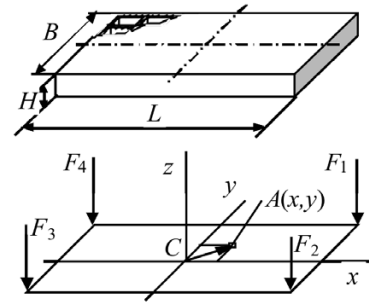


Рис. 5. Паллета, расчетная схема ее поверхности и опорная поверхность

кольцевого поперечного сечения (внешний диаметр 3,6 м). Основные размеры серийной паллеты получены в конструкторском бюро на основе технического расчета [22].

Расчетная схема паллеты строится на основе следующих положений.

Корпус паллеты моделируется пластинчатым прямоугольным и стержневым (ребра жесткости) конечными элементами. В процессе построения более мелкой сетки ребра моделируются пластинчатым КЭ.

Паллета опирается на жесткие круговые направляющие саней стола.

Расчетными нагрузками являются собственные веса паллеты (380 кН для серийной паллеты) и обрабатываемой детали (2 МН). Силы резания ввиду их малости по сравнению с указанной нагрузкой не учитываются; так, при чистовом торцовом фрезеровании наибольшая компонента силы резания составляет 3,0 кН.

Полагаем, что обрабатываемая деталь установлена на технологических базах, совпадающих с угловыми зонами паллеты. Внешняя нагрузка  $F$  от веса детали и паллеты в предельном случае характеризуется силами  $F_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ), приложенными в угловых точках паллеты (рис. 5). Распределение нагрузки от веса детали в угловых точках паллеты определяется по формуле, полученной на основе методов сопротивления материалов [22]:

$$F_i = (1/4)F [1 \pm x/(L/2) \pm y/(B/2)]. \quad (8)$$

В общем случае центр тяжести детали  $A$  (рис. 5) смещен в плоскости  $xu$  относительно оси поворота стола на  $1/20$  длины и  $1/30$  ширины паллеты; это – наибольшее значение эксцентриситета, установлен-

ное на основе анализа конфигураций встречающихся на практике крупногабаритных деталей.

### 2.2. Детерминированная модель

Координаты точки *A* приложения результирующей нагрузки в этом случае:  $x = L/20 = 0,28$  м,  $y = B/30 = 0,12$  м. Используя формулу (8), определяют силы  $F_1, \dots, F_4$ , приложенные в угловых точках паллеты.

*Расчет методом конечных элементов.* Результаты расчета жесткости паллеты методом конечных элементов приведены на рис. 6 и в табл. 4. Анализ результатов показывает, что применение более густой сетки уточняет расчеты, однако увеличение числа конечных элементов до 757 (почти в 4 раза) изменило результат лишь на 22 и 32 %. Это позволяет предварительные расчеты при сравнении вариантов конструкции проводить на более редкой сетке (существенно при использовании методов оптимизации вследствие итерационного характера этих методов). Наличие ребер по нижнему контуру паллеты повышает ее жесткость на 40 %. Максимальные напряжения не превышают 8 МПа. Наибольшая относительная деформация паллеты (757 КЭ) при неравномерном распределении нагрузки от веса обрабатываемой детали составляет (рис. 6)  $(0,249 - 0,181)/(5,6 \cdot 10^{-3}) = 1,2 \cdot 10^{-5}$ . Полученный результат меньше принятого критерия жесткости  $2 \cdot 10^{-5}$ . Паллета имеет повышенную жесткость и, следовательно, избыточную массу.

В результате численного эксперимента на основе МКЭ можно предложить следующий вариант конструкции (в скобках – параметры серийной конструкции):

Толщина, мм:		
верхняя плита	60	(60)
боковые стенки	30	(60)
внутренние перегородки	20	(50)
ребра	60	(60)
Вертикальное перемещение, мм:	0,427	(0,249)
Масса, т:	24,4	(38,12).

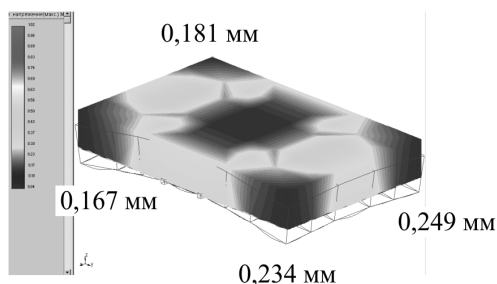


Рис. 6. Деформированное состояние паллеты при неравномерном приложении нагрузки от веса обрабатываемой детали

### Результаты расчета жесткости паллеты МКЭ

Число конечных элементов	Максимальные вертикальные перемещения, мм	
	нагрузка равномерная	нагрузка неравномерная
199	0,259	0,328
757	0,211	0,249
1044	0,208	–
117 (без ребер жесткости)	0,365	–

Таким образом, для заданной компоновки масса паллеты уменьшилась на 36 % по сравнению с массой серийной конструкции.

*Оптимальное проектирование.* Задача оптимального проектирования паллеты формулируется следующим образом:

минимизировать 
$$\Psi_0 = \rho \left( \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{j=1}^m V_j \right) \quad (9)$$

при ограничениях:

на перемещения  $\Psi_1 = 1 - \delta/[\delta] \geq 0,$   
 напряжения  $\Psi_2 = 1 - \sigma_{\text{эКВ}}/[\sigma] \geq 0,$   
 устойчивость  $\Psi_3 = 1 - n\sigma/\sigma_{\text{кр}} \geq 0,$   
 частоту  $\Psi_4 = p_1/[p_1] - 1 \geq 0$   
 переменные проектирования  $\Psi_5 = V_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, k,$   
 $\Psi_6 = V_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, m,$

где  $k, m$  – число пластинчатых и стержневых конечных элементов (КЭ);  $\rho$  – плотность материала;  $V$  – объем конечного элемента;  $\delta, [\delta]$  – расчетная и допускаемая относительная деформация, определяемая в направлении, перпендикулярном плоскости паллеты;  $\sigma_{\text{эКВ}}, [\sigma] = 100$  МПа – эквивалентное и допускаемое напряжения;  $n = 2$  – коэффициент запаса на устойчивость;  $\sigma, \sigma_{\text{кр}}$  – сжимающее напряжение, действующее в плоскости КЭ, и критическое напряжение;  $p_1, [p_1] = 12$  Гц – расчетное значение и нижняя граница (определяется частотой вращения шпинделя  $500 \text{ мин}^{-1}$  с отстройкой от резонанса 30 %) первой собственной частоты.

Переменными проектирования являются геометрические размеры паллеты – длина, ширина, высота, толщина стенок корпуса и ребер (при постоянной ширине). В связи с тем что часть размеров паллеты (длина, ширина, высота) определяется габаритами обрабатываемой детали, а также конструктивными соображениями и не варьиру-

Результаты оптимизации паллеты

Проект паллеты	Толщина, мм				Наибольшее вертикальное перемещение, мм	Масса, т
	верхняя плита	боковая стенка	внутренняя стенка	ребро		
Серийный	60,0	60,0	50,0	60,0	0,249	38,12
МКЭ	60,0	30,0	20,0	60,0	0,427	24,40
Исходный для оптимизации	70,0	40,0	40,0	70,0	–	32,05
Оптимальный	29,0	36,3	36,3	69,5	0,452	24,59

ется, область введенных переменных сужается до толщины  $t_c$  стенки корпуса и толщина  $t_p$  ребра (при постоянной ширине).

В качестве критерия жесткости рекомендуется принимать угол наклона паллеты  $\alpha$  направляющих, непосредственно влияющий на работоспособность гидростатических направляющих [21]. На практике вместо угла наклона используется линейная относительная деформация, определяемая на поверхности паллеты и равная  $2 \cdot 10^{-5}$  при ширине направляющих стола 1 м, толщине масляного слоя  $4 \cdot 10^{-5}$  м.

Задача (9) решается методом штрафных функций в форме

$$\varphi = \psi_0 / \psi_0^H + r \sum_{i=1}^4 (1 / \psi_i), \quad (10)$$

где  $\psi_0^H$  – начальная масса серийной конструкции паллеты до оптимизации;  $r$  – малый положительный параметр. Решение задачи получено безусловной минимизацией функции (10) для убывающей последовательности значений параметра  $r$  методом ДФП.

В табл. 5 приведены результаты, полученные МКЭ путем ограниченного перебора вариантов и МКЭ совместно с методами оптимизации. С целью сокращения времени счета проверка ограничений по устойчивости, напряжениям и собственной частоте выполнялась в конце итерации после нахождения переменных проектирования по критерию жесткости.

В результате оптимального проектирования масса паллеты уменьшилась на 35,5 % по сравнению с серийным вариантом, что практически совпадает с результатом, полученным при расчете только МКЭ. Различие лишь в размерах элементов, что связано, по-видимому, с разной чувствительностью переменных проектирования при оптимальном поиске. Для оптимальной паллеты наибольшие напряжения составили 13,4 МПа, невязка по критерию жесткости равна 0,65 %. Значения первых трех собственных частот паллеты приведены в табл. 6. Видно, что низшая собственная частота паллеты превосходит частоту

Таблица 6

Спектр собственных частот оптимальной паллеты

Форма колебаний	Частота, Гц		
	ось x	ось y	ось z
1	269,2	272,2	88,6
2	283,2	294,5	192,0
3	306,8	526,1	268,2

вынужденных колебаний (от вращения шпинделя) почти в 9 раз. Такое расхождение допускает введение ограничения только по первой собственной частоте.

Выбор начальной точки с другими параметрами (толщина 60, 45, 45, 60 мм соответственно графам табл. 5) показал аналогичный результат по целевой функции, что свидетельствует о достижении оптимума задачи.

Для оценки влияния ограничений задачи (9) на переменные проектирования исследуем поведение вариации переменных проектирования в окрестности оптимального решения. С этой целью зафиксируем все переменные проектирования, кроме одной, и исследуем изменение перемещений, напряжений, частоты. Принимаем изменение параметра на  $\pm 25\%$  вследствие возможности его округления для практического использования. Очередность изменения переменных проектирования приведена в табл. 7. Изменение ограничений определялось по отношению к наименьшему значению соответствующего ограничения при варьировании переменной проектирования от  $-25\%$  до  $+25\%$ , т. е.

$$[(\psi_{+25\%} - \psi_{-25\%}) / \psi_{\min}] 100 \%,$$

где

$$\psi_{\min} = \begin{cases} \psi_{+25\%}, & \text{если } \psi_{+25\%} < \psi_{-25\%}, \\ \psi_{-25\%}, & \text{если } \psi_{+25\%} > \psi_{-25\%}. \end{cases}$$

Анализ чувствительности показывает, что если бы требовалось улучшение проекта паллеты по соб-



Результаты анализа чувствительности

№ п/п	Переменные проектирования	Чувствительность ограничений, %			
		перемещения	напряжения	устойчивости	частоты
1	Толщина боковых и внутренних стенок (0,0363 м)	73,4	54,6	51,5	5,4
2	Толщина верхней плиты (0,029 м)	16,7	4,9	8,2	85,8
3	Толщина ребра (0,0695 м)	15,2	10,4	25,1	0,2

ственной частоте, то наилучшего результата в этом направлении можно достигнуть путем варьирования толщины верхней плиты. В других случаях лучшие результаты получаются при вариациях толщины боковых и внутренних стенок. Используя информацию о чувствительности проекта, конструктор может систематически проводить анализ конструкции и улучшать проект. Полученные результаты подтверждают превалирование критерия жесткости над другими критериями, что позволяет при оптимальном проектировании несущих конструкций станков основной поиск вести по критерию жесткости, а по остальным критериям осуществлять лишь проверку их выполнения на заключительных стадиях оптимального поиска.

**2.3. Вероятностная модель**

В расчетной практике наибольшее распространение получили детерминированные математические модели. Однако изменение в пространстве положения любой точки обрабатываемой детали, установленной на столе, зависит от ряда факторов, в частности, от положения центра тяжести детали относительно оси поворота стола. Из-за возможных эксплуатационных ошибок (например, неправильная установка детали на столе, нарушение правил эксплуатации) несовпадение центра тяжести детали с осью поворота стола носит вероятностный (статистический) характер. Получаемый при этом эксцентриситет *e* может рассматриваться как нормально распределенная величина с математическим ожиданием *m* = 0.

Координаты (x,y) точки A (см. рис. 5) фактического приложения результирующей нагрузки от веса детали образуют систему двух случайных величин, для которых плотность нормального распределения выражается формулой [23]

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\}. \tag{11}$$

Для прямоугольной области характерно эллиптическое распределение эксцентриситета, т. е. образуется эллипс рассеивания, имеющий большую *a* и малую *b* полуоси. Полагая, что полуоси эллипса совпадают с координатными осями, начало координат т. С – с центром рассеивания, а случайные величины *x*, *y* независимы, формула (11) принимает следующий вид:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right].$$

Полный эллипс рассеивания определяется уравнением [23]

$$\frac{x^2}{(4E_x)^2} + \frac{y^2}{(4E_y)^2} = 1, \tag{12}$$

где  $E_x \approx 0,675\sigma_x$ ,  $E_y \approx 0,675\sigma_y$  – главные вероятные отклонения. Для величин, нормально распределенных в интервале  $[-a;a]$  и  $[-b;b]$ , имеем  $a/\sigma_x \approx 3$ ,  $b/\sigma_y \approx 3$ . Тогда с учетом  $a = L/20$ ,  $b = B/30$  уравнение (12) запишется в следующем виде:

$$\frac{x^2}{0,002L^2} + \frac{y^2}{0,0009B^2} = 1.$$

Для определения координат точки A сформулируем следующую задачу оптимизации:

максимизировать  $F_i$  (13)  
 при ограничении  $\frac{x^2}{0,002L^2} + \frac{y^2}{0,0009B^2} = 1.$

Решая задачу (13) методом множителей Лагранжа [16] для принятых размеров *L* и *B*, получим следующие координаты точки A и эксцентриситет: *x* = 0,21 м, *y* = 0,06 м, *e* = 0,218 м.

Задача оптимального проектирования паллеты формулируется в этом случае аналогично задаче (9). При расчете по вероятностной модели нагружения паллеты рассматриваются два случая:

1) на значения  $t_c, t_p$  накладывается требование неотрицательности, т. е.  $t_c = t_p \geq 0$ ;



Результаты расчета по трем моделям

Модель паллеты	Толщина, мм				Невязка по критерию жесткости, %	Масса, т
	верхней плиты	боковой стенки	внутренней стенки	ребра		
Серийная	60,0	60,0	50,0	60,0	40,0	36,80
Детерминированная	29,0	36,3	36,3	69,5	0,65	24,59
Вероятностная:						
$t \geq 0$	8,6	17,2	17,2	63,4	0,54	14,22
$t \geq 23$ мм	23,1	23,2	23,2	38,9	27,0	15,80

2) на значения  $t_c$ ,  $t_p$  накладывается ограничение по литейным условиям по формуле [2]

$$t_{\min} = 10 \sqrt{(2L + B + H)/3} \text{ мм,}$$

где  $L$ ,  $B$ ,  $H$  – габаритные размеры конструкции, м. В нашем случае  $t_c = t_p = t_{\min} = 23$  мм.

В табл. 8 приведены результаты расчетов по вероятностной модели паллеты в сравнении с рассмотренными ранее моделями. Полученные результаты показывают, что при действии на конструкцию неравномерно распределенной нагрузки расчет по вероятностной модели позволяет в сравнении с детерминированной моделью дополнительно уменьшить массу конструкции при сохранении ее работоспособности. При проведении вероятностных расчетов конструкции необходимо учитывать в ограничениях задачи проектирования технологические требования, в частности литейные условия, определяющие минимальную толщину стенки. Появляющиеся при этом резервы по жесткости конструкции (27 %) указывают на поиск дополнительных конструкторских решений по улучшению ее компоновки.

#### 2.4. Учет жесткости обрабатываемой детали

Ранее были рассмотрены детерминированный и вероятностный подходы к расчету паллеты поворотного подвижного стола. При построении моделей прочностной надежности использовались модели нагружения паллеты, которые учитывали только вес обрабатываемой детали, но не учитывали ее жесткость. Однако изменение положения в пространстве любой точки обрабатываемой детали, установленной на поворотном подвижном столе, зависит не только от жесткости стола, но и от жесткости обрабатываемой детали.

При учете собственной жесткости обрабатываемой детали принимаем, что деталь жестко закрепляется в угловых зонах паллеты в трех точках (рис. 7, места приложения сил), что обеспечивает эквивалентность схем нагружения для двух рассматриваемых случаев – без учета и с учетом жесткости обрабатываемой детали.

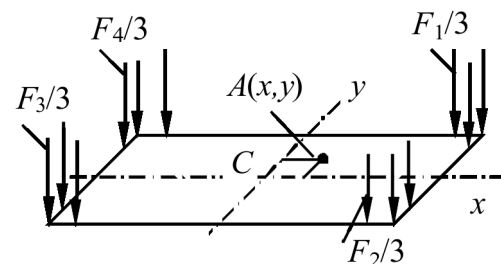


Рис. 7. Схема нагружения поверхности паллеты при расчете с учетом жесткости обрабатываемой детали

Для оценки совместной работы системы паллета – обрабатываемая деталь нами предлагается использовать условную корпусную деталь минимальной жесткости (без перегородок, ребер жесткости, замкнутых внутренних контуров и др.) с расчетным весом 2 МН и поперечным сечением, обеспечивающим эксцентриситет центра тяжести  $A(x,y)$  с координатами (рис. 8)  $x = L/20 = 0,28$  м,  $y = B/30 = 0,12$  м.

Для всех расчетов учитывалось ограничение на толщину стенок и ребер паллеты по литейным условиям – здесь  $t_{\min} = 23$  мм. Расчеты проведены в среде программного комплекса APM WinMachine (версия 7.0) методом конечных элементов:

- 1) для паллеты с оптимальными размерами,
- 2) для паллеты с толщиной стенки корпуса 23 мм, ограниченной по литейным условиям.

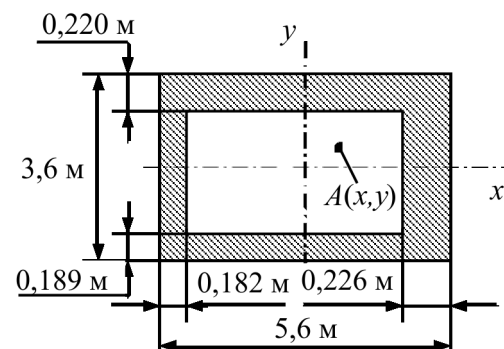


Рис. 8. Поперечное сечение условной корпусной детали

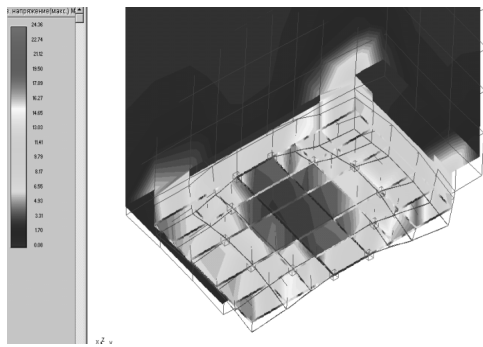


Рис. 9. Деформированное состояние паллеты при нагружении условной корпусной деталью (вид снизу)

На рис. 9 приведено деформированное состояние паллеты, нагруженной условной корпусной деталью. Приведенные в табл. 9 результаты расчетов показывают, что жесткость обрабатываемой детали существенно влияет на жесткость паллеты – масса паллеты уменьшена на 22,3 % в сравнении с детерминированной моделью. Наименьшее значение собственной частоты паллеты с толщиной стенки 23 мм составляет 88,18 Гц, что значительно выше допускаемой собственной частоты 10,8 Гц (определяется наибольшей частотой вращения шпинделя  $500 \text{ мин}^{-1}$  отстройкой от резонанса 30 %). Следовательно, при снижении массы паллеты отсутствует вероятность появления резонанса в процессе механической обработки.

Реальные обрабатываемые детали имеют различные элементы, увеличивающие их жесткость (перегородки, ребра жесткости, замкнутые контура и др.) и, следовательно, увеличивающие жесткость системы паллета – обрабатываемая деталь. Однако вследствие большого разнообразия компоновок обрабатываемых деталей и, следовательно, разной жесткости их поперечного сечения, целесообразно проводить расчет с использованием более простой представительской (условной) детали минимальной жесткости для известной номенклатуры деталей с целью получения более рациональных конструкций элементов стола. Избыточная жесткость реальных деталей по сравнению с жесткостью представительской детали идет в запас жесткости несущей системы стола.

## Выводы

Проведенные исследования показывают, что при оптимальном проектировании несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков успешно можно применять однокритериальную оптимизацию. Выбранные методы оптимизации в сочетании с методом конечных элементов и авторское программное обеспечение эффективно решают задачи оптимального

Результаты расчета с учетом жесткости обрабатываемой детали (детерминированная модель)

№ п/п	Модель нагружения	Толщина элементов паллеты			Масса паллеты
		верхней плиты	стенок	ребра	
		мм			т
1	Без учета жесткости обрабатываемой детали, оптимальная конструкция	29,0	36,3	69,5	24,59
2	Учет жесткости обрабатываемой детали	23,0	23,0	69,5	19,11

проектирования несущих конструкций для тяжелого станкостроения.

Рассмотренные расчетные модели (детерминированные и вероятностные) на примере паллеты тяжелого поворотного-подвижного стола показывают, что существует широкий спектр возможных путей по созданию рациональных несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков, в частности, минимально возможной массы с учетом требований по производительности и точности механической обработки [24]. Применение метода конечных элементов в сочетании с методами оптимизации, учет собственной жесткости обрабатываемой детали на основе предложенной автором представительской корпусной детали минимальной жесткости позволяют проектировать несущие конструкции станка без избыточных возможностей. В результате расчета по вероятностной модели уменьшается масса конструкции в сравнении с детерминированной моделью на 27 % при сохранении ее работоспособности. Учет же собственной жесткости обрабатываемой детали на основе представительской корпусной детали минимальной жесткости приводит к снижению массы паллеты на 22,3 % в сравнении с той же детерминированной моделью.

## Список литературы

1. *Металлорежущие станки*, производимые и намеченные к производству странами Восточной Европы в 1991–1995 гг. Каталог. – М.: ВНИИТЭМР. –1991. – 4.3. – 164 с.
2. *Металлорежущие станки* / под ред. В.Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
3. *Атапин В.Г.* Расчет деформированного состояния фундамента тяжелого многоцелевого станка // Вестник машиностроения. – 1989. – № 6. – С. 31–32.
4. *Витес Б.И., Гроссман В.М., Кравцов О.А.* Проектирование корпусных деталей металлорежущих станков с использованием метода конечных элементов // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 13–14.

5. Пахмутов В.А., Шалдыбин А.Я. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций базовых деталей тяжелых станков // Станки и инструмент. – 1992. – № 2. – С. 11–13.
6. Lull B. Statische und dynamische Berechnung von Werkzeugmaschinenstellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 26. N1. – S. 10–13.
7. Roscher A. Berechnung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinenstellen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol. 27. N 4. – S. 156–160.
8. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. Design sensitivity analysis of structural systems. Mathematics in Science and engineering, 177. – Academic Press, Inc., Orlando, FL, 1986.
9. Pao, Гранди. Оптимальное проектирование несущей конструкции радиально-сверлильного станка с ограничениями по статической жесткости и частотам собственных колебаний // Труды АОИМ: Конструирование и технология машиностроения. – 1983. – Т. 105. № 2. – С. 206–211.
10. Редди, Pao. Автоматизированное проектирование несущих систем МРС, оптимальных в отношении статической жесткости, собственных частот и регенеративных автоколебаний // Труды АОИМ: Конструирование и технология машиностроения. – 1978. – Т. 100. № 2. – С. 171–180.
11. Есимура, Такэути, Хитоми. Оптимальное проектирование несущих конструкций МРС с учетом стоимости изготовления, точности и производительности // Труды АОИМ: Конструирование и технология машиностроения. – 1984. – Т. 106. № 4. – С. 213–220.
12. Каминская В.В., Гильман А.М., Егоров Ю.Б. Об автоматизированных расчетах оптимальных размеров деталей и узлов станков // Станки и инструмент. – 1975. – № 3. – С. 2–5.
13. Каминская В.В., Гильман А.М. Оптимизация параметров несущих систем карусельных станков // Станки и инструмент. – 1978. – № 10. – С. 6–7.
14. Соболев И.М., Статников П.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 110 с.
15. Хомяков В.С., Яцков А.И. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка // Станки и инструмент. – 1984. – № 5. – С. 14–16.
16. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. Engineering Optimization. – John Wiley and Sons, Inc., New York. 1983.
17. Bunday B.D. Basic optimization methods. – Edward Arnold, London. 1984.
18. Zeleny M. Multiple criteria decision making. – McGraw-Hill, New York. 1982.
19. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1. 656 с.
20. Атапин В.Г., Гапонов И.Е., Павин А.Г. Автоматизация проектирования тяжелых многоцелевых станков // Тезисы докл.: I Всесоюзный съезд технологов-машиностроителей. – М., 1989. – С. 42–43.
21. Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Д.Н. Станины и корпусные детали металлорежущих станков. – М.: Машгиз, 1960. – 362 с.
22. Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И. Соппротивление материалов: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 556 с. – («Учебники НГТУ»).
23. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
24. Атапин В.Г. Расчетное проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 (52). – С. 27–34.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 54–67

### About application of optimization methods at design of heavy multi-purpose machines

V.G. Atapin

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
E-mail: metal\_working@mail.ru

Abstract

Results on the application of the finite elements method in the combination with optimization methods in the design of heavy multi-purpose machines with a mass of some hundred tons are presented. The choice of a supporting constructions mass as an objective function in optimization problem is justified. Restrictions in a problem of optimum design of supporting constructions are formulated on the base of an analysis of the service properties possible violations (durability, rigidity, stability, resonance). A penalty functions method is applied to solute the optimization problem. The solution of the optimization problem is achieved by unconditional minimization of the objective function by the Davidon-Fletcher-Powell's method (DFP), which uses cubic interpolation by one-dimensional search. The author's software, which efficiency is confirmed by the solution of known functions having the accurate decision in the literature is used. Optimization pallet of carrier system of the heavy moving-rotary table which is a part of the multi-purpose machine with the mass of 380 tons, in cases of the determined and statistical models is considered. As a result of optimum design in case of the determined model a mass of the pallet is reduced by 35,5%

in comparison with a production version. The evaluation of the influence of an optimization problem restrictions on variables of design confirms the importance of rigidity criterion in relation to other criteria. Calculation for statistical model allows to reduce the mass of the construction by 27% in comparison with the determined model. Taking into account own rigidity of a work piece on the basis of a representative case work piece of the minimum rigidity (without stiffening ribs etc.) leads to reducing of the pallet mass by for 22,3 % in comparison with the determined model.

Keywords: Multi-purpose machine tool; Supporting constructions; Design; Finite elements method; Optimization methods

### References

1. *Metallorzhushhie stanki, proizvodimye i namechennye k proizvodstvu stranami Vostochnoj Evropy v 1991–1995 gg.* (Metal-cutting machine-tools, manufactured and intended for the production of the countries of Eastern Europe in 1991–1995). Catalogue. Moscow, VNIITJeMR. 1991. 4.3. 164 p.
2. *Metallorzhushhie stanki* (Metal-cutting machine-tools). Pod red. V.Je. Pusha. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 256 p.
3. Atapin V.G. *Vestnik mashinostroenija*, 1989, no. 6, pp. 31–32.
4. Vites B.I., Grossman V.M., Kravcov O.A. *Stanki i instrument*, 1991, no. 5, pp. 13–14.
5. Pahmutov V.A., Shaldybin A.Ja. *Stanki i instrument*, 1992, no. 2, pp. 11–13.
6. Lull B. Statische und dynamische Berechnung von Werkzeugmaschinenstellen. *Maschinenbautechnik*, 1977, Vol.26, N1, S. 10–13.
7. Roscher A. Berechnung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinenstellen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente. *Maschinenbautechnik*, 1978, Vol.27, N4, S. 156–160.
8. Haug E. J., Choi K. K., Komkov V. Design sensitivity analysis of structural systems. Academic Press, Inc., Orlando, FL. 1986.
9. Rao, Grandi. *Trudy AOIM "Konstruirovaniye i tehnologiya mashinostroenija"* (Trans. ASME "Designing and technology of engineering"). 1983. Vol.105, no. 2, pp. 206–211.
10. Reddi, Rao. *Trudy AOIM "Konstruirovaniye i tehnologiya mashinostroenija"* (Trans. ASME "Designing and technology of engineering"). 1978. Vol.100, no. 2, pp. 171–180.
11. Esimura, Takjeuti, Hitomi. *Trudy AOIM: Konstruirovaniye i tehnologiya mashinostroenija* (Trans. ASME "Designing and technology of engineering"). 1984. Vol.106, no 4, pp. 213–220.
12. Kaminskaja V.V., Gil'man A.M., Egorov Ju.B. *Stanki i instrument*. 1975, no. 3, pp. 2–5.
13. Kaminskaja V.V., Gil'man A.M. *Stanki i instrument*. 1978, no. 10, pp. 6–7.
14. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* (Choice of the optimum parameters in problems with many criteria). Moscow, Nauka, 1981. 110 p.
15. Homjakov V.S., Jackov A.I. *Stanki i instrument*. 1984, no. 5, pp. 14–16.
16. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. Engineering Optimization. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1983.
17. Bunday B.D. Basic optimization methods. Edward Arnold, London. 1984.
18. Zeleny M. Multiple criteria decision making. McGraw-Hill, New York. 1982.
19. *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja. V 2-h t.* (Reference book of machine builder technologist). Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Meshherjakova. Moscow, Mashinostroenie, 1986. Vol.1. 656 p.
20. Atapin V.G., Gaponov I.E., Pavin A.G., Abstracts of Papers, *I Vsesojuznyj s#ezd tehnologov-mashinostrotelej* (I All-Union Congress of machine builder technologists), Moscow, 1989, pp. 42–43.
21. Kaminskaja V.V., Levina Z.M., Reshetov D.N. *Staniny i korpusnye detali metallo-rezhushhih stankov* (Machine beds and case parts of machine tools). Moscow, Mashgiz, 1960. 362 p.
22. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov: uchebnik* (Strength of materials: textbook). Novosibirsk, 2006. 556 p. («Uchebniki NGTU»).
23. Ventcel' E.S. *Teorija verojatnostej* (Theory of probabilities). Moscow, Fizmatgiz, 1962. 564 p.
24. Atapin V.G. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2011, no.3 (52), pp. 27–34.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ\*

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ, доктор техн. наук, профессор*  
*Т.Г. МАРТЫНОВА, ассистент*  
*В.Ю. СКИБА, доцент, канд. техн. наук*  
*В.Н. ПУШНИН, аспирант*  
*Н.В. ВАХРУШЕВ, магистрант*  
*Д.Ю. КОРНЕВ, магистрант*  
*Е.К. ЗАЙЦЕВ, магистрант*  
 (НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 4 июля 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Скиба В.Ю.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
 Новосибирский государственный технический университет,  
 e-mail: skeeba\_vadim@mail.ru

Разработана методика проектирования смесителей непрерывного действия, позволяющая определять основные параметры технологических машин для перемешивания сыпучих материалов. Методика включает определение нагрузки на рабочие органы смесителей, нагрузки, приведенной к валу электродвигателя, мощности, необходимой для осуществления технологического процесса. В соответствии с данной методикой проведены расчеты основных технико-эксплуатационных параметров двухвального смесителя непрерывного действия для макаронного теста. По результатам расчетов построены графические зависимости приведенной нагрузки к валу электродвигателя, времени технологического процесса, производительности и мощности от частоты вращения рабочих органов. Методика позволяет на основе уточненных значений нагрузок на месильные лопадки от внешних механических воздействий модернизировать существующие смесители с возможностью увеличения их производительности до 60 % за счет повышения частоты вращения рабочих органов.

**Ключевые слова:** методика проектирования, лопастной смеситель, сыпучие материалы, технологическая нагрузка, рабочий орган.

## Введение

На отечественных предприятиях в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства насчитывается множество наименований технологического оборудования, предназначенного для приготовления различных смесей. При этом наиболее часто применяются лопастные смесители, которые по сравнению с барабанными, шнековыми и прочими обладают в большей мере возможностью управления процессом смешивания, универсальностью, высокой производительностью, быстрой и несложной переналадкой для работы с различными сыпучими материалами [1, 2, 3]. Повышение производительности таких смесителей возможно при увеличении геометрических параметров рабочей камеры (длины, ширины), при повышении скорости движения исполнительных механизмов,

а также при сокращении времени простоев оборудования по технологическим и техническим причинам. Однако во время простоев перемешивающего оборудования смеси изменяют свои свойства, в результате нагрузка на рабочие органы со временем значительно увеличивается. Для снижения пусковых моментов перед повторным запуском смесителя возникает необходимость освободить рабочую камеру от находящейся в ней смеси, что связано с дополнительными затратами времени и возможными потерями сырья. Следует также отметить, что увеличение геометрических параметров и скоростных режимов рабочих валов предъявляет повышенные требования к их уравновешенности [4, 5].

В связи с вышеизложенным цель данной работы заключается в разработке методики проектирования лопастных смесителей для сыпучих материалов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2013 г. и в плановом периоде в 2013-2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А «Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки деталей машин»).

### Теория

Разработана методика проектирования смесителей для получения сыпучих материалов (макаронного теста) (рис. 1), включающая в себя определение нагрузок на рабочий орган от внешних механических воздействий, приведенных к ведущему валу; расчет времени разгона механизма в зависимости от изменения нагрузок за время простоев; уравнивание рабочего вала с учетом точности изготовления его элементов. В части определения нагрузок методика включает в себя три блока: 1 – задаваемые параметры; 2 – параметры, определяемые по известным методикам [6, 7]; 3 – параметры, определяемые по экспериментальным данным и уточняющие методику (предложение авторов).

Значения нагрузки от внешних механических воздействий на каждую лопатку получали с использованием аналитических зависимостей, описывающих графики на рис. 3–6.

Учитывая рассчитанное время перемешивания, выбирается скоростная характеристика рабочего органа. Сочетание этих двух параметров обеспечивает надлежащее качество теста и, следовательно, готовых изделий.

После того как были выбраны объем смеси, приходящейся на одну лопатку, углы установки лопаток, скорость движения рабочего органа, можно перейти ко второй части методики.

Для определения нагрузок от внешних механических воздействий, приведенных к ведущему валу, и потребной мощности необходимо выполнить следующие действия.

1. Составить расчетную схему (рис. 1) и определить исходные параметры, учитывая данные первой части методики.

2. Определить в соответствии с выбранными параметрами нагрузку на каждую лопатку [8, 9] по графикам или аналитическим зависимостям в соответствии с углом установки лопатки, количеством смеси, приходящейся на одну лопатку, и частотой вращения рабочего органа.

3. Определить суммарную нагрузку на каждый ряд лопаток на рабочем валу в соответствии с п. 2 данной методики и построить графики нагрузок на каждый ряд лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала.

4. Построить графики изменения суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла поворота вала.

5. Построить графики изменения суммарной нагрузки, приведенной к валу электродвигателя, в зависимости от угла поворота рабочего вала с учетом передаточного отношения привода.

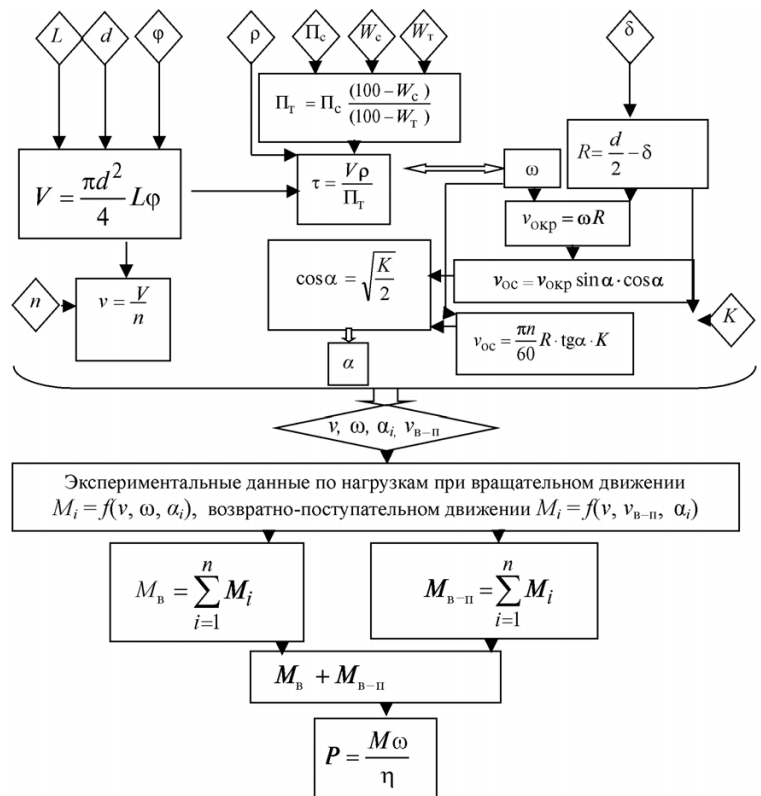


Рис. 1. Структурная схема методики проектирования смесителя:

$\rho$  – плотность макаронного теста, кг/м<sup>3</sup>;  $W_c$  – влажность сухих изделий, %;  $W_t$  – влажность макаронного теста, %;  $L, d$  – длина и диаметр рабочей камеры, м;  $\phi$  – коэффициент заполнения рабочей камеры;  $\delta$  – величина зазора между стенкой рабочей камеры и концом месильной лопатки;  $n$  – количество месильных лопаток;  $V$  – объем смеси, одновременно находящейся в рабочей камере, м<sup>3</sup>;  $v$  – объем смеси, приходящейся на одну лопатку, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время перемешивания смеси, мин;  $\omega$  – угловая скорость рабочего вала, с<sup>-1</sup>;  $R$  – расстояние от оси вращения рабочего вала до самой удаленной точки лопатки, м;  $v_{окр}, v_{ос}$  – окружная и осевая скорости перемещения смеси, м/с;  $K$  – коэффициент объемной подачи смеси;  $n$  – частота вращения рабочего вала, мин<sup>-1</sup>;  $\alpha_i$  – угол разворота  $i$ -й лопатки, град;  $v_{B-II}$  – частота возвратно-поступательного движения рабочего вала, дв. ход./с;  $M_i$  – нагрузка на  $i$ -ю лопатку, Н·м;  $M_B$  – суммарная нагрузка на рабочие валы при их вращательном движении, Н·м;  $M_{B-II}$  – суммарная нагрузка на рабочие валы при их возвратно-поступательном движении, Н·м;  $M$  – общая нагрузка на рабочие валы, Н·м;  $P$  – потребная мощность для осуществления процесса перемешивания, Вт;  $\eta$  – КПД передаточного механизма смесителя

6. Определить максимальную и минимальную нагрузки на вал электродвигателя с учетом КПД передаточного механизма, Н·м.

7. Определить в соответствии с выбранными параметрами нагрузку на одну лопатку по графикам или аналитическим зависимостям с учетом угла разворота лопатки, количества смеси, приходящейся на одну лопатку.

8. Определить суммарную нагрузку на каждый ряд лопаток на рабочем валу в соответствии с п. 6 данной методики и построить графики нагрузок на каждый ряд лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала.

9. Построить графики изменения суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота.

10. Построить графики изменения суммарной нагрузки, приведенной к валу электродвигателя, в за-

Углы разворота лопаток

- 70°
- 75°
- 80°
- 85°
- 90°
- 70°

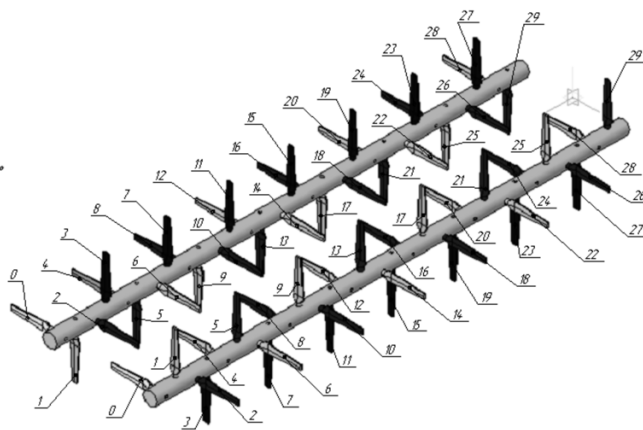


Рис. 2. Схема расположения месильных лопаток на рабочем валу тестомесителя (Braibanti)

висимости от угла поворота рабочего вала с учетом передаточного отношения.

11. Определить максимальную и минимальную нагрузки на вал электродвигателя с учетом КПД передаточного механизма, Н·м.

12. Определить общую нагрузку, приведенную к валу электродвигателя с максимально и минимально нагруженных валов, при вращательном и возвратно-поступательном движениях с учетом КПД передаточного механизма.

13. Рассчитать мощность, необходимую для осуществления технологического процесса при заданных режимах.

## Результаты

В соответствии с предложенной методикой были проведены расчеты основных параметров двухвального смесителя непрерывного действия: нагрузок от внешних механических воздействий на рабочие органы смесителя, приведенных нагрузок к валу электродвигателя; мощности, необходимой для осуществления технологического процесса для планируемых режимов (при планируемом режиме I – частота вращения рабочего вала составит  $90 \text{ мин}^{-1}$ , при планируемом режиме II –  $120 \text{ мин}^{-1}$ ).

На первом этапе расчеты проводились для вращательного движения рабочего органа смесителя. В соответствии с выбранными параметрами была определена нагрузка на одну лопатку при заданных углах установки  $\alpha$ . В соответствии с нагрузками на одну лопатку были получены значения суммарных нагрузок на каждый ряд лопаток на рабочем валу (рис. 2).

На основании полученных данных были построены графики изменения суммарных нагрузок на каждый ряд лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала (рис. 3); графики изменения суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота (рис. 4).

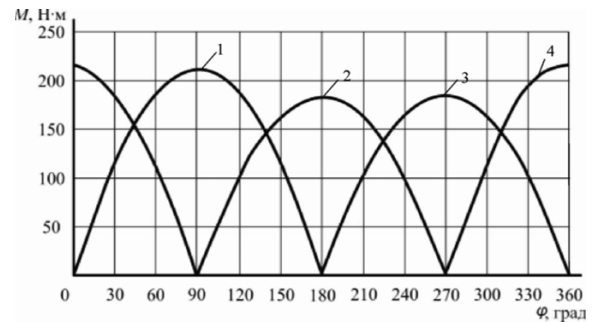


Рис. 3. Изменение нагрузок на ряды лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала при существующем режиме: 1, 2, 3, 4 – нагрузки на соответствующие ряды лопаток

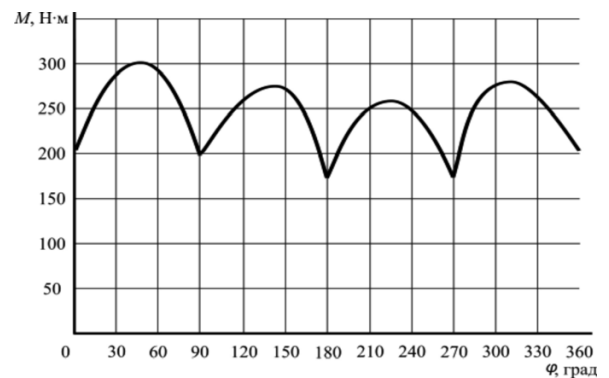


Рис. 4. Изменение нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота при существующих режимах

В заключение были построены графики приведенной к валу электродвигателя суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота (рис. 5).

На втором этапе расчеты проводились для возвратно-поступательного движения рабочего органа смесителя. В соответствии с выбранными параметрами были определены нагрузки на одну лопатку при заданном угле установки лопатки  $\alpha$ . В процессе исследований выявлено, что частота возвратно-поступательного движения в исследуемом диапазоне

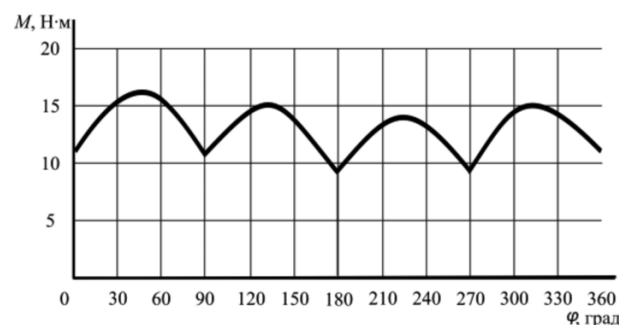


Рис. 5. График изменения суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота при существующих режимах

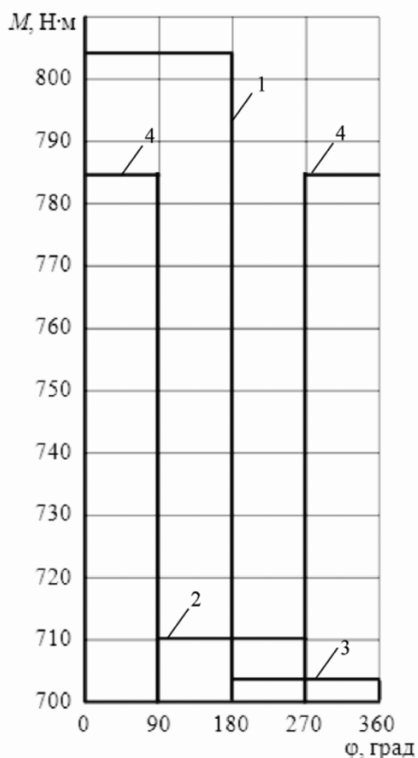


Рис. 6. Изменение нагрузки на ряды лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала: 1, 2, 3, 4 – нагрузки на соответствующие ряды лопаток

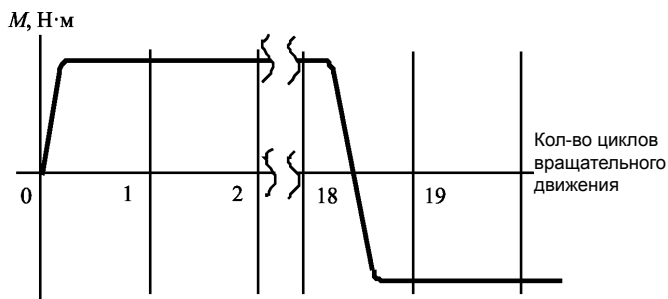


Рис. 7. Типовая картина изменения нагрузки на лопатку

не оказывает влияния на нагрузочные характеристики, а зависит только от углов их установки и объема смеси.

Используя нагрузки, приходящиеся на одну лопатку, были получены значения суммарных нагрузок на каждый ряд лопаток на рабочем валу, и построены графики суммарных нагрузок на каждый ряд лопаток в зависимости от угла поворота рабочего вала для существующего и планируемых режимов (рис. 6). Характер их изменения обусловлен тем, что за один двойной ход рабочего вала он может совершить более 36 циклов вращательного движения (1 цикл = 1 оборот = 360°), максимальная нагрузка на лопатку от внешних механических воздействий при возвратно-поступательном движении приходится на часть циклов (рис. 7, циклы 2–18). Таким образом,

для дальнейших расчетов принимаются постоянные значения нагрузок для каждого ряда лопаток. Далее были построены графики суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота (рис. 8). С учетом полученных значений были построены графики приведенной к валу электродвигателя суммарной нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота (рис. 9)

Следующий этап заключался в определении нагрузки, приведенной к валу электродвигателя, и мощности, необходимой для осуществления технологического процесса, при вращательном и возвратно-поступательном движении.

Суммарная нагрузка с двух валов, приведенная к валу электродвигателя, будет составлять 46,36 Н·м. Таким образом, мощность, необходимая для осуществления технологического процесса с учетом КПД передаточного механизма, составляет 7,04 кВт.

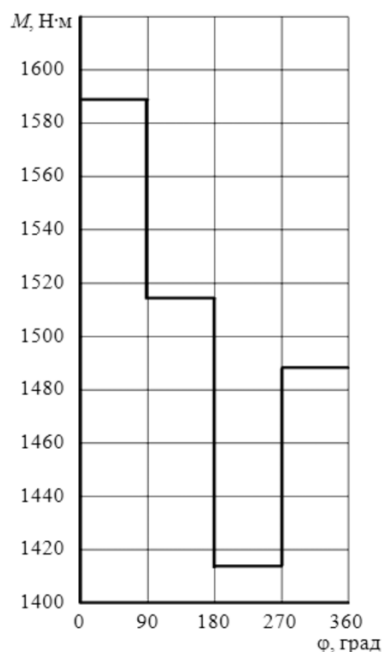


Рис. 8. Изменение нагрузки на рабочий вал в зависимости от угла его поворота

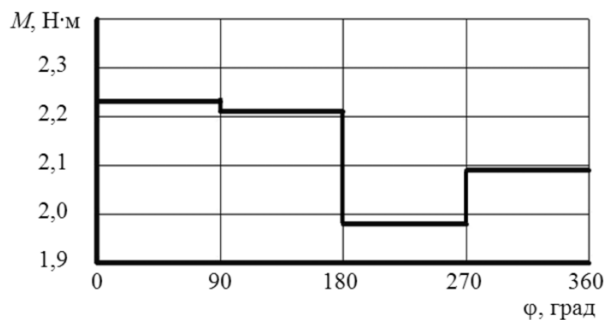


Рис. 9. График изменения суммарной нагрузки на рабочий вал, в зависимости от угла его поворота при существующем режиме



В результате проведенных расчетов основных параметров двухвального смесителя автоматической линии Braibanti, эксплуатируемой на Новосибирской макаронной фабрике [10], при существующих (частота вращения рабочих органов  $74,6 \text{ мин}^{-1}$ ) и планируемых (частота вращения рабочих органов 70; 80; 90; 100; 110;  $120 \text{ мин}^{-1}$ ) режимах получены графические зависимости, представленные на рис. 10.

Данные графики позволяют определять нагрузку, приведенную к валу электродвигателя, производительность, мощность электродвигателя и время замеса в зависимости от частоты вращения рабочих органов для двухвального смесителя при частоте вращения от 70 до  $120 \text{ мин}^{-1}$ , значения за пределами предложенного диапазона можно получить методом экстраполяции. Для смесителей с другими исходными параметрами необходимо проводить расчеты по данной методике.

### Выводы

Разработана методика проектирования лопастных смесителей, позволяющая определять уточненные значения суммарных нагрузок на рабочие органы смесителя; нагрузки, приведенной к ведущему валу смесителя; мощности, необходимой для осуществления технологического процесса.

Установлено, что предложенная методика позволяет на основе уточненных значений нагрузок на месильные лопатки от внешних механических воздействий модернизировать существующие смесители с возможностью увеличения их производительности до 60 % за счет повышения частоты вращения рабочих органов.

### Список литературы

1. Демин О.В. Анализ работы различных видов смесителей сыпучих материалов периодического действия [Текст] / О.В. Демин // Труды НГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во Тамбовский гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 8. – С. 109–114.
2. Першин В.Ф. Расчет одновального лопастного смесителя сыпучих материалов [Текст] / В.Ф. Першин, О.В. Демин // Научно-технический прогресс в инженерной сфере АПК России – проблемы развития машинных технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции: Тез. докл. 11 междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВИМ, 2002. – Т. 142, ч. 2. – С. 18–23.
3. Васильева М.А. Влияние физико-механических свойств сыпучих материалов на оптимальный выбор сме-

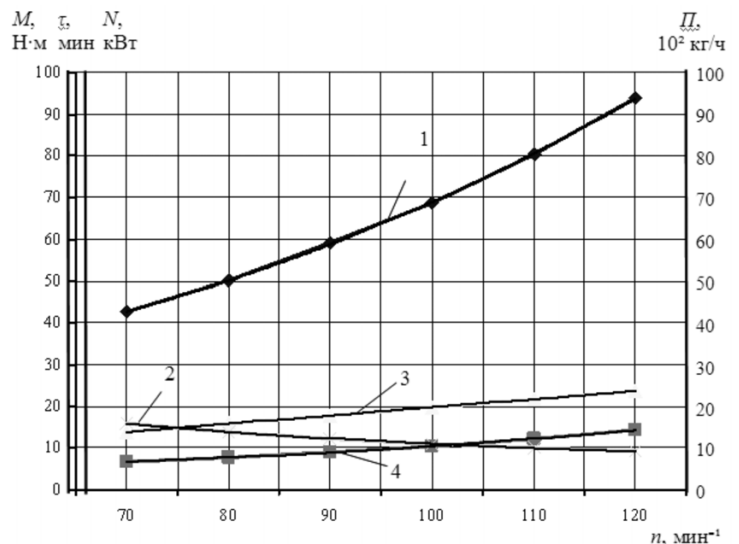


Рис. 10. Взаимосвязь технико-эксплуатационных параметров:

1 – нагрузка, приведенная к валу электродвигателя, Н·м; 2 – время технологического процесса, мин; 3 – производительность,  $10^2 \text{ кг/ч}$ ; 4 – мощность, необходимая для осуществления технологического процесса при заданных параметрах, кВт

сительного устройства [Текст] / М.А. Васильева; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург, 2002. – 8 с.

4. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки [Электронный ресурс]. – М., 1993. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/10/10030/>

5. Гусаров А.А. Балансировка роторов машин. В 2 кн. Кн. 1. [Текст] / А.А. Гусаров; отв. ред. С.М. Каплунов; Ин-т машиностроения им. А. А. Благоднарова. – М., 2004. – 267 с.

6. Чернов М.Е. Справочник по макаронному производству [Текст] / М.Е. Чернов, Г. М. Медведев, В.П. Негруб. – М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1984. – 304 с., ил.

7. Драгилев А.И. Технологическое оборудование: хлебопекарное, макаронное и кондитерское [Текст] / А.И. Драгилев, В.М. Хроменков, М.Е. Чернов. – М.: Академия, 2004. – 432 с.

8. Мартынова Т.Г. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик смесителя [Текст] / Т.Г. Мартынова, Ю.И. Подгорный, С. В. Птицын // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 183–188.

9. Мартынова Т.Г. Исследование удельного сопротивления перемешиванию макаронного теста [Текст] / Т.Г. Мартынова, С. В. Птицын, А.В. Горбунов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 3 (53). – С. 113–116.

10. Подгорный Ю.И. Исследование состояния автоматической линии по выборке макаронных изделий BRAIBANTI на ОАО «Новосибирская макаронная фабрика» [Текст] / Ю.И. Подгорный, С. В. Птицын, Т.Г. Мартынова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2004. – № 1 (35). – С. 15–18.



Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 68-73

**Determination of the main parameters of the processing equipment**

Yu.I. Podgornyj, T.G. Martynova, V.Yu. Skeebea, V.N. Pushnin, N.V. Vahrushev, D.Yu. Kornev, E.K. Zaycev

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: skeebee\_vadim@mail.ru

**Abstract**

The design technique of the continuous mixers, allowing to define the basic parameters of production machines for mixing bulk solids is developed. The technique includes determining the load on the driven element mixers, the load given to the motor shaft, the power required to perform the process. In accordance with this technique the calculations of basic technical and operational parameters of a two-shaft continuous mixer for pasta are conducted. The calculations are constructed a graph of reduced load to the motor shaft, processing time, power and performance of the speed of working. The technique allows to upgrade existing mixer with the possibility of increasing their performance up to 60% by increasing the speed of driven element, using the revised values of the loads on the kneading blade from external mechanical influences.

Keywords: design technique, cut, paddle blade-type mixing machine, bulk solids, load, driven element

**References**

1. Demin O.V. *Analiz raboty razlichnyh vidov smesitelej sypuchih materialov periodicheskogo dejstvija* [The analysis of the various types of mixers bulk material batch]. *Sbornik nauchnyh statej molodyh uchenyh i studentov "Trudy TSTU"* [Collection of scientific papers of young scientists and students "Transaction of TSTU"]. Tambov, TSTU, 2001, Iss. 8, pp. 109–114.
2. Pershin V.F., Demin O.V. *Raschet odnopal'nogo lopastnogo smesitelja sypuchih materialov* [Calculation of single-shaft paddle mixer bulk materials]. *Tezisy dokladov 11 mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Nauchno-tehnicheskij progress v inzhenernoj sfere APK Rossii – problemy razvitiya mashinnyh tehnologij i tehniceskikh sredstv proizvodstva sel'skohozjajstvennoj produkcii"* [Theses of reports 11th International Scientific and Practical Conference "Scientific and technical progress in the field of agriculture engineering Russia - the problems of machine technologies and technical means of agricultural production"]. Moscow, VIM, 2002, Vol. 142, part. 2, pp. 18–23.
3. Vasil'eva M.A. *Vlijanie fiziko-mehaniceskikh svoystv sypuchih materialov na optimal'nyj vybor smesitel'nogo ustrojstva* (Influence of physico-mechanical properties of bulk materials for the optimal choice of mixing device). Orenburg, OSU, 2002. 8 p.
4. *GOST 22061-76. Mashiny i tehnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki* [State Standard 22061-76. Machines and technological equipment. Balance quality grade system], Moscow, Standartinform Publ., 1984. 136 p.
5. Gusarov A.A. *Balansirovka rotorov mashin* (Rotor balancing machines). Editor-in-chief. Kaplunov S.M. Moscow, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov, 2004, In 2 books, Book 1. 267 p.
6. Chernov M.E., Medvedev G.M., Negrub V.P. *Spravochnik po makaronnomu proizvodstvu* (Handbook of pasta production). Moscow, Legkaja i pishhevaja promyshlennost', 1984. 304 s.
7. Dragilev A.I., Hromeenkov V.M., Chernov M.E. *Tehnologicheskoe oborudovanie: hlebopekarnoe, makaronnoe i konditerskoe* (Process equipment: baking, pasta and confectionery). Moscow, Akademija, 2004. 432 p.
8. Martynova T.G., Podgornyj Yu. I., Pticyn S.V. *Nauchnyj vestnik NSTU*, 2011, no. 2 (43), pp. 183–188.
9. Martynova T.G., Pticyn S.V., Gorbunov A.V. *Issledovanie udel'nogo soprotivlenija peremeshivaniju makaronnogo testa* (The study of resistivity mixing pasta dough). *Sbornik nauchnyh trudov NSTU*, 2008. no.3 (53), pp. 113–116.
10. Podgornyj Yu.I., Pticyn S.V., Martynova T.G. *Issledovanie sostojanija avtomaticheskoy linii po vyborke makaronnyh izdelij BRAIBANTI na OAO «Novosibirskaja makaronnaja fabrika»* (The study states the automatic line for a sample of pasta BRAIBANTI at JSC "Novosibirsk macaroni factory"). *Sbornik nauchnyh trudov NSTU*, 2004, no. 1 (35), pp. 15–18.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОЕЧНОЙ МАШИНЫ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ СОЖ И СТРУЖКИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ\*

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор*  
*И.А. ЛЕОНТЬЕВ, зав. лабораторией*  
*(НГТУ, г. Новосибирск)*  
*М.И. НИКИТЕНКО, советник директора*  
*(ООО «УЗГЦ», г. Новоуральск)*

Поступила 5 июля 2013 года  
 Рецензирование 30 августа 2013 года  
 Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Леонтьев И.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,  
 Новосибирский государственный технический университет,  
 e-mail: igoral@ngs.ru

Проведены исследования процесса удаления остатков СОЖ и стружки из продольных длинномерных отверстий и с поверхностей изделия при различных разрывах во времени между окончанием механической обработки детали и началом удаления остатков СОЖ. Исследованы возможности применения выпускаемого промышленного оборудования для осуществления удаления остатков СОЖ и стружки с поверхностей изделия «КОЛЛЕКТОР» в автоматическом режиме. Разработана и изготовлена машина для межоперационного удаления остатков СОЖ и стружки с наружных поверхностей и внутренних каналов изделия «КОЛЛЕКТОР». Разработана и применена на машине микропроцессорная система управления, которая позволяет проводить в автоматическом цикле удаление остатков СОЖ и стружки после механической обработки мойкой изделия с последующей сушкой поверхностей изделия горячим воздухом при возможности изменять количество проходов мойки и сушки.

**Ключевые слова:** коллектор, удаление стружки, удаление СОЖ с поверхностей изделия, мойка, моющий раствор, сушка поверхностей.

## Введение

В современном машиностроении нашли широкое применение длинномерные корпусные детали. Одним из представителей таких деталей является изделие «КОЛЛЕКТОР», изготавливаемый на Уральском заводе газовых центрифуг.

Коллектор представляет собой выполненную из алюминиевого сплава АК-6 ГОСТ 4784-74 протяженную, длиной 2015 мм, деталь с тремя продольными круглыми каналами А. На поверхности Б выполнены отверстия В и проточки Г. Масса кол-

лектора 48 кг. Поперечное сечение коллектора представлено на рис. 1.

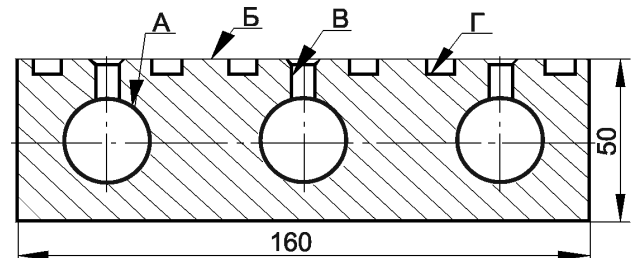


Рис. 1. Сечение коллектора

\* Работа проведена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в 2013 г. в части проведения научно-исследовательских работ. Регистрационный номер: 7.759.2011.

В процессе механической обработки материалов широко используются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Механическая обработка коллектора производится с применением СОЖ на основе (4...6)% раствора масла CATROL Suntilo R\*HAS [1]. После механической обработки детали на поверхностях остается СОЖ и стружка, которые необходимо удалять. После высыхания СОЖ на поверхностях коллектора образуется масляная пленка CATROL, обладающая хорошей адгезией с поверхностью и хорошо удерживающая остатки стружки.

На Уральском заводе газовых центрифуг мойка изделий «КОЛЛЕКТОР» от остатков СОЖ производится растворителем трихлорэтилен (перхлорэтилен) в герметичной камере установки компании FIRMATIC [2]. Остатки стружки удаляются вручную мойкой в ванне с помощью щеток и ершей горячим (50...60 °С) моющим раствором на основе технического порошкообразного моющего средства «Выбор-1М» [3] по ТУ 9144-02-0121858111-2004. Мойка растворителем продолжается 4 ч 40 мин при загрузке в камеру 12 изделий «КОЛЛЕКТОР» – более 23 мин на изделие, не учитывая время загрузки-выгрузки. Ручная мойка от остатков стружки характеризуется высокой температурой в рабочей зоне и необходимостью оператору работать с тяжелой деталью – поворачивать, поднимать, наклонять. Таким образом, существующий техпроцесс имеет следующие недостатки:

- 1) высокую температуру в рабочей зоне;
- 2) токсичность применяемых для мойки материалов. Применяемый растворитель трихлорэтилен (перхлорэтилен) [2, 6], обладает высокой растворяющей способностью и совместим с большинством металлов, в частности, алюминием. Применение растворителя для удаления СОЖ позволяет ускорить процесс удаления СОЖ в 2...3 раза, но растворители при разложении образуют токсичные вещества – фосген, окисел углерода, что обуславливает применение для обработки деталей герметических камер;
- 3) ручной режим мойки при удалении стружки;
- 4) отсутствие механизации и автоматизации процесса.

Существующие промышленные установки для струйной мойки узлов, деталей, агрегатов, в том числе и с подогревом воды [4, 5], имеют камеры с размерами не более 1500 мм и не пригодны для обработки данного изделия.

Для удаления остатков СОЖ могут быть применены машины для мойки с использованием ультразвука в растворителях KWL класса АIII [6], которые оказывают менее вредное влияние на окружающую среду и не относятся к категориям, регулируемым нормативом VOC/13/99 по эмиссии вредных веществ. Спо-

соб ультразвуковой очистки [7, 8] с использованием воды или растворителя позволяет ускорить процесс удаления остатков СОЖ и стружки с поверхностей.

Наиболее сложным в процессе удаления остатков СОЖ и стружки является обработка внутренних каналов А (рис. 1) коллектора, имеющих большую длину. Для обработки протяженных отверстий детали могут быть использованы установки для внутренней и наружной мойки труб [9]. Также можно применить мойки высокого давления с реактивным моющим соплом, например фирмы KERSHER [10].

Автоматизация процессов качественной мойки – актуальная проблема, особенно когда в деталях имеются внутренние полости. Целью данной работы является разработка машины для удаления остатков СОЖ и стружки из продольных каналов и наружных поверхностей изделия с автоматическим циклом обработки.

## 1. Экспериментальные исследования

Проведенные эксперименты по удалению СОЖ, в том числе пленки CATROL с поверхностей изделия, показали, что образующаяся после высыхания СОЖ пленка (через 14...16 ч после обработки) обладает хорошей адгезией к поверхности изделия и удаляется только горячей (50...55 °С) водой через 17...20 мин. Удаление СОЖ с изделия не позднее 1,5...2 ч после обработки производится потоком холодной водопроводной воды менее чем за 2 мин. После 4,5...5 ч после обработки поток простой водопроводной воды удаляет СОЖ за 10...12 мин. Нагрев воды до 55...60 °С ускоряет процесс удаления остатков СОЖ до 2 мин.

Удаление остатков стружки с поверхностей изделия происходит струей воды (моющего раствора) при давлении более 1,5 бар, что объясняется «прилипанием» стружки к поверхности, на которой имеются остатки СОЖ.

## 2. Результаты и обсуждение

Для автоматизации процесса мойки детали и удаления остатков стружки после механической обработки была спроектирована и изготовлена машина моечная для межоперационного обезжиривания и удаления СОЖ и стружки после механической обработки изделий с наружного контура и продольных каналов изделия «КОЛЛЕКТОР» с последующей сушкой промытых поверхностей. Общий вид машины моечной представлен на рис. 2.

Машина моечная имеет зону загрузки А, зону мойки Б, насос В подачи моющего раствора с фильтром Г на входе и двигателем Д, теплообменник Е

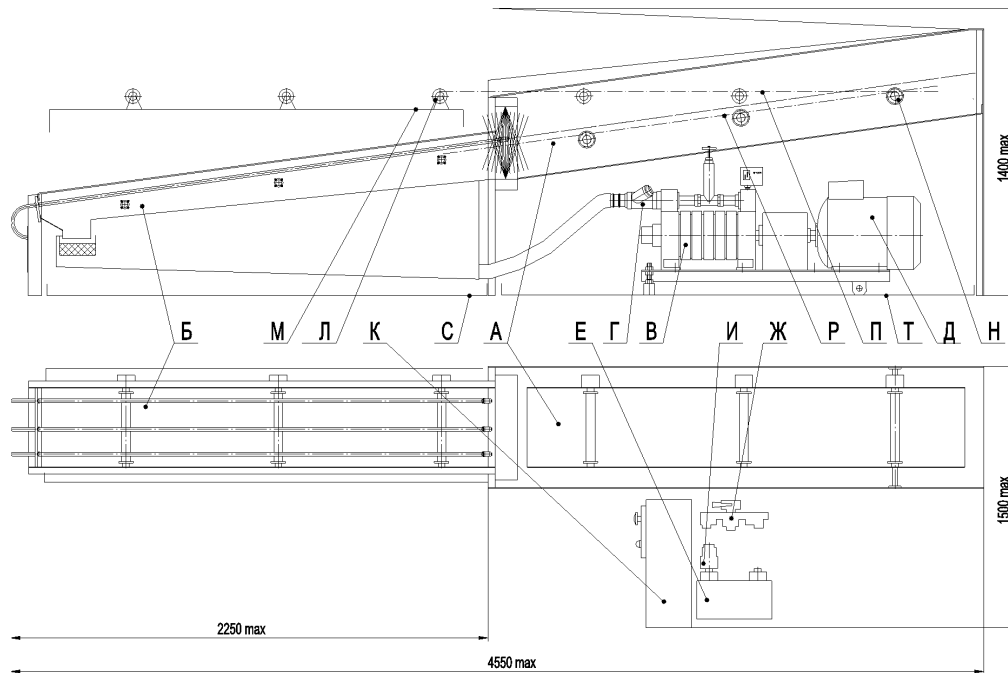


Рис. 2. Машина моечная

с контурами раздачи моющего раствора Ж и воздуха И, электрооборудование, расположенное в шкафу К. Изделие «КОЛЛЕКТОР» закатывается с роликов Л транспортной тележки М на ролики Н рольганга зоны загрузки, который устанавливается в горизонтальное положение П. При мойке рольганг зоны загрузки устанавливается под наклоном Р, который способствует сливу моющего раствора с поверхностей изделия. Машина моечная имеет поддоны С и Т для сбора пролившегося моющего раствора.

**Зона загрузки.** Зона загрузки (рис. 3) машины моечной предназначена для загрузки в машину моечную изделия «КОЛЛЕКТОР» с транспортной тележки и выгрузки промытого изделия из машины моечной на транспортную тележку. Загрузка изделия в зону загрузки машины моечной и выгрузка изделия из зоны загрузки производится оператором путем закатывания.

В зоне загрузки расположен загрузочный рольганг 1 с опорными роликами 2, имеющими привода 3. Рольганг имеет форсунки 4 для мойки-сушки роликов рольганга. Рольганг расположен в коробе 5 для предотвращения разбрызгивания моющего раствора за пределы машины моечной. Загрузочный рольганг может поворачиваться на оси 6 и находиться в двух положениях:

А – положение загрузки-выгрузки изделия «КОЛЛЕКТОР» – ролики загрузочного рольганга расположены горизонтально в одной плоскости с роликами транспортной цеховой тележки (Л на рис. 2);

Б – положение мойки – ролики загрузочного рольганга расположены наклонно в одной плоскости с опорными роликами зоны мойки (1 на рис. 4).

Изменение положения загрузочного рольганга осуществляется механизмом подъема 7. При подъеме рольганга в горизонтальное положение раскрывается крышка 8 машины моечной, механически связанная с рольгангом. При опускании рольганга в положение мойки крышка закрывается, препятствуя разбрызгиванию моющего раствора. Все механизмы и узлы зоны загрузки смонтированы на раме 8 машины моечной.

**Зона мойки.** Зона мойки (рис. 4) предназначена для мойки наружных поверхностей и внутренних продольных каналов изделия «КОЛЛЕКТОР» с последующей сушкой промытых поверхностей.

В зоне мойки установлены опорные ролики 1 с приводами 2, штанги 3 мойки продольных каналов коллекторов и блок форсунок 4. Опорные ролики рольганга зоны загрузки и опорные ролики зоны мойки имеют синхронизированные приводы вращения. Все механизмы и узлы зоны мойки смонтированы на раме 5 машины моечной. Зона мойки имеет бак для моющего раствора 6 с фильтром 7. Фильтр бака предназначен для очистки моющего раствора от механических примесей. В баке расположены ТЭНы нагрева моющего раствора 8, датчики уровня 9 и температуры 10 моющего раствора. Моющим раствором служит горячий (50...60 °С) раствор на основе технического порошкообразного моющего средства «Выбор-1М» по ТУ 9144-02-0121858111-2004, подаваемый насосом в форсунки под давлением 6...7 бар.

**Работа машины моечной.** После загрузки изделия на горизонтально расположенный рольганг зоны загрузки оператором запускается процесс авто-

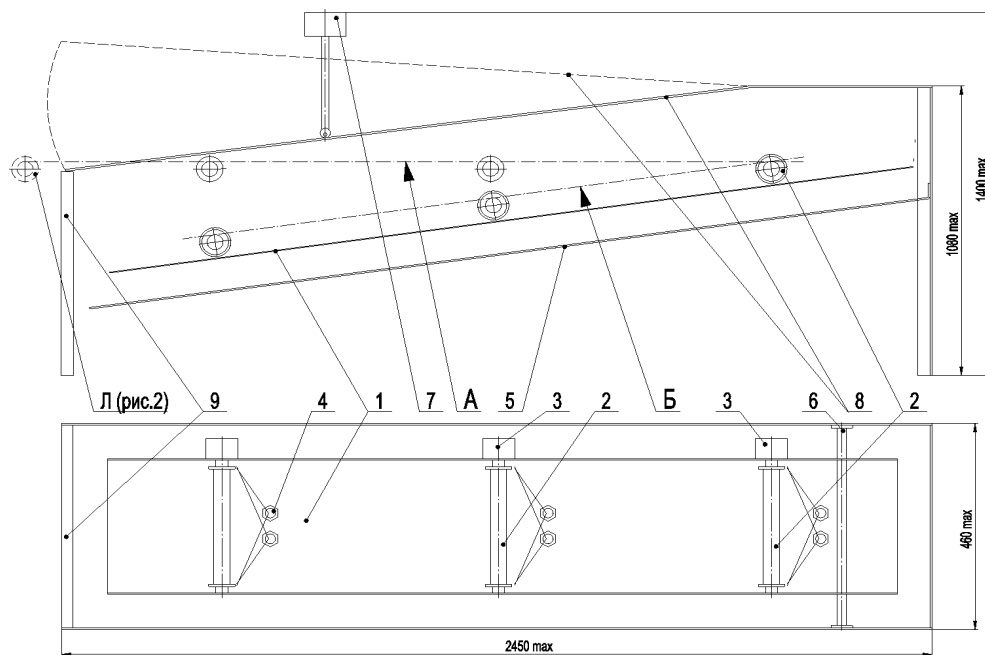


Рис. 3. Зона загрузки

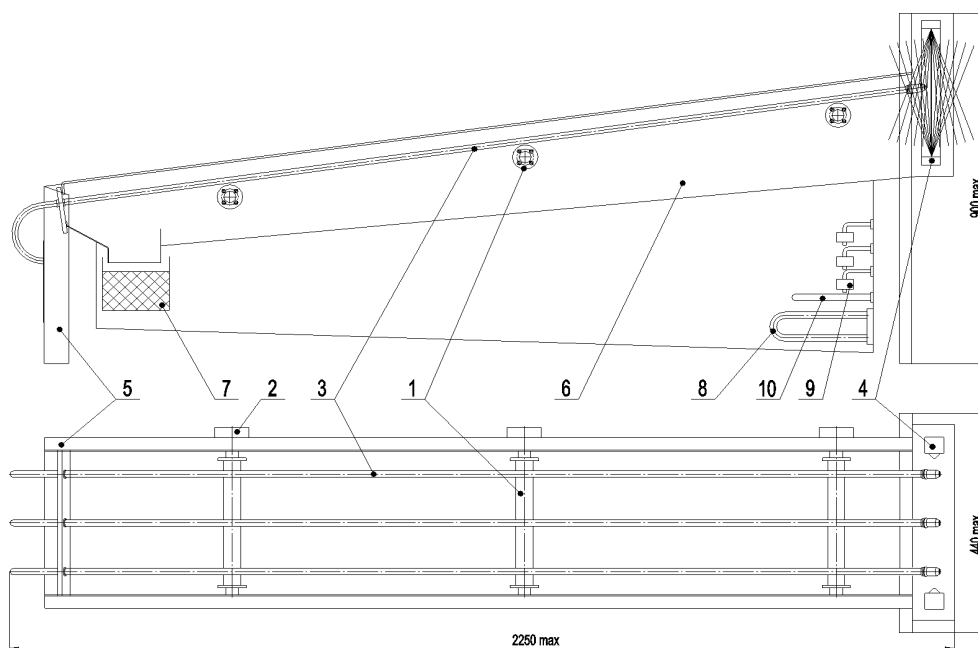


Рис. 4. Зона мойки

матической мойки-сушки изделия (под управлением микропроцессорной системы управления):

- опускается рольганг зоны загрузки с деталью в положение мойки;

- включаются двигатели приводов опорных роликов для подачи изделия на ролики зоны мойки – изделие проходит через блок форсунок, в который подается моющий раствор для обработки наружного контура. Одновременно изделие «наезжает» продольными каналами на штанги мойки каналов и произ-

водится обработка моющим раствором продольных каналов изделия;

- реверсируются двигатели приводов опорных роликов для возврата изделия на ролики зоны загрузки – продолжается мойка наружного контура и продольных каналов;

- выключается подача моющего раствора в форсунки и включается подача воздуха в форсунки;

- включаются двигатели приводов опорных роликов для подачи изделия на ролики зоны мойки –

изделие проходит через блок форсунок, в который подается воздух для сушки наружного контура. Одновременно изделие «наезжает» продольными каналами на штанги мойки каналов и производится сушка воздухом продольных каналов изделия;

– реверсируются двигатели приводов опорных роликов для возврата изделия на ролики зоны загрузки – продолжается сушка наружного контура и продольных каналов;

– после мойки-сушки изделия открывается крышка и поднимается рольганг в горизонтальное положение, и изделие выкатывается из машины моечной на цеховую транспортную тележку.

Микропроцессорная система управления позволяет оператору задавать количество двойных ходов (вниз-вверх) мойки и сушки от нуля до девяти.

### Выводы

1. Удаление остатков СОЖ и стружки из продольных каналов и с наружных поверхностей изделия «КОЛЛЕКТОР» на изготовленной машине при трех двойных ходах мойки и восьми двойных ходах сушки происходит за 11 минут. При этом на поверхностях коллектора не остается стружки и видимых следов CASTROLA.

2. Обработка изделия проводится в закрытом объеме машины, что препятствует контакту оператора с горячим моющим раствором.

3. Машина работает с автоматическим циклом мойки-сушки изделия при минимальном обслуживании машины оператором.

### Список литературы

1. *Жидкость* смазочно-охлаждающая Castrol Suntilo R-4. – Режим доступа: <http://www.bpks.ru/catalog/smazочно-ohlazhdayuschaya neste cutting 100/E014000000T00032/?show=description>
2. Машины для мойки в растворителе Fiblimatic серий SF и Logica. – Режим доступа: [http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range\\_sf.html](http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range_sf.html)
3. ТУ 9144-02-0121858111-2004. «Техническое порошкообразное моющее средство Выбор-1М». – Пермь, 2005. – 16 с.
4. *Установка L-210* для мойки узлов, деталей, агрегатов стационарная, вращающаяся, струйная. Италия. – Режим доступа: [http://engtech1.ru/index.php/podomniki?category\\_id=56&flypage=flypage.tpl&page=shop.product\\_details&product\\_id=304](http://engtech1.ru/index.php/podomniki?category_id=56&flypage=flypage.tpl&page=shop.product_details&product_id=304)
5. *Установка SME LT 100-120* для мойки деталей и агрегатов под давлением и подогревом воды. Италия. – Режим доступа: <http://www.avtomir-vologda.ru/avtoservis.html?catid=31&sobi2Id=47&sobi2Task=sobi2Details>
6. *Машины* для мойки в растворителе деталей от СОЖ, масел, нефтепродуктов и других загрязнений с использованием ультразвука. – Режим доступа: [http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range\\_fdk\\_sfk.html](http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range_fdk_sfk.html)
7. *Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швецла Ш.* Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
8. *Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И.* Основы физики и техники ультразвука. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
9. *Оборудование* для автоматической мойки труб. – Режим доступа: <http://www.golberg.ru/oborudovanie-dlya-avtomaticheskoy-mojki-trub/>
10. *Мойки* высокого давления Керхер. – Режим доступа: [http://www.karcher.ru/ru/Poleznye\\_publicacyy/Mojka\\_vsokym\\_davleniyem.htm](http://www.karcher.ru/ru/Poleznye_publicacyy/Mojka_vsokym_davleniyem.htm)

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 74-79

### Design of washing machine with automatic cycle to remove the coolant and swarf after machining of long workpieces

<sup>1</sup>Kh. M. Rakhimyanov, <sup>1</sup>B.A. Krasilnikov, <sup>1</sup>I. A. Leontyev, <sup>2</sup>M. I. Nikitenko

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

<sup>2</sup>LLC Ural Gaseous Centrifuge Plant, Dzerzhinskogo st., 2, Novouralsk, 624130, Russia

E-mail: igoral@ngs.ru

Abstract

The research of residual coolant-cutting fluid and cutting chip removing process from the longitudinal elongated holes and from the product surfaces at different time gap between the end of machining and the start of removal of residual coolant is carried out. The possibilities of the use of commercially available equipment for the removal of residual coolant-cutting fluid



and cutting chip from the surface of the product "collector" in automatic mode is investigated. The machine for interoperation removing of residual coolant-cutting fluid and cutting chip from exterior and interior product "collector" channels is designed and manufactured. The microprocessor control system, which allows to remove residual coolant-cutting fluid and cutting chip after machining at the automatic cycle, by washing, followed by drying the product surfaces with hot air at the possibility of changing the number of passes, is developed and applied.

Keywords: chip removal, removal of coolant from the surface of the product, product surfaces drying.

### References

1. Zhidkost' smazочно-ohlazhdajushhaja Castrol Suintilo R-4 (The cutting fluid Castrol Suintilo R-4). Available at: [http://www.bpks.ru/catalog/smazочно-ohlazhdajushhaja\\_neste\\_cutting\\_100/E0140000000T00032/?show=description](http://www.bpks.ru/catalog/smazочно-ohlazhdajushhaja_neste_cutting_100/E0140000000T00032/?show=description) (accessed 16 June 2013).
2. Mashiny dlja mojki v rastvoritele Fiblimatic serij SF i Logica (Machines for washing in a solvent Fiblimatic SF series and Logica). Available at: [http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range\\_sf.html](http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range_sf.html) (accessed 16 June 2013).
3. TU 9144-02-0121858111-2004. «Tehnicheskoe poroshkoobraznoe mojushhee sredstvo Vybor-1M» [Specifications "Technical powder cleaning agent Vybor-1M"]. Perm, 2005. 16 p.
4. Ustanovka L-210 dlja mojki uzlov, detalej, agregatov stacionarnaja, vrashhajushhajasja, strujnaja. Italija (Plant L-210 for cleaning components, parts, assemblies stationary, rotating, jet. Italy). Available at: [http://engtech1.ru/index.php/podorniki?category\\_id=56&flypage=flypage.tpl&page=shop.product\\_details&product\\_id=304](http://engtech1.ru/index.php/podorniki?category_id=56&flypage=flypage.tpl&page=shop.product_details&product_id=304) (accessed 16 June 2013).
5. Ustanovka SME LT 100-120 dlja mojki detalej i agregatov pod davleniem i podogrevom vody. Italija (Plant SME LT 100-120 for cleaning parts and components under pressure and heating water. Italy). Available at: <http://www.avtomir-vologda.ru/avtoservis.html?catid=31&sobi2Id=47&sobi2Task=sobi2Details> (accessed 16 June 2013).
6. Mashiny dlja mojki v rastvoritele detalej ot SOZh, masel, nefteproduktov i drugih zagrjaznenij s ispol'zovaniem ul'trazvuka (Washing machines in the solvent parts of the coolant, oil, petroleum products and other contaminants from the use of ultrasound). Available at: [http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range\\_fdk\\_sfk.html](http://www.firbimatic-spa.ru/ru/range_fdk_sfk.html) (accessed 16 June 2013).
7. Abramov O.V., Horbenko I.G., Shveгла Sh. Ul'trazvukovaja obrabotka materialov (Ultrasonic processing of materials). Moscow, Mashinostroenie, 1984. 280 p.
8. Agranat B.A., Dubrovin M.N., Havskij N.N., Jeskin G.I. Osnovy fiziki i tehniki ul'trazvuka (Bases of physics and technics of ultrasound). Moscow, Mashinostroenie, 1987. 352 p.
9. Oborudovanie dlja avtomaticheskoy mojki trub (Equipment for automatic cleaning of pipes). Available at: <http://www.golberg.ru/oborudovanie-dlya-avtomaticheskoy-mojki-trub/> (accessed 16 June 2013).
10. Mojki vysokogo davlenija Karcher (Karcher Pressure Washers). Available at: [http://www.karcher.ru/ru/Polezne\\_publicy/Mojka\\_vsokym\\_davleniem.htm](http://www.karcher.ru/ru/Polezne_publicy/Mojka_vsokym_davleniem.htm) (accessed 16 June 2013).



# СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ НА СТАЛЬ С МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРОЙ\*

*С.В. РАЙКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник*  
*Е.С. ВАЩУК, канд. техн. наук, ст. преподаватель*  
*Т.Ю. КОБЗАРЕВА, аспирант*  
*Е.А. БУДОВСКИХ, доктор техн. наук, профессор*  
*В.Е. ГРОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор*  
*(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 24 мая 2013

Рецензирование 10 июля 2013

Принята к печати 15 июля 2013

**Райков С.В.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
e-mail: budovskih\_ea@physics.sibsiu.ru

Методами световой микроскопии исследованы покрытия, наплавленные различными марками порошковых проволок на закаленную сталь Hardox 400 с мартенситной структурой. Покрытия толщиной 5 мм характеризуются слоистым строением. Поверхностный, приповерхностный и промежуточные слои покрытий имеют дендритную структуру. Между осями дендритов выявляются зернистые включения карбидов и боридов железа и ниобия с микротвердостью 1500 HV. Микротвердость покрытий, наплавленных проволоками EnDOtec DO\*33 и SK A 70-G 2, содержащими карбиды и бориды ниобия, увеличивается до двух раз по сравнению с основным материалом и достигает 900 HV. Микротвердость покрытий, наплавленных проволокой EnDOtec DO\*30, не содержащей ниобий, составляет 700 HV.

**Ключевые слова:** сталь Hardox 400, покрытия, электродуговая наплавка, структурно-фазовые состояния, микротвердость.

## Введение

Для защиты металлов и сплавов от изнашивания, коррозии, высокотемпературного окисления и других внешних воздействий используются плазменные [1–5], лазерные [6, 7], электронно-лучевые [8–10] и другие методы нанесения покрытий с высоким уровнем требуемых свойств. Однако, как правило, они не позволяют обеспечить износостойкость поверхностей ковшей экскаваторов, кузовов самосвалов и других деталей и конструкций при интенсивных нагрузках. Одним из простых и эффективных методов повышения их прочности и долговечности является электродуговая наплавка порошковой проволокой [4, 11], которая применяется на предприятиях всех отраслей промышленности для защиты от разрушения деталей и узлов, в частности, от абразивного изнашивания, для предэксплуатационного упрочнения и изготовления биметаллических (двухслойных) мате-

риалов. За счет содержащихся в порошковой проволоке добавок легирующих элементов обеспечивается надежная защита расплавленного металла от воздействия воздуха и высокие механические свойства покрытий.

Цель настоящей работы – изучение структуры и распределения микротвердости по глубине износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на мартенситную сталь для защиты от абразивного изнашивания в условиях ударных нагрузок.

## Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования применяли сталь Hardox 400, химический состав которой приведен в табл. 1. Твердость стали в закаленном состоянии составляет 370 HB.

\* Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

Химический состав стали Hardox 400

Химический элемент	C	Si	Mn	P	N	B	S	Mo	Fe
Содержание, %	0,18	0,70	1,60	0,01	0,004	0,025	0,01	0,25	Ост.

Таблица 1  
 1-й раствор азотной кислоты. Время травления составляло 20 с. Измерения микротвердости проводили на приборе HVS-1000A.

## Результаты и обсуждение

Химический состав проволоки EnDOtec DO\*30

Химический элемент	C	Si	Mn	P	Ni	B	Fe
Содержание, %	0,50	0,40	1,40	0,02	0,01	3,70	Остальное

Таблица 2

Химический состав проволоки EnDOtec DO\*33

Химический элемент	C	Si	Mn	P	Cr	Nb	Fe
Содержание, %	2,06	0,65	2,51	0,03	13,48	6,36	Остальное

Таблица 3

Химический состав проволоки SK A 70-G

Химический элемент	C	Si	Mn	Cr	Nb	B	Fe
Содержание, %	2,60	0,60	1,70	14,80	4,70	2,20	Остальное

Таблица 4

Наплавку осуществляли порошковыми проволоками – EnDOtec DO\*30 (проволока 1), EnDOtec DO\*33 (проволока 2) и SK A 70-G (проволока 3) (табл. 2–4) диаметром 1,6 мм. Твердость слоев наплавки согласно спецификации проволок составляет 67, 68 и 67 HRC соответственно. Наплавку проводили в среде защитного газа состава Ar 82 %, CO<sub>2</sub> 18 % при сварочном токе 250...300 А и напряжением на дуге 30...35 В.

Световую микроскопию поперечных шлифов осуществляли с использованием прибора Olympus GX51. Для травления покрытий использовали 3 %-й спирто-

Световая микроскопия поперечных шлифов покрытий показала, что толщина наплавленных слоев достигает 5,0...5,5 мм. По глубине покрытий выделяются 4 слоя (рис. 1), которые отличаются друг от друга контрастом травления, поверхностный 1, приповерхностный 2, промежуточный 3 и с тонкой прослойкой 4 на границе с основой. Их толщина составляет 3,5...4,0, 0,25...0,40, 0,25 и 0,01 мм соответственно. В зоне термического влияния, располагающейся ниже покрытия, также выделяется тонкий слой 5 толщиной 0,04 мм (рис. 1, 2). Общая толщина зоны термического влияния составляет 4 мм.

В структуре слоя 1 выделяются дендриты с осями второго порядка (рис. 3). Среднее значение расстояния между ними составляет 3 мкм. Расстояние между осями дендритов первого порядка составляет 20 мкм. Между ними наблюдаются кристаллические включения размерами от 2 до 16 мкм. Исходя из спецификации наплавленной проволоки можно считать, что кристаллические включения являются карбидами или боридами железа и ниобия. В слое 1 выявляются продольные и поперечные трещины, что говорит о его хрупкости, обусловленной наличием карбидов и боридов. Микротвердость включений составляет 1500 HV. Слой 1 плавно переходит в слой 2 (рис. 1), который характеризуется скоплением включений боридов и карбидов, характерные размеры которых достигают 6 мкм. В слое 2

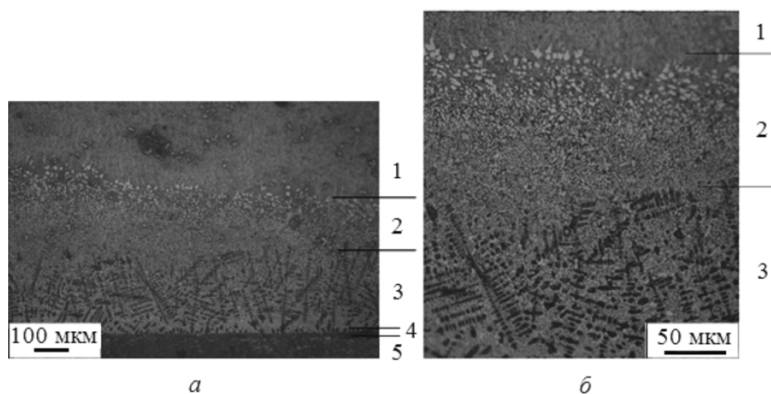


Рис. 1. Слоистая структура покрытия, наплавленного проволокой 3

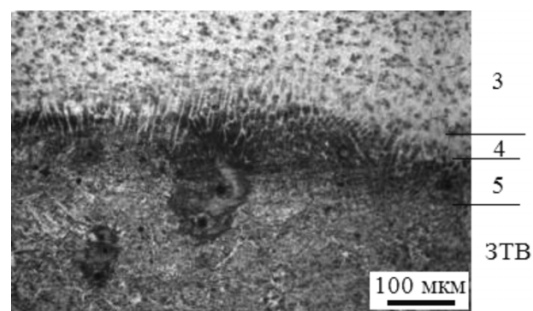


Рис. 2. Структура покрытия на границе с зоной термического влияния, наплавленного проволокой 2

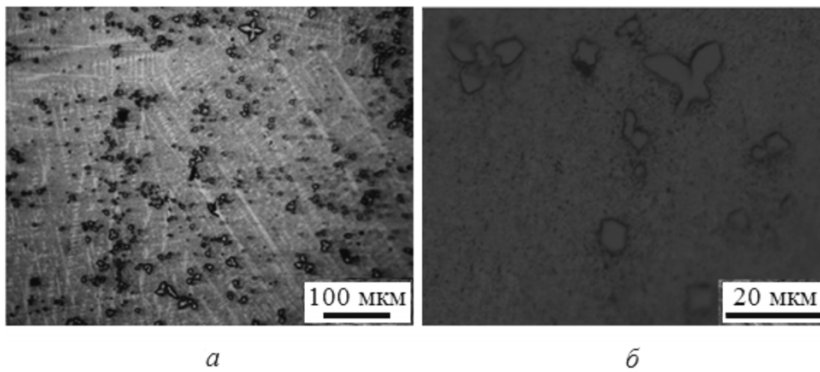


Рис. 3. Дендритная структура слоя 1 (а) и зернистые включения между осями дендритов (б)

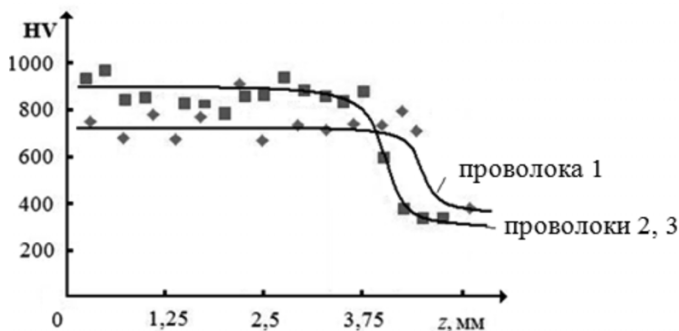


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине наплавленных покрытий: проволока 1; проволоки 2, 3

формируется мелкодисперсная структура с размерами зерен около 3 мкм (рис. 1, б). В слое 3, имеющем мелкодисперсную структуру, выделяются дендриты с осями второго порядка, среднее расстояние между которыми составляет 5 мкм. Расстояние между осями дендритов первого порядка составляет 15...50 мкм. В слоях 2 и 3 также наблюдаются включения карбидов и боридов. В слое 3 карбиды и бориды располагаются между осями дендритов второго порядка (рис. 1, б). Отношение плотностей распределения карбидов и боридов в слоях 1–3 равно 1:3:7 соответственно, что говорит об увеличении плотности распределения боридов и карбидов железа и ниобия по глубине. Зона термического влияния имеет закалочную структуру с кристаллами мартенсита пакетного и пластинчатого типа (рис. 2) и характеризуется наличием пористости.

Микротвердость наплавленных покрытий остается неизменной по всей глубине до 3,7...4,0 мм (рис. 4). В случае наплавки проволокой 1 среднее значение микротвердости упрочненного слоя составляет 700 HV, что в 2–3 раза больше микротвердости основного материала. Уровень микротвердости покрытий, наплавленных проволоками 2 и 3, составляет 900 HV, что в 3 раза больше микротвердости основного материала. Различия в уровне микротвердости покрытий могут быть обусловлены

содержанием карбидов и боридов ниобия в порошковых проволоках. Опыт показывает, что покрытия, наплавленные проволокой 3, обладают наибольшей износостойкостью.

## Выводы

При наплавке стали Hardox 400 различными марками порошковых проволок формируются покрытия со слоистой структурой общей толщиной около 5 мм. Поверхностный, приповерхностный, промежуточные слои покрытий имеют дендритную структуру, между осями которых наблюдаются зернистые включения боридов и карбидов железа и ниобия с микротвердостью 1500 HV. Микротвердость покрытий, наплавленных проволоками EnDOtec DO\*33 и SK A 70-G 2, содержащие карбиды и бориды ниобия, составляет 900 HV, а проволокой EnDOtec DO\*30 – 700 HV.

## Список литературы

1. Тюрин Ю.М., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. – Киев: Наукова Думка, 2008. – 266 с.
2. Погребняк А.Н., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физических наук. – 2005. – 175. – № 5. – С. 515–544.
3. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионноустойчивых покрытий, полученных методом электровзрывного напыления // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 1. – С. 36–43.
4. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
5. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: учебник / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калин и др. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
6. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 251 с.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
8. Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на низкоуглеродистую сталь / И.М. Полетика, С.А. Макаров, М.В. Тетюцкая, Т.А. Крылова // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. № 2. – С. 86–89.
9. Белюк С.И., Самарцев В.П., Гальченко Н.К., Дампилов Б.В., Раскошный С.Ю., Колесникова К.А.



Электронно-лучевая наплавка в черной металлургии // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – Спец. выпуск. – С. 157–160.

10. Буйносков А.П. Наплавка гребней бандажей промышленных электровозов без выкатки колесных пар

// Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 3–11.

11. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с япон. В.П. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 80-83

### Structure and microhardness wear resistant coatings welding by the electric arc method on martensitic steel

S.V. Raykov, E.S. Vaschuk, T.Yu. Kobzareva, E.A. Budovskikh, V.E. Gromov

Siberian State Industrial University, Kirov st., 42,

Novokuznetsk, 654007, Russia

E-mail: budovskikh\_ea@physics.sibsiu.ru

#### Abstract

Coatings fused by different grades of cored wires on quenched steel Hardox 400 with martensitic structure are studied by light microscopy. Coatings with a thickness more than 5 mm are characterized by a layered structure. The surface, subsurface and intermediate layers of the coatings have a dendritic structure. Between dendritic branches granular inclusions of carbides and iron and niobium borides with microhardness 1500 HV are revealed. Microhardness of the coatings fused by EnDOtec DO \* 33 and SK A 70-G 2 wires, containing niobium carbides and borides, increases increase by a factor of two in comparison with the base material and reaches 900 HV. Microhardness of the coatings fused by EnDOtec DO \* 30 wire, that doesn't contain niobium, is 700 HV.

Keywords: Steel Hardox 400; Coatings; Electric arc welding; Structural-phase states; Microhardness.

#### References

1. Tjurin Ju.M., Zhadkevich M.L. *Plazmennye uprochnjajushhie tehnologii* (Plasma hardening technology). Kiev, «Naukova Dumka», 2008. 266 p.
2. Pogrebnyak A.N., Tjurin Ju.N. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2005, vol. 175, no. 5, pp. 515–544.
3. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2013, no. 1, pp. 36–43.
4. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topoljanskij P.A. *Plazmennye tehnologii. Svarka, nanesenije pokrytij, uprochnenie* (Plasma technologies. Welding, coating, hardening). Moscow, Mashinostroenie, 2008. 406 p.
5. Gribkov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A., Jakushin V.L. *Perspektivnye radiacionno-puchkovye tehnologii obrabotki materialov: Uchebnik* (Prospective radiation beam-material processing technologies: Textbook). Moscow, Kruglyj god, 2001. 528 p.
6. Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Lazernye tehnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke* (Laser technologies in mechanical engineering and metal working). Minsk, Belorusskaja nauka, 2008. 251 p.
7. Grigor'janc A.G., Shiganov I.N., Misjurov A.I. *Tehnicheskie processy la-zernoj obrabotki* (Technical Processes laser treatment). Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2006. 664 p.
8. Poletika I.M., Makarov S.A., Tetjuckaja M.V., Krylova T.A. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universitetata*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 86–89.
9. Beljuk S.I., Samarcev V.P., Gal'chenko N.K., Dampilon B.V., Raskoshnyj S.Ju., Kolesnikova K.A. *Fizicheskaja mezomehanika*, 2006, vol. 9, special issue, pp. 157–160.
10. Bujnosov A.P. *Vestnik transporta Povolzh'ja*, 2012, no. 4, pp. 3–11.
11. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* (Building-up and spraying). Translated from Japanese: Popova V.P.; Edited Stepina V.S., Shesterkina N.G. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 240 p.

# ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ИОНАМИ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА. ЧАСТЬ 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА\*

*Е.Б. ФИРХОВА*<sup>1</sup>, аспирант  
*Н.А. ПОПОВА*<sup>2</sup>, канд. техн. наук, с.н.с.  
*Г.В. ЛЯМИНА*<sup>3</sup>, канд. хим. наук, доцент  
*М. ДАУЛЕТ*<sup>3</sup>, магистрант  
*А.И. СМИРНОВ*<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доцент  
*И.А. КУРЗИНА*<sup>1,3</sup>, канд. хим. наук, доцент  
<sup>1</sup>(ТГУ, г. Томск)  
<sup>2</sup>(ТГАСУ, г. Томск)  
<sup>3</sup>(ТПУ, г. Томск)  
<sup>4</sup>(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 15 июня 2013 года  
 Рецензирование 15 августа 2013 года  
 Принята к печати 25 августа 2013 года

**Курзина И.А.** – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
 Национальный исследовательский Томский государственный университет  
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
 e-mail: kurzina99@mail.ru

Исследовано влияние структурно-фазового состояния поверхностного слоя титана в ультрамелкозернистом состоянии (средний размер зерна 0,3 мкм), ионно-легированного алюминием на источнике MEVVA V.RU на механические и коррозионные свойства. Установлено, что в результате ионного облучения образуются полифазные имплантированные слои на основе зерен  $\alpha$ -титана, содержащие интерметаллидную фазу  $Ti_3Al$  по границам зерен  $\alpha$ -титана. Модифицированные поверхностные слои характеризуются улучшенными механическими характеристиками и коррозионной устойчивостью.

**Ключевые слова:** ионная имплантация, ультрамелкозернистый титан, микроструктура, коррозионные свойства

## Введение

Применение титана как конструкционного материала обусловлено благоприятным сочетанием его высокой механической прочности, коррозионной стойкости, жаропрочности и малой плотности. Однако измельчение зерна в титановых сплавах может привести к существенному повышению предела текучести и прочности [1–4]. Кроме изменения зеренного состояния металла значительно улучшить механические и коррозионные свойства можно с помощью поверхностного ионного модифицирования [5]. Согласно диаграмме состояния Ti-Al [6] можно

прогнозировать необходимые в сплаве фазы для модификации поверхностных свойств. Ранее было показано, что введение алюминия в титан позволяет сформировать поверхностные слои, содержащие интерметаллидные, оксидные и карбидные фазы в наноструктурном состоянии. Формирование наночастиц в структуре титанового сплава приведет к значительному упрочнению этого материала, которое будет обусловлено структурным состоянием титановой мишени, формированием наночастиц (дисперсное упрочнение) и возникновением внутренних полей напряжений (упруго-дислокационное упроч-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-02-01012\_а проекта Минобрнауки РФ 3.2372.2011 и ГК № 02.740.11.0823 от 11.06.2010 г.

нение) после ионной имплантации [1, 5]. Поэтому исследования взаимосвязи структурно-фазового состояния и физико-химических характеристик поверхностных слоев титана в ультрамелкозернистом состоянии в условиях ионного облучения являются актуальными.

Цель данной работы предполагала исследование влияния структурно-фазового состояния титана в ультрамелкозернистом состоянии на механические и коррозионные характеристики материалов.

### Материал и методика эксперимента

В качестве исходного материала для имплантации ионами алюминия выбран титан марки ВТ1-0. Для формирования ультрамелкозернистого состояния в заготовках титана (УМЗ-титан) применяли метод многократного одноосного прессования (*abc*-прессование) с последующей многоходовой прокаткой в ручьевых валках при комнатной температуре и дорекристаллизационным отжигом [3, 4]. Зеренная структура сплава представляет собой зерна анизотропной формы, средний поперечный размер которых составляет 0,3 мкм.

Ионная имплантация титановых материалов проведена на ионном источнике MEVVA-V.RU при температуре 623 К, ускоряющем напряжении 50 кВ, плотности тока ионного пучка 6,5 мА/см<sup>2</sup>, расстоянии 60 см от ионно-оптической системы, времени имплантации 5,25 ч и дозе облучения 1·10<sup>18</sup> ион/см<sup>2</sup>.

Исследование микротвердости выполнялось в поверхностных слоях исследуемых образцов до и после ионной имплантации. Измерение микротвердости проводилось для исходных и имплантированных образцов на приборе ПМТ-3М по стандартной методике [7, 8]. Нагрузка на индентор (пирамидка Виккерса) соответствовала 0,98 Н.

Для установления влияния имплантации поверхности МЗ-титана на коррозионную устойчивость материала были проведены исследования образцов в различных средах при линейной развертке потенциала. Поляризационные кривые регистрировали на полярографе ПУ-1 со скоростью развертки потенциала 10 мВ/с в трехэлектродной ячейке. В качестве противоиэлектрода и электрода сравнения использовали насыщенные хлоридсеребряные электроды. Площадь титановых электродов составляла 0,25 см<sup>2</sup>. Фоновые электролиты – 0,1 М HCl, 0,1 М NaNO<sub>3</sub> и NaOH – готовили с использованием бидистиллированной воды. Потенциалы и токи коррозии определяли графически [9]. Кроме этого были проведены исследования коррозионной устойчивости УМЗ-титана в смеси плавиковой и серной кислот в соотношении 1:1.

### Результаты и их обсуждение

Ранее было показано, что имплантация алюминия в ультрамелкозернистый титан привела к образованию упрочняющих фаз, таких как β-Ti, TiAl<sub>3</sub>, Ti<sub>3</sub>Al, TiC и TiO<sub>2</sub>, суммарное количество которых в поверхностной области (до 200 нм) составило ~5 % от объема материала, а в области на глубине 200...500 нм ~10 %.

К настоящему времени установлено, что прочность любого металлического материала определяется многими факторами [10], основными из которых являются: 1) наличие границ зерен и других структурных образований; 2) высокая плотность дислокаций, образующихся при любом воздействии на материал; 3) наличие в материале карбидных, оксидных частиц и других вторичных фаз и др. Роль каждого из этих факторов в любом конкретном случае будет различной, и доля вклада отдельных механизмов упрочнения в общее упрочнение материала также неодинакова.

В настоящей работе согласно известным представлениям [10-12] расчет предела текучести проводился по формуле, где квадратично складываются вклады упрочнения дислокациями «леса» и внутренних полей, остальные вклады складываются аддитивно:

$$\sigma = \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_{\text{ТВ}} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_{\text{ор}} + \sqrt{(\Delta\sigma_{\text{д}}^2 + \Delta\sigma_{\text{л}}^2)}. \quad (1)$$

Формула (1) охватывает практически все вклады сопротивлению деформирования. В этой формуле  $\Delta\sigma_n$  – напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке α-Ti;  $\Delta\sigma_{\text{ТВ}}$  – упрочнение твердого раствора на основе α-Ti атомами легирующих элементов (Al, C, O);  $\Delta\sigma_{\text{л}}$  – упрочнение дислокациями «леса», которые перерезают скользящие дислокации;  $\Delta\sigma_{\text{д}}$  – упрочнение дальнедействующими полями напряжений;  $\Delta\sigma_{\text{ор}}$  – упрочнение материала некогерентными частицами при обходе их дислокациями по механизму Орована;  $\Delta\sigma_3$  – упрочнение за счет границ зерен. Имплантация алюминия привела к существенному упрочнению: микротвердость выросла практически в 3 раза. Вклады различных составляющих в общее упрочнение сплавов приведены в табл. 1. В сплаве

Таблица 1

Предел текучести и вклады отдельных механизмов упрочнения до и после имплантации сплавов ВТ1-0 (σ, МПа)

Образец, средний размер зерна	Исходное состояние, σ	Имплантированное состояние				
		σ	Δσ <sub>3</sub>	Δσ <sub>л</sub>	Δσ <sub>д</sub>	Δσ <sub>ор</sub>
Ti (0,3 мкм)	400	1210	400	410	0	400

**Потенциалы и токи коррозии для титана в различных средах**

СК-титан	0,1 M HCl		0,1 M NaNO <sub>3</sub>		0,1 M NaOH	
	$E_{кор}$ , В	$I_{кор}$ , mA/cm <sup>2</sup>	$E_{кор}$ , В	$I_{кор}$ , mA/cm <sup>2</sup>	$E_{кор}$ , В	$I_{кор}$ , mA/cm <sup>2</sup>
Не имплантированный	0,070	0,08	-0,10	2,81	-0,176	3,0
Имплантированный ионами алюминия	-0,425	0,024	-0,720	0,020	-0,656	0,20

$E_{кор}$  – потенциал коррозии,  $I_{кор}$  – ток коррозии

все механизмы вносят в упрочнение практически одинаковый вклад.

С уменьшением размера зерна титановой мишени, т.е. с увеличением плотности границ в сплаве, происходит увеличение микротвердости исходных сплавов ВТ1-0. Например, для крупнокристаллического титана (средний размер зерна 17 мкм) микротвердость составляет 1,6 ГПа, в то время как для ультрамелкокристаллического микротвердость составляет 3 ГПа. В мелкозернистом титане, в котором плотность границ наибольшая, микротвердость имеет значение в два раза большее. После ионной имплантации наблюдается существенное увеличение микротвердости, для УМЗ-титана микротвердость составляет 3,6 ГПа. На величину микротвердости, которая обсуждается в настоящей работе, решающую роль оказывает плотность границ. В УМЗ-титане плотность границ определяется в основном поперечным размером зерен. Продольный размер зерен заметных изменений в величину плотности границ не вносит.

В титановом сплаве после имплантации и формирования наноразмерных частиц на границах зерен приводит к тому, что увеличение микротвердости имплантированных сплавов связано с уменьшением границ зерен металлической матрицы, формированием нанокристаллических оксидных и карбидных фаз в объеме зерна. Дополнительная стабилизация структуры материалов с параметрами зерен в микробласти происходит путем закрепления границ зерен и их стыков интерметаллидными фазами, что дает дополнительное упрочнение.

Нанокристаллические структуры, формируемые в условиях ионной имплантации, вносят вклад не только в модификацию механических свойств, но и оказывают существенное влияние на коррозионные характеристики. Для выявления роли имплантации в модификации коррозионных свойств было проведено сравнение рассчитанных потенциалов и токов коррозии для двух типов титановых сплавов: исходный титановый сплав и титановые образцы, имплантированные алюминием. В табл. 2 приведены потенциалы и токи коррозии, рассчитанные по кри-

вым, полученным в потенциодинамическом режиме (режим циклической вольтамперометрии). Видно, что потенциал коррозии смещается в отрицательную область для титана, подвергнутого ионной имплантации, при этом сила тока коррозии уменьшается. Эта закономерность характерна для всех изученных фоновых электролитов. Таким образом, имплантированные образцы проявляют большую коррозионную устойчивость, чем исходные образцы УМЗ-титана.

Имплантация поверхности титана ионами более активного металла – алюминия – по отношению к матрице при условии отсутствия образования интерметаллических соединений и процессов пассивации обычно приводит к снижению коррозионной устойчивости [13]. В данном случае механизм электрохимической коррозии более сложен, так как, во-первых, на поверхности титана образуются интерметаллические соединения, а во-вторых, и титан, и алюминий склонны к пассивации как на воздухе, так и во многих электролитах.

На рис. 1 представлены коррозионные диаграммы МЗ-титана, подвергнутого ионной имплантации, и исходного. Сравнивая электрохимическую устойчивость металлов в различных средах, можно отметить, что наиболее отрицательный потенциал для неимплантированного УМЗ-титана – в щелочной среде, а для имплантированного – в нейтральной. Тем не менее для всех трех сред характерно уменьшение тока коррозии для образцов имплантированного УМЗ-титана, что видно по расположению кривых относительно друг друга на графиках. Катодный процесс (восстановление водорода и воды) и анодный процесс (окисление металла) протекают со значительно большей скоростью для образцов исходного УМЗ-титана вне зависимости от среды. Таким образом, проведенные исследования показывают большую коррозионную устойчивость для образцов имплантированного ультрамелкозернистого титана.

Для изучения влияния процессов коррозии проведен ряд исследований коррозионной устойчивости титановых материалов в субмикрокристаллическом

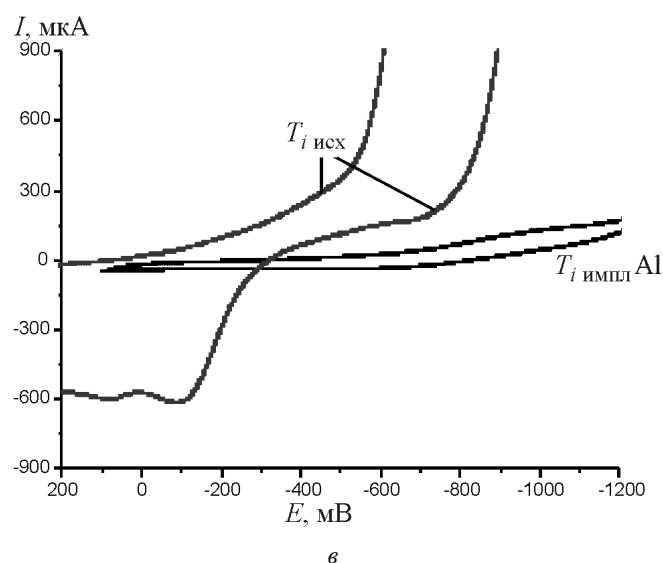
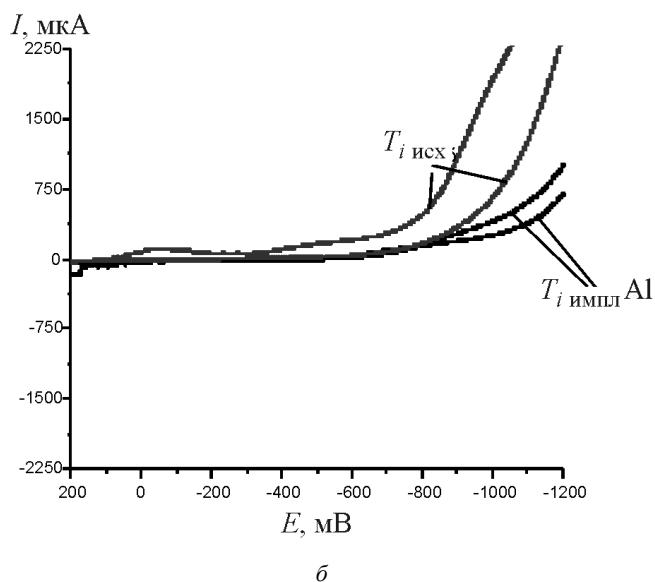
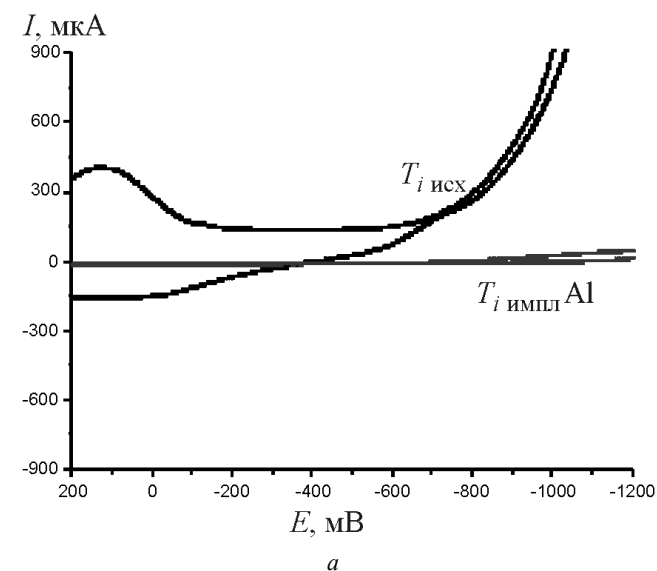


Рис. 1. Коррозионные диаграммы УМЗ-титана (исходного и имплантированного) в нейтральной (а), кислой (0,1М НСl) (б) и щелочной (в) средах

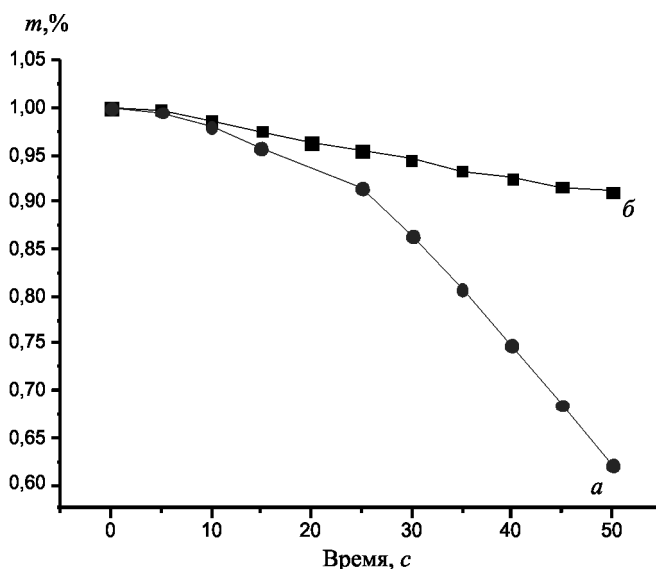


Рис. 2. Зависимость массы УМЗ-титана до (а) и после (б) ионной имплантации от времени контакта с коррозионной средой

состоянии до и после ионной имплантации ионами алюминия в кислой среде. Исследуемые образцы подвергались травлению в смеси концентрированных серной и плавиковой кислот в соотношении 1:1. Потеря массы образца не превышает 1-3 %. На рис. 2 представлена зависимость изменения массы имплантированного и неимплантированного образцов МЗ-титана от времени контакта с коррозионной средой. Видно, что неимплантированный образец теряет большую массу (в процентном отношении), чем имплантированный образец УМЗ-титана, за одинаковый промежуток времени. Так, через 50 с потеря массы для имплантированного образца составила 8,9 %, тогда как неимплантированный образец потерял 37,8 % от своей начальной массы. Полученные результаты подтверждают сделанные выше заключения о наибольшей коррозионной устойчивости имплантированных образцов УМЗ-титана.

### Заключение

Формирование модифицированного поверхностного слоя с уменьшением размером зерна мишени и с закрепленными границами частицами наноразмерных оксидных, карбидных интерметаллидных фаз приводит к увеличению прочности и микротвердости. Выполнено сравнительное электрохимическое исследование имплантированного и не имплантированного титана в кислой, нейтральной и щелочной средах. Показано, что имплантация матрицы титана ионами алюминия повышает коррозионную устойчивость образцов. Исследование коррозионной устойчивости в агрессивной среде подтверждает



данные, полученные при изучении поляризационных кривых.

Авторы выражают благодарность Ерошенко А.Ю., Шаркееву Ю.П., Никоненко Е.Л., Калашиникову М.П., Оксу Е.М., Савкину К.П. и Юшкову Г.К. за помощь в получении титановых образцов, в проведении экспериментов и полезные дискуссии.

#### Список литературы

1. Козлов Э.В., Конева Н.А., Попова Н.А. Зеренная структура, геометрически необходимые дислокации и частицы вторых фаз в поликристаллах микро- и мезоуровня // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 4. – С. 93–106.
2. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
3. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Братчиков А.Д., Легостаева Е.В., Кукареко В.А. Структура и механические свойства наноструктурного титана после дорекристаллизационных отжигов // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – Спецвыпуск. – С. 91–94.
4. Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Толмачев А.И. и др. Структура и свойства объемного ультрамелкозернистого титана, полученного *abc*-прессованием и прокаткой // Перспективные материалы. – 2009. – № 7. – С. 107–112.
5. Курзина И.А. Наноразмерные интерметаллидные фазы, формирующиеся в условиях ионной имплантации // Материаловедение. – 2010. – № 2. – С. 49–64.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1–3.
7. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
8. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-лучевом воздействии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 324 с.
9. Скорчелетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов. – Л.: Химия, 1973. – 264 с.
10. Козлов Э.В., Конева Н.А. Природа упрочнения металлических материалов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – № 3(приложение). – С. 52–71.
11. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // Перспективные материалы: учеб. пособие / под ред. Д.Л. Мерсона. – Тула: Изд-во ТГУ, МИСиС, 2006. – С. 267–320.
12. Конева Н.А., Козлов Э.В. Закономерности субструктурного упрочнения // Изв. вузов. Физика. – 1991. – № 3. – С. 56–70.
13. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

Obработка metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 84–89

#### The effect of doping with aluminum ions on the structural-phase state and the corrosion properties of ultrafine titanium. Part 2. Mechanical and corrosion properties

<sup>1</sup>E.B. Firkhova, <sup>2</sup>N.A. Popova, <sup>3</sup>G.V. Lyamina, <sup>3</sup>M. Daulet, <sup>4</sup>A.I. Smirnov, <sup>1,3</sup>I.A. Kurzina

<sup>1</sup>Tomsk State University, Lenina Avenue, 36,  
Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya sq., 2,  
Tomsk, 634003, Russia

<sup>3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30,  
Tomsk, 634050, Russia

<sup>4</sup>Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: kurzina99@mail.ru

Abstract

The study examines the influence of structural-phase condition of surface layer ultrafine-grained titanium (the average grain size of 0.3 micron), doped with aluminum ions by the means of MEVVA V.RU on the mechanical and corrosion properties. The exposure to the ionizing radiation results in formation of polyphase implanted layers on the basis of  $\alpha$ -titanium grains containing  $Ti_3Al$  intermetallic phase on the surface of the  $\alpha$ -titanium grains. The modified surface layers are characterized by better mechanical properties and corrosion resistance. The formation of the modified surface layer with smaller target grain

and fixed crystal junction lines with the particles of nanosized oxide, carbide intermetallic phases leads to greater strength and microhardness. Implanted and non-implanted titanium samples have been compared in acid, neutral and alkaline media. The implantation of aluminum ions in the titanium matrix increases corrosion resistance of the samples. The examination of corrosion resistance in aggressive medium proves the data gained while the examination of the polarization curves.

Keywords: ion implantation, ultrafine-grain titanium, microstructure, corrosion properties.

## References

1. Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A. *Zerennaja struktura, geometricheski neobhodimye dislokacii i chasticy vtorih faz v polikristallah mikro- i mezourovnja* [Grain structure, geometrically necessary dislocations and second-phase particles in polycrystals of micro- and mesolevels]. *Fizicheskaja mezomehanika - Physical Mesomechanics*, 2009, Vol.12, no.4, pp. 93-106.
2. Kajbyshev O.A., Utjashev F.Z. *Sverhplastichnost', izmel'chenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemih splavov* (Superplasticity, structure refinement and processing of hard-alloy). Moscow, Nauka, 2002. 438 p.
3. Sharkeev Yu.P., Eroshenko A.Yu., Bratchikov A.D., Legostaeva E.V., Kukareko V.A. *Struktura i mehanicheskie svoystva nanostruktornogo titana posle dorekristallizacionnyh otzhigov* [Structure and mechanical properties of nanostructured titanium after prior-to-recrystallization annealing]. *Fizicheskaja mezomehanika - Physical Mesomechanics*, 2005, Vol. 8, no. Special issue, pp. 91-94
4. Eroshenko A.Yu., Sharkeev Yu.P., Tolmachev A.I., Korobicyn G.P., Danilov V.I. *Perspektivnye materialy*, 2009, no.7 (Special issue), pp.107-112.
5. Kurzina I.A. *Materialovedenie*, 2010, no.2, pp. 49-64.
6. *Diagrammy sostojanija dvojnih metallicheskih sistem* (Diagrams of binary metal systems). Pod red. N.P. Ljakisheva. Moscow, Mashinostroenie, 1996. Vol.1-3.
7. Grigorovich V.K. *Tverdost' i mikrotverdost' metallov* (The hardness and micro-hardness of metals). Moscow, Nauka, 1976. 230 p.
8. Kurzina I.A., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P. and al. *Nanokristallicheskie intermetallidnye i nitridnye struktury, formirujushiesja pri ionno-plazmennom vozdejstvii* (Nanocrystalline intermetallic and nitride structures formed by ion-plasma exposure). Tomsk, Nauchno-tehnicheskaja literatura, 2008. 324 p.
9. Skorcheletti V.V. *Teoreticheskie osnovy korrozii metallov* (Theoretical foundations of metal corrosion). Leningrad, Himija, 1973. 264 p.
10. Kozlov E.V., Koneva N.A. *Priroda uprochnenija metallicheskih materialov* [Nature of metallic materials hardening]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika - Russian Physics Journal*, 2002, no. 3, appendix, pp.52-71.
11. Koneva N.A., Kozlov E.V. *Dislokacionnaja struktura i fizicheskie mehanizmy uprochnenija metallicheskih materialov* (The dislocation structure and the physical mechanisms of hardening of metallic materials). *Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovanija: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov napravlenij "Fizicheskoe materialovedenie" i "Metallurgija"* (Advanced materials. Structure and Methods: Tutorial for students of directions "Physical Materials" and "Metallurgy"). Pod red. D.L. Mersona. Moscow, MISiS; Togliatti, TSU, 2006. pp. 267-320.
12. Koneva N.A., Kozlov E.V. *Zakonomernosti substrukturnogo uprochnenija* [Regularities of substructural hardening]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika - Soviet Physics Journal*, 1991, no.3, pp.56-70.
13. Gorynin I.V., Chechulin B.B. *Titan v mashinostroenii* (Titan in mechanical engineering). Moscow, Mashinostroenie, 1990. 400 p.

# СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ TiC-Mo, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ\*

*Д.А. РОМАНОВ, канд. техн. наук, ст. преподаватель*  
*О.В. ОЛЕСЮК, доцент*  
*Е.А. БУДОВСКИХ, доктор техн. наук, профессор*  
*Е.С. ВАЩУК, канд. техн. наук, ст. преподаватель*  
*В.Е. ГРОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор*  
*(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 24 мая 2013 года

Рецензирование 10 июня 2013 года

Принята к печати 14 июня 2013 года

**Романов Д.А.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,  
 Сибирский государственный индустриальный университет,  
 e-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru

Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей из металлов и сплавов является электровзрывное напыление (ЭВН), которое осуществляется с использованием электрического взрыва проводников. К его достоинствам относится возможность формирования покрытий, характеризующихся высокой адгезией с основой. В настоящей работе методами оптической интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии изучены рельеф поверхности и особенности структуры электровзрывных покрытий системы TiC-Mo. Установлено, что параметр шероховатости покрытий  $Ra = 2,9...3,0$  мкм. Толщина покрытий составляет 55...70 мкм. На границе покрытия с основой формируется рельеф, который позволяет увеличивать адгезию. Структура композиционных покрытий представляет собой молибденовую матрицу с включениями частиц карбида титана.

**Ключевые слова:** электровзрывное напыление, износостойкие покрытия, молибден, карбид титана, шероховатость, адгезия, микроструктура.

## Введение

Композиционные покрытия системы TiC-Mo обладают высокой износостойкостью и микротвердостью [1]. Формирование таких покрытий в настоящее время реализовано методом плазменного напыления в воздушной среде [1] и в вакууме [2]. Они используются в машиностроении для защиты деталей, испытывающих повышенные нагрузки при работе в агрессивных средах и высоких температурах, в частности, в поршневых системах двигателей внутреннего сгорания. Однако структура этих покрытий имеет такие недостатки, как пористость, которая ухудшает их теплопроводность, и низкая адгезия.

Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей из металлов и сплавов является электровзрывное напыление (ЭВН), которое осуществляется с использованием электрического

взрыва проводников. К его достоинствам относится возможность формирования покрытий с высокой адгезией с основой [3]. Электровзрывное напыление без оплавления поверхности основы позволяет получать единичные слои из того или иного вещества либо при многократном нанесении единичных слоев разных материалов – композиционные покрытия со слоистой структурой. Электровзрывное напыление с оплавлением поверхности и перемешиванием слоев наносимых материалов друг с другом и с материалом основы позволяет получать композиционные покрытия с наполненной структурой, когда в матрице одного металла расположены включения других фаз.

Цель настоящей работы заключалась в создании методом ЭВН композиционных покрытий системы TiC-Mo, изучении топографии их поверхности и структуры.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-12009 офи\_м и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

## Материалы и методы исследования

ЭВН покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, которая описана в работе [4]. Она включает емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализирующей продукты взрыва и переходящей в сопло, по которому они истекают в вакуумную технологическую камеру с остаточным давлением 100 Па. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник тока большой плотности при разряде накопителя.

Обработке подвергали образцы стали 45 в отожженном состоянии с размерами  $20 \times 30 \times 2$  мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [5]. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого ма-

## Результаты и обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия показала, что на поверхности покрытий (рис. 1, а, б) вследствие высокоскоростной кристаллизации образуются микротрещины. Хорошо различимы также многочисленные деформированные микрокапли диаметрами от 1 до 50 мкм, осевшие на ней из тыла струи [5].

Стрелками на рис. 1, а, б показаны микротрещины

Оптическая интерферометрия показала, что шероховатость поверхности покрытий характеризуется высокими значениями  $Ra = 2,9 \dots 3,0$  мкм, что обусловлено получением покрытия при ЭВН, для которого характерно осаждение на поверхность преимущественно жидких частиц продуктов взрыва из тыла струи с последующей самозакалкой [3, 5].

Рентгеноспектральный микроанализ различных участков покрытия обнаружил (рис. 2), что область набора рентгеновского спектра 1, выбранная на включении (светлые области округлой формы размером  $0,1 \dots 0,5$  мкм на рис. 1, а) образована титаном. Область спектра 2, выбранная на участке покрытия

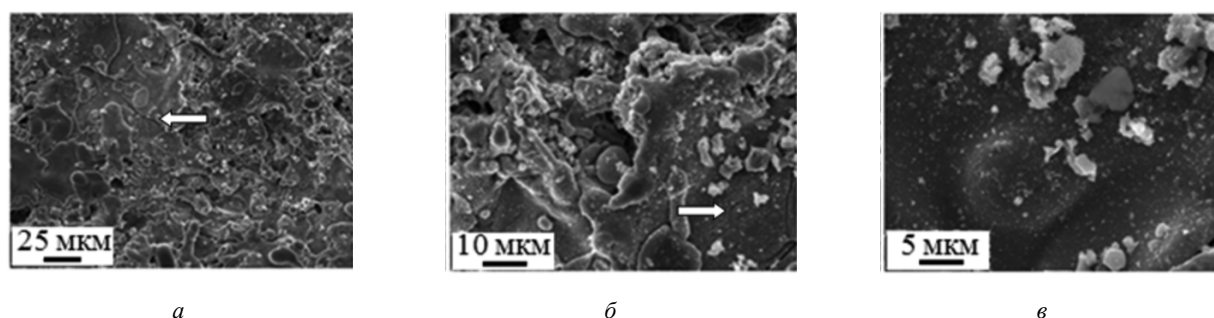


Рис. 1. Морфология поверхности электровзрывного композиционного покрытия системы TiC-Mo:

а – общий вид; б – микрокапли; в – композиционная структура микрокапли

териала (КЭВМ) для нанесения покрытий, который в данной работе представлял собой двуслойную молибденовую фольгу с заключенной в ней навеской порошка карбида титана. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла  $4,5 \text{ ГВт/м}^2$ , диаметр молибденового сопла – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Массы фольги и порошковой навески составляли: 284 и 142 в режиме 1; 284, 213 в режиме 2; 284 мг в режиме 3.

Исследования топографии поверхности проводили с использованием оптического интерферометра Zygo NewViewTM 7300. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50.

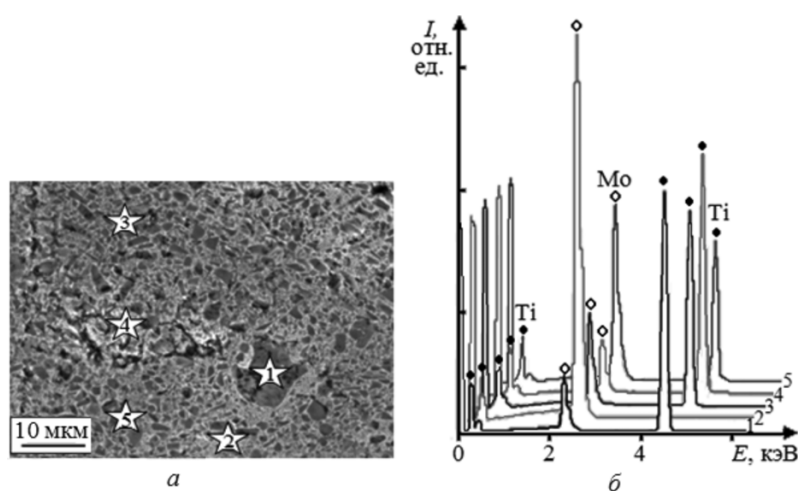


Рис. 2. Рентгеноспектральный микроанализ покрытия системы TiC-Mo, напыленного в режиме 3:

а – области набора рентгеновского спектра; б – рентгеновские спектры

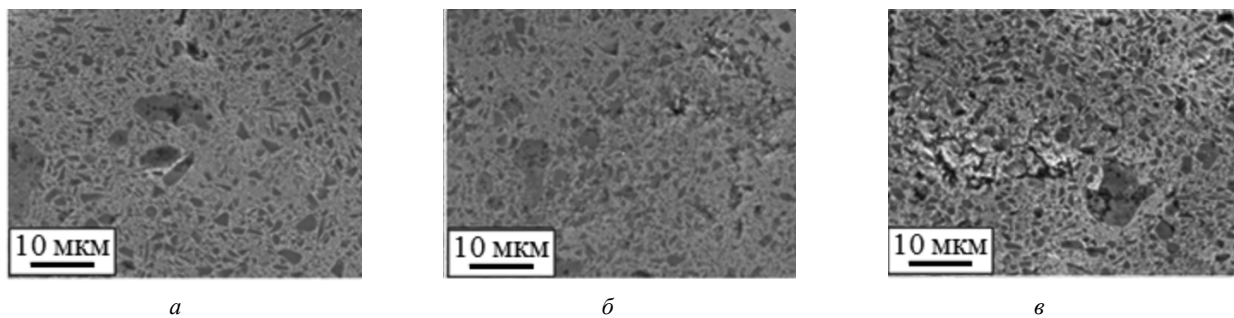


Рис. 3. Композиционная наполненная структура покрытий системы TiC-Mo, напыленных в различных режимах. Прямые шлифы:

*a* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3

без включений, – молибденом, спектров 3–5, выбранных на участках покрытия, образованных матрицей и включениями – молибденом и титаном в различном соотношении. Содержание титана и молибдена для спектров 3, 4 и 5 составляет 44 и 56, 52 и 48, 46 и 54 ат. % соответственно. На основании этих данных можно утверждать, что покрытие обладает композиционной наполненной структурой, представляющей собой молибденовую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями карбида титана с размерами 0,1...8,0 мкм. Видно (рис. 3), что соотношение матрицы и упрочняющих включений составляет 2:1, 1,5:1 и 1:1 для режимов 1, 2 и 3 соответственно. Покрытия характеризуются отсутствием пористости.

Согласно данным СЭМ поперечных сечений покрытий их толщина равна 55...70 мкм (рис. 4). На границе покрытия с основой вследствие термосилового воздействия плазменной струи на поверхность основы, нагреваемую до температуры плавления, формируется рельеф, который позволяет увеличить адгезию.

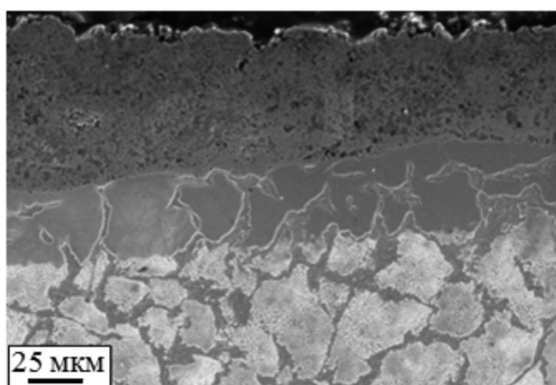


Рис. 4. Характерное изображение структуры покрытия системы TiC-Mo. Прямой шлиф

## Выводы

Впервые электровзрывным способом получены покрытия из молибдена и карбида титана, параметр шероховатости которых  $Ra = 2,9...3,0$  мкм. Рельеф поверхности покрытий образован композиционными микрокаплями системы TiC-Mo диаметрами от 1 до 50 мкм. Толщина покрытий составляет 55...70 мкм. Граница покрытия с основой является неровной. Покрытие обладает композиционной наполненной структурой, представляющей собой молибденовую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями карбида титана.

## Список литературы

1. Fukushima T. High temperature properties of TiC/Mo coatings by thermal spraying // Journal of High Temperature Society. – 2002. – Vol. 28. – No. 4. – P. 171 – 175.
2. Xiaoqian G., Yaran N., Liping H., Heng J., Xuebin Z. Microstructure and tribological property of TiC-Mo coating prepared by vacuum plasma spraying // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21(5). – P. 1083 – 1089.
3. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.
4. Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Автоматизированная электровзрывная установка для повышения эксплуатационных характеристик материалов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 6. – С. 22–25.
5. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 301 с.

Obrabotka metallov  
N 3 (60), July–September 2013, Pages 90-93

### Structure of wear resistant coatings TiC-Mo, received electric-explosive spraying

D.A. Romanov, O.V. Olesyuk, E.A. Budovskikh, E.S. Vaschuk, V.E. Gromov

Siberian State Industrial University, Kirov st., 42,  
Novokuznetsk, 654007, Russia  
E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru

#### Abstract

One of promising technique to increase the performance index and service life of details made of metal and alloys is electroexplosive spattering (EES), that is carried out by electrical explosion. One of this technique advantages is a high adhesion to the substrate of the formed coating. A topography and structural features of TiC-Mo electroexplosive coatings is studied in this work by methods of optical interferometry, and scanning electron microscopy. It is found that the after treatment surface roughness parameters are about  $Ra = 3,0 \mu\text{m}$ . The thickness of layers is about  $55-70 \mu\text{m}$ . A profile, forming on the border of a coating and a substrate, increases an adhesion. A structure of composite coatings is presented by molybdenum matrix with titanium carbide particles inside. Coatings have a cohesively-adhesive bond with the material contact surfaces.

Keywords: electroexplosive spraying; wear-resistant coatings; molybdenum; titanium carbide; roughness; adhesion; microstructure.

#### References

1. Fukushima T. *Journal of High Temperature Society*, 2002, Vol. 28, no. 4, pp. 171 – 175.
2. Xiaoqian G., Yaran N., Liping H., Heng J., Xuebin Z. *Journal of Termal Spray Technology*, 2012, Vol. 21(5), pp. 1083 – 1089.
3. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. *Jeletrovzryvnoe napylenie jeletrojerozionnostojkih pokrytij: formirovanie struktury, fazovogo sostava i svojstv jeletrojerozionnostojkih pokrytij metodom jeletrovzryvnogo napylenija* (Electro-detonation spraying of electro-erosion-resistant coatings: structure formation, phase composition and properties of electro-erosion-resistant coatings by electro-detonation spraying), Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 170 p.
4. Zhmakin Ju.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Kuznecov V.A. *Promyshlennaja jenergetika*, 2011, no. 6, pp. 22–25.
5. Bagautdinov A.Ja., Budovskikh E.A., Ivanov Ju.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy jeletrovzryvnogo legirovanija metallov i splavov* (Physical basis of Electro-detonation doping metals and alloys). Novokuznetsk, SibSIU, 2007. 301 p.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

*А.С. БАЧУРИН, аспирант*

*К.Н. БОБИН, канд. техн. наук, доцент*

*К.А. МАТВЕЕВ, доктор техн. наук, профессор*

*Н.А. РЫНГАЧ, канд. техн. наук, доцент*

*Н.В. КУРЛАЕВ, доктор техн. наук, профессор  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 4 июня 2013 года

Рецензирование 20 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Бачурин А.С.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Производство высокоточных деталей часто сталкивается с необходимостью прогнозирования деформаций, вызываемых термической обработкой. Основная сложность подобных расчетов заключается в наличии нестационарного теплообмена между закалочной средой и деталью, а также в отсутствии достоверной информации о сходимости решений подобных задач с экспериментальными исследованиями. В работе проведено решение связанной задачи нестационарного теплообмена и термической деформации образца из алюминиевого сплава и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. В расчетах учтена зависимость коэффициента теплообмена между поверхностью детали и закалочной средой от температуры поверхности детали, скорости и направления погружения детали в закалочную среду. В результате расчетов были получены температурные поля в детали, возникающие напряжения и деформации детали. Экспериментальные данные подтвердили характер деформации, полученной при расчете, разность между деформациями, полученными при расчетах и экспериментальными данными, составила 23%.

**Ключевые слова:** ANSYS, численное моделирование, закалка, закалочные напряжения, закалочные деформации.

## Введение

Процесс закалки связан с появлением напряжений, которые в ряде случаев могут привести к короблению и деформации деталей. Также на деформацию влияют материал, размеры, геометрия и толщина закаливаемых деталей, кроме того, детали помещаются в закалочную среду с конечной скоростью, что также вносит вклад в общую деформацию деталей [1, 3]. Эта проблема особенно актуальна в авиастроении, где детали обладают малой жесткостью [4, 9].

В настоящее время борьба с закалочными деформациями ведется следующими способами [3, 6, 7, 8]: рациональное конструирование деталей, фиксация деталей и задание дополнительных припусков на чистовую механическую обработку, выполняемую после термообработки. Однако существующие методики определения закалочных деформаций [3, 5] носят либо качественный характер, либо сложны и не обладают необходимой точностью для нежестких деталей. Отсутствие достоверной методики прогнозирования закалочных напряжений приводит к зна-

чительному количеству бракованных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по точности изготовления.

В настоящее время существующее программное обеспечение позволяет производить анализ тепловых деформаций [8, 10, 11, 12], но для моделирования закалки необходимо задать функцию, описывающую теплообмен между поверхностью детали и закалочной средой. Кроме того, для получения достоверных результатов необходимо учитывать изменение теплообмена между закалочной средой и деталью, зависящего от температуры поверхности детали [2], а также направление и скорость погружения детали в закалочную среду. Проведенный анализ доступной литературы [8, 12], посвященной термической обработке, показал, что готовых решений для задач в данной постановке не существует, однако возможно решение подобных задач с применением связанного междисциплинарного анализа. Главной проблемой такого анализа является вопрос сходимости результатов расчетов с экспериментальными данными, поэтому для практического применения результатов

таких расчетов необходимо оценить погрешность путем сравнения тестовых расчетов либо задачами, имеющими известное решение, либо с экспериментальными данными.

Цель данной работы – оценка достоверности результатов связанного анализа теплообмена и термических деформаций образца из алюминиевого сплава.

### Численное моделирование процесса закалки

Для моделирования процесса погружения детали в закалочную среду задана расчетная область (рис. 1), представляющая собой параллелепипед с габаритными размерами 200×41×18 мм.

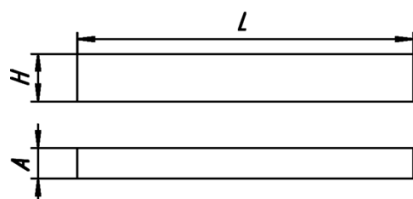


Рис. 1. Эскиз стержневого образца

В качестве начальных условий для расчета были заданы:

- материал детали – алюминиевый сплав АК6,
- начальная температура стержня 515 °С,
- закалочная среда – вода,
- температура закалочной среды 27 °С.

Решение задачи проводилось с помощью конечно-элементного анализа в программе ANSYS 14 в два этапа: первый этап заключался в решении нестационарной тепловой задачи, второй представлял собой расчет перемещений образца под действием напряжений, вызванных локальным нагревом. Кроме того, учитывался нелинейный характер теплообмена между водой и поверхностью детали, зависящий от температуры [2], для чего был написан макрос, изменявший коэффициент теплообмена в зависимости от температуры на поверхности образца.

Для упрощения расчетов и снижения числа конечных элементов использовалась симметрия детали. Погружение в закалочную среду производилось со скоростью 0,05 м/с вдоль размера 41 мм. Для обеспечения устойчивости решения учитывалось условие

$$ITS = \frac{\Delta^2}{4\alpha},$$

где  $ITS$  – начальный шаг по времени;  $\Delta^2$  – приведенная длина конечного элемента в направлении температурного градиента;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности.

Так как процесс погружения детали в закалочную среду продолжается менее 1 с, для расчетов выбран шаг по времени 0,01 с, и исходя из шага

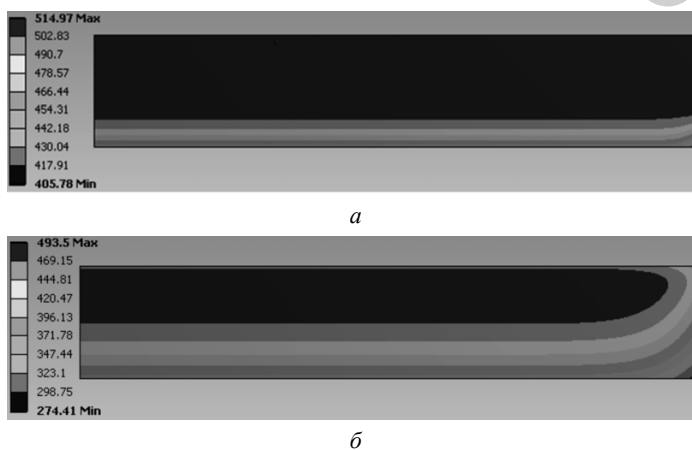


Рис. 2. Распределение температур (°С) в стержне в различные моменты времени при погружении в закалочную среду: а – 0,03 с; б – 0,4 с

по времени задан размер ячейки. В результате проведенных расчетов была получена зависимость распределения температуры по сечению стержня от времени (рис. 2). Расчет показал разницу ~100 °С между отдельными частями образца. Такая разница температур вызывает значительные напряжения в детали, которые могут вызвать пластические деформации, учитывая тот факт, что при нагреве величина предела текучести снижается.

Данные распределения температур, полученные в расчете конвективного теплообмена, были использованы в структурном анализе, в результате чего были получены значения эквивалентных напряжений (рис. 3).

Из распределения напряжений можно сделать вывод, что внешние слои стержня при контакте с закалочной средой охлаждаются и сжимаются, в то время как внутренние слои остаются горячими и препятствуют сжатию внешних слоев. Следовательно, во внешних слоях действуют напряжения растяжения, во внутренних – напряжения сжатия. Далее наружный слой теряет возможность пластически

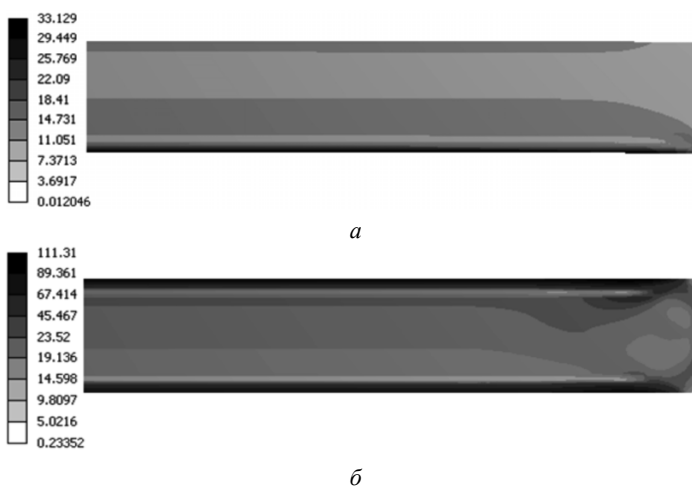


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в расчетной области образца в различные моменты времени: а – 0,03 с; б – 0,4 с





Рис. 4. Деформации закаленного стержня относительно первоначальной формы (масштаб перемещений увеличен)

деформироваться, при этом внутренний объем, охлаждаясь, уменьшается, что приводит к появлению внутри стержня напряжений растяжения. В результате появления напряжений стержень деформируется (рис. 4), что часто встречается в практике термообработки [3].

### Результаты и обсуждение

Для оценки достоверности расчетов деформаций проведена экспериментальная закалка образцов. Режимы термообработки и размеры образцов соответствуют начальным условиям расчета. Всего было изготовлено восемь образцов из четырех партий. На поверхность образцов нанесена мерная сетка для оценки деформации. Характер деформации, наблюдаемый при закалке (рис. 5), качественно аналогичен деформациям, полученным при расчете (рис. 4). Измерения образцов проводились после выдержки, исключающей влияния старения.

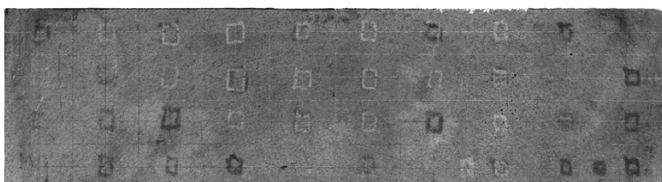


Рис. 5. Образец с мерной сеткой после закалки

При сравнении экспериментальных результатов с результатами численного моделирования (рис. 6) максимальная относительная погрешность составила 23 %, что соответствует отклонению примерно в 0,01 мм, из чего можно сделать вывод, что результаты численного расчета удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными.

### Выводы

1. Экспериментальные данные подтвердили характер деформации, полученный при расчете, при этом разность между деформациями, полученными при расчетах и экспериментальными данными, составила не более 23 %.

2. Найденная погрешность позволяет использовать результаты данного анализа для прогнозирования закалочных деформаций и назначения припусков на окончательную механическую обработку детали после проведения термообработки.

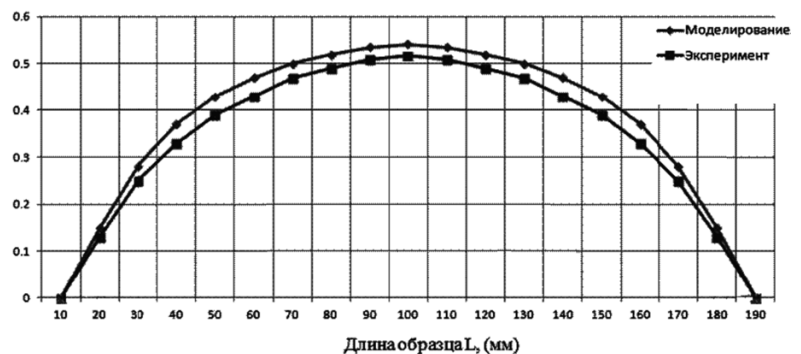


Рис. 6. Сравнение перемещений по длине образца

### Список литературы

1. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов. – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
3. Арндарчук А.В., Астафьев А.А., Башнин Ю.А. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 776 с.
4. Курлаев Н.В., Рынгач Н.А., Нарышева Г.Г. Теоретические основы самолето- и вертолетостроения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 100 с.
5. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела. – М.: Машгиз, 1963. – 352 с.
6. Фиргер В.И. Термическая обработка сплавов. Справочник. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 304 с.
7. Лахтин Ю.М., Рахматдт А.Г. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
8. George E.T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – Ohio: ASM, 2001. – 550 p.
9. Пекариш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А., Громишев А.Г., Матвиенко В.А.. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 303 с.
10. Биленко Г.А. Общие возможности пакета программ Welding Simulation Suite // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 28–31.
11. Скиба В.Ю., Корниенко Е.Е., Веселов С.В., Плотникова Н.В. Определение рациональных режимов электродуговой сварки стали 30ХГСА с помощью конечно-



элементного моделирования в программном комплексе SYSWELD // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. трудов VI межд. науч.-техн. конф. Часть 1. - Липецк: ЛГТУ, 2009. – С. 238–245.

12. Портал технической поддержки пользователей ANSYS: [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal> (дата обращения: 7.10.12)

Obrabotka metallov  
N 3 (60), July–September 2013, Pages 94-97

### Numerical simulation of aluminum alloy parts quenching process

A.S. Bachurin, K.N Bobin, K.A. Matveev, N.A. Ryngach, N.V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

#### Abstract

Production of high-precision parts needs to predict deformation and stresses caused by thermal treatment. The main problem of such calculation is the presence of unsteady heat transfer between the quenching medium and the part as well as the absence of reliable information on the convergence of solutions of such problems with experimental studies. In the paper the solution of the coupled problem of unsteady heat transfer and thermal deformation of an aluminum alloy sample is given and the results are compared with experimental data. The calculations took into account the dependence of the heat transfer coefficient between the workpiece surface and the temperature of the quenching medium surface of the part, the speed and the direction of the dive details in the quenching medium. Temperature fields in detail, resulting stress and strain in details are obtained in consequence of the calculations. Experimental data confirmed the nature of the deformation, obtained by calculating, the total deviation between the strains obtained in the calculations and the experimental data was 23%.

Keywords: ANSYS, numerical simulation, quenching, quenching stress, quenching deformation.

#### References

1. Beljaev A.I., Bochvar O.S, Bujnov N.N. *Metallovedenie aljuminija i ego splavov* (Physical metallurgy aluminum and aluminum alloys). Moscow, Metallurgija, 1971. 352 p.
2. Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlja vuzov* (Heat-mass exchange: Textbook for universities). Moscow, Moscow Power Engineering Institute Press, 2005. 550 p.
3. Arendarchuk A.V., Astaf'ev A.A., Bashnin Ju.A. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: Spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1980. 776 p.
4. Kurlaev N.V., Ryngach N.A., Narysheva G.G. *Teoreticheskie osnovy samoletno- i vertoletostroenija: Uchebnoe posobie* (Theoretical basis of aircraft and helicopter: Tutorial). Novosibirsk, NSTU, 2013. 100 p.
5. Abramov V.V. *Ostatochnye naprjazhenija i deformacii v metallah. Raschjoty metodom raschlenenija tela* (Residual stresses and deformations metals. Calculations by a method of dismemberment body). Moscow. Mashgiz, 1963. 352 p.
6. Firger V.I. *Termicheskaja obrabotka splavov: Spravochnik* (Heat treatment of alloys: Handbook). Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 304 p.
7. Lahtin Yu.M., Rahshtadt A.G. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1980. 783 p.
8. George E.T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Ohio, ASM, 2001. 550 p.
9. Pekarsh A.I. Tarasov Yu.M., Krivov G.A., Gromashev, A.G.; Matvienko, V.A. *Sovremennye tehnologii agregatno-sborocnogo proizvodstva samoletov* (Modern technologies of aggregate-assembly production aircraft). Moscow, Agrafpress, 2006. 303 p.
10. Bilenko G.A. Obshhie vozmozhnosti paketa programm Welding Simulation Suite [General capabilities of the software package welding simulation suite]. *Metallurg - Metallurgist*, 2011, no. 5, pp. 28-31.
11. Skeebe V.Yu., Kornienko E.E., Veselov S.V., Plotnikova N.V. *Opredelenie racional'nyh rezhimov jelektrodugovoj svarki stali 30HGSA s pomoshh'ju konechno-jelementnogo modelirovanija v programmnom komplekse SYSWELD* [The definition of rational modes of arc welding steel 30HGSA using finite-element modeling software package SYSWELD]. *Sovremennaja metallurgija nachala novogo tysjacheletija: sbornik nauchnyh trudov VI mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. [Collected scientific papers of the VI International Scientific Conference "Modern metallurgy beginning of the new millennium"]. Lipetsk: LSTU, 2009, Part 1. pp. 238-245.
12. *Portal tehniceskoy podderzhki pol'zovatelej ANSYS* (Portal user support ANSYS) Available at: <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal> (accessed 7 October 2012).

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ТРАВЛЕНИЯ ИОННЫМ ПУЧКОМ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

*М.В. ТОПЯКОВА, аспирант*  
*А.А. ВЕЛИЧКО, доктор техн. наук, профессор*  
*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Получена 29 июля 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

Топякова М.В. – 630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: topyakova@gmail.com

Проведен анализ скоростей травления ионным пучком материалов, используемых при производстве интегральных микросхем. Экспериментальное травление проводилось на двухлучевом электронно-ионном микроскопе Cross Beam 1540 EsV. Показаны зависимости скорости травления алюминия, фосфоросиликатного стекла, нитрида кремния, термического оксида и поликремния от времени и тока пучка ионов. Из полученных зависимостей видно, что с увеличением тока в некоторых материалах существенно увеличивается эффект распыления и переосаждения, что сказывается и на скорости, и на качестве травления. Исходя из полученных результатов выявлены наиболее оптимальные режимы травления для последующей коррекции экспериментальных образцов чипов СБИС.

**Ключевые слова:** травление фокусированным ионным пучком, интегральные микросхемы, растровый электронный микроскоп.

## Введение

Технология фокусированного ионного пучка (FIB – Focused Ion Beam) последнее время получает все более широкое распространение [1]. Возможности прецизионного травления и наблюдения оказываются востребованными при работе с такими микро- и нанообъектами, как приготовления фольг для просвечивающей электронной микроскопии, обработка различных покрытий и многослойных структур, модифицирование нанообъектов, в том числе и интегральных микросхем (ИМС) [2–4].

Современная технология фокусированного ионного пучка характеризуется способностью фокусировки ионного пучка до диаметра 5 нм при ускоряющем напряжении 30 кВ и относительно малой глубиной проникновения ионов в твердое тело  $25 \pm 8$  нм, что позволяет сохранять свойства обрабатываемого материала. Возникновение при взаимодействии ионного пучка с веществом вторичных ионов и электронов позволяет проводить микроскопическое исследование. Взаимодействие ионного пучка с веществом в газообразном состоянии дает возможность осуществлять ионно-стимулированное химическое травление и осаждение.

Особенно большие перспективы при использовании ионных пучков возникают при их использовании в микро- и наноэлектронике [5]. Современные сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС) могут объединять на одном кристалле более миллиарда транзисторов. В настоящее время наиболее распространенной в производстве СБИС и оптимальной с точки зрения «качество-цена» является субмикронная КМОП-технология, в частности, с проектно-технологическими нормами 0,18 мкм, реализованная на большинстве «кремниевых фабрик» в мире. Современная организация микроэлектронного производства подразумевает возможность проектирования СБИС дизайн-центрами с последующим изготовлением экспериментальных образцов СБИС на серийных фабриках в различных странах мира. Однако в случае выявления ошибок проектирования повторный запуск СБИС на фабрике осуществляется в соответствии с возможностями фабрики спустя достаточно длительное время [1].

Вместо повторного запуска на фабрике намного быстрее и экономичней провести коррекцию выявленных ошибок проектирования с помощью фокусированного ионного пучка. Для того чтобы отработать

технологии коррекции СБИС, необходимо иметь представление о требуемом времени и режиме травления корректируемой интегральной схемы. Целью данной работы является получение зависимостей глубины травления от времени и зависимостей глубины травления от тока сфокусированного ионного пучка основных материалов, используемых в СБИС.

### Методика эксперимента

Для исследования возможности проведения ионного травления различных материалов на установке сфокусированных ионных пучков FIB Cross Beam 1540 EsB и проверки возможности коррекции экспериментальных образцов чипов СБИС были проведены эксперименты по травлению различных материалов. В качестве исследуемых материалов использовались вольфрам, алюминий, фосфоросиликатное стекло, нитрид кремния, термический оксид и поликремний.

Установка CrossBeam 1540 EsB представляет собой аналитический автоэмиссионный электронно-ионный (двулучевой) растровый электронный микроскоп. Это уникальное оборудование CrossBeam 1540 состоит из комбинации автоэмиссионной электронно-оптической колонны GEMINI, автоэмиссионной ионной колонны, сфокусированных в единую точку фокуса. В серии реализованы самые последние достижения в области электронной и ионной оптики для применения во всех областях исследований, связанных с нанотехнологиями.

Образцы вольфрама, алюминия, фосфоросиликатного стекла, нитрида кремния, термического оксида и поликремния травились сфокусированным ионным пучком. Были исследованы результаты травления при токе ионного пучка 1, 2 и 5 нА. Область травления выбиралась  $5 \times 10$  мкм (общая площадь 50 мкм<sup>2</sup>).

### Результаты и обсуждения

Ниже приведены результаты травления легированного поликремния  $d = 0.6$  мкм на термическом оксиде  $d = 0.1$  мкм при трех разных токах пучка. Зависимости глубины травления от времени имеют линейный характер. При увеличении времени воздействия сфокусированного пучка ионов на образец глубина травления увеличивается (рис. 1–3).

Важно отметить, что дальнейшее увеличение тока ионного пучка до 5 нА при тех же временах травления приводит к увеличению глубины травления всего с 6 до 7 мкм, т.е. происходит замедление скорости травления. На рис. 3 приведены зависимости глубины травления от тока пучка ионов для трех значений времени травления: 120, 240 и 360 с.

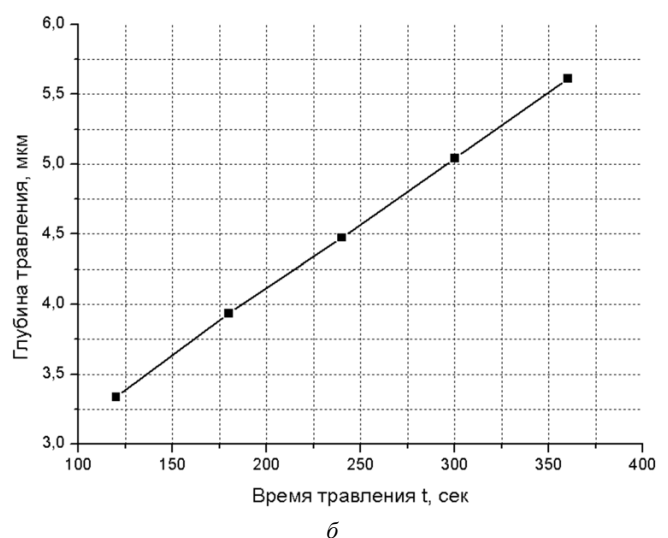
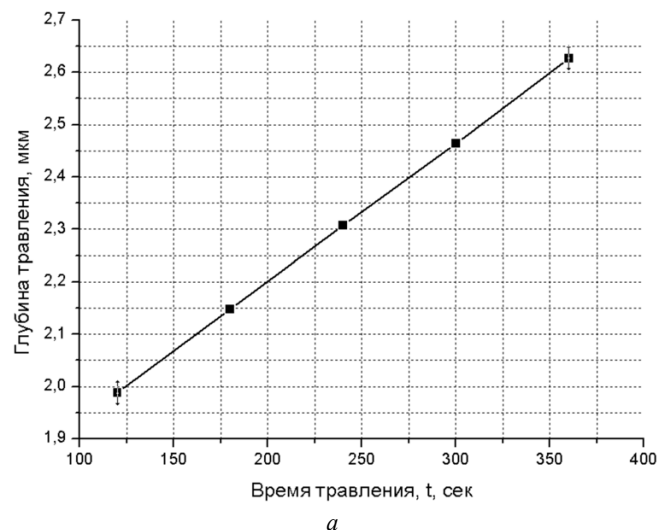


Рис. 1. Зависимость глубины травления от времени травления, для тока пучка 1 нА (а) и 2 нА (б) соответственно

Из полученных зависимостей глубины травления от тока ионного пучка (рис. 2) видно, что с увеличением тока пучка скорость травления растет. Следует отметить, что с увеличением тока усиливается явление

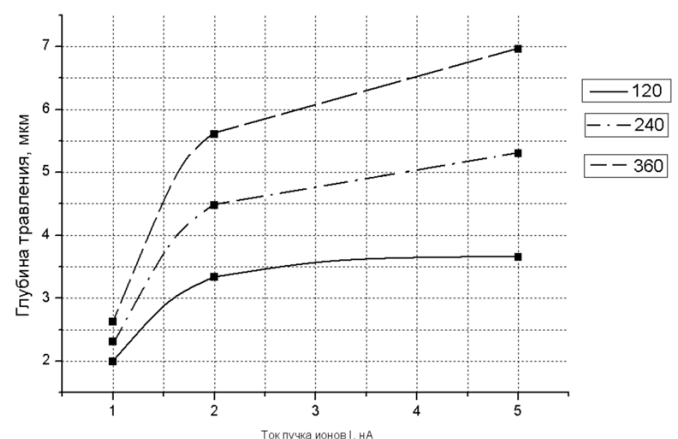


Рис. 2. Зависимости глубины травления поликремния от тока ионного пучка для 120, 240 и 360 с.

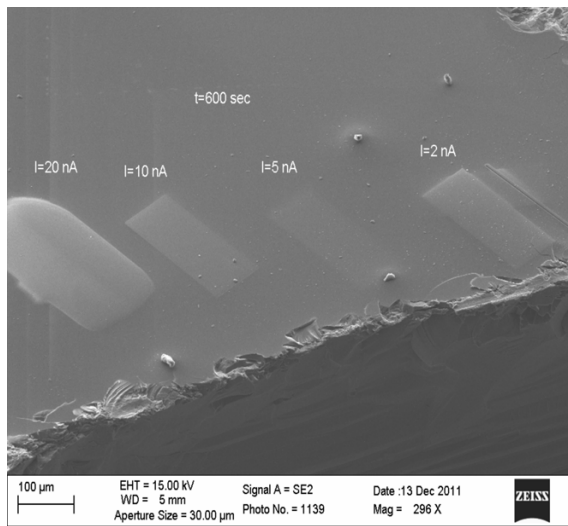


Рис. 3. РЭМ-изображение результата травления при заданном времени 600 с. Токи пучка ионов равны:  $I = 2$  нА,  $I = 5$  нА,  $I = 10$  нА,  $I = 20$  нА

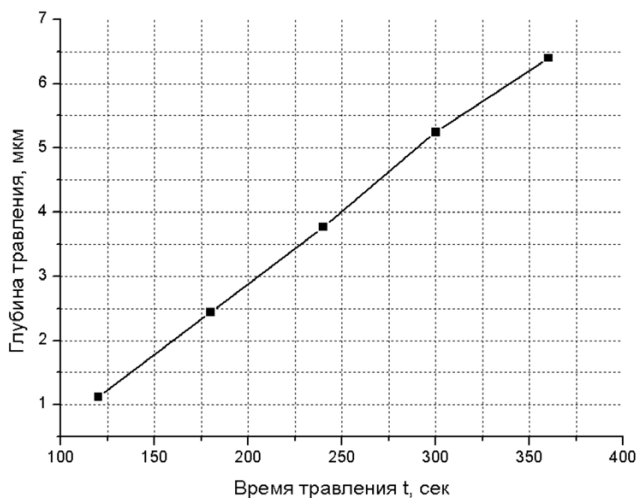
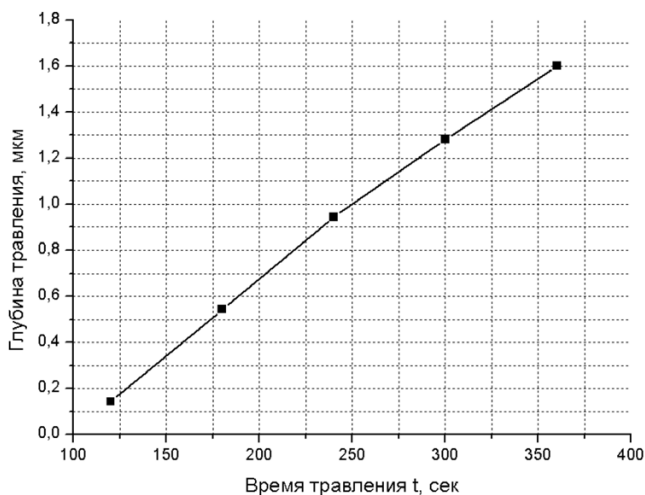


Рис. 4. Зависимость глубины травления нитрида кремния  $d = 0.2$  мкм от времени травления при токе пучка 1 нА (а) и 2 нА (б) соответственно

ние распыления, что сказывается и на скорости, и на качестве травления (рис. 3).

На рис. 4, а и б приведены зависимости глубины травления от времени травления при токах ионного пучка 1 и 2 нА.

Как и в предыдущем случае, при увеличении тока до 5 нА глубина травления практически осталась неизменной при времени 360 с. На рис. 5 приведены зависимости глубины травления от тока пучка ионов для трех значений времени травления: 120, 240 и 360 с.

Полученные зависимости глубины травления нитрида кремния ведут себя аналогично зависимостям легированного поликремния. Также из графиков, изображенных на рис. 5 видно, что глубина

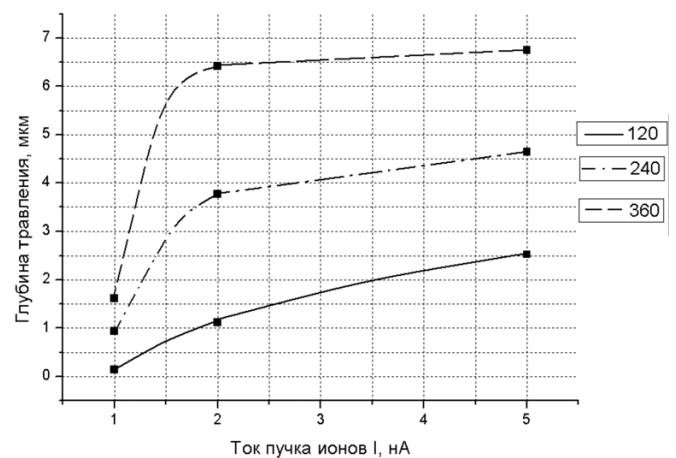


Рис. 5. Зависимости глубины травления нитрида кремния  $d = 0.2$  мкм от тока ионного пучка за 120, 240 и 360 с.

травления увеличивается намного медленней при увеличении тока пучка от 2 до 5 нА, чем при увеличении от 1 до 2 нА. Данный спад можно объяснить сильным эффектом распыления нитрида кремния при токах более 2 нА.

На рис. 6, а и б приведены зависимости глубины травления от времени процесса при токах ионного пучка 1 и 2 нА.

В случае травления фосфоросиликатного стекла при увеличении тока ионного пучка увеличение скорости травления от времени уменьшается несущественно, что говорит о том, что эффект распыления в данном случае меньше, чем при травлении нитрида кремния и легированного поликремния.

## Выводы

Результаты экспериментального травления материалов, используемых при изготовлении СБИС, и построенные зависимости глубины травления от времени и зависимости глубины травления от тока сфокусированного ионного пучка позволяют сформировать представление о требуемом времени и

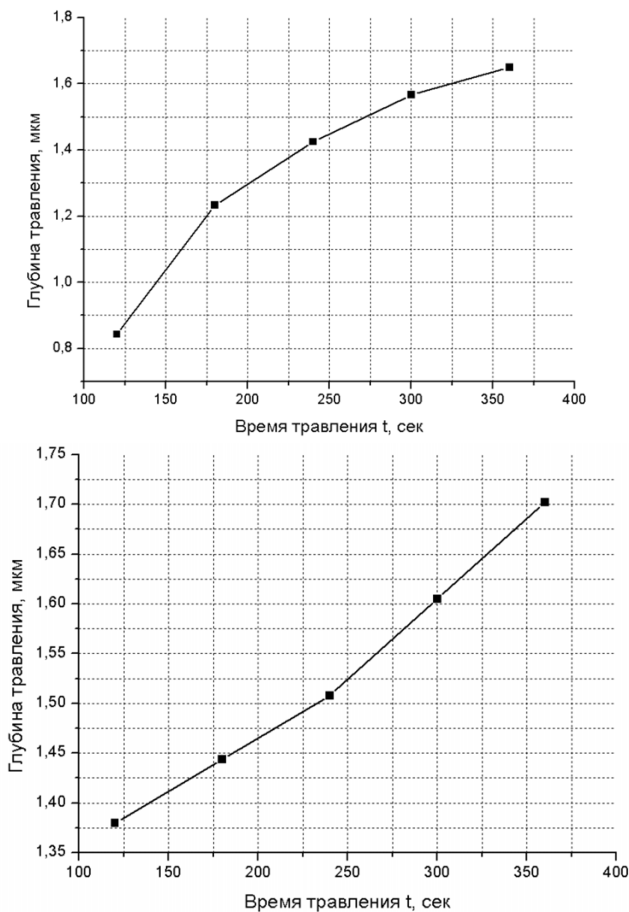


Рис. 6. Зависимость глубины травления фосфоросиликатного стекла на термическом оксиде толщиной  $d = 0.1$  мкм от времени травления для тока пучка 1 нА (а) и 2 нА (б) соответственно

режиме травления корректируемой интегральной схемы.

При анализе графиков можно сделать вывод, что для большинства материалов скорость травления есть величина линейная и растет непосредственно в зависимости от времени. Зависимости глубины травления от тока ионного пучка демонстрируют, что при увеличении тока ионного пучка рост скорости травления и качество травления снижаются, что связано с эффектом распыления и переосаждения материала.

На стадии удаления фосфоросиликатного стекла и защитного слоя СБИС для ускорения процесса

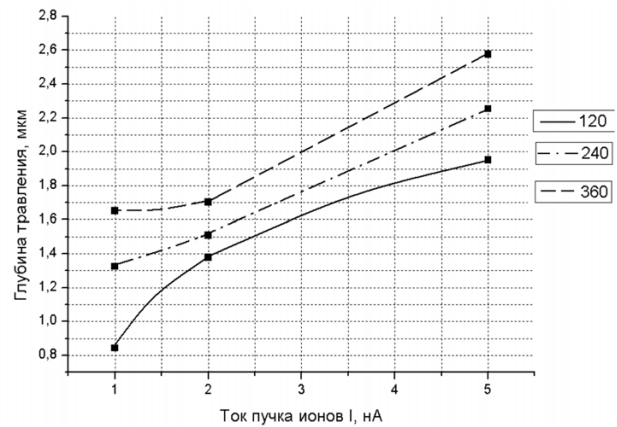


Рис. 7. Зависимости глубины травления фосфоросиликатного стекла на термическом оксиде толщиной  $d = 0.1$  мкм от тока ионного пучка для 120, 240 и 360 с.

можно ток пучка задавать порядка 5...10 нА. В случае проведения более точных работ для удаления нижележащих слоев нитрида кремния или легированного поликремния ток пучка должен быть порядка 1...2 нА.

#### Список литературы

1. Лучинин В.В., Савенко А.Ю., Тагаченков А.М. Методы микро- и наноразмерной обработки материалов и композиций // Петербургский журнал электроники. – № 2. – 2005. – С. 3–14.
2. Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Наноразмерные ионно-лучевые технологии. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В.В. Лучинина и Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. – С. 284–304.
3. Кузнецова М.А., Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Ионно-лучевая технология сверхлокального препарирования интегральных схем // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Физика твердого тела и электроника». – 2006. – № 2. – С. 28–35.
4. Volinsky A.A., Rice L., Qin W., Theodore N. D. FIB failure analysis of memory arrays. Microelectronic Engineering. – 2004. – № 75. – P. 3–11.
5. Топякова М. В., Васильев В. Ю., Величко А. А. Коррекция субмикронных многоуровневых интегральных микросхем с помощью электронно-ионного микроскопа // Сборник трудов междунар. науч. конф. «Электронная техника и технологии». – Харьков, 2012. – Т. 2. – С. 42–43.

Обработка металлов  
N 3 (60), July–September 2013, Pages 98-102

#### Investigation of the ion beam etching of the materials used in micro- and nanotechnologies

M. V. Topyakova, A. A. Velichko

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
E-mail: topyakova@gmail.com

## Abstract

The analysis of the ion-beam etching rates of the materials used in integrated circuits manufacturing is carried out. Experimental etching is carried out by the dual-beam electron-ion microscope Cross Beam 1540 EsB. The etching rate-time functions and etching rate – ion beam current functions for aluminum, phosphor – silicate glass, silicon nitride, polysilicon and thermal oxide are presented. The results show that increase of the current in some materials results in significant increase of sputtering and redeposition effects. These effects affects the rate and on the quality of etching. Based on these results the most suitable ion beam etching parameters for subsequent correction of experimental integrated circuits are determined.

Keywords: focused ion beam etching, integrated circuits, scanning electron microscope.

## References

1. Luchinin V.V., Savenko A.Yu., Tagachenkov A.M. *Metody mikro- i nanorazmernoj obrabotki materialov i kompozicij* (Methods of micro-and nanoscale materials processing and compositions). *Peterburgskij Zhurnal Jelektroniki*, Saint Petersburg, OAO “Rossijskij nauchno-issledovatel’skij institut “Jelektronstandart”, 2005, no. 2, pp. 3-14.
2. Luchinin V.V., Savenko A.Yu. *Nanorazmernye ionno-lucheveye tehnologii* [Nano-scale ion-beam technology]. *Nanotehnologija: fizika, processy, diagnostika, pribory. Monografija. Pod red. V.V. Luchinina, Yu.M. Tairova* [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices. Monograph. Ed. V.V. Luchinina and Yu.M. Tairova]. Moscow, Fizmatlit, 2006. pp. 284-304.
3. Kuznecova M.A., Luchinin V.V., Savenko A.Yu. *Izvestija Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”*, 2006. no. 2, pp. 28 - 35.
4. Volinsky A.A., Rice L., Qin W., Theodore N.D. FIB failure analysis of memory arrays. *Microelectronic Engineering*, 2004, no. 75, pp. 3-11.
5. Topyakova M.V., Vasil’ev V.Yu., Velichko A.A. *Korrekcija submikronnyh mnogourovnevnyh integral’nyh mikroshem s pomoshh’ju jelektronno-ionnogo mikroskopa* [Correction of multi-level sub-micron integrated circuits using electron-ion microscope]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Jelektronnaja tehnika i tehnologii»* [Proceedings of the International Conference “Electronic Equipment and Technologies”]. Kharkov, 2012, Vol. 2, pp. 42-43.



# ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ВНЕВАКУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ\*

*О.Г. ЛЕНИВЦЕВА<sup>1</sup>, аспирант  
И.А. БАТАЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
М.Г. ГОЛКОВСКИЙ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук  
В.В. САМОЙЛЕНКО<sup>1</sup>, аспирант  
Р.А. ДОСТОВАЛОВ<sup>1</sup>, студент  
<sup>1</sup>(НГТУ, г. Новосибирск)  
<sup>2</sup>(ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 4 июля 2013 года  
Рецензирование 26 августа 2013 года  
Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Ленивцева О.Г.** – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: lenivtseva\_olga@mail.ru

Исследуется структура и свойства поверхностных слоев титана VT1-0, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей титана и графита. Методами оптической и растровой электронной микроскопии исследована структура полученных покрытий. Показано, что наплавленный слой характеризуется высоким качеством и толщиной до 2 мм. Структура наплавленного слоя представляет собой высокопрочные кристаллы карбида титана, распределенные в матрице  $\alpha'$ -Ti и нерастворившиеся частицы графита. Исследуемые покрытия отличаются высокой твердостью и износостойкостью. Потеря массы при изнашивании у образцов с покрытием в 7 раз ниже по сравнению с материалом без покрытия. Полученные в работе данные показывают, что технология вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей позволяет получать покрытия на титане VT1-0, отличающиеся повышенной твердостью и износостойкостью.

**Ключевые слова:** карбид титана, титан, вневакуумная электронно-лучевая обработка, структура, износ.

## Введение

В настоящее время титан и титановые сплавы используются в аэрокосмической, судостроительной и химической промышленности. Широкое распространение этих материалов связано с такими их свойствами, как высокая удельная прочность, малая плотность и отличная коррозионная стойкость. К существенным недостаткам титановых сплавов относятся высокий коэффициент трения, низкая износостойкость, склонность к контактному схватыванию и образованию задиров при взаимодействии с другими материалами. Для повышения триботехнических и антифрикционных свойств титана применяют ионное имплантирование, поверхностный переплав, диффузионное насыщение поверхностных слоев кислородом, азотом, углеродом, бором и другими

элементами, а также методы нанесения различных упрочняющих покрытий [1].

Многочисленные исследования показывают, что эффективными методами поверхностного упрочнения титановых сплавов являются обработка высококонцентрированными источниками энергии, такими как электрическая дуга, луч лазера, электронный луч [2–6]. Результаты исследований, представленных в работах [7–8], демонстрируют высокую эффективность электронно-лучевой наплавки для создания защитных покрытий на титановых сплавах.

В процессе облучения материала сфокусированным электронным пучком кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую, что обеспечивает нагрев зоны обработки до температуры, достаточной для плавления материала. При этом происходит расплавление и перемешивание легирующих компо-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 12-08-31292.



Режимы наплавки

Номер режима	Скорость перемещения образцов	Частота сканирования	Расстояние от выпускного окна до заготовки	Диаметр пучка	Энергия электронов	Ток пучка
1	10 мм/с	50 Гц	90 мм	12 мм	1,4 МэВ	20 мА
2						21 мА

ментов и поверхностного слоя основного материала. Использование электронного луча, выведенного в атмосферу, позволяет реализовывать различные режимы обработки и получать покрытия требуемого качества и большой толщины (до 2 мм) с сохранением свойств основного металла. Использование ускорителя электронов типа ЭЛВ-6, разработанного специалистами Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск) [9–14], позволяет обрабатывать детали любых размеров без применения дорогостоящих вакуумных камер.

При создании покрытий на титановых сплавах в качестве упрочняющих компонентов используют порошок WC [15–16], смесь порошков TiB и TiC [4], порошки нитридов [9] и другие материалы. В ряде работ показана возможность повышения триботехнических свойств титановых сплавов за счет переплава поверхностных слоев совместно с порошком графита [3, 17]. Savalani с соавторами [6] показали, что использование углеродных нанотрубок при лазерной наплавке позволяет получать покрытия с равномерно распределенными частицами TiC в матрице  $\alpha$ -титана. В результате обработки формируются износостойкие поверхностные слои, содержащие высокопрочные частицы, распределенные в вязкой матрице. Однако высокая цена углеродных нанотрубок и сложность работы резко снижают перспективы их применения в качестве материала для наплавки.

Цель данной работы заключалась в получении и исследовании износостойких слоев на титане ВТ1-0 при наплавке углеродсодержащих смесей электронным лучом, выведенным в атмосферу.

## 1. Материалы и методы исследования

В качестве основного материала использовались заготовки из технически чистого титана размерами 50×100×10 мм. Для получения качественной рабочей поверхности заготовки подвергались шлифованию. Наплавочная смесь состояла из порошка титана чистотой более 99,9 % производства компании Alfa Aesar и графита марки ГЛ 1 в соотношении 4:1 (по массе). Для предотвращения окисления и обеспечения равномерного плавления порошков в наплавочную

смесь добавляли сварочный флюс  $\text{CaF}_2$  (40 % по массе). Все компоненты порошковой смеси тщательно перемешивались и наносились на титановую основу с плотностью насыпки 0,3 г/см<sup>2</sup>.

Обработка электронным лучом осуществлялась в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН с использованием ускорителя электронов ЭЛВ-6. Схема, иллюстрирующая процесс наплавки, представлена на рис. 1.

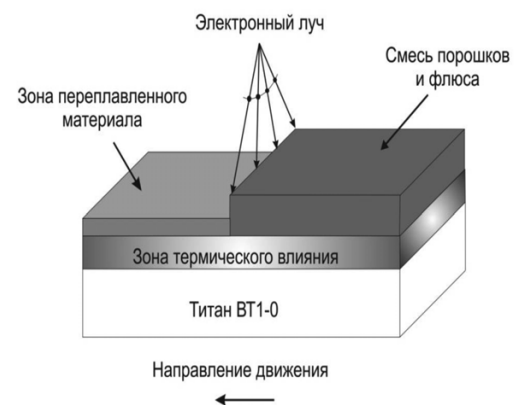


Рис. 1. Схема электронно-лучевой наплавки порошковой смеси

Выбор технологических параметров обработки осуществлялся на основании выполненных ранее экспериментов [8–9, 11–12]. Режимы обработки приведены в табл. 1. Отличия между режимом 1 и режимом 2 заключались в значениях тока пучка (20 и 21 мА соответственно).

Потери компонентов порошковой смеси при наплавке определялись весовым методом с использованием весов Pioneer PA 214C. Потери порошков титана и углерода в процессе обработки составили 2,4 и 1,9 %, потери флюса – 18,3 и 19,8 % для режимов 1 и 2 соответственно.

Структура полученных образцов исследовалась на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m, а при увеличениях свыше 1000 крат – на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Структура материалов выявлялась раствором Кролля. Фазовый состав полученного покрытия определялся на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA. Дифракционные картины были получены при использовании  $\text{Cu K}\alpha$ -излучения.

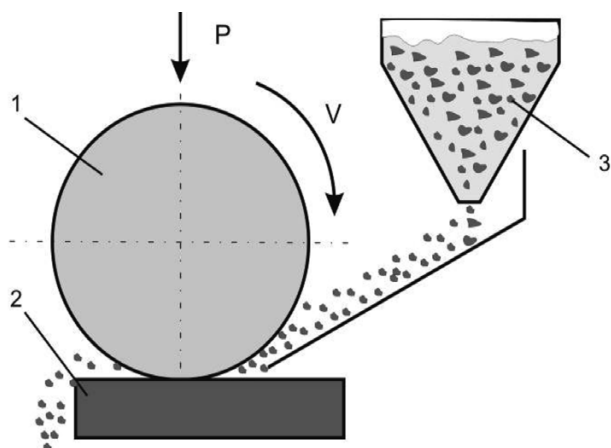


Рис. 2. Схема испытаний по определению износостойкости:

1 – резиновый ролик; 2 – образец; 3 – емкость с абразивом (речной песок);  $P$  – усилие прижатия ролика к образцу;  $V$  – направление вращения ролика

Микротвердость образцов оценивалась на твердомере Wolpert Group 402 MVD под нагрузкой 100 г (при измерениях вдоль линии) и 25 г (при измерении твердости отдельных фаз). Твердость карбидных частиц оценивалась методом наноиндентирования с использованием прибора НаноСкан 3Д.

Износостойкость покрытий определялась по схеме трения о нежестко закрепленные частицы абразива (ГОСТ 23.208-79). Абразивом являлся речной песок. Песок подавался между трущимися поверхностями и захватывался вращающимся резиновым роликом ( $D = 50$  мм), который с постоянным усилием прижимался к испытуемому образцу ( $50 \times 25 \times 10$  мм) (рис. 2). Степень износа оценивалась по потере веса образца. Общая длина пути трения составила 942,5 м. После изнашивания поверхность образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе.

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащей порошковой смеси на образцах из технического титана ВТ1-0 были получены качественные покрытия. При обработке электронным лучом первым расплавлялся флюс (температура плавления 1424 °С). Это способствовало равномерному плавлению присутствующих в смеси порошков. Флюс не оказывает влияния на состав наплавленного слоя. На поверхности заготовок он образует корку шлака, которая предотвращает окисление расплавленной зоны.

Фазовый состав покрытия представлен на рис. 3. На рентгенограмме наплавленного слоя можно выделить три фазы ( $\alpha'$ -Ti, TiC и графит). Следует отме-

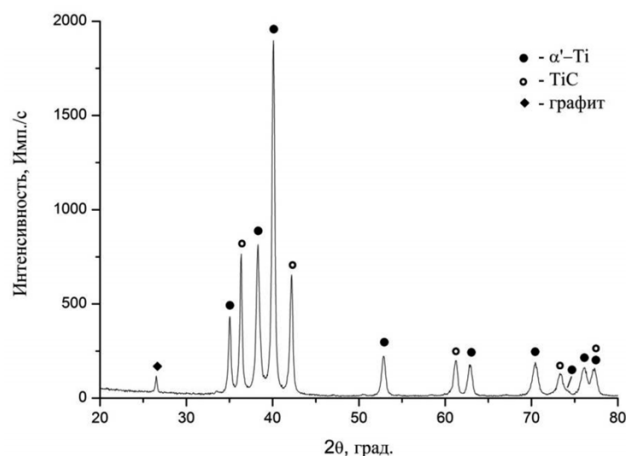


Рис. 3. Фазовый состав зоны переплавленного материала (режим 2)

тить, что разделение  $\alpha'$  и  $\alpha$ -фаз титана методом рентгенофазового анализа весьма затруднительно. Тем не менее, учитывая высокую скорость охлаждения наплавленного слоя, можно предположить, что титановая матрица представлена именно  $\alpha'$ -фазой.

Строение наплавленных слоев в поперечном сечении представлено на рис. 4. На полученных снимках можно выделить ряд характерных зон: зону расплавленного металла (~2 мм для режимов 1 и 2), зону термического влияния (ЗТВ), образованную в результате теплопередачи от расплавленной области, а также зону основного металла, температура которой была недостаточной для развития структурных превращений.

В структуре наплавленного слоя зафиксированы включения нерастворившегося графита. При увели-

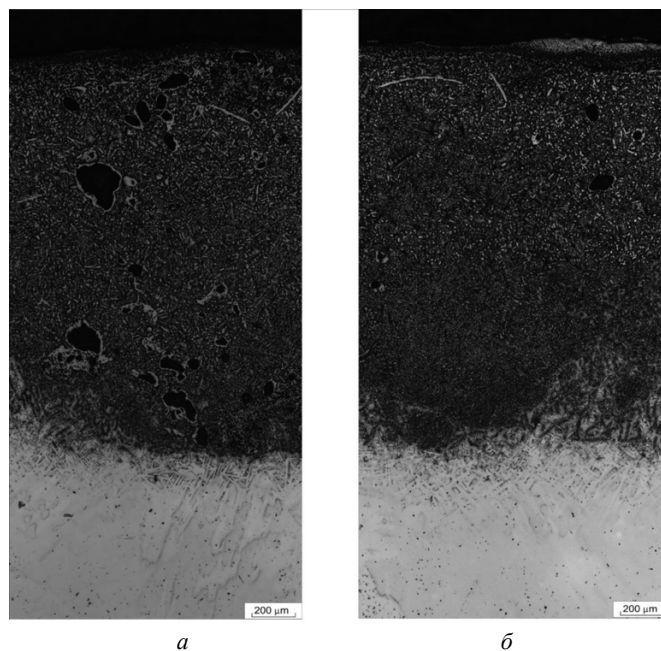


Рис. 4. Поперечное сечение наплавленных слоев:

а – 20 мА; б – 21 мА

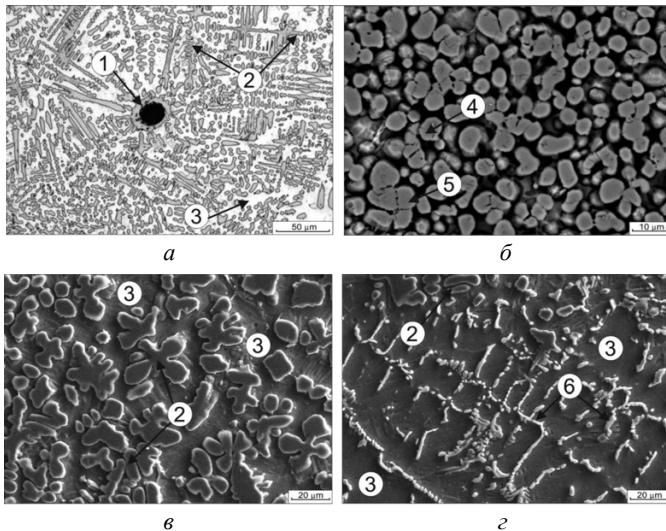


Рис. 5. Структура наплавленного слоя:

1 – частицы графита; 2 – дендритные кристаллы TiC; 3 –  $\alpha$ -Ti ( $\alpha'$ -Ti); 4 – округлые частицы TiC; 5 – конгломераты частиц TiC; 6 – эвтектический TiC

чении силы тока с 20 до 21 мА количество включений графита заметно сократилось, тем не менее полностью устранить их не удалось. Присутствие крупных выделений графита должно приводить к снижению твердости наплавленного слоя. В то же время можно ожидать благоприятное влияние этих включений на снижение коэффициента трения. Подобный эффект наблюдался авторами работы [2], показавшими что структура, содержащая твердые частицы карбида титана, пластичную матрицу и графитовые включения, позволяет улучшить триботехнические свойства полученного материала.

Некоторые особенности структуры переплавленного слоя представлены на рис. 5. Кроме включений нерастворившегося графита (рис. 5, а) структура наплавленного слоя состоит из титановой матрицы и распределенных в ней частиц карбида титана. Условия охлаждения в верхней части покрытия привели к ориентации карбидных кристаллов в направлении, перпендикулярном плоскости шлифа (рис. 5, б). В этой зоне карбидная фаза представлена в виде конгломератов частиц округлой формы средним размером ~2,5 мкм. В ряде случаев наблюдалось слияние отдельных карбидных частиц между собой и образование плотного слоя. В более глубоких слоях покрытия карбидная фаза выделялась в характерной дендритной форме (рис. 5, в). Вблизи зоны термического влияния ввиду недостатка углерода зафиксировано выделение эвтектического карбида титана (рис. 5, з).

На рис. 6 представлены графики изменения микротвердости по глубине наплавленного слоя. Увеличение тока пучка на 1 мА приводит к увеличению толщины наплавленного слоя на 0,2 мм. Средняя твердость покрытия находится на уровне 4,3 ГПа, что в два раза выше твердости основного материала.

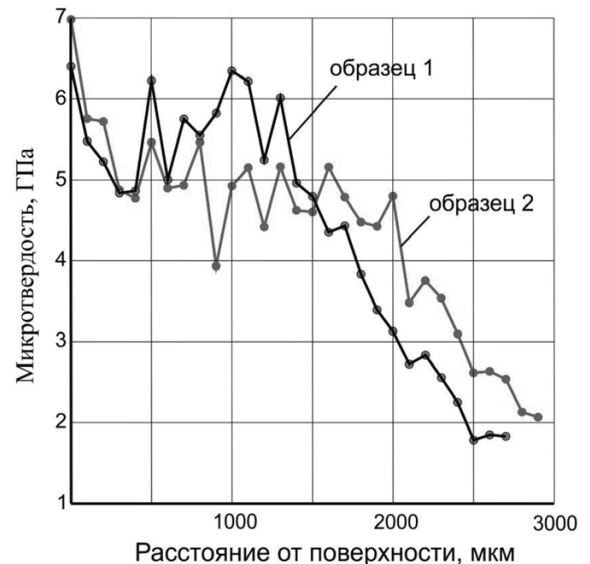


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя

ла. Максимальная твердость покрытия составила 8,5 ГПа. Это связано с высокой объемной долей частиц карбида титана TiC (~32 вес. % для режима 2). Максимальное значение твердости карбидных частиц TiC, зафиксированное методом наноиндентирования, составило 28 ГПа. Твердость покрытия снижается в направлении от поверхности в глубь покрытия, что обусловлено уменьшением размера и объемной доли твердых карбидных частиц.

Наплавленные слои характеризуются высоким уровнем износостойкости. При проведении электронно-микроскопических исследований титановых образцов BT1-0 на поверхности изнашивания

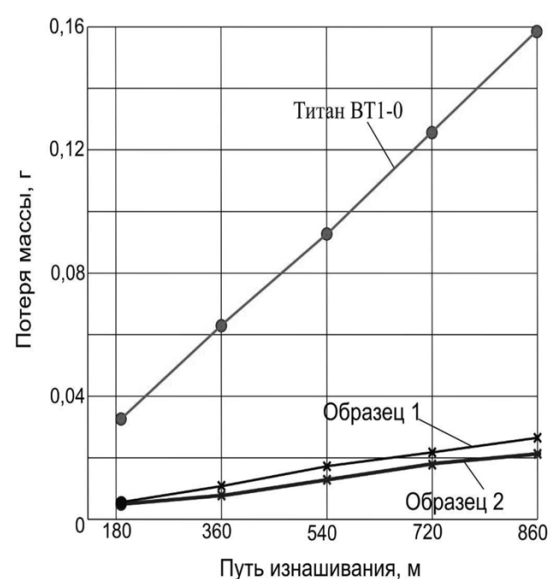


Рис. 7. Потеря массы образцов при воздействии нежестко закрепленных абразивных частиц: образец 1 – ток пучка 20 мА; образец 2 – ток пучка 21 мА

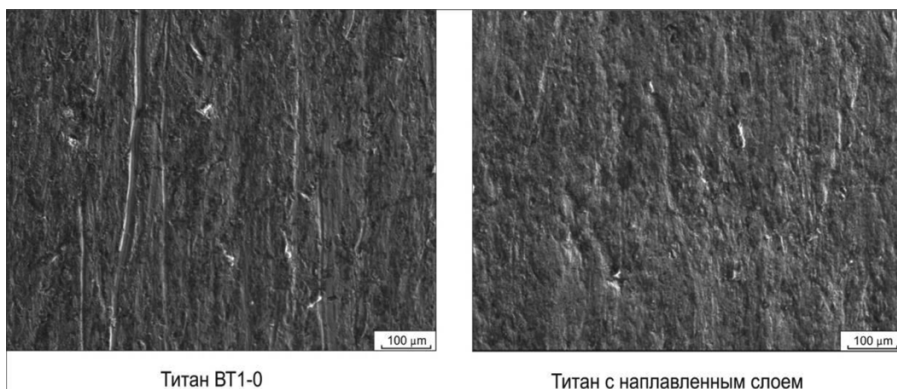


Рис. 8. Микроснимки поверхности образцов после изнашивания

зафиксировано наличие глубоких бороздок (рис. 8). На поверхности образцов с покрытием бороздки подобного рода отсутствуют (рис. 8). Из графика, представленного на рис. 7, следует, что процесс изнашивания развивается с постоянной скоростью. Стойкость образцов с покрытием в семь раз выше по сравнению с титаном BT1-0.

### Выводы

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошка графита является эффективным методом повышения твердости и износостойкости титановых сплавов. Применение этой технологии обеспечивает получение качественных поверхностных слоев большой толщины (до 2 мм).

2. Изменяя режимы наплавки, возможно управлять структурой полученного слоя и контролировать содержание нерастворившихся частиц графита.

3. Электронно-лучевая наплавка обеспечивает повышение твердости материала в два раза по сравнению с исходным титаном. Средняя твердость покрытия составляет 430 HV. Наибольший вклад в общую твердость покрытия вносят частицы карбида титана.

4. В условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива наплавленные покрытия обладают уровнем износостойкости, в семь раз превышающим стойкости титана BT1-0.

### Список литературы

1. *ASM Handbook*. Vol. 5. Surface Engineering / eds.: Catherine M. Cotell, James A. Sprague, and Fred A. Smidt, Jr. : ASM International, 1994. P. 525. (ASM Handbook).
2. Courant B., Hantzpergue J.J., Benayoun S. Surface Treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction // *Wear*. 1999. Vol. 236. P. 39–46.
3. Chehrghani A., Torkamany M.J., Hamedi M.J., Sabbaghzadeh J. Numerical modeling and experimental investi-

gation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation // *Applied Surface Science*. January 2012. Vol. 258. Iss. 6. P. 2068–2076.

4. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Surface & Coatings Technology*. 2004. Vol. 184. P. 74–83.

5. Ettaqi S., Hays V., Hantzpergue J.J., Saindrenan G., Remy J.C. Mechanical, structural and tribological properties of titanium nitrided by a pulsed laser // *Surface & Coatings Technology*. 1998. Vol. 100/101. Iss. 1–3. P. 428–432.

6. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding // *Applied Surface Science*. Vol. 258. Iss. 7. P. 3173–3177. 15 January 2012.

7. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum // *Materials Science & Engineering: A*. 2013. Vol. 578. P. 310–317.

8. Батаев И.А., Журавина Т.В., Руктуев А.А., Ленивецова О.Г., Ромашова Ю.Н. Структурные исследования покрытий системы «титан-тантал», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2012. – № 3(56). – С. 56–59.

9. Oh J.Ch., Lee S., Golkovski M.G. Improvement of the hardness and wear resistance of (TiC, TiN)/Ti–6Al–4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Metallurgical & Materials Transactions: A*. 2001. Vol. 32. Iss. 2. P. 2995–3005.

10. Veis M.E., Kuksanov N.K., Korabelnikov B.M., Nemytov P.I., Salimov R.A. High voltage electron accelerators at a power of up to 90 kW // *Radiation Physics & Chemistry*. 1990. Vol. 35. Iss. 4–6. P. 658–661.

11. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of tantalum and niobium on titanium by electron beam, injected in atmosphere // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 314–316. P. 23–27.

12. Bataev V.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Ostromenskij P.I., Korotaev B.V. Hardening of side faces of railheads by electric beam treatment in air. *Metal Science and Heat Treatment*, 2002, Vol. 44, Iss. 11–12, pp. 510–513.

13. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruhin A.V., Petrov S.E., Salimov R.A., Vaisman A.F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere // *Radiation Physics and Chemistry*. 2000. Vol. 57. Iss. 3–6. P. 653–655.

14. Salimov R.A., Cherepkov V.G., Golubenko J.I., Krainov G.S., Korabelnikov B.M., Kuznetsov S.A., Kuksa-

nov N.K., Malinin A.B., Nemytov P.I., Petrov S.E., Prudnikov V.V., Fadeev S.N., Veis M.E. D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications // *Radiation Physics and Chemistry*. 2000. Vol. 57. Iss. 3–6. P. 661–665.

15. Farayibi P.K., Folkes J., Clare A., Oyelola O. Cladding of pre-blended Ti–6Al–4V and WC powder for wear resistant applications // *Surface & Coatings Technology*. Vol. 206. Iss. 2–3. P. 372–377. 25 October 2011.

16. Çelik O.N. Microstructure and wear properties of WC particle reinforced composite coating on Ti6Al4V alloy produced by the plasma transferred arc method // *Applied Surface Science*, in press.

17. Couranta B., Hantzpergue J.J., Avril L., Benayoun S. Structure and hardness of titanium surfaces carburized by pulsed laser melting with graphite addition // *Journal of Materials Processing Technology*.- Vol. 160. Iss. 3. – P. 374–381. 30 March 2005.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 103–109

### Production of wear-resistance coatings on titanium alloys by the method of non-vacuum electron-beam cladding

<sup>1</sup>O.G. Lenivtseva, <sup>1</sup>I.A. Bataev, <sup>2</sup>M.G. Golkovsky, <sup>1</sup>V.V. Samoylenko, <sup>1</sup>R.A. Dostovalov.

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics, Prospect akademika Lavrentieva, 11, Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: lenivtseva\_olga@mail.ru

#### Abstract

Structure and properties of the surface layers on titanium VT1-0, produced by the method of non-vacuum electron-beam cladding of titanium and graphite powder mixtures are described in the article. The structure of the coatings is investigated by the means of optical and scanning electron microscopy. It is showed that the cladded layer has a high quality and a thickness of about 2 mm. The cladded layer structure is represented by high-strong crystals of a titanium carbide, distributed in a  $\alpha'$ -Ti matrix, and undissolved graphite particles. Cladded layers under consideration have high hardness and wear resistance. Cladded samples wear loss is 7-fold lower compared to the material without the coating. Data obtained indicate that the technology of powder mixtures non-vacuum electron-beam cladding allows to obtain coatings with a high hardness and wear resistance on titanium VT1-0.

Keywords: titanium carbide, titanium, non-vacuum electron-beam cladding, structure, wear

#### References

1. Catherine M. Cotell, James A. Sprague, and Fred A. Smidt, Jr. *ASM Handbook. Surface Engineering*. ASM International, 1994, Vol. 5. 525 p.
2. Courant B., Hantzpergue J.J., Benayoun S. Surface Treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction. *Wear*. 1999, Vol. 236, pp. 39–46.
3. Chehrghani A., Torkamany M.J., Hamed M.J., Sabbaghzadeh J. Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation. *Applied Surface Science*, 2012, Vol. 258, Iss. 6, pp. 2068–2076.
4. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Surface & Coatings Technology*, 2004, Vol. 184, pp. 74–83.
5. Ettaqi S., Hays V., Hantzpergue J.J., Saindrenan G., Remy J.C. Mechanical, structural and tribological properties of titanium nitrided by a pulsed laser. *Surface & Coatings Technology*, 1998, Vol. 100/101, Iss. 1–3, pp. 428–432.
6. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding. *Applied Surface Science*, 2012, Vol. 258, Iss. 7, pp. 3173–3177.
7. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials Science & Engineering*, 2013, Vol. 578, pp. 310–317.
8. Bataev I.A., Zhuravina T.V., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Romashova Yu.N. *Obrabotka metallov: tehnologija, oborudovanie, instrument*, 2012, no. 3(56), pp. 56–59.

9. Oh J.Ch., Lee S., Golkovski M.G. Improvement of the hardness and wear resistance of (TiC,TiN)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical & Materials Transactions*, 2001, Vol. 32, Iss. 2, pp. 2995–3005.
10. Veis M.E., Kuksanov N.K., Korabelnikov B.M., Nemytov P.I., Salimov R.A. High voltage electron accelerators at a power of up to 90 kW. *Radiation Physics & Chemistry*, 1990, Vol. 35, Iss. 4–6, pp. 658–661.
11. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of tantalum and niobium on titanium by electron beam, injected in atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 314–316, pp. 23–27.
12. Bataev V.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Ostromenskij P.I., Korotaev B.V. Hardening of side faces of railheads by electric beam treatment in air. *Metal Science and Heat Treatment*, 2002, Vol. 44, Iss. 11-12, pp. 510–513.
13. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruhin A.V., Petrov S.E., Salimov R.A., Vaisman A.F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, Vol. 57, Iss. 3–6, pp. 653-655.
14. Salimov R.A., Cherepkov V.G., Golubenko J.I., Krainov G.S., Korabelnikov B.M., Kuznetsov S.A., Kuksanov N.K., Malinin A.B., Nemytov P.I., Petrov S.E., Prudnikov V.V., Fadeev S.N., Veis M.E. D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, Vol. 57, Iss. 3–6, pp. 661-665.
15. Farayibi P.K., Folkes J., Clare A., Oyelola O. Cladding of pre-blended Ti-6Al-4V and WC powder for wear resistant applications. *Surface & Coatings Technology*, 2011, Vol. 206, Iss. 2–3, pp. 372–377.
16. Çelik O.N. Microstructure and wear properties of WC particle reinforced composite coating on Ti6Al4V alloy produced by the plasma transferred arc method. *Applied Surface Science*, in press.
17. Couranta B., Hantzpergueb J.J., Avrilb L., Benayounb S. Structure and hardness of titanium surfaces carburized by pulsed laser melting with graphite addition. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, Vol. 160, Iss. 3, pp. 374-381.

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА, СФОРМИРОВАННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ИЗ СТАЛЕЙ 20 И Н18К9М5Т

*В.С. ЛОЖКИН, аспирант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 26 июля 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

Ложкин В.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: logkaa@mail.ru

Изучены структура и механические свойства тринадцатислойных композитов, полученных методом сварки взрывом пластин из углеродистой стали 20 и мартенситно-стареющей стали Н18К9М5Т. Прирост ударной вязкости композита составил 20 % по сравнению с исходной сталью 20. Экспериментальные значения предела прочности многослойной композиции на 27 % выше расчетных значений. Повышение прочности обусловлено деформационным упрочнением сталей, а также последующей термической обработкой сварных пакетов. Методами металлографического анализа изучены особенности структурных преобразований, происходящих в зонах сопряжения разнородных стальных пластин. Формирование прямых сварных швов и соединений волнообразной формы обусловлено особенностями распределения давления в точках контакта пластин на различном расстоянии от взрывчатого вещества. Методами электронной микроскопии сварных пакетов изучены области сильнодеформированного материала, рекристаллизованного материала и вихревых зон с литым строением.

**Ключевые слова:** сварка взрывом, слоистые материалы, мартенситно-стареющая сталь, термическая обработка.

## Введение

Известно, что характер развития многих промышленных технологий и показатели создаваемых образцов новой техники в значительной степени определяются свойствами применяемых материалов. В современных авиа- и ракетостроении, энергетике, химическом машиностроении и других отраслях производства одними из основных критериев, учитываемых специалистами, являются металлоемкость и надежность создаваемых конструкций [1, 2]. С целью повышения показателей конструктивной прочности металлических материалов в промышленном производстве широко используются традиционные методы обработки материалов, в том числе термическая [3], термопластическая [4], химико-термическая [5]. В то же время во многих случаях более рациональным является применение композиционных материалов, полученных с использованием процессов сварки взрывом [6], нанесения покрытий [7], порошковой металлургии [8].

Сварка взрывом как технологический процесс появилась сравнительно недавно. Во многих случаях этот процесс рассматривают в качестве эффективного решения проблемы соединения материалов, склонных к образованию хрупких интерметаллидных фаз [9]. Проведенный анализ показал, что один из рациональных подходов к проблеме повышения комплекса механических свойств материалов конструкционного назначения может быть основан на применении слоистых композиционных материалов, полученных по технологии сварки взрывом мартенситно-стареющих сталей с низкоуглеродистыми.

## Материалы и методы исследования

Материалом исследования являлся металлический слоистый тринадцатислойный пакет из сталей 20 и Н18К9М5Т, полученный сваркой взрывом. Для сварки использовали стальные пластины размерами 1×60×100 мм. Химический состав материалов, зафиксированный с использованием оптико-эмиссионного

Химический состав материалов

Материал	Массовая доля элемента, %									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Co
H18K9M5T	0,02	0,01	0,04	0,004	0,007	17,23	0,01	4,28	0,77	8,18
Сталь 20	0,18	0,47	0,18	0,01	0,02	0,03	0,01	–	–	–

спектрометра ARL 3460, представлен в табл. 1. Для снижения уровня механических напряжений и устранения структурной неоднородности исходные материалы подвергали термической обработке по режимам, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Термическая обработка стальных заготовок

Материал	Обработка	Среда	Температура, °C
Сталь 20	Отжиг	Вакуум	920
Сталь H18K9M5T	Закалка	Воздух	820
Слоистый композит «сталь 20 – сталь H18K9M5T»	Старение	Воздух	490

Сварку взрывом и расчет технологических параметров процесса осуществляли сотрудники Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Пластины сваривали за один этап с использованием симметричной угловой схемы (рис. 1). В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит БЖВ. Расчетные значения скоростей точек контакта и углов соударения пластин на 1, 2, 3, 4, 5 и 6 границах составили 3613 м/с и 33° 33'; 2984 м/с и 20° 2'; 2360 м/с и 16° 51'; 1844 м/с и 16° 10'; 1449 м/с и 16° 28'; 1449 м/с и 13° 39' соответственно. После сварки многослойные пакеты в течение трех часов выдерживали в печи при температуре 490 °C, обеспечивающей развитие процессов старения мартенситно-стареющей стали.

Исследования структуры композиционного материала выполняли с применением металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP и просвечивающего электронного микроскопа

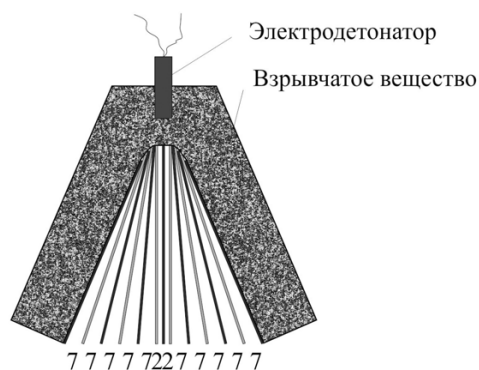


Рис. 1. Схема сварки взрывом стальных пластин. Цифры соответствуют величине зазоров между чередующимися пластинами

FEI Tecna 20 G2 TWIN. Металлографические шлифы готовились по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Для выявления микроструктуры использовали 5 %-й спиртовой раствор азотной кислоты [11].

### Результаты исследований и их обсуждение

Общий вид тринадцатислойного композиционного материала в поперечном сечении представлен на рис. 2. Форма границ сопряжения стальных заготовок в поперечном сечении стального пакета различна. В сварных швах, расположенных ближе к слою взрывчатого вещества, наблюдается волнообразование (рис. 3), что свидетельствует о высоком уровне давления в области точки контакта. По мере приближения к центру пакета волны становятся менее выраженными и, начиная с третьего шва, практически исчезают (рис. 4). Геометрические параметры волн сварных швов представлены в табл. 3. Форма дефор-

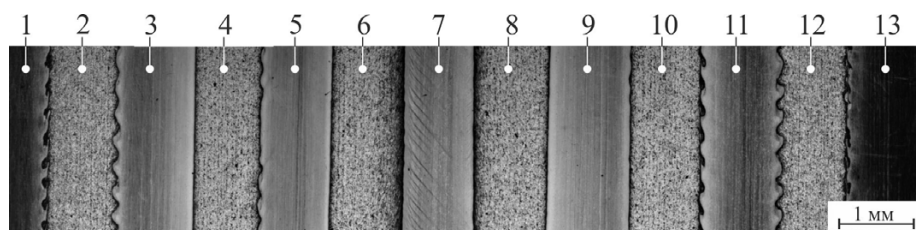


Рис. 2. Строение многослойного материала в поперечном сечении. Слои 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – сталь H18K9M5T, слои 2, 4, 6, 8, 10, 12 – сталь 20



Параметры волн сварных соединений

Параметры сварных швов	Номер сварного шва											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\lambda$ , мкм	233	277	–	–	–	–	–	–	–	142	205	270
A, мкм	67	61	–	–	–	–	–	–	–	42	66	84
A/ $\lambda$	0,28	0,22	–	–	–	–	–	–	–	0,29	0,32	0,31

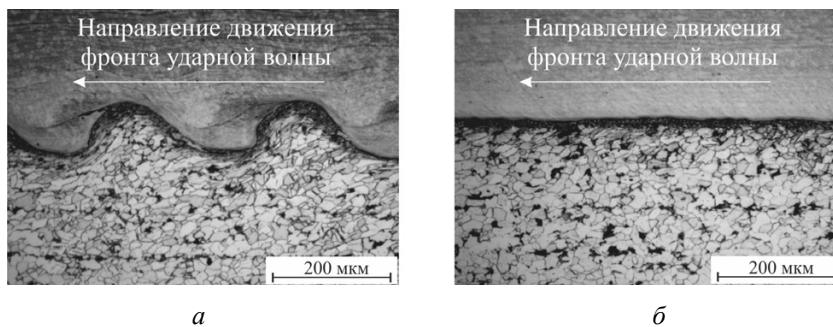


Рис. 3. Строение одиннадцатого (а) и восьмого (б) сварных швов

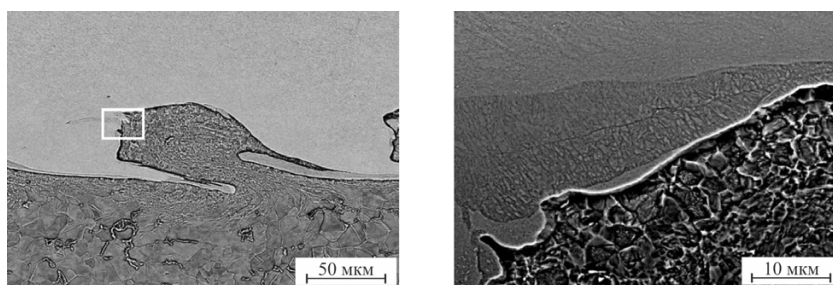


Рис. 4. Строение гребня волны сварного шва № 10. Растровая электронная микроскопия

мированных зерен в заготовках из стали 20 определяется направлением распространения фронта ударной волны (рис. 3).

Металлографические исследования не позволяют провести детальный анализ структуры в зонах соединения пластин. Решение этой задачи выполняли с использованием растровой электронной микроскопии. В стали 20 в зонах сварных швов выявлены слои рекристаллизованных зерен феррита. Средний размер зерен составляет 3 мкм, толщина слоев не превышает 30 мкм (рис. 4, а).

В ходе электронно-микроскопических исследований зафиксирована литая структура вихрей с характерным дендритным строением. Формирование вихрей связано с внедрением разогретых до высоких температур микрообъемов одного материала в другой, его частичным оплавлением в результате превращения кинетической энергии в тепловую, трением смежных микрообъемов материала [12]. Проведенный анализ показал, что температура в зонах вихрей превышала  $\sim 1500^\circ\text{C}$  [13].

## Механические свойства слоистых материалов

Оценку прочностных свойств слоистого композита проводили на измерительном комплексе Instron 3369 в условиях растяжения плоских образцов по ГОСТ 1497-84 [14]. Результаты прочностных испытаний исходных материалов и сварных слоистых пакетов после термической обработки представлены на рис. 5. Предел прочности многослойного композита «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т» составляет 1500 МПа, что на 20 % ниже, чем стали Н18К9М5Т. Расчетные значения предела прочности композита, полученные с использованием правила фаз, составляют 1180 МПа. Наблюдаемое отклонение объясняется деформационным упрочнением стальных пластин, проявляющимся при интенсивной пластической деформации заготовок.

Испытания на ударную вязкость были проведены при комнатной температуре на маятниковом копре Metrocom в соответствии с ГОСТ 9454-78 [16]. Надрезы на образцах имели V-образную форму. Результаты динамических испытаний представлены на рис. 6. Анализ полученных результатов свидетельствует об увеличении

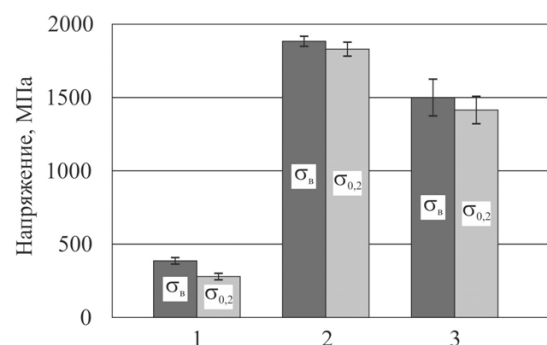


Рис. 5. Результаты прочностных испытаний материалов:

1 – сталь 20; 2 – сталь Н18К9М5Т;  
3 – КМ «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т»

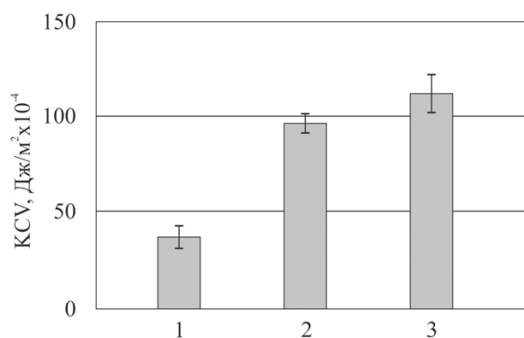


Рис. 6. Результаты испытаний материалов на ударную вязкость:

1 – сталь H18K9M5T; 2 – сталь 20; 3 – композит «сталь 20 – сталь H18K9M5T»

ударной вязкости композита на 20 % по сравнению с пластичной сталью 20. Прирост ударной вязкости объясняется благоприятным влиянием межслойных границ и формированием в зоне сварных швов прослоек рекристаллизованных зерен.

### Выводы

1. Сварка взрывом позволяет получать многослойные материалы с прочно соединенными слоями феррито-перлитной стали 20 и закаленной стали H18K9M5T. В процессе соединения тонколистовых заготовок в стали 20 образуются прослойки рекристаллизованного феррита шириной, не превышающей 25 мкм.

2. Формирование слоистой структуры композита «сталь 20 – сталь H18K9M5T» сопровождается увеличением ударной вязкости на 20 %. Экспериментальные значения предела прочности многослойной композиции «сталь 20 – сталь H18K9M5T» на 27 % выше расчетных значений. Различия в уровне прочностных свойств обусловлены деформационным упрочнением стальных пластин, проявляющимся в процессе сварки взрывом.

### Список литературы

1. Солнцев Ю.П. Специальные материалы в машиностроении. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. – 640 с.
2. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 400 с.

3. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

4. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.

5. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

6. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 544 с.

7. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere / М.Г. Голковский, И.А. Батаев, А.А. Батаев, С.В. Веселов, В.А. Батаев, Т.В. Журавина, Е.А. Приходько // *Advanced Materials Research*. - Vols. 314–316 (2011), pp. 23–27.

8. Структурно-фазовое состояние Fe-содержащих сплавов, модифицированных ультра- и нанодисперсными порошками оксидов d-металлов / А.П. Зыкова, М.Ю. Новомейский, И.А. Курзина, А.А. Никулина, А.С. Князев // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2012. – № 4 (57). – С. 72–78.

9. Свойства интерметаллидных прослоек в слоистых титано-алюминиевых композитах / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, Д.В. Проничев, В.Н. Арисова, О.С. Киселев, А.Ю. Кондратьев, С.В. Панков // *Известия Волгогр. гос. техн. ун-та*. – 2009. – Вып. 3. – № 11(59). – С. 35–40.

10. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.

11. *Металлографические реактивы*. Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

12. Батаев И. А. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09. Новосибирск, 2010. – С. 116.

13. *Материаловедение и технология металлов*: учеб. для студентов вузов, обучающихся по машиностроит. спец. / [Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.]. М.: Высш. шк., 2000. – 639 с.

14. *ГОСТ 1497–84*. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 37 с.

15. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. / А.А. Батаев., В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

16. *ГОСТ 9454–78*. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введ. 1979–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 14 с.

Obработка metallo

N 3 (60), July–September 2013, Pages 110–114

**Structure and properties of multilayered composite, formed by explosive welding of steel 20 and steel H18K9M5T thin plates**

V.S. Lozhkin

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: logkaa@mail.ru

## Abstract

The structure and mechanical properties of 13-layered composites produced by explosive welding of carbon steel 20 and maraging steel H18K9M5T plates is investigated. The toughness gain of the composite was 20 % in comparison with the original steel 20. The experimental value of the multilayer composition tensile strength is 27 % higher than the calculated value. Strength improvement is due to strain hardening and weld-fabricated package subsequent heat treatment. The characteristics of the structural changes taking place in the areas of interfacing disparate steel plates are investigated by the methods of metallographic analysis. The formation of the straight and wave-shaped welded joints is due to the peculiarities of the pressure distribution in the contact points of plates at different distances from the explosive. The regions of the heavily deformed material, recrystallized material and vortex zones with a cast structure are studied by electron microscopy of the weld-fabricated packages.

Keywords: Explosive welding, layered materials, maraging steel, heat treatment

## References

1. Solncev Yu.P. *Special'nye materialy v mashinostroenii* (Special materials in mechanical engineering). Saint Petersburg, HIMIZDAT, 2004. 640 p.
2. Tushinsky L.I. *Strukturnaja teorija konstruktivnoj prochnosti materialov* (The Structural Theory of Constructive Strength of Materials). Novosibirsk, NSTU, 2004. 400 p.
3. Novikov I. I. *Teorija termicheskoy obrabotki metallov* (The theory of heat treatment of metals). Moscow, Metallurgija, 1986. 480 p.
4. Bernshtejn M. L. *Struktura deformirovannyh metallov* (The structure of deformed metals). Moscow, Metallurgija, 1977. 431 p.
5. Lahtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Himiko-termicheskaja obrabotka metallov* (Chemical heat treatment of metals). Moscow, Metallurgija, 1985. 256 p.
6. Lysak V.I., Kuz'min S.V. *Svarka vzryvom* (Explosion Welding). Moscow, Mashinostroenie, 2005. 544 p.
7. Golkovsky M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Zhuravina T.V., Prikhodko E.A. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 314-316, pp. 23-27.
8. Zykova A.P., Novomejskij M.Yu., Kurzina I.A., Nikulina A.A., Knjazev A.S. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2012, no. 4 (57), pp. 72–78.
9. Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Pronichev D.V., Arisova V.N., Kiselev O.S., Kondrat'ev A.Yu., Pankov S.V. *Izvestija Volgograd State Technical University. Serija Problemy materialovedenija, svarki i prochnosti v mashinostroenii*, 2009, Iss. 3, no. 11(59), pp. 35–40.
10. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N., Bykov A.A., Vostrikov V.P. *Proizvodstvo metallicheskih slojstyh kompozicionnyh materialov* (Production of metal laminated composite materials). Moscow, Internet Inzhiniring, 2002. 496 p.
11. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy: spravochnik* (Metallographic reagents: a guide). Moscow, Metallurgija, 1981. 120 p.
12. Bataev I.A. *Struktura i mehanicheskie svojstva mnogoslojnyh materialov, sformirovannyh po tehnologii svarki vzryvom tonkolistovyh zagotovok iz nizkouglerodistoj stali*. Diss. kand. tehn. nauk [Structure and mechanical properties multilayer materials formed by explosion welding thin sheets of mild steel workpieces]. Novosibirsk, 2010. 116 p.
13. Fetisov G.P., Karpman M.G., Matjunin V.M. and al. *Materialovedenie i tehnologija metallov: uchebnik dlja studentov vuzov, obuchajushhij po mashinostroitel'nym special'nostjam* (Materials science and technology of metals: a textbook for students studying in machine building specialties). Moscow, Vysshaja shkola, 2000. 639 p.
14. *GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastjazhenie* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tension test], Moscow, Standartinform Publ., 2005. 22 p.
15. Bataev A.A., Bataev V.A. *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie: Uchebnik* (Composite Materials: Structure, Production, Application: Textbook). Novosibirsk, NSTU, 2002. 384 p.
16. *GOST 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyj izgib pri ponizhennyh, komnatnoj i povyshennyh temperaturah* [State Standard 9454–78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature], Moscow, Standartinform Publ., 2002. 12 p.



# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВ ТИТАНА, ТАНТАЛА, МОЛИБДЕНА И ГРАФИТА\*

*Д.О. МУЛЬ<sup>1</sup>, аспирант*  
*Е.А. ДРОБЯЗ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*И.К. ЧАКИН<sup>2</sup>, инженер*  
*В.В. САМОЙЛЕНКО<sup>1</sup>, аспирант*  
*В.С. ЛОЖКИН<sup>1</sup>, аспирант*  
*Р.А. ДОСТАВАЛОВ<sup>1</sup>, студент*  
<sup>1</sup>(НГТУ, г. Новосибирск)  
<sup>2</sup>(ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск)

Поступила 26 июля 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

Мулъ Д.О. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: ddariol@yandex.ru

Рассмотрены особенности формирования структуры в поверхностных слоях конструкционной стали 40Х, подвергнутой вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошковых смесей. Для получения покрытий использовали три вида наплавочных порошковых смесей: титан и графит; титан, молибден и графит; титан, тантал и графит. В наплавочных покрытиях в процессе ускоренного нагрева и последующего охлаждения формируется сложная высокодисперсная кристаллическая структура. В слоях наплавленного металла, содержащих титан с графитом, титан, молибден с графитом, зафиксировано присутствие карбида титана (TiC). Увеличение его объемной доли приводит к повышению твердости покрытий. Введение молибдена способствует формированию однородной структуры мартенсита. Износостойкость наплавленных покрытий коррелирует с уровнем их твердости.

**Ключевые слова:** вневакуумная электронно-лучевая наплавка, износостойкость, карбиды.

## Введение

Одним из эффективных вариантов повышения долговечности деталей машин и механизмов является их поверхностное упрочнение карбидами тугоплавких металлов. Введение высокопрочных включений в материалы, предназначенные для изготовления изделий, эксплуатирующихся в условиях повышенных нагрузок, позволяет в значительной мере повысить их износостойкость. Эффективным способом повышения триботехнических свойств металлических материалов является поверхностное легирование карбидом титана, обладающего высокой твердостью (28 ГПа), износостойкостью и температурой плавления (3067 °С) [1, 2].

В настоящее время распространенными способами поверхностного легирования металлических материалов являются спекание, электродуговая и индукционная наплавка [3]. Однако указанные технологии не обеспечивают возможность контролируемого местного нагрева материала, приводящего к расплавлению только поверхностных слоев основного металла и порошковой смеси. Такой нагрев эффективно реализуется при воздействии на поверхностные слои высокоэнергетических источников нагрева, среди которых следует особо выделить электронный пучок, выведенный в воздушную атмосферу [4–6]. Вневакуумная электронно-лучевая обработка позволяет формировать покрытия различного химического

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0447 от 06 августа 2012 года.

состава, в том числе и на крупногабаритных изделиях [7]. Анализ литературных данных свидетельствует о возможности формирования покрытий на основе тугоплавких элементов, обладающих высокими показателями твердости и износостойкости, с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки [8–11].

Цель данной работы заключается в изучении структурных и фазовых превращений в поверхностных слоях конструкционной стали при электронно-лучевой наплавке титансодержащих порошковых смесей и оценке их влияния на твердость и износостойкость покрытий.

### Материалы и методы исследования

Наплавку порошковых смесей проводили на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики СО РАН электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу. Обработка осуществлялась по следующим режимам: энергия электронов пучка – 1,4 МэВ; расстояние от выпускного отверстия до образца – 90 см; ток пучка – 27...28 мА. Заготовка перемещалась со скоростью 10 мм/с в направлении, перпендикулярном направлению действия электронного пучка. Наплавка производилась при сканировании образца электронным пучком с частотой 26 Гц, что позволило обработать всю поверхность.

Наплавке подвергались пластины из отожженной конструкционной стали 40Х размером 100×50×16 мм. На предварительно подготовленную поверхность материала наносилась наплавочная смесь с насыпной плотностью 0,33 г/см<sup>2</sup>. Для получения покрытий применяли три вида порошковых смесей, которые содержали 60 масс. % легирующих компонентов и 40 масс. % флюса (CaF<sub>2</sub>). Наплавочная смесь типа «А» состояла из порошка титана (71,4 масс. %) и графита (28,6 масс. %). Смесь типа «Б» содержала 63,4 масс. % титана, 21,8 масс. % графита и 14,8 масс. % молибдена. В смеси типа «В» находилось 30 масс. % титана, 3,3 масс. % графита и 26,7 масс. % тантала.

Формирование покрытий происходило в условиях высокоскоростного нагрева поверхностного слоя за счет большого количества энергии, выделяющейся при торможении электронов. При этом нагрев осуществлялся до значений выше температуры плавления материала. Ускоренное охлаждение расплава за счет интенсивного теплоотвода приводило к формированию на стальной заготовке покрытия. Полученные образцы подвергались структурным и триботехническим исследованиям.

Для проведения структурных исследований и определения показателей микротвердости из по-

лученных образцов с использованием стандартной технологии были изготовлены поперечные шлифы. Структуру материалов выявляли методом химического травления с применением 5 %-го раствора азотной кислоты в этиловом спирте [12]. Структурные исследования осуществляли с применением оптического микроскопа типа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и растрового электронного микроскопа типа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*. Объемную долю карбидной фазы определяли методом анализа изображений на оптическом микроскопе с применением модуля *Multiphase*.

Рентгенофазовый анализ покрытий был проведен с использованием дифрактометра *ARL X'TRA*. Источником излучения являлась медная трубка. Рентгенограммы регистрировали с шагом 0,05 град. и временем накопления 3 с. Химический состав покрытий определяли на оптико-эмиссионном спектрометре *ARL 3460*.

Микротвердость покрытий устанавливали на микротвердомере *Wolpert Group 402MVD*. Измерения проводили с нагрузкой 10 г. Дорожки уколов были ориентированы в направлении от поверхности покрытия образца к основному материалу.

Оценить эффективность высокопрочных покрытий при эксплуатации в реальных условиях позволили триботехнические испытания. Износостойкость определяли в условиях трения о закрепленные абразивные частицы. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 17367-71 в течение 35 с при скорости вращения круга 100 об/мин и нагрузке на образец 3Н.

### Результаты исследований и их обсуждение

Структурные исследования покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки, показали, что в процессе обработки формируются слои, толщина которых составляет 2,07, 2,39 и 2,12 мм для смесей типа «А», «Б» и «В» соответственно. Дефектов в виде трещин и расслоений ни на поверхности образцов, ни в объеме покрытий обнаружено не было. Объемная доля легирующих элементов в поверхностном слое уменьшается с увеличением толщины получаемого покрытия. Химический состав материалов, представленный в табл. 1, свидетельствует о снижении концентрации легирующих элементов в поверхностных слоях наплавленных покрытий.

Металлографические исследования показали, что в покрытии «А» наблюдается наибольшее количество карбида титана. Частицы в виде дендритных построений равномерно распределены по всему объему покрытия (рис. 1, а). Размер частиц карбида титана изменяется от 1 до 5 мкм. Кроме того, в покрытии присутствуют колонии ледебурита-

Таблица 1

## Химический состав наплавленных покрытий

Покрытие	Массовая доля элемента, %										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Ta	Fe
«А»	2,67	0,68	0,27	0,02	0,02	0,14	0,94	0,02	7,23	-	88,01
«Б»	1,27	0,78	0,31	0,02	0,01	0,16	1,03	0,73	2,67	-	93,02
«В»	0,85	0,71	0,33	0,02	0,02	0,18	0,94	0,03	5,15	5,63	86,14

та, микрообъемы феррита, мартенсита и остаточного аустенита.

В покрытиях, содержащих молибден и тантал, объемная доля карбида титана меньше. Упрочнению поверхностных слоев способствуют также сложные карбиды на основе молибдена и тантала. Добавки молибдена приводят к формированию в покрытиях высокопрочной мартенситной структуры, что отражается на повышении твердости и износостойкости материалов.

Введение тантала в наплавочную смесь, содержащую титан и графит, приводит к образованию сложного карбида  $TiTaC_2$ , частицы которого сформировали крупные дендритные построения с осями первого и второго порядка (рис. 1, в, 2, в). Размер таких частиц достигает 70 мкм. Карбид  $TiTaC_2$  также входит в состав тонкой игольчатой структуры эвтектики.

Рентгенофазовый анализ покрытий позволил оценить фазовый состав сформированных покрытий (рис. 2). В образцах типа «А» и «Б» наблюдаются пики, соответствующие фазам  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe, TiC (рис. 2, а, б). Высокий пик  $\gamma$ -Fe в покрытии «А» свидетельствует о наличии большого количества остаточного аустенита в матрице.

Результаты дюрOMETрических исследований представлены в табл. 2. Установлено, что введение в смесь молибдена приводит к увеличению твердости

Таблица 2

## Основные параметры наплавленных покрытий

Покрытие	Средняя твердость покрытий, МПа	Микротвердость матрицы, МПа	Микротвердость дендритных образований, МПа	Объемная доля дендритных карбидов, %
«А»	7460±5	5470±1233	13250±3255	30,92
«Б»	7720±6	6542±777	20394±7339	27,93
«В»	2280±3	2807±441	5462±753	17,33

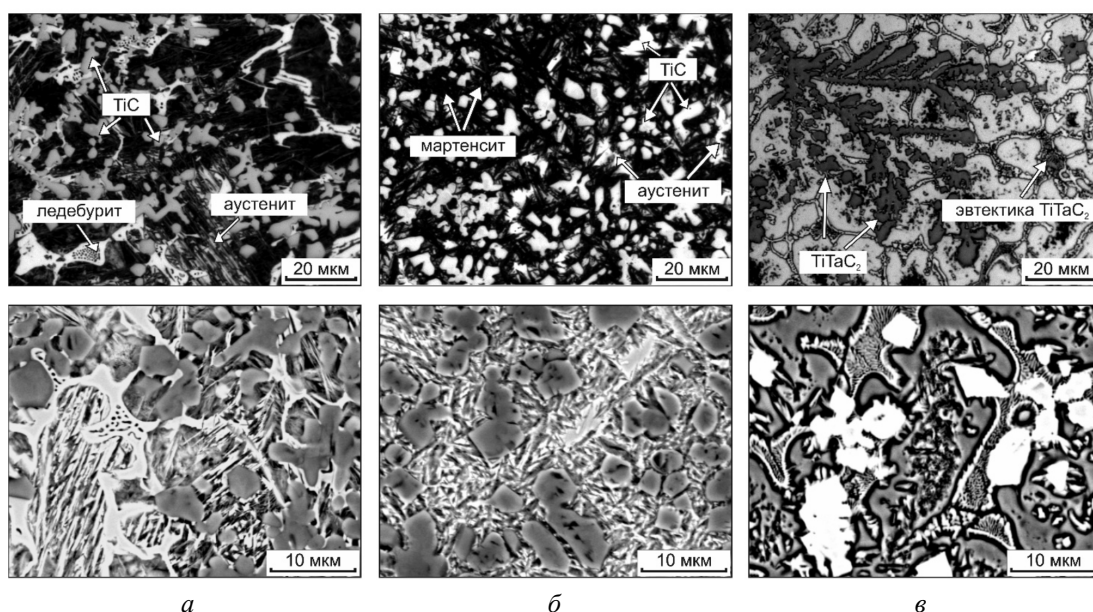


Рис. 1. Строение покрытий, сформированных наплавкой титана и графита (а), титана, молибдена и графита (б), титана, тантала и графита (в)

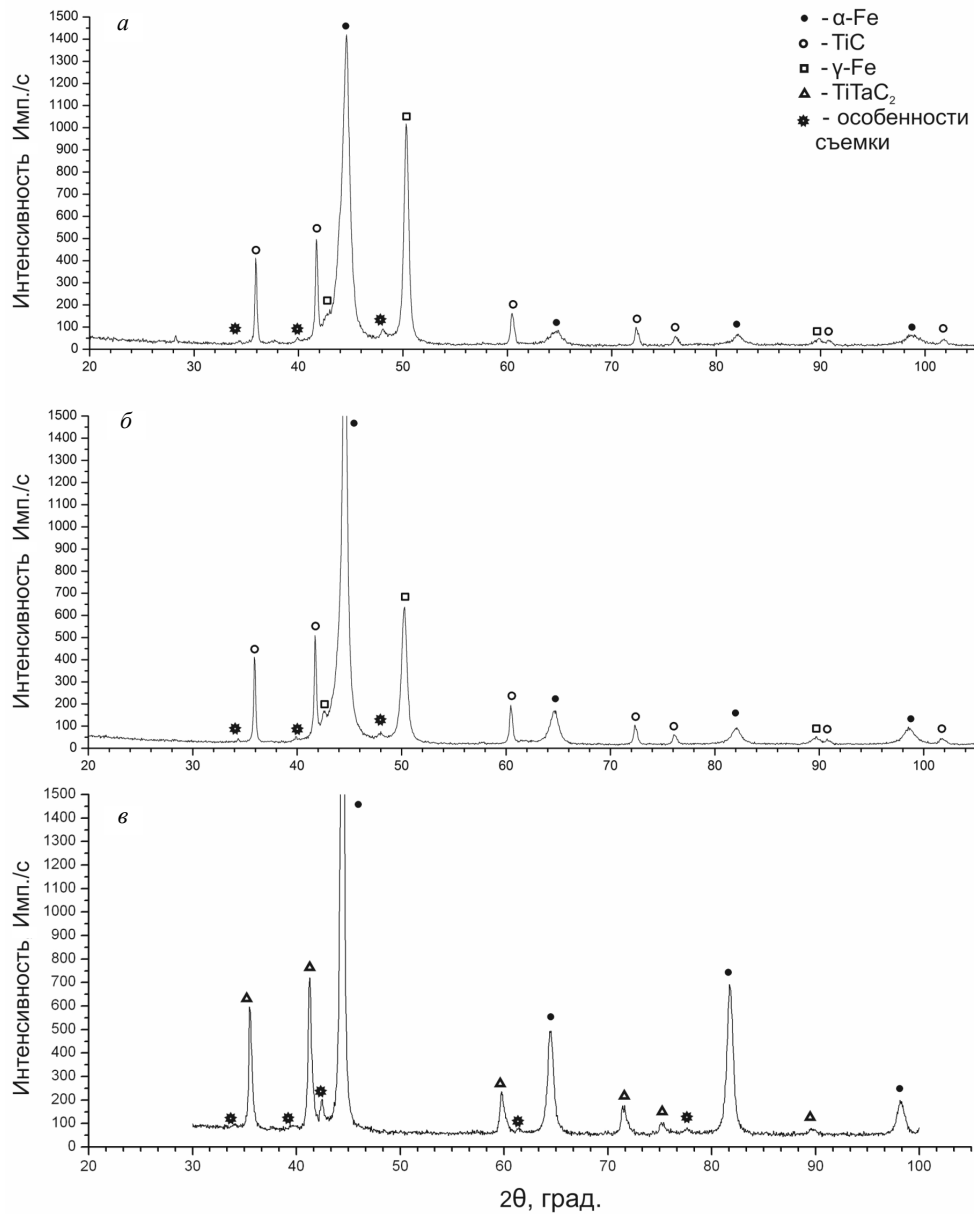


Рис. 2. Рентгенограммы образцов, полученных наплавкой порошков титана и графита (*a*), титана, молибдена и графита (*б*), титана, графита и тантала (*в*)

покрытия на основе титана и углерода на 300 МПа. Объясняется это повышением твердости карбида титана за счет его легирования (20 ГПа). Добавка тантала снижает микротвердость покрытия до 2280 МПа, что обусловлено низкой твердостью карбида  $\text{TiTaC}_2$  (5,5 ГПа) и легированного феррита (2,8 ГПа).

В зоне термического воздействия, находящейся непосредственно под покрытием, микротвердость материала составляет  $\sim 5000$  МПа. На графике, представленном на рис. 3, наблюдаются скачки микротвердости, свидетельствующие о неоднородности структуры покрытия.

На показатели твердости оказывает влияние и объемная доля тугоплавких включений в структуре покрытия. Объемная доля карбидов в форме дендритов представлена в табл. 2. Наибольшая концентра-

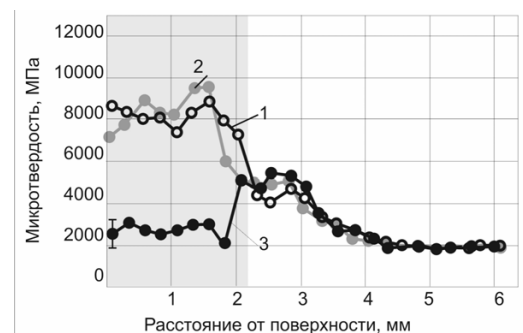


Рис. 3. Распределение микротвердости наплавленных образцов в поперечном сечении:

1 – покрытие из смеси порошков титана, молибдена и графита; 2 – покрытие из смеси порошков титана и графита; 3 – покрытие из смеси порошков титана, тантала и графита

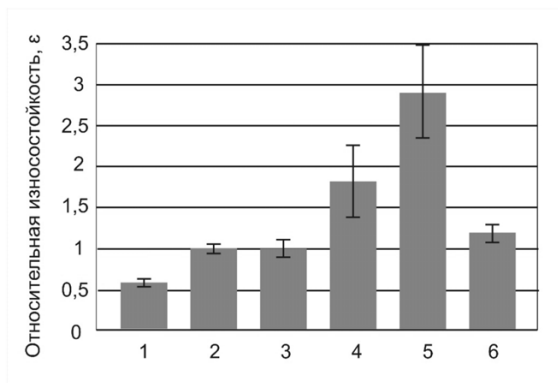


Рис. 4. Износостойкость образцов при трении о закрепленные абразивные частицы:

1 – сталь 40X после отжига; 2 – сталь 40X после закалки и низкого отпуска; 3 – сталь 20 после цементации; 4 – покрытие из смеси титана с графитом; 5 – покрытие из смеси титана, графита и молибдена; 6 – покрытие из смеси титана, графита и тантала

ция частиц этого типа наблюдается в покрытии «А» и составляет 30,92 %. В покрытии «Б» доля карбидов снижается до 27,93 %, а в покрытии «В» она составляет 17,33 %.

Результаты триботехнических испытаний в условиях трения о закрепленные абразивные частицы представлены на рис. 4. В качестве эталонного материала была выбрана сталь 20 после закалки и цементации. Легирование поверхности стали 40X титаном и графитом способствовало повышению износостойкости в 3 раза, а добавление в порошковую смесь молибдена повысило износостойкость материала в 4,8 раза. Наплавка порошковой смеси титана, тантала и графита обеспечила повышение износостойкости в 2 раза по сравнению с материалом основы. Такое поведение объясняется высокой твердостью карбидов титана и их повышенной концентрацией в структуре покрытий типа «А» и «Б». В танталсодержащем покрытии объемная доля сложных карбидов мала. Следует отметить также, что карбиды  $TiTaC_2$  располагаются в ферритной матрице, обладающей пониженной твердостью.

## Выводы

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка в воздушной среде позволяет формировать высоколегированные покрытия с мелкодисперсной структурой на низколегированной конструкционной стали 40X. В наплавленных покрытиях высокой толщины отсутствуют дефекты в виде трещин и расслоений.

Введение в порошковую титан-графитовую смесь молибдена приводит к формированию ультрадисперсной структуры, обеспечивающей повышенный

уровень твердости и износостойкости. Механизмы упрочнения изученных материалов основаны на образовании в наплавленных слоях карбидов титана и микрообъемов мартенсита.

## Список литературы

1. Лившиц Л.С. Гринберг Э.Г., Куркумели Н.А. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение. – 1969. – 188 с.
2. Купарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. – М.: Металлургия. – 1987. – 216 с.
3. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение. – 1985. – 240 с.
4. Полетика И.М., Голковский М.Г., Борисов М.Д., Салимов Р.А., Перовская М.В. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 5. – С. 29–41.
5. Голковский М.Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода. Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 317 с.
6. Создание нового класса покрытий методом двойной электронно-лучевой обработки / Полетика И.М. [и др.] // Перспективные материалы. – 2011. – № 1. – С. 71–81.
7. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere / S.N. Fadeev, M.G. Golkovski, A.I. Korzhagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavruhin, S.E. Petrov, R.A. Salimov, A.F. Vaisman // Radiation Physics and Chemistry. 2000. № 57, pp. 653-655.
8. Eunsub Yun, Yong Chan Kim, Sunghak Lee, Nack J. Kim. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC,SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 2004. Vol. 35A, pp. 1029-1038.
9. Nam D., Lee K., Lee S. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of carbide-reinforced ferrous surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 2008. Vol. 39A, pp. 2626-2634.
10. Seong-Hun Choo, Sunghak Lee, Soon-Ju Kwon. Effect of flux addition on the microstructure and hardness of TiC-reinforced ferrous surface composite layers fabricated by high-energy electron beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 1999. Volume 30, Issue 12, pp. 3131-3141.
11. Jongmin Lee, Kwangjun Euh, Jun Cheol Oh, Sunghak Lee. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation // Materials Science and Engineering: A. 2002. № 323, Issue 1 – 2, pp. 251-259.
12. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.



### Structure and properties of steel under non-vacuum electron-beam welding deposition of titanium, tantalum, molybdenum and graphite powders

<sup>1</sup>D.O. Mul, <sup>1</sup>E.A. Drobyaz, <sup>2</sup>I.K. Chakin, <sup>1</sup>V.V. Samoilenko, <sup>1</sup>V.S. Lozhkin, <sup>1</sup>R.A. Dostovalov

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics, Prospect akademika Lavrentieva, 11,  
Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: ddariol@yandex.ru

#### Abstract

Features of the structure formation in surface layers of structural steel 40X subjected to the electron beam welding of titanium-containing powder mixtures were studied. The formation of coating is carried out with the usage of three types of powders mixtures: titanium and carbon (graphite); titanium, molybdenum and carbon (graphite); titanium, tantalum and carbon (graphite). The presence of complicated ultra-dispersive crystalline structure in the coating is detected. It is formed during high-speed cooling. Availability of titanium carbide (TiC) presence in the surface layer is detected by X-ray diffraction analysis. Growth of the titanium carbide volume fraction in the surface layer leads to increase in hardness. The molybdenum injection allows forming the uniform martensite matrix structure which promotes significantly improved hardness of coatings. It is found that the wear resistance of coatings directly depends on its hardness.

Keywords: non-vacuum electron-beam welding deposition, wear resistance, carbides

#### References

1. Livshic L.C. Grinberg Je.G., Kurkumeli H.A. *Osnovy legirovaniya naplavlennogo metalla* (Basics of added metal alloying). Moscow, Mashinostroenie, 1969. 188 p.
2. Kiparisov S.S., Levinskij Yu.V., Petrov A.P. *Karbid titana: poluchenie, svoystva, primeneniye* (Titanium carbide: production, properties and application). Moscow, Metallurgija, 1987. 216 p.
3. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. *Per. s jap. V.N. Popova; pod red. V.S. Stepina, N.G. Shesterkina* [Translated from Japanese V.N. Popova, editors V.S. Stepina, N.G. Shesterkina]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 240 p.
4. Poletika I.M., Golkovski M.G., Borisov M.D., Salimov R.A., Perovskaja M.V. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 2005, no.5, pp. 29-41.
5. Golkovskii M.G. *Zakalka i naplavka relativistskim jelektronnym puchkom vne vakuuma. Tehnologicheskie vozmozhnosti metoda* (Hardening and cladding of a relativistic electron beam outside the vacuum. Technological capabilities of the method). Saarbrücken, LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. 317 p.
6. Poletika I.M., Ivanov Yu.F., Golkovski M.G., Krylova T.A., Teresov A.D., Makarov S.A. *Perspektivnye materialy*, 2011, no.1, pp. 71-81.
7. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruhin A.V., Petrov S.E., Salimov R.A., Vaisman A.F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, no. 57, Issues 3-6, pp. 653-655.
8. Eunsub Yun, Yong Chan Kim, Sunghak Lee, Nack J. Kim. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC,SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, Vol. 35, Issue 3, pp. 1029-1038.
9. Dukhyun Nam, Kyuhong Lee, Sunghak Lee. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of carbide-reinforced ferrous surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, Vol. 39, Issue 11, pp. 2626-2634.
10. Seong-Hun Choo, Sunghak Lee, Soon-Ju Kwon. Effect of flux addition on the microstructure and hardness of TiC-reinforced ferrous surface composite layers fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, Volume 30, Issue 12, pp. 3131-3141.
11. Jongmin Lee, Kwangjun Euh, Jun Cheol Oh, Sunghak Lee. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, no. 323, Issue 1 – 2, pp. 251-259.
12. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy: spravochnik* (Metallographic reagents: a guide). Moscow, Metallurgija, 1981. 120 p.

# СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОГО ЧУГУНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СМЕСЬЮ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И ХРОМА\*

*Н.В. СТЕПАНОВА<sup>1</sup>, аспирант*

*В.А. КУЗНЕЦОВ<sup>2</sup>*

*Ю.Н. МАЛЮТИНА<sup>1</sup>, аспирант*

*Д.С. ТЕРЕНТЬЕВ<sup>1</sup>*

*В.С. ЛОЖКИН<sup>1</sup>, аспирант*

*А.А. РАЗУМАКОВ<sup>1</sup>, аспирант*

<sup>1</sup>(НГТУ, г. Новосибирск)

<sup>2</sup>(ООО Центролит-С, г. Новосибирск)

Поступила 10 августа 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

**Степанова Н.В.** – 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: naty@ya.ru

Разработан модификатор, представляющий собой механоактивированную смесь порошков карбида вольфрама и хрома. Исходные порошки карбида вольфрама, хрома и их механоактивированная смесь исследованы методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Модификатор представляет собой механическую смесь частиц хрома, карбида вольфрама и карбида титана. Карбиды расположены на поверхности хрома, как более пластичного материала. Частицы модификатора имеют субмикронный размер и развитую поверхность. Показано, что использование данного модификатора при литье чугуна позволяет изменить структуру и увеличить его прочностные свойства. Разработанный модификатор способствует увеличению содержания перлита и уменьшению длины графитовых включений. При концентрации карбида вольфрама 0,0375 % предел прочности увеличился на 19,8 %, твердость – на 13 %.

**Ключевые слова:** чугун, модифицирование, микроструктура, механические свойства.

## Введение

Модифицирование расплава имеет огромный потенциал, поскольку позволяет изменить механические свойства материала при незначительных материальных затратах. Это связано с тем, что в процессе модифицирования вводятся малые концентрации активного вещества. Архаров В.И. и Новохатский И.А. развили квазиполикристаллическую модель строения расплавов [1], согласно которой в структуре жидкого расплава присутствуют участки структуры, имеющие ближний порядок. Причины влияния модификаторов на структуру и свойства сплавов лежат в самом процессе кристаллизации, именно благодаря наличию в сплаве кластеров (участков структуры с ближним порядком) кристаллу энергетически более выгодно

доставать уже имеющуюся структуру, чем создавать новый кластер из участка структуры с дальним порядком. Вероятно, именно по этой причине в процессе модифицирования нерастворимыми тугоплавкими частицами центрами кристаллизации являются частицы модификатора, и чем таких частиц больше – тем больше возникнет кристаллов, тем мельче будет структура расплава. Работы В.И. Данилова [2] подтвердили существенную роль нерастворимых примесей в инициировании процесса образования новой фазы: он показал, что величина поверхностного натяжения на поверхности подложка–зародыш может служить физической характеристикой активности твердой поверхности в отношении зародышеобразования. Удельная поверхность вносимой в расплав частицы оказывает значительное влияние на скорость

\* Работа проведена в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 гг., соглашение № 14.132.21.1660 от «01» октября 2012 г.

кристаллизации, так как тесно связана как с размером частицы, так и с ее формой. Влияние развитой поверхности косвенно можно подтвердить эффектом переcondенсации [3]. Данное явление описывает переход из газообразной фазы в жидкую, при этом давление пара больше всего на вогнутой поверхности и меньше всего на выпуклой. Если провести аналогию, то становится очевидным, что для образования кристалла на вогнутой поверхности требуется энергии меньше, чем на выпуклой. Следовательно, чем более развитую поверхность будут иметь частицы модификатора, чем больше будет их удельная поверхность, тем большее влияние они смогут оказать на процесс кристаллизации и, как следствие, на структуру расплава.

В работах [4–6] описано влияние модификаторов на механические и технологические свойства чугуна и стали. Авторы [5, 6] пишут об уменьшении степени отбела чугунов, увеличении предела прочности и относительного удлинения, увеличении износостойкости. В результате воздействия модификаторов авторами отмечено измельчение зерна [5, 6]. В работе [7] установлено, что введение модифицирующей смеси с восстановителем ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , либо  $\text{CaC}_2$ ) приводит к образованию однородной структуры, изменению фазового состава.

Анализ вышеуказанных работ, связанных с выбором труднорастворимых добавок (частиц) с наибольшей модифицирующей способностью, свидетельствует о необходимости создания следующих условий:

- использование тугоплавких нерастворимых частиц, которые могут образовать в расплаве самостоятельную фазу;
- использование дисперсных частиц с большой суммарной поверхностью раздела фаз и сопоставимые по размерам с кластерами в расплаве;
- использование частиц, обладающих металлическими свойствами;
- использование веществ, способных создавать эндогенные частицы, являющиеся впоследствии центрами кристаллизации расплава.

Работы по модифицированию тугоплавкими частицами [4–6] зачастую носят локальный характер, без серьезного обоснования, почему берется именно такой состав. По этой причине целью данной работы является разработка модификатора по названным выше условиям и исследование его влияния на структуру и механические свойства серого чугуна.

## Методики и инструменты

Разработка состава модификатора, используемого в работе, проводилась совместно с ИХТТМ СО РАН. Для получения модификатора использовался порошок карбида вольфрама, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, и порошок хрома, полученный механическим измельчением. В лаборатории ИХТТМ СО РАН проведена механоактивация порошков в мельнице АГО-2 в течение одной минуты. Удельную поверхность ( $S_{уд}$ ) модификатора определяли методом БЕТ по тепловой десорбции аргона с внутренним эталоном. Перед проведением измерений механоактивированная смесь была прогрета в потоке газов Ar и He при температуре 120 °С в течение 0,5 ч.

Для определения влияния разработанного модификатора были получены три отливки: контрольная отливка серого чугуна – без модификатора и две отливки модифицированного чугуна. Данные по концентрации модификаторов приведены в табл. 1.

Металл плавил в индукционной печи ОКБ-281 с кислой футеровкой и емкостью тигля 750 кг. Разливка металла производилась из ковша емкостью 200 кг для обеспечения одинаковых температурных условий для всех отливок. Использовался синтетический чугун второго переplava. Применялась технология внутриформенного модифицирования, предполагавшая расположение модификатора между двумя керамическими фильтрами (рис. 1). Расчет концентрации модификатора производился на 20 кг расплава. Преимуществом литейной формы (рис. 1) является отсутствие возможности всплытия модификатора и равномерное распределение частиц в расплаве. Заливка производилась в формы из сухой песчано-глинистой смеси при температуре расплава 1350...1380 °С.

Химический анализ полученных образцов проводился на оптическом эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Твердость оценивалась по методу Бринелля с нагрузкой 3000 кг стальным шариком диаметром 10 мм. Одноосное статическое растяжение проводилось на универсальной сервогидравлической системе типа Instron 300DX, образцы подготавливались по

Таблица 1

Концентрация модификаторов

Отливка	Состав	Масса модификатора, г	Состав активной фазы	Масса активной фазы, г (%)	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
1	Контрольный	–	–	–	–
2	(WC-TiC)+Cr	5	WC-TiC	2,5 (0,013)	5,48
3	(WC-TiC)+ Cr	15	WC-TiC	7,5 (0,0375)	

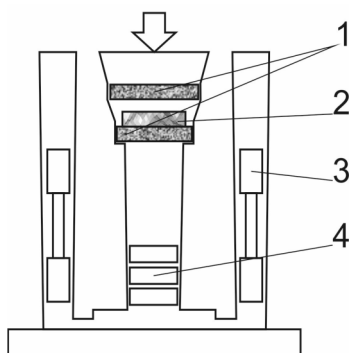


Рис. 1. Модель литевой формы:

1 – керамические фильтры; 2 – модификатор в алюминиевой фольге; 3 – участок отливки для изготовления образцов на растяжение; 4 – участок отливки для определения химического состава материала и проведения микроструктурных и дюрOMETрических исследований

ГОСТ 1497. Скорость подвижной траверсы машины растяжения составляла 5 мм/мин.

Образцы для проведения микроструктурных исследований изготавливались по стандартной технологии, заключающейся в шлифовании и полировании. Для проведения микроструктурных исследований был использован микроскоп Carl Zeiss AxioObserver Alm. Травление шлифов производилось в 4 %-м спиртовом растворе  $\text{HNO}_3$ . Микроструктура чугуна определялась по ГОСТ 3443. Структура порошков в исходном состоянии и готового модификатора анализировалась на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act и на просвечивающем электронном микроскопе Technai G2 FEI.

### Результаты и обсуждения

В ходе выполнения исследования был разработан модификатор и проведено внутриформенное модифицирование серого чугуна.

Выбор метода получения модифицирующих порошков обусловлен особенностями взаимодействия модификатора с расплавом серого чугуна в процессе кристаллизации. Активной фазой в данном случае является карбид вольфрама. Хром выполняет роль связующего материала, объединяющего частицы активного вещества в агломераты. Хром, в свою очередь, в расплаве может образовывать карбиды хрома, которые тоже могут быть центрами кристаллизации. Но влияние хрома, находящегося в составе модификатора, нивелируется наличием хрома в составе самого чугуна (табл. 2), по этой причине в дальнейшем рассматривается концентрация активного вещества, т. е. карбида вольфрама, полученного методом самораспро-

страняющегося высокотемпературного синтеза. Механоактивация использована для повышения удельной поверхности полученных агломератов.

На рис. 2 представлены исходные порошки и механоактивированная смесь. По данным микрорентгено-спектрального анализа в порошке карбида вольфрама, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (рис. 2, а) присутствует углерод, вольфрам и титан. Наличие титана в химическом составе обусловлено использованием карбида титана в качестве катализатора при производстве карбида вольфрама в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Порошок хрома (рис. 2, б) получен в результате механического измельчения. На поверхности частиц наблюдаются сколы, что характерно для данного вида получения порошка. При использовании порошка в качестве модификатора сколы могут способствовать

Таблица 2

Химический состав образцов

Отливка	Химические элементы									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	As	Fe
1	3,83	0,53	3,88	0,03	0,05	0,11	0,16	0,6	0,0039	ост.
2	3,79	0,54	3,8	0,04	0,03	0,12	0,17	0,64	0,0038	
3	3,81	0,52	3,67	0,04	0,05	0,12	0,17	0,64	0,0041	

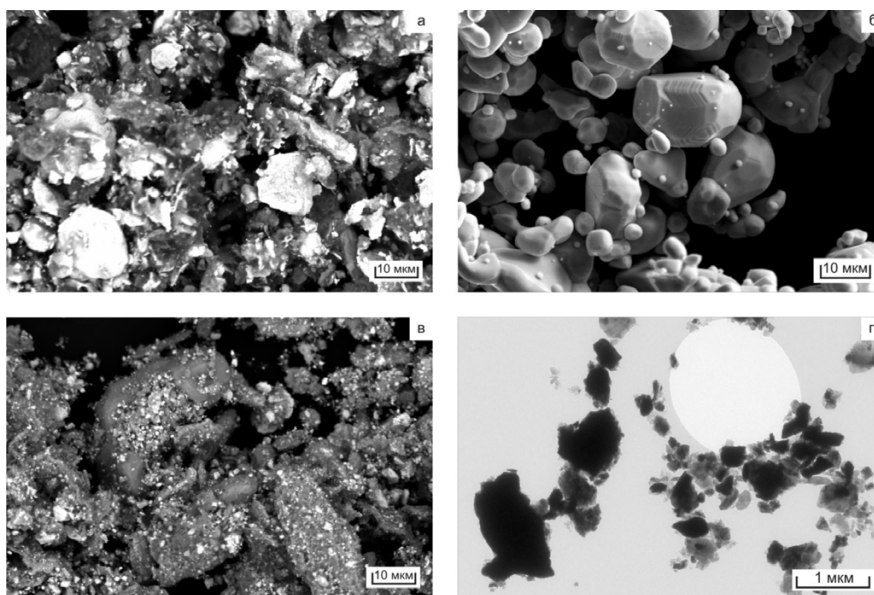


Рис. 2. Исходные составляющие модификатора:

а – исходный порошок WC, полученный методом СВС; б – исходный порошок Cr и механоактивированный порошок WC и Cr (б – РЭМ, г – ПЭМ)

образованию на их поверхности кристаллов расплава. Чем более развитую поверхность имеют частицы, тем больше их удельная поверхность и тем выше вероятность образования кристаллов на поверхности частицы.

После механоактивации частицы карбида вольфрама и титана находятся на поверхности агломератов хрома (рис. 2, в). Механизм образования такой смеси можно представить следующим образом: при смешивании высокопрочного материала с пластичным в течение недолгого времени пластичный материал образует агломераты, а высокопрочный разместится на поверхности вязкого материала. Так и в данном случае, наблюдаются агломераты более пластичного хрома, на поверхности которого находятся частицы более твердых (по отношению к хрому) карбидов вольфрама и титана.

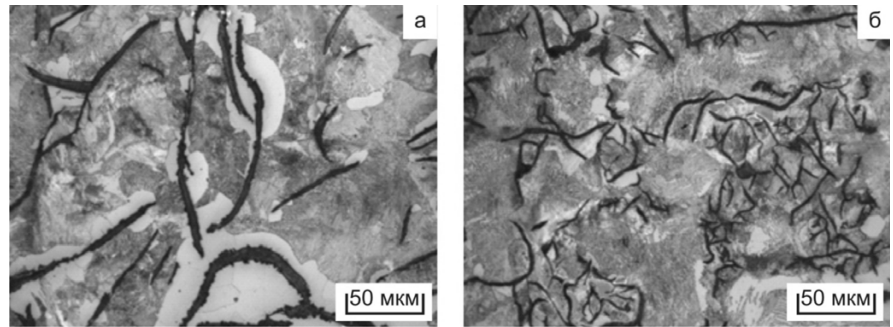


Рис. 3. Структура образцов (а – контрольный; б – 3-й образец)

0,0375 % (рис. 3, б). Влияние модифицирующих добавок на структуру графитовых включений показано в табл. 3. Для 1-й и 2-й отливок характерно соотношение перлита и феррита 70 и 30 % соответственно, в то время как для 3-й отливки содержание феррита составило 8 %. Феррит находится вокруг графитовых включений в отдельных областях, равномерно расположенных в плоскости шлифа. Среднее расстояние между пластинами цементита для всех образцов составляет 0,8...1,3 мкм. Частицы модификатора в структуре чугуна не выявляются.

Таблица 3

**Влияние модифицирующих добавок на структуру графитовых включений**

Отливка	Графитовые включения			
	Форма	Длина, мкм	Распределение	Количество
1-й контрольный	Пластинчатая прямолинейная	120...250	Неравномерное	3–5 %
2-й	Пластинчатая прямолинейная и завихренная	Области с длиной 30...60 и 60...120	Неравномерное и сетчатое	5–8 %
3-й	Пластинчатая прямолинейная	60...120	Неравномерное	8–10 %

Исследование модификатора с применением методов просвечивающей электронной микроскопии показало, что его частицы имеют субмикронный размер. При этом они имеют неправильную форму, что может способствовать созданию благоприятных условий для образования зародышей кристаллов на поверхности по сравнению, например, с круглыми частицами.

Результаты химического анализа отливок, полученных для проведения исследований приведены в табл. 2. По данным химического анализа видно, что модификатор не изменяет химический состав серого чугуна, хотя структура и механические свойства изменились.

На рис. 3 показано влияние модификатора на структуру серого чугуна. Наибольшее изменение оказалось при концентрации активной фазы

Зависимость твердости и предела прочности при растяжении чугуна от концентрации активного вещества в модификаторе представлена на рис. 4. Все модифицированные образцы имеют твердость выше контрольного образца. Максимальный прирост твердости составил 13 %, при этом наибольший прирост предела прочности составил 19,8 %. Изменение механических свойств связано со сле-

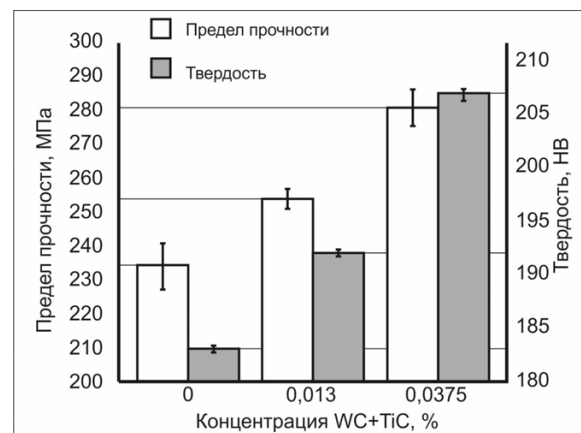


Рис. 4. Зависимость механических свойств серого чугуна от концентрации активной фазы модификатора



дующими изменениями в структуре чугуна. При введении модификатора удельная доля перлита увеличилась, это вызвало увеличение твердости и предела прочности материала. Вместе с тем изменился и размер графитовых включений, длина включений стала меньше, что, в свою очередь, тоже привело к увеличению предела прочности.

### Выводы

Модификатор из механоактивированной смеси карбида вольфрама и хрома представляет собой механическую смесь частиц хрома, карбида вольфрама и карбида титана. Карбиды расположены на поверхности хрома. Частицы, входящие в состав модификатора имеют субмикронный размер и развитую поверхность.

Использование модификатора из механоактивированной смеси карбида вольфрама, полученного самораспространяющимся высокотемпературным синтезом, и хрома при литье чугуна способствует увеличению содержания перлита и уменьшению длины графитовых включений, что приводит к увеличению предела прочности на 19,8 % и твердости на 13 % при концентрации карбида вольфрама в расплаве 0,0375 %.

### Список литературы

1. Архаров В.И. О квазиполикристаллической модели расплавов / В.И. Архаров, И.А. Новохатский // Строение и свойства метал. и шлаковых расплавов: науч. сообщ. Все-

союз. конф. по строению и свойствам метал. и шлаковых расплавов. – Свердловск, 1974. – С. 52–53.

2. Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкости: Избранные статьи / В.И. Данилов; под ред. Г.В. Курдюмова; АН УССР. – Киев: Изд-во АН УССР, 1956. – 568 с.

3. Крюков А.П. Переконденсация в газопылевой смеси / А.П. Крюков, В.Ю. Левашов, И.Н. Шишкова // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т. 42. – № 4. – С. 601–607.

4. Сабуров В.П. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / С.П. Сабуров, А.Н. Черепанов, М.Ф. Жуков. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 344 с.

5. Крушенко Г.Г. Результаты опытно-промышленных исследований повышения свойств черных и цветных металлов с помощью тугоплавких нанопорошковых материалов / Г.Г. Крушенко, А.Н. Черепанов, В.А. Полуобояров, В.А. Кузнецов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 4. – С. 23–29.

6. Крушенко Г.Г. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков / Г.Г. Крушенко, И.С. Ямских, А.А. Бонченков, А.С. Мишин // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 2 (9). – С.20–21.

7. Зыкова А.П. Структурно-фазовое состояние Fe-содержащих сплавов, модифицированных ультра- и нанодисперсными порошками оксидов d-металлов / А.П. Зыкова, И.А. Курзина, М.Ю. Новомейский, А.С. Князев, А.А. Никулина // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – Новосибирск. – 2012. – № 4. – С. 72–78.

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 121–126

### Structure and mechanical properties of cast iron, inoculated by mechanically activated mixture of tungsten carbide and chromium carbide

<sup>1</sup>N.V. Stepanova, <sup>2</sup>V.A. Kuznetsov, <sup>1</sup>Y.N. Malutina, <sup>1</sup>D.S. Terent'ev, <sup>1</sup>V.S. Lozhkin, <sup>1</sup>A.A. Razumakov

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

<sup>2</sup>Ltd. Centrolit-S, Petuhova st., 51, Novosibirsk, 630088, Russia

E-mail: naty@ya.ru

### Abstract

Nucleation catalyst, consisting of mechanically activated mixture of tungsten carbide and chromium carbide is developed. Original tungsten carbide and chromium carbide powders and its mechanically activated mixture are investigated by the scanning and transmission electronic microscopy. The modifier is a mechanical mixture of particles of chromium carbide, tungsten carbide and titanium. Carbides are located on the surface of chromium, so it is more ductile material. The particles are sub-micron size of the modifier and the developed surface. It is showed, that the usage of developed nucleation catalyst

during cast iron casting leads to the strength properties increasing. The developed modifier promotes increase pearlite content and decrease in the length of graphite inclusions. The tensile strength increased by 19.8%, the hardness increased by 13% when the concentration of tungsten carbide 0.0375%.

Keywords: cast iron, inoculation, microstructure, mechanical properties

### References

1. Arharov V.I., Novohatskij I.A. *O kvazipolikristallicheskoj modeli rasplavov* [About quasi-polycrystalline model melts]. *Stroenie i svojstva metal. i shlakovyh rasplavov: Nauch. soobshh. Vsesojuz. konf. po stroeniju i svojstvam metal. i shlakovyh rasplavov* [Scientific Reports All-Union Conference "Structure and properties of metal and slag melts"]. Sverdlovsk, 1974, pp. 52-53.
2. Danilov V.I. *Stroenie i kristallizacija zhidkosti: Izbrannye stat'I* (The structure and crystallization of the liquid. Featured Articles). Kiev, AN UkrSSR, 1956. 568 p.
3. Kryukov A.P., Levashov V.Yu., Shishkova I.N. *Perekondensacija v gazopylevoj smesi* [Evaporation condensation in a gas-dust mixture]. *Teplofizika vysokih temperatur - High Temperature*, 2004, Vol. 42, no. 4, pp. 601-607.
4. Saburov S.P., Cherepanov A.N., Zhukov M.F. *Plazmohimicheskij sintez ul'tradispersnyh poroshkov i ih primenenie dlja modifikirovanija metallov i splavov* (Plasma chemical synthesis of ultrafine powders and their application for the modification of metals and alloys). Novosibirsk, Sibirskaja izdatel'skaja firma RAN "Nauka", 1995. 344 p.
5. Krushenko G.G., Cherepanov A.N., Polubojarov V.A., Kuznecov V.A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 2003, no. 4, pp. 23-29.
6. Krushenko G.G., Yamskih I.S., Bonchenkov A.A., Mishin A.S. *Metallurgija mashinostroenija*, 2002, no. 2 (9), pp. 20-21.
7. Zykova A.P., Kurzina I.A., Novomejskij M.Yu., Knjazev A.S., Nikulina A.A. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2012, no. 4, pp. 72-78

## Рекомендации по написанию научной статьи

Оформление русскоязычной части статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)», должно соответствовать *по стилю и содержанию* определенным минимальным требованиям еще до того, как она будет принята на рассмотрение для публикации. Статьи, не соответствующие этим минимальным требованиям, получают мотивированный отказ редактора – их даже не отправляют на рассмотрение в редакционный совет. Вопросы новизны и оригинальности исследования решаются авторами статьи.

Отметим одно необходимое условие, сформировавшееся за время работы в журнале, – нельзя подавать на рассмотрение работу, которая предварительно не прошла **оценки качества** самим автором (и научным руководителем в случае недостаточного опыта автора в подготовке научных статей). Кроме того, текст должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

### 1. Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно, соблюдая правила написания по русскому языку.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

### 2. Заглавие и сведения об авторах

Используйте лаконичное описательное название, содержащее основные ключевые слова темы статьи. Перед заглавием обязательно указывается УДК.

После заглавия по порядку следуют: *И.О. ФАМИЛИЯ авторов, их ученая степень, ученое звание*, в скобках указываются *сокращенное название организации, город*. Ниже – данные для переписки: *Фамилия И.О. основного автора, почтовый адрес и полное название организации, e-mail*.

### 3. Аннотация (реферат)

Аннотация содержит ключевые слова и представляет собой **сжатый обзор** содержания работы, указывает на основные проблемы, к которым обращается автор, на подход к этим проблемам и на достижения работы (не менее 10 строк).

### 4. Ключевые слова

Ключевые слова должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат **профилем вашей работы** для баз данных.

### 5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

### 6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы

#### 6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.



При проведении испытаний приводится следующая информация:

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.
2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

### 6.2. Результаты экспериментов

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

### 6.3. По теоретической/вычислительной работе

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно для того, чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшает работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

### 7. Обсуждение

Необходимо использовать данный раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Данный раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и показать перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

### 8. Выводы

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

### 9. Список литературы

Прежде чем составить список литературы, необходимо ознакомиться с правилами оформления ссылок в журнале «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)» на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания).

В списки литературы обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %, исключение – публикации по региональной тематике); число цитируемой литературы чаще всего – от 15 до 30 ссылок. Списки литературы (References) – это демонстрация вашей эрудиции, информированности о текущих исследованиях в данной области, поэтому цитируемые публикации должны быть как можно более новые (но и увеличивать их чрезмерно, без причины тоже не следует). Ссылки на свои работы приветствуются, но проявляйте умеренность.

**В.Г. Атапин, В.Ю. Скиба,**  
 заместители главного редактора журнала  
 «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы, не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее **100-250 слов** (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

### Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на основе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

### Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents

a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to “interactive strategic management” which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

### Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

**Purpose:** Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

**Methods:** We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

**Results:** As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via <sup>1</sup>H or <sup>31</sup>P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative <sup>13</sup>C-glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by <sup>31</sup>PMR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

**Discussion:** Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

### Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает:

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.
2. Кратко излагая основные факты работы, необходимо помнить следующие моменты:
  - следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;
  - не включать несущественные детали;
  - вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение и имея также в виду, что вы пишете для международной аудитории;
  - текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;
  - необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);
  - стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры хороших рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

**Научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»** публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований по следующим научным направлениям (рекомендованные ВАК): 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Статью с приложениями и их электронные версии на CD можно направлять в редакцию **по почте** либо **по электронной почте (metal\_working@mail.ru)**. Одновременно со статьей высылается **оригинал экспертного заключения** о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора *Атапин В.Г.*

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

### Требования к оформлению рукописей

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word 97-2003**. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

Научная публикация должна иметь следующую структуру:

1. **Заглавие** (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).

2. **Аннотация:**

- на русском языке на основе ГОСТ 7.9-95 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ **не менее 10 строк, 850 знаков**), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

- на английском языке - по объему больше аннотации на русском языке и включает **100-250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

3. **Ключевые слова** (должны отображать содержание работы). На английском языке - использовать термины из контролируемых словарей.

4. **Введение** (краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то как вы это сделали).

5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

6. **Результаты и обсуждение.**

7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).

8. **Список литературы** (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка»).

### Краткие требования к набору рукописей

**Единицы физических величин.** При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц (**СИ**).

**Таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

**Математические формулы.** Сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Используется только сквозная нумерация.

**Рисунки** представляются в форматах TIFF, PNG, JPEG, BMP, WMF. *Рисунки, сканированные откуда-либо, не принимаются.* Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм. **Библиографический список**, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например, [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

## Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

### ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В.Г. ИВАНОВ, доктор техн. наук, профессор,  
....., канд. техн. наук, доцент,  
В.С. ПЕТРОВ, аспирант, ..... , магистрант,  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

**Иванов В.Г.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский  
государственный технический университет, e-mail: **metal\_working@mail.ru**

**Аннотация** (не менее 10 строк, 850 знаков)

**Ключевые слова**

<текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение
2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.
3. Результаты и обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы

**Choice of design parameters of base details at the design stage**

V.G. Ivanov, ....., V.S. Petrov, .....

**Abstract** (100-250 слов)

**Key words**

На отдельном листе приводится информация для РИНЦ (исполнение обязательно).

## Пример оформления сведений для РИНЦ:

УДК  
621.9.06

**Расчетная оценка упругих деформаций фундамента многоцелевого станка**

Иванов Владимир Григорьевич, Петров Виктор Сергеевич, ....

*Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20*

**Аннотация**

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности. ...

**Ключевые слова**

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов.

Литература

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2008. – №4(41). – С. 18–25.
3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // *Вестник машиностроения*. – 2007. – № 2. – С. 61–64.

**Calculation of elastic deformations the base of the multi-purpose machine tool**

V.G. Ivanov, V.S. Petrov, ....

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ...

**Keywords**

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.