

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 16  
2020  
№ 11 (191)  
ноябрь

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**  
д.т.н., проф.  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

д.т.н., проф., заслуженный  
деятель науки и техники РФ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**

д.ф.-м.н., проф.  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

д.т.н., проф. В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН  
д.т.н., проф. А.В. КИРИЧЕК  
д.т.н., проф. О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.  
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.

В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Ян СУХАНЭК

Мариан СЧЕРЕК

Войтек ХОМИК

**Редакция:**

О.С. ЛУКАШЕНКО

А.В. ОРЛОВА

Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ



### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Выбор технологического процесса производства деталей из порошков на железной основе, обеспечивающего их прочность ..... 483

**Томашевич А.М., Ширваньянц Г.Г., Теряев Д.А.** Повышение ресурса и надежности елочных пазов диска турбины низкого давления с помощью ультразвукового поверхностного упрочнения шариками ..... 491



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В.** Расчетное определение модуля упругости материала поверхностного слоя детали в случае упрочнения при механической обработке ..... 496

**Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П.** Особенности напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя при свободном ортогональном резании ..... 498

**Щедрин А.В., Бекаев А.А., Игнаткин И.Ю., Онищенко Д.О., Чихачёва Н.Ю.** Влияние состава металлоплакирующей смазки и технологии ее применения на контактные характеристики методов комбинированного дорнования отверстий ..... 504



### ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

**Еремин Е.Н., Лосев А.С., Пономарев И.А., Бородин С.А.** Жаростойкость металла покрытий, наплавленных никельмарганцеволибденовой порошковой проволокой ..... 511

**Жуковский Е.А., Артамонов А.В., Балдаев Л.Х., Неуймин В.М.** Моделирование горения и течения продуктов сгорания по тракту горелки К-2 для газотермического напыления защитных покрытий ..... 516



### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

**Безбородов И.А.** Детонационно-газовое напыление покрытий как управляемая система направленного формирования адгезии покрытий при восстановлении элементов механических систем автотракторных ДВС ..... 522

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 16  
2020  
№ 11 (191)  
November

Since 2005, January

**Editor-in-Chief**

Dr. of Eng. Sci.  
Yu.V. PANFILOV

**Chair of Editorial Council**

Dr. of Eng. Sci., The honoured  
worker of a science and  
technics of the RF  
V.F. BEZYAZYCHNYI

**Editorial Assistant**

Dr. of Phys.-Math. Sci.  
V.Yu. FOMINSKY

**Chairman Assistants:**

Dr. of Eng. Sci. V.Yu. BLUMENSTEIN  
Dr. of Eng. Sci. A.V. KIRICHEK  
Dr. of Eng. Sci. O.V. CHUDINA

**Editorial council:**

Yu.P. ANKUDIMOV  
V.P. BALKOV  
V.M. BASHKOV  
A.I. BELIKOV  
A.I. BOLDYREV  
S.N. GRIGORIEV  
V.E. GROMOV  
S.A. KLIMENKO  
Yu.R. KOPYLOV  
N.K. KRIONI  
V.P. KUZNETSOV  
V.A. LEBEDEV  
V.V. LYUBIMOV  
E.D. MAKARENKO  
B.Ya. MOKRITSKY  
F.I. PANTELEENKO  
H.M. RAKHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.V. SLEPTSOV  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
G.A. SUKHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
V.A. SHULOV  
M.L. KHEIFETS  
Jan SUCHANEK  
Marian SZCZEREK  
Wojciech HOMIK

**Edition:**

O.S. LUKASHENKO  
A.V. ORLOVA  
E.A. SERIKOVA

Journal is spreaded on a subscription,  
which can be issued in any post office  
(index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269)  
or in publishing office.  
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by  
Roskomnadzor. The certificate  
of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

## CONTENTS

### GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

**Dmitriev A.M., Korobova N.V.** Selection of technological process for production of parts made of iron-based powders, providing their strength ..... 483

**Tomashevich A.M., Shirvan'yants G.G., Teryaev D.A.** Low-pressure turbine disc fir-tree slots' life and reliability enhancement by ultrasonic surface hardening ..... 491

### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

**Bez'yazychny V.F., Timofeev M.V.** Calculated determination of elasticity modulus of surface layer material during hardening in mechanical processing ..... 496

**Krechetov A.A., Blyumenstein V.Yu., Petrenko K.P.** Features of stress-strain state of surface layer metal during free orthogonal cutting ..... 498

**Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Ignatkin I.Yu., Onishchenko D.O., Chikhacheva N.Yu.** Effect of composition of metal-cladding lubricant and its application technology on contact characteristics of combined hole mandrelling methods ..... 504

### THERMAL PROCESSING

**Eremin E.N., Losev A.S., Ponomarev I.A., Borodikhin S.A.** Heat resistance of coatings metal deposited by nickel-manganese-molybdenum flux-cored wire ..... 511

**Zhukovsky E.A., Artamonov A.V., Baldaev L.Kh., Neuymin V.M.** Simulation of combustion and combustion of flow products in K-2 thermal spraying torch for thermal spraying of protective coatings ..... 516

### PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

**Bezborodov I.A.** Detonation-gas deposition of coatings as controlled system for directed formation of coatings adhesion in restoration of mechanical systems of automotive tractor internal combustion engine ..... 522

Reprint is possible only with the reference to the journal  
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,  
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

(Московский государственный технологический университет "Станкин")

E-mail: mt-6@yandex.ru

## Выбор технологического процесса производства деталей из порошков на железной основе, обеспечивающего их прочность

*Рассмотрено крупносерийное производство деталей из порошков и порошковых сталей, в котором деталям придают требуемую форму на прессах. Приведен анализ трех технологических процессов. В двух процессах формуют из порошка заготовки, спекают ее и штампуют из нее деталь. В первом процессе применяют горячую штамповку, во втором — холодную штамповку. Показано преимущество холодной штамповки. Производство деталей из порошковых сталей при холодной штамповке ограничено прочностью инструмента. Описаны способы снижения напряжений в инструменте. Третий процесс включает в себя формование из порошка детали окончательной формы и ее спекание. Этот процесс применяется для деталей из порошковых сталей. При этом процессе у деталей остается большая пористость, снижающая их прочность и уменьшающая эффективность термообработки. Описан способ уменьшения пористости деталей при их формовании.*

**Ключевые слова:** детали порошковые, порошки железные, порошковые стали, технологии производства деталей, прессовое оборудование.

*Large-scale production of parts from powders and powder steels, in which parts are shaped in presses is considered. The three processes for production of the parts are analyzed. At two of them preforms are formed from the powder, they are sintered and the parts are punched from the sintered preforms. In the first process is used hot forging, in the second process used cold forging. The advantage of cold forging is demonstrated. The durability of the tool during cold forming is not sufficient to produce of parts from powder steels. The ways to reduce of stresses in the tool are described. The third process comprises forming from powder of the final shape parts and their sintering. Such process is applied for parts from powder steels. However in this process the parts have large porosity, which reduces their strength and reduces the efficiency of heat treatment. The method for reducing of the parts porosity as they are formed is described.*

**Keywords:** powders parts, iron powder, powder steels, parts processing technologies, pressure equipment.

### Введение

Специалисты по технологии конструкционных материалов проводят анализ разных технологических процессов для выбора наилучших из них для производства машиностроительных деталей, имеющих требуемый комплекс служебных свойств. Под комплексом служебных свойств авторы данной статьи понимают как прочность изготавливаемых деталей, так и форму и равномерность фрагментов, на которые эти детали разрушаются под действием внутреннего давления. Последнее указанное требование выполняется, когда деталь, помимо прочности, обладает пластичностью.

Решая указанные задачи, технолог находится в определенных рамках, связанных с материальной базой машиностроительного предприятия, для которого разрабатывается технология. В частности, при разработке технологического процесса рассматривается оборудование, которым располагает данное предприятие. Поэтому в статье описаны и сопоставлены варианты трех технологических процессов.

С участием авторов данной статьи разработаны процессы производства деталей, показанных на рис. 1—4. Программы выпуска этих деталей — крупносерийные.

На рисунках представлены детали, изготовленные из заготовок, подвергнутых спеканию до



Рис. 1. Стаканы, изготовленные холодным выдавливанием из спеченных цилиндрических порошковых заготовок



Рис. 2. Втулки со ступенчатой внешней поверхностью из порошка, до их спекания



Рис. 3. Втулки с тонкой стенкой из порошка, до их спекания



Рис. 4. Стаканы из порошка, до их спекания

проведения штамповки из них деталей, а также детали, сформованные непосредственно из порошка до проведения операции их спекания и только после этого — спеченные.

**Цель работы** — сравнение вариантов технологического процесса производства осесимметричных машиностроительных деталей, обладающих высокими плотностью и, как следствие, прочностью и одновременно пластичностью. Сравнение проведено, чтобы помочь технологу выбрать наиболее приемлемый из них для реализации на своем предприятии.

При производстве порошковых деталей рассматриваемого типа в технологических процессах присутствуют следующие операции. Переработка материалов в виде слитков в порошковые материалы, приготовление порошковой смеси (далее шихты), уплотнение шихты с приданием ей формы простейшей исходной заготовки или сразу окончательной формы изготавливаемой детали, спекание сформованной детали или, как вариант, сформованной заготовки, штамповка окончательной детали из спеченной заготовки простейшей формы.

В зависимости от того, в какой последовательности выполняются операции уплотнения шихты и ее спекания, сформировалось традиционное разделение областей технологии между специалистами по порошковой металлургии и по обработке металлов давлением.

Считается, что если сразу приближенную по форме к готовой детали заготовку формуют из порошковой шихты, а потом ее спекают, то это область порошковой металлургии. Если вначале изготавливают заготовку простейшей формы (цилиндрическую, призматическую и др.), спекают ее, а затем штампуют из нее деталь с требуемой формой, то это область обработки давлением.

Специалисты по порошковой металлургии успешно решили ряд вопросов по переработке компактных материалов (слитков) в порошки, приготовлению сложных порошковых композиций материалов, по спеканию и последующей термообработке образцов, изготовленных из этих композиций. При этом изготовленные образцы отвечают требованиям, предъявляемым к материалам, например электротехническим. Значительно меньших успехов такие специалисты достигли в технологии производства машиностроительных деталей из рассматриваемых материалов.

При крупносерийном производстве рассматриваемых деталей в цехах машиностроительных предприятий их или формуют на пресс-автоматах [1–3], после чего передают на спекание, или формуют заготовки простейшей формы, спекают эти заготовки и штампуют из них детали требуемой формы на обычных штамповочных прессах.

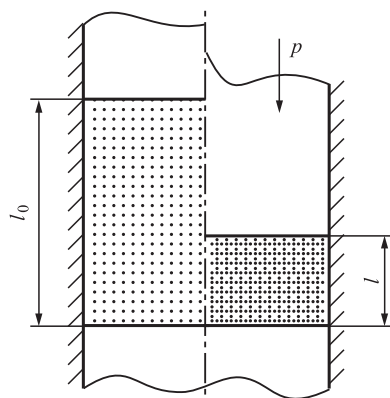


Рис. 5. Схема уплотнения засыпанного порошка в закрытой матрице

В обоих сравниваемых технологических процессах к применяемым прессам предъявляют требования по большому высоте штампового пространства и ходу ползуна. Причиной этого является необходимость обеспечения в штамповой оснастке большой так называемой засыпной высоты  $l_0$  (рис. 5).

При засыпке в матрицу порошковая шихта укладывается с плотностью, указанной в марке порошка. В частности, на рис. 1—4 показаны детали из ПЖРВ3.160.24. Последние две цифры в марке характеризуют засыпную плотность  $2,4 \text{ г/см}^3$ . Если засыпанную в матрицу шихту удастся по схеме, приведенной на рис. 5, уплотнить хотя бы до плотности  $7,2 \text{ г/см}^3$ , то  $l_0/l = 3$ . В большом ходе деформирующего инструмента заключается отличие штамповки порошковых деталей от штамповки деталей из компактных материалов. При штамповке заготовки из компактного материала дополнительного хода пуансона, равного  $l_0 - l$ , не требуется, также на величину  $l_0 - l$  меньше необходимая глубина матрицы.

В конструировании оборудования для формования деталей из порошковых материалов имеют место два направления [2, 4].

Первое — использование прессов традиционных конструкций (выбирая конструкции с большими размерами штампового пространства) и применение штампов специальных конструкций. Такой подход характерен для японских фирм Kotaki и Yoshizuka, фирмы Mannesmann-Pulvermetall (ФРГ) и др. В частности, на заводе "Сибприбормаш" установлены механогидравлические прессы фирмы Yoshizuka, имеющие крупногабаритные и очень сложные штампы. Фирма Mannesmann укомплектовала своим оборудованием, имеющим очень сложные штампы, цех порошковой металлургии на Алтайском заводе агрегатов.

Второе направление, реализованное, например, в специализированных прессах шведской фирмы ASEA — это использование в прессе отдельных

гидроцилиндров для перемещения каждого из деформирующих заготовку инструментов. В прессе фирмы ASEA [1] — это главный верхний цилиндр, верхние боковые цилиндры, нижние боковые цилиндры, цилиндры управления высотой камеры засыпки, цилиндры подвижных упоров для плиты с установленной на ней матрицей, внутренний верхний цилиндр, цилиндр подвижных упоров, цилиндр стержня, наружный верхний цилиндр.

Специалисты фирмы Bolding Lima Hamilton (США) считают [1], что максимальное число независимых движений пресса позволяет значительно расширить его технологические возможности и упростить конструкцию штамповых инструментов. Пресс этой фирмы силой 3 МН имеет размещенные в штамповом пространстве два независимых верхних пуансона, выталкиватель, подвижную матрицу, сердечник. Все эти инструменты приводятся в действие от независимых между собой гидроцилиндров пресса. Последовательность срабатывания гидроцилиндров устанавливается системой программного управления прессом.

Отечественные конструкторы прессов для производства порошковых деталей используют второй из описанных выше подходов. Ими разработаны гаммы порошковых пресс-автоматов, имеющих гидравлические и механические приводы [1—3]. Название "пресс-автоматы" дано потому, что они снабжены системами автоматической подачи порошковой шихты в матрицу штампа. К сожалению, и для гидравлических, и для механических отечественных пресс-автоматов характерны настолько малые хода ползунов и, как следствие, малые засыпные высоты матриц, что на них можно формовать только плоские порошковые детали.

При изготовлении деталей из порошков на железной основе, помимо повышения их плотности, которая оказывает наибольшее влияние на их прочность и одновременно пластичность, в целях повышения этих характеристик используют порошковые стали.

В отличие от литых сталей, порошковые стали подразделяют на гомогенно-легированные и негеногено-легированные. Первые получены путем размельчения до порошкового состояния стальных слитков, содержащих легирующие элементы, которые сохраняются в частицах порошка. Перед формованием стальной порошок смешивают с порошком пластификатора, который выполняет функцию смазки при последующем формовании порошковой заготовки. Сформованная заготовка передается на спекание. Вторые получают добавлением в железный порошок, составляющий основу стали, навески порошков легирующих сталь элементов. В композицию порошков добавляют также порошок пласти-

фикатора, композицию перемешивают в смесителе и передают на формование порошковой заготовки. В крупносерийном производстве прошедшие смешение в отдельных смесителях порции шихты подвергают обработке в усреднителях шихты. При спекании заготовки из неомогенно-легированной стали, порошки легирующих компонентов путем диффузии насыщают железный порошок, и образуется порошковая сталь. При производстве деталей из неомогенно-легированных порошковых сталей спекание занимает большее время и производится при более высоких температурах, чем спекание заготовок из гомогенно-легированных сталей.

Ниже, при рассмотрении этапа формообразования порошковых деталей, вначале рассмотрена традиционно считающаяся прерогативой обработчиков давлением технология, согласно которой уплотнением порошка в штампе изготавливают заготовку цилиндрической или призматической формы, спекают ее, и из спеченной заготовки штампуют деталь заданной формы.

Сформованные из порошка по традиционным схемам (см. рис. 5) и спеченные заготовки всегда имеют значительную остаточную пористость. Причиной этого является начало образования так называемых "перепрессовочных" трещин, когда плотность заготовки достигает для порошков разных марок из чистого железа величины 83...87 % от теоретической плотности железа. Возможно вместо указанной плотности указать, что заготовка имеет остаточную пористость 13...17 %. Установлено, что давление  $p$  перед началом образования "перепрессовочных" трещин для разных железных порошков составляет 600...800 МПа, и это давление не превышают, чтобы избежать зарождения в заготовке трещин.

После спекания в методической проходной печи с восстановительной или хотя бы инертной к окислению газовой средой заготовки передают на штамповку. Методическая печь необходима, чтобы обеспечить сначала выжиг пластификатора при температуре 500...600 °С, и только после этого проводят спекание заготовки при температуре 950...1250 °С в течение 1 ч и более. Повышение температуры оказывает большее влияние на качество спекания, чем увеличение продолжительности спекания, однако может привести к укрупнению зернистости в структуре детали.

Штамповка на прессе детали требуемой формы из спеченной порошковой заготовки может быть проведена как в холодном, так и в горячем состоянии. При горячей штамповке можно организовать процесс непрерывным, чтобы использовать нагрев заготовки при ее спекании для последующей штамповки.

Преимущества и недостатки горячей объемной и холодной объемной штамповки во многом такие же, как при обработке компактных (литых, прокатанных) заготовок. Имеются в виду рекристаллизация зерен, окалинообразование, упрочнение материала заготовки, давление в штамповом инструменте и др.

Существенными аргументами при сравнении технологий являются исключение остаточной пористости в изготовленной детали, а также образование оксидных пленок на поверхности порошковых частиц.

При горячей штамповке остаточная пористость исключается полностью, в то же время, даже при описанных ниже наиболее эффективных способах холодной объемной штамповки, остаточная пористость имеет место и составляет в среднем по детали 2...4 %.

Эффект легирования в целях изменения механических характеристик порошковой детали при последующей термообработке проявляется при пористости детали <5 % (в меньшей степени — при пористости <10 %) [5]. Следовательно, остаточная пористость 2...4 % не снижает эффект легирования.

Однако исключить образование оксидных пленок на поверхности частиц при горячей штамповке не удается. Эти пленки препятствуют высокой теплопроводности и межзеренной диффузии атомов при спекании. Поэтому легированные горячештампованные порошковые детали хуже подчиняются термообработке, чем холоднштампованные.

Авторы статьи не рассматривают здесь возможную дополнительную операцию восстановления оксидных пленок [4], образовавшихся при горячей штамповке на поверхности частиц, путем помещения горячештампованных и спеченных деталей на продолжительное время в среду водорода. Операция, имеющая некоторую аналогию с рассматриваемой, применяется при затратной по времени и дорогостоящей горячей штамповке деталей из порошков в газостатах. Для восстановления используют водород. При подготовке к штамповке в газостатах восстановление железного порошка наиболее эффективно при температуре, приблизительно равной 1000 °С. После восстановления порошки подвергают вакуумной обработке (дегазации), чтобы удалить остатки продуктов восстановления с поверхности частиц. Для этого создают вакуум и выдерживают в нем порошок в течение 3...5 ч. Только после этого порошок засыпают в оболочку и подвергают его утряске, затем запаивают оболочку помещают в газостат.

В отличие от штамповки в газостатах, при рассматриваемой в данной статье штамповке на прес-

сах восстановлению водородом надо было бы подвергать не исходный порошок, а уплотненную до 100 % от теоретической плотности железа штампованную деталь. В этом случае возможность контакта водородной среды с оксидными пленками и последующая дегазация детали были бы сильно затруднены.

Для расширения области применения холодной объемной штамповки спеченных заготовок из железных порошков, как и при производстве деталей из компактных материалов, перспективно применение разрабатываемого авторами данной статьи выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения между заготовкой и инструментом [6].

Для выполнения такого выдавливания по чертежам авторов данной статьи созданы специализированные гидропрессы, конструкции которых приведены в работах [4, 6, 7].

При холодном выдавливании спеченных порошковых заготовок, в отличие от выдавливания заготовок из компактных материалов, активное направление напряжений контактного трения меняется в ходе выполнения операции (рис. 6) [4, 8].

Для уменьшения пористости стенки изделия матрицу вначале принудительно перемещают в том же направлении, в каком движется выдавливаемая полость пуансон. На эпюрах показаны:  $v_{заг}$  — скорость перемещения частиц заготовки при ее осадке;  $v_M$  — скорость перемещения матрицы;  $v_{ск}$  — скорость перемещения матрицы по поверхности заготовки. Стрелками на меридиональном сечении заготовки показаны направления напряжений контактного трения  $\tau_a$ . При этом (см. рис. 6,

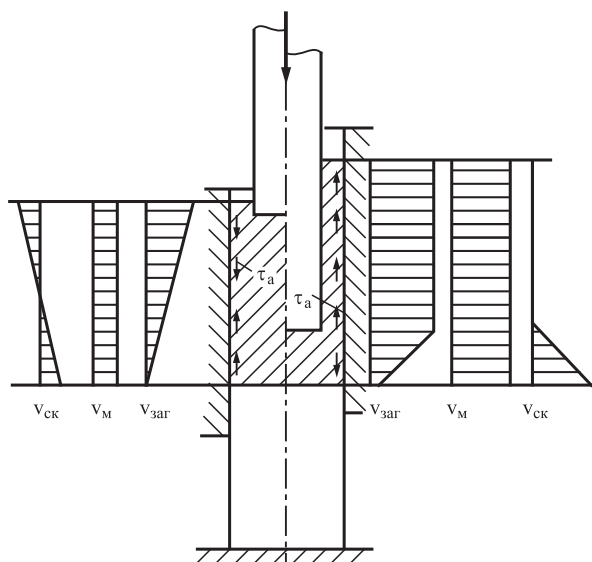


Рис. 6. Выдавливание стаканов из спеченных порошковых заготовок при активном действии напряжений  $\tau_a$  контактного трения

слева от оси) активно направленными напряжениями контактного трения создают дополнительное препятствие течению деформируемого металла в стенку стакана. Только после того, как будет уменьшена пористость заготовки, выдавливание продолжают, перемещая матрицу в сторону течения материала в стенку стакана (см. рис. 6, справа от оси) со скоростью, превышающей скорость течения материала. На этом этапе выдавливания активно направленные напряжения контактного трения  $\tau_a$  способствуют деформированию заготовки и разгружают пуансон.

На рис. 7 видно, что в начале выдавливания пуансон выполняет только небольшую наметку полости на верхнем торце заготовки, после чего происходит осадка заготовки, при которой исключается остаточная пористость в материале. После уменьшения остаточной пористости, когда заготовка становится практически компактной, пуансон продолжает свое внедрение в заготовку, и из нее выдавливается стакан. Такое формоизменение особенно важно для увеличения плотности стенок стакана в их верхней части. Если бы на начальном этапе выдавливания не создавали бы напряжения трения, препятствующие вытеканию заготовки в стенку, то пуансон внедрялся бы в заготовку, не осаживая ее, и верхняя часть стенки стакана имела бы почти такую же остаточную пористость, как в исходной заготовке, т. е. 13...17 %.

На этапе выдавливания полости стакана перемещение матрицы снижает удельную силу выдавливания  $q$  (которая рассчитывается как частное от деления полной силы выдавливания на площадь поперечного сечения пуансона) на 15...20 %. При этом эффект снижения  $q$  при выдавливании спеченной порошковой заготовки больше, чем при выдавливании заготовки из компактных железа или стали. Это объясняется следующим.



Рис. 7. Поэтапное формоизменение спеченной порошковой заготовки при выдавливании из нее стакана при активном действии напряжений контактного трения

Порошковые заготовки перед деформированием смазывают пастой дисульфида молибдена —  $\text{MoS}_2$ . Однако при деформировании заготовки на ее поверхность изнутри выходят несмазанные частицы, поэтому коэффициент контактного трения специалисты оценивают, как  $\mu = 0,2$ . При таком коэффициенте контактного трения возрастает эффект штамповки с активными силами трения по сравнению с холодным выдавливанием фосфатированных и омыленных компактных стальных заготовок.

Снижение  $q$  на пуансоне вследствие действия активно направленных напряжений контактного трения позволяет осуществлять штамповку деталей из спеченных заготовок из железного порошка, даже незначительно легированных порошками других металлов.

На рис. 8 приведена кривая сопротивления усталости пуансонов, изготовленных из стали Р6М5 и имеющих твердость 61...63 НРС. Данная кривая [9] построена по результатам экспертных оценок, собранных авторами данной статьи на протяжении нескольких десятилетий работы в области производства деталей холодной объемной штамповкой.

С помощью приведенной на рис. 8 кривой можно определить, во сколько раз увеличится стойкость пуансона при снижении удельной силы выдавливания  $q$ , например, на 15 %. Если это снижение произошло от 2500 до 2125 МПа, то сопротивление усталости пуансона возросло от  $N = 1000$  циклов до  $N = 2500$  циклов, т.е. в 2,5 раза.

Поскольку формованная по традиционной технологии и спеченная порошковая заготовка имеет существенную указанную выше остаточную пористость, разработан способ поверхностного легирования спеченной заготовки в целях повышения механических характеристик ее поверхностного слоя (рис. 9). При этом удельная сила холодного выдавливания  $q$  не достигает определяемого с помощью рис. 8 критического для пуансона значения.

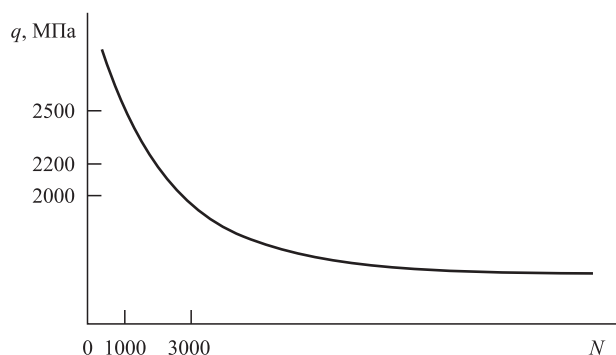


Рис. 8. Кривая сопротивления усталости пуансонов:  $q$  — удельная сила;  $N$  — число циклов, которые может выдержать пуансон при холодном выдавливании

Заготовку помещают в матрицу, как показано на рис. 9, слева от оси. Заготовка опирается на подпружиненный плунжер. Диаметр заготовки  $d_0$  на 0,5...1,0 мм меньше, чем диаметр нижней части полости матрицы  $d$ . Верхний пуансон имеет контролируемую посадку по поверхности верхней части полости матрицы. Между заготовкой и внутренней поверхностью верхней части полости матрицы, имеющей диаметр  $D$ , засыпают порошковую композицию, состоящую из стеарата цинка (50 % по объему композиции), смешанного с порошками графита и других легирующих элементов.

При опускании верхнего пуансона заготовка проталкивается в нижнюю часть полости матрицы, а уплотняемый порошковый материал, который окружал заготовку, создает на поверхности заготовки слой обмазки (рис. 10).

Далее из этих заготовок холодным выдавливанием изготавливают детали приведенного на рис. 1 типа, при этом действуют удельные силы 2000...2500 МПа, и материал обмазки вдавливается в поры в поверхностном слое спеченной заготовки, имеющей в начале выдавливания существенную остаточную пористость.

В конце выдавливания остаточная пористость в детали становится минимальной, а частицы легирующих порошков распределяются в поверхностном слое детали, смешиваясь с частицами железного порошка — основы. При этом на этапе выдавливания существенно снижается контактное трение. Для лучшего протекания процесса целесообразно подогревать матрицу до 250...300 °С. После выдавливания детали производится ее высокотемпературный отжиг для снятия остаточ-

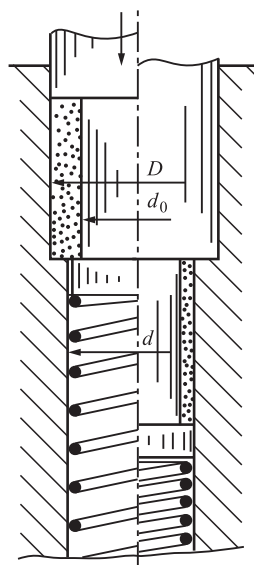


Рис. 9. Схема нанесения обмазки на поверхность заготовки

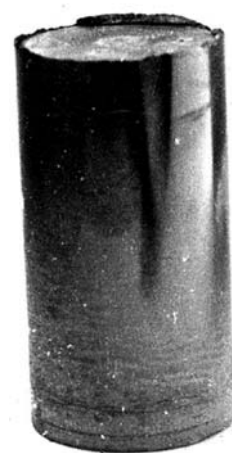


Рис. 10. Заготовка с нанесенным на нее слоем обмазки



ных напряжений. В процессе этой обработки происходит диффузионное взаимодействие легирующих элементов и материала основы (железа), и на поверхности детали образуется порошковая сталь.

Благодаря снижению коэффициента контактного трения при выдавливании спеченных заготовок по этой технологии были изготовлены детали приведенного на рис. 1 типа с поверхностным слоем, легированным порошками следующих компонентов: 0,6 % С; 1 % Ni; 2 % Mn; 3 % Cu. Удельная сила холодного выдавливания таких деталей составляла всего лишь 2350 МПа.

Эффект снижения давления на пуансоне при выдавливании с активно направленными силами контактного трения деталей приведенного на рис. 1 типа из спеченных порошковых заготовок может быть увеличен, если на специализированном прессе, имеющем привод подвижной матрицы, реализовать схему, приведенную на рис. 11. В этой схеме сочетают способ снижения удельной силы выдавливания путем применения компенсационных полостей в матрице [3] и рассмотренный выше способ выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения.

Выдавливает деталь со ступенчатой внешней поверхностью из заготовки, имеющую внешний диаметр  $2R$ , пуансоном с диаметром  $2r$ .

Матрица в исходном положении опирается на нижний пуансон, и диаметр полости, в которую укладывают заготовку, также равен  $2R$ . По мере внедрения верхнего пуансона в заготовку матрицу передвигают вверх со скоростью  $v_m$ . При этом на внешней поверхности заготовки действуют активно направленные напряжения контактного трения, а на уровне ступени матрицы последовательно открывается компенсационная полость, уменьшающая гидростатическое давление в заготовке и снижающая удельную силу выдавливания.

В области, традиционно не отнесенной к прерогативе обработчиков давлением, из-за образования в формуемых заготовках так называемых перепрессовочных трещин изготавливали на пресс-автоматах порошковые детали окончательной формы с остаточной пористостью 13...17 %. После формования деталей окончательной формы их спекали. При этом комплекс механических характеристик у этих деталей пытались улучшить с помощью легирования порошковой шихты. Из-за высокой остаточной пористости деталей легирование было малоэффективным.

Специалисты по технологиям и машинам обработки давлением разработали способы повышения плотности неспеченных порошковых заготовок. Эти способы основаны на уплотнении в матрице порошковой заготовки (см. рис. 5) и создании

при этом сдвигов между частицами уплотняемой заготовки.

Уплотнение порошковой шихты при формовании деталей с большим отношением высоты к диаметру со сдвигами между частицами реализовано на прессах, осуществляющих перемещение матрицы, о которых говорилось в данной статье выше. Сдвиги между частицами порошка при деформировании на этих прессах создаются в заготовке при уплотнении по схеме, приведенной на рис. 11. Только вместо спеченной заготовки в матрицу помещают порошковую шихту, а радиус пуансона задают величиной  $r = R$ . Уплотнением по такой схеме изготовлены детали, имеющие настолько высокую плотность, что их до проведения спекания фрезеровали по меридиональной плоскости и изготовили шлифы (рис. 12).

При производстве высокоплотных деталей типа стаканов формование порошковой шихты с созданием сдвигов между частицами осуществляется на указанных выше прессах способом, показанным на рис. 13.

Стаканы изготавливают с фланцем, который является технологическим припуском. Матрица имеет полость, состоящую из участков двух диаметров: диаметр одного участка равен диаметру внешней поверхности стакана, а диаметр другого — диаметру фланца стакана.

На первом этапе формования матрица перемещается вниз (рис. 13, а), при этом засыпную полость образует участок большего диаметра, а напряжения трения на поверхности контакта порошка с матрицей способствуют заполнению полости матрицы. После окончания засыпки порошка и предварительного его уплотнения верхним пуансоном осуществляется движение матрицы вверх

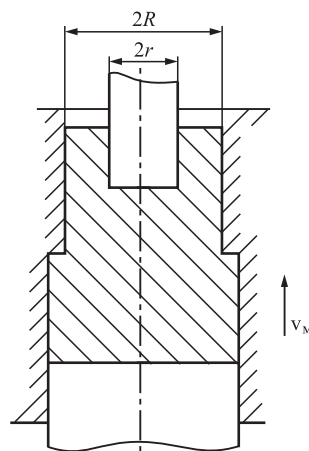


Рис. 11. Схема выдавливания с открывающейся компенсационной полостью в матрице



Рис. 12. Заготовка, сформованная из порошка ПЖВ2.160.28 и фрезерованная до ее спекания

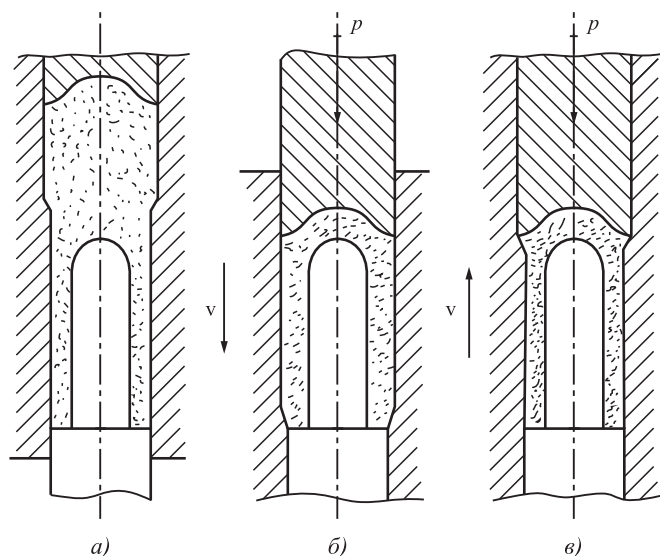


Рис. 13. Схема формования стаканов с созданием интенсивных сдвигов в порошковом материале

(рис. 13, б), при этом сформованный на первом этапе стакан перемещается в участок полости матрицы меньшего диаметра. В результате происходит дополнительное уплотнение стенок стакана (рис. 13, в). На донную часть заготовки постоянно действует сила, создаваемая верхним пуансоном.

### Заключение

Основное преимущество последней из трех рассмотренных в статье технологий состоит в возможности неограниченного легирования порошковой шихты. Формование из шихты детали холодной обработкой давлением предшествует операции спекания, и легирование практически не влияет на давление, при котором осуществляется формование. Таким образом, производится изготовление высоколегированной детали.

Применение описанных схем формования, при которых происходят сдвиги между частицами порошка, позволяет обеспечивать остаточную пористость в деталях, не превышающую 5 %, и при последующих операциях спекания и термообработки таких деталей имеется возможность полностью реализовать эффекты легирования для получения требуемого комплекса механических характеристик детали.

Для реализации способов холодного выдавливания деталей из спеченных порошковых заготовок и формования деталей непосредственно из порошковой шихты целесообразно применять созданные по чертежам авторов данной статьи специализированные гидравлические прессы.

Для производства деталей с неупрочненной глубиной частью и упрочненной поверхностью

эффективен описанный способ холодного их выдавливания из заготовок, предварительно формованных и спеченных из железного порошка. Перед выдавливанием на заготовки наносится обмазка, содержащая требуемый комплекс легирующих добавок, которая снижает контактное трение во время выдавливания. При выдавливании под действием давления поверхностный слой деталей насыщается легирующими добавками. При последующем высокотемпературном отжиге для снятия остаточных напряжений смесь железного порошка с легирующими добавками в поверхностном слое превращается в сталь при нелегированной железной сердцевине детали.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клячко Л.И., Уманский А.М., Бобров В.Н. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов. М.: Металлургия, 1986. 336 с.
2. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г.М. Волкогон, А.М. Дмитриев, Е.П. Добряков и др.; под общ. ред. А.М. Дмитриева, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
3. Ковка и штамповка: справочник. В 4. т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.
4. Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В. Специализированное штамповочное оборудование и выбор его технологических параметров. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. 334 с.
5. Радомысльский И.Д., Сердюк Г.Г., Щербань Н.И. Конструкционные порошковые материалы. Киев: Техніка, 1985. 152 с.
6. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Expanding of Application of Cold Die Forging by Inducing Active Contact Friction Forces // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34. P. 232—237.
7. Технологичность конструкций создаваемых малогабаритных специализированных прессов / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, Н.С. Толмачев // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 11. С. 3—9.
8. А. с. 1018746 СССР, МКИ В 21 С 23/20. Способ выдавливания деталей типа "стакан" / А.Г. Овчинников, М.В. Широков, А.М. Дмитриев и др. // Бюл. изобретений № 19. 1983. 32 с.
9. Научные технологии в машиностроении / А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с. / Научные технологии при производстве заготовок обработкой давлением / В.А. Демин, А.М. Дмитриев, В.Н. Субич, Н.А. Шестаков. С. 68—114.
10. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Анализ метода интенсивного пластического деформирования и его применение при исследовании формования заготовок из железного порошка // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 9 (723). С. 53—59.

А.М. Томашевич, Г.Г. Ширваньянц  
(Филиал АО "Объединенная двигателестроительная корпорация"  
"Научно-исследовательский институт двигателестроения", г. Москва),  
Д.А. Теряев  
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))  
E-mail: alkinsynode1@mail.ru

## Повышение ресурса и надежности елочных пазов диска турбины низкого давления с помощью ультразвукового поверхностного упрочнения шариками

Рассмотрена возможность повышения ресурса и надежности елочных пазов диска турбины низкого давления двигателя АЛ-31Ф методом ультразвукового упрочнения шариками. Изучив свойства материала диска, проведен расчет эксплуатационных напряжений елочного паза, который использовался для последующих сравнительных усталостных испытаний. Также проведен анализ остаточных напряжений по методу Давиденкова, показавший, что тангенциальные остаточные напряжения, в среднем, изменяются на 95,3 %, осевые — на 80,9 % в сторону напряжений сжатия, что доказывает возможность повышения ресурса и надежности елочного паза при его ультразвуковом упрочнении. Сравнительные испытания на базе  $N = 4 \cdot 10^5$  циклов показали, что упрочненные образцы отстояли заданную базу циклов при амплитудах колебаний (а следовательно, и нагрузках) больших, чем неупрочненные.

**Ключевые слова:** ультразвуковое упрочнение, елочный паз, диск турбины, усталостные испытания, остаточные напряжения.

*The possibility of life and reliability enhancing of AL-31F low pressure turbine disc's fir-tree slots by ultrasonic hardening is considered. Having disc's material properties studied, working stress derivation is executed which was further used for following comparative fatigue tests. Also, Davidenkov method residual stress analysis is carried out which showed 95.3 % change to compression stress for circumferential residual stress and 80.9 % change to compression stress for axial residual stress which proves possibility of fir-tree slots' life and reliability enhancement by ultrasonic hardening. Comparative fatigue tests with  $N = 4 \cdot 10^5$  cycles basis showed that the hardened samples standing out the cycle basis during higher oscillatory amplitudes (and, thus, affecting loads) than the non-hardened basic ones.*

**Keywords:** ultrasonic hardening, fir-tree slot, turbine disk, fatigue tests, residual stresses.

### Введение

При изготовлении деталей газотурбинных двигателей (ГТД) используются различные технологии обработки: давлением, литье, сварка, термообработка, шлифование, обработка резанием и др., что сопровождается возникновением в изделии внутренних и поверхностных напряжений. В большинстве случаев напряжения полностью или частично сохраняются в металле после окончания технологического воздействия.

Причиной возникновения остаточных напряжений являются неодинаковая пластическая деформация и разное изменение удельного объема в различных точках тела. Остаточные напряжения складываются с эксплуатационными нагрузками, что впоследствии может привести к разрушению материала. Однако, создавая контролируемые остаточные напряжения, можно существенно изменить свойства металла — повысить предел выносливости. Чаще всего в поверхностном слое намеренно создают сжимающие остаточные на-

пряжения, которые уменьшают влияние опасных растягивающих рабочих напряжений. Для этого применяют различные технологии поверхностной обработки металлов (упрочнение).

Одними из наиболее нагруженных деталей ГТД являются диски турбин. Наибольшие напряжения испытывает обод дисков как от собственных сил вращения, так и от лопаток и высоких температур газа. Ситуация может усугубляться наличием растягивающих напряжений в поверхностном слое дисков, которые снижают сопротивление усталости металла при циклическом характере работы. При максимальных эксплуатационных нагрузках рабочие напряжения, складываясь с растягивающими поверхностными остаточными напряжениями, могут превзойти предел текучести материала, в результате чего возможно образование усталостной трещины в поверхностном слое и разрушение детали.

В данной работе рассмотрена возможность повышения ресурса и надежности елочных пазов диска турбины низкого давления двигателя АЛ-31Ф методом ультразвукового упрочнения шариками.

### Расчет эксплуатационных напряжений в елочном пазе

Перед сравнительными испытаниями на циклическую долговечность требуется определить эксплуатационные напряжения, возникающие в елочном пазе. Полученные значения будут служить средством получения такой амплитуды, при которой напряжения в пазе, где установлен датчик, совпадают с эксплуатационными.

В качестве материала диска используется сплав ЭП741НП, свойства которого для расчетов были взяты из справочника ВИАМ [2]. Расчеты проводили согласно методике Скубачевского [6]. По результатам расчетов был проведен анализ действующих на вырез эквивалентных напряжений. Результаты первого анализа в T-FLEX CAD 15 и окончательный анализ в ANSYS, подтверждающий результаты анализа в T-FLEX CAD 15, приведены на рис. 1 (см. обложку).

### Упрочнение елочного паза и анализ остаточных напряжений

Для сравнительных усталостных испытаний елочного паза из диска были вырезаны образцы, имитирующие лопатку с елочным хвостовиком, и с помощью захвата за нижнюю впадину хвостовика (рис. 2) имитаторы лопатки подвергаются колебаниям на резонансной частоте с определенной амплитудой так, чтобы распределение напряжений во второй впадине было аналогично такому при рабочем режиме нагружения паза.

Для ультразвукового упрочнения елочного профиля образца была разработана специальная оснастка, позволяющая шарикам скатываться по ее стенкам обратно на концентратор, не давая, при этом шарикам вылетать наружу. Внешний вид оснастки и ее положение на столе установки Stressonic показаны на рис. 3.

Упрочнение осуществлялось шариками Acler из материала 100С6 (ближайший отечественный аналог — сталь ШХ15) диаметром  $d_{ш} = 1$  мм при следующем режиме: амплитуда колебаний концен-

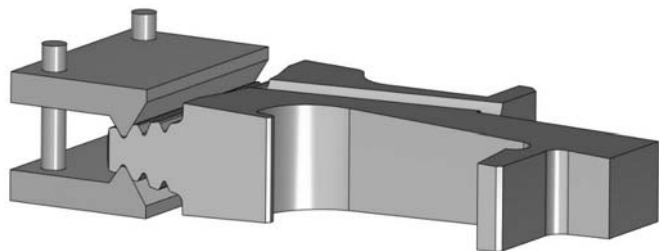


Рис. 2. Модель захвата имитатора лопатки в захватах

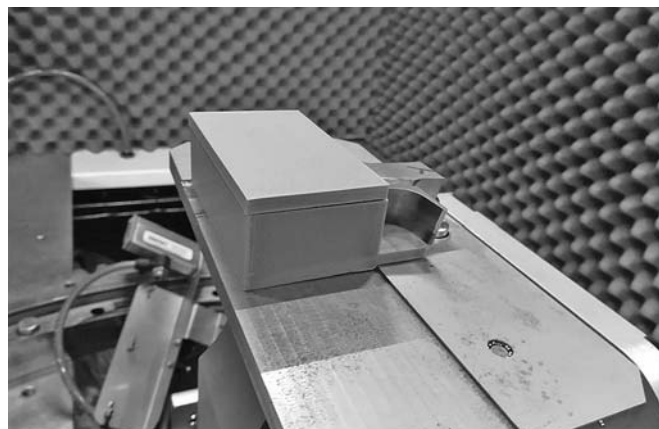


Рис. 3. Оснастка и ее установка на столе

тратора  $A = 120$  мкм, частота колебаний  $f = 20$  кГц, время обработки — 5 мин на сторону. Частота и амплитуда заданы характеристиками установки.

Время обработки устанавливается экспериментально по критерию сплошности покрытия обрабатываемой поверхности отпечатками шариков.

При визуальном осмотре упрочненной поверхности с помощью линзы с десятикратным увеличением SANDVIK Coromant выявлено, что диаметр отпечатков варьируется от 0,1 до 0,3 мм, поэтому примем диаметр отпечатка 0,2 мм. С помощью САПР "T-FLEX CAD 15" вычислили глубину проникновения шарика в материал. Результаты показаны на рис. 4.

Таким образом, глубина проникновения шариков в упрочняемую поверхность  $\Delta l = 10$  мкм.

Тогда относительная деформация  $\varepsilon$  (считаем, что материал в области максимальной толщины  $l_0 = 12,98$  мм сжимается с обеих сторон, т.е. глубину проникновения  $\Delta l$  увеличим в 2 раза) [3, 7]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{12,98 \cdot 10^{-3}} = 0,00156.$$

Тогда возникающие остаточные напряжения сжатия  $\sigma_{сж}$  [3]:

$$\sigma_{сж} = E\varepsilon = 189 \cdot 10^9 \cdot 0,00156 = 294,13 \text{ МПа},$$

где  $E = 189$  ГПа — модуль Юнга.

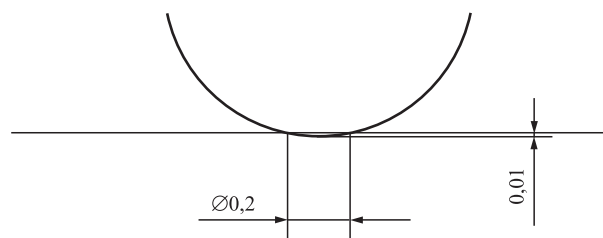


Рис. 4. Глубина проникновения шарика

При измерениях остаточных напряжений вызывают интерес и осевые (направлены по касательной к осевой линии радиуса паза), и тангенциальные (лежат в плоскости поперечного сечения) их составляющие. В целях получения результатов по этим составляющим из имитаторов лопатки с упрочненной и неупрочненной стороны делаются типовые вырезы (рис. 5 и 6), которые закрепляются в держателе образцов. Анализ остаточных напряжений осуществлялся механическим методом ак. Давиденкова [4] на установке "МерКулОН "Тензор-3", путем измерения деформаций при электролитическом травлении поверхностного слоя.

Травление образцов показало следующие результаты (рис. 7). Как видно из эпюр, при ультразвуковом упрочнении шариками Acleg из материала 100С6 диаметром 1 мм, при амплитуде коле-

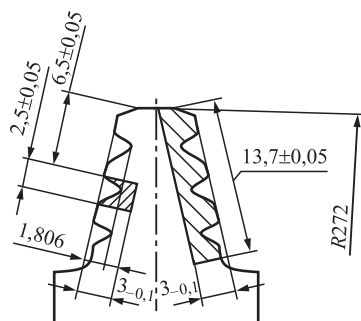
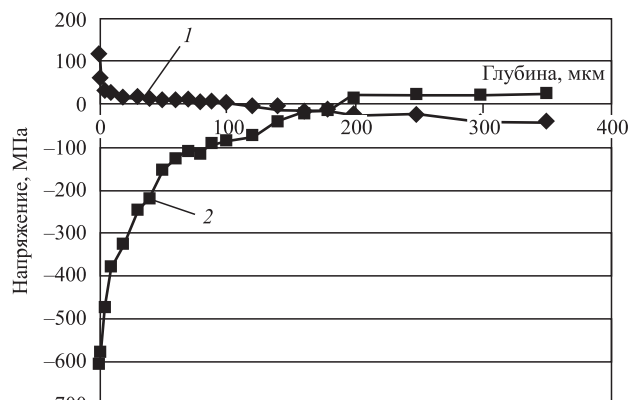


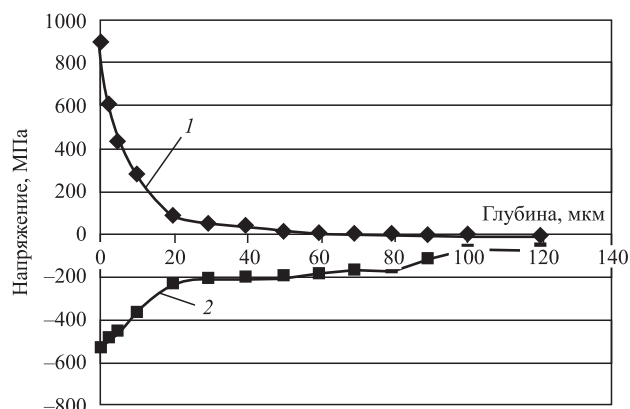
Рис. 5. Схема вырезки образцов для измерения остаточных напряжений



Рис. 6. Образцы для измерения остаточных напряжений: а — для осевой составляющей; б — для тангенциальной



а)



б)

Рис. 7. Эпюры тангенциальных (а) и осевых (б) остаточных напряжений во впадине елочного паза: 1 — исходные; 2 — упрочненного образца

баний  $A = 120$  мкм, частоте колебаний  $f = 20$  кГц и времени обработки 5 мин на сторону тангенциальные остаточные напряжения, в среднем, изменяются на 95,3 %, осевые — на 80,9 % в сторону напряжений сжатия, что доказывает возможность повысить ресурс и надежность елочного паза.

Таким образом, с учетом результатов расчета диска на прочность, распределения напряжений на максимально нагруженном рабочем режиме была разработана методика сравнительных усталостных испытаний.

### Проведение сравнительных испытаний на усталость

Для поиска резонансной частоты и амплитуды использовали конечно-элементный анализ в модуле САПР "T-FLEX 15". Ограничив образец полным закреплением в плоскостях захвата, сосредоточив сетку на впадинах и плоскостях контакта зубьев паза и ножки лопатки, искали резонансную частоту и амплитуду по первой форме колебаний, поскольку сам характер испытаний предусматривает

именно эту форму. На рис. 8 (см. обложку) изображен результат конечно-элементного анализа на частоту и амплитуду собственных колебаний.

Далее, для имитатора проводили анализ вынужденных колебаний при резонансной частоте и некоторой амплитуде, при которой эквивалентные напряжения аналогичны эксплуатационным. Опыт-

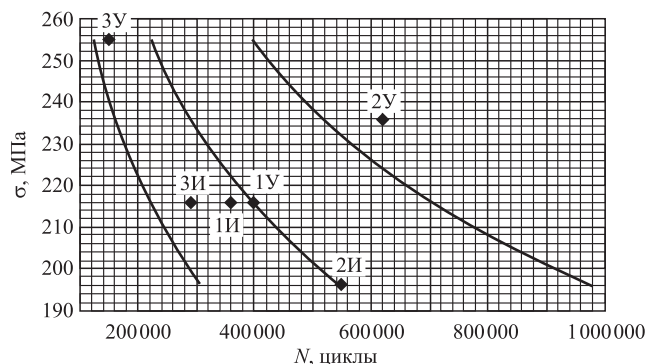


Рис. 10. Усталостные кривые, построенные по результатам сравнительных усталостных испытаний

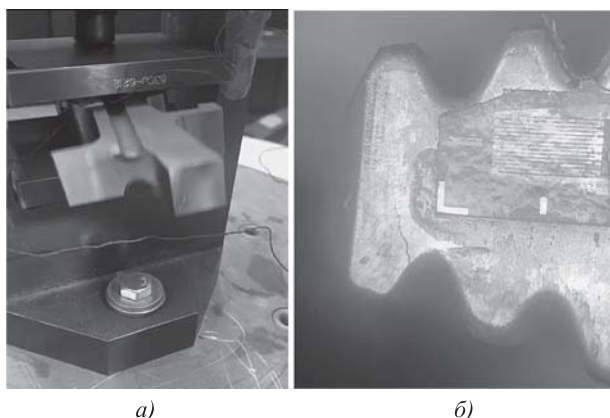


Рис. 11. Исходный образец 2И во время испытаний (а) и разрушившийся образец после испытаний (б)

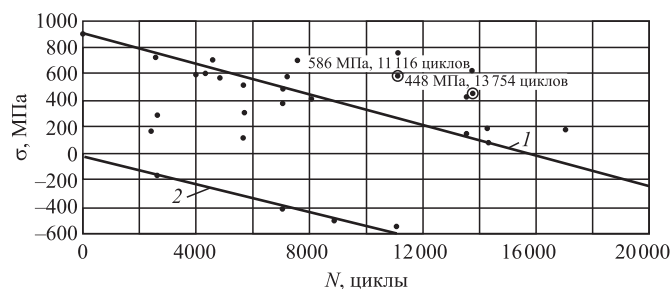


Рис. 12. Линия релаксации с результатами испытаний дисков на малоцикловую усталость (кружками обозначены случаи превышения значений остаточных напряжений сжатия в пазах относительно линии релаксации, вышестоящие точки над отмеченными — остаточные напряжения сжатия в охлаждающих отверстиях): 1 — остаточные напряжения сжатия; 2 — остаточные напряжения растяжения

ным путем с помощью оператора "Осциллятор" было установлено, что эксплуатационные напряжения возникают при амплитуде  $2A = 1,5$  мм. Анализ проводили таким же образом, как и при поиске частот собственных колебаний: имитатор ограничен контактом с захватами. Результат анализа вынужденных колебаний показан на рис. 9 (см. обложку).

После анализа вынужденных колебаний осуществляли пробные испытания и тарировку образцов непосредственно на стенде, поскольку подобный тип испытаний с имитаторами лопаток проводили в лаборатории впервые.

Имитатор снабжали тензодатчиками, после чего его устанавливали в захваты, датчики соединяли с переходником, переводящим измеряемые данные на персональный компьютер. Тарировку образцов выполняли по уровню нагрузки  $\sigma$  и соответствующей этой нагрузке амплитуде колебаний. На малых нагрузках тарировку дополнительно проводили и по электрическим напряжениям на тензодатчике  $U$ . Испытания проводили на базе  $N = 40 \cdot 10^4$  циклов при ступенчатом повышении нагрузки с шагом  $2 \text{ кгс/мм}^2$  ( $19,6133 \text{ МПа}$ ).

Сравнительные испытания проводили при следующих условиях:

- ГОСТ РВ 2840-001—2008;
- стенд: Tira 57315;
- датчики-тензорезисторы: КФ5П1-3-100-Б-8;
- число образцов: 6 (три исходных и три упрочненных).

Испытания (рис. 10—12) показали результаты, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Тарировка образцов-имитаторов

Нагрузка $\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup> (МПа)	Напряжение на тензодатчике $U$ , В	2A, мм, для образцов					
		исходных			упрочненных		
		1	2	3	1	2	3
4 (39,226)	0,35	0,35	0,34	0,36	0,36	0,35	0,36
12 (117,68)	1,0	1,10	1,08	1,10	1,12	1,10	1,11
16 (156,9)	1,357	1,35	1,33	1,35	1,35	1,35	1,35
18 (176,52)	—	1,57	1,57	1,57	1,56	1,57	1,57
20 (196,13)	—	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	—
22 (215,75)	—	1,87	—	1,87	1,87	1,88	—
24 (234,36)	—	—	—	—	—	2,03	2,03
26 (254,97)	—	—	—	—	—	—	2,20

Таблица 2

Испытания образцов-имитаторов

Образец	$\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup> (МПа)	2A, мм	f, Гц	t <sub>нар</sub> , мин	N, 10 <sup>4</sup> циклы	Результат
1И	22 (215,75)	1,87	601	10	36	Разрушился
2И	16 (156,9)	1,35	615	20	74	Прошел
	18 (176,52)	1,57	613	20	73,5	
	20 (196,13)	1,70	609	15	55	Разрушился
3И	16 (156,9)	1,35	617	20	74	Прошел
	18 (176,52)	1,57	614	20	74	
	20 (196,13)	1,70	612	20	73	
	22 (215,75)	1,87	608	8	29	Разрушился
1У	18 (176,52)	1,56	620	20	74	Прошел
	20 (196,13)	1,70	616	20	74	
	22 (215,75)	1,87	613	11	40	Разрушился
2У	20 (196,13)	1,70	614	20	74	Прошел
	22 (215,75)	1,88	611	20	73	
	24 (234,36)	2,03	606	17	62	Разрушился
3У	22 (215,75)	1,87	617	20	74	Прошел
	24 (234,36)	2,03	614	20	74	
	26 (254,97)	2,20	612	4	15	Разрушился

Упрочненные образцы выдержали заданную базу испытаний при амплитудах колебаний (а следовательно, и нагрузках) больших, чем неупрочненные.

Результаты испытаний и их обсуждение

В результате выполненной работы было показано, что с помощью ультразвукового упрочнения стальными шариками возможно повысить ресурс и надежность елочных пазов дисков турбины.

Ультразвуковое упрочнение можно внедрить непосредственно в техпроцесс при тех же режимах, на которых проводилось упрочнение образцов. Соответственно, обработка одного диска, по основному времени займет 7,5 ч (по 5 мин на каждый из 90 пазов, 1 диск в смену).

Еще один способ применения при ремонте — повторное упрочнение пазов дисков с наработкой. Как указывают авторы [1], со временем остаточные напряжения релаксируют и вытесняются остаточными напряжениями растяжения. Измерения остаточных напряжений рентгеновским методом показали, что остаточные напряжения

сжатия у повторно упрочненных дисков превышают значения линии релаксации (см. рис. 12).

Соответственно, при временном контроле диска, т.е. через указанный промежуток времени, его можно проконтролировать на остаточные напряжения (и усталостные трещины в том числе) и, при необходимости, повторно упрочнить поверхность елочных пазов для продления ресурса диска: трещины начнут образовываться только после полной релаксации остаточных напряжений сжатия.

Можно использовать и поверхностное упрочнение шариками гидро- и пневмодробеструйной обработкой, однако качество поверхности (ее микрогеометрия) в этом случае будет ниже [5].

Заключение

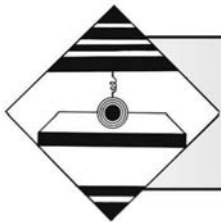
Независимо от текущих технологических возможностей, надежность и ресурс любого изделия и его компонентов остаются актуальными всегда, особенно для таких изделий, которые при эксплуатации испытывают большие нагрузки и работают в жестких условиях. Диски турбин с их геометрически сложными елочными пазами — пример таких изделий.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. За счет сформированных ультразвуковым упрочнением остаточных напряжений сжатия становится возможным повысить ресурс и надежность елочных пазов дисков.
2. Ультразвуковое упрочнение шариками елочных пазов диска можно внедрить непосредственно в техпроцесс. Допускается повторное упрочнение елочных пазов у дисков с наработкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bradley E.F., Berkley S.G., Fairbank R.J. The Role of Residual Stress in Low Cycle Fatigue of Gas Turbine Engine Disks // San Antonio, Texas: USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference, June 1997. P. 807—824.
2. Авиационные материалы: справочник. В 9 т. / под общей ред. Р.Е. Шалина. Т. 3. Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. М., 1989. 570 с.
3. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учебное пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.
4. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 233 с.
5. Поляк М.С. Технология упрочнения. Методы упрочнения. М.: Машиностроение, 1995. Т. 2. 688 с.
6. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1969. 547 с.
7. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская Энциклопедия, 1979. 400 с.



**В.Ф. Безъязычный, М.В. Тимофеев**

*(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)*

*E-mail: technology@rsatu.ru*

## Расчетное определение модуля упругости материала поверхностного слоя детали в случае упрочнения при механической обработке

*Предложен вариант расчетного определения модуля упругости материала поверхностного слоя детали после обработки лезвийным инструментом при его изменении, обусловленном силовым и тепловым воздействием на поверхность детали в процессе резания.*

**Ключевые слова:** обработка резанием, поверхностный слой, упрочнение материала, модуль упругости.

*Variant for the calculated determination of the elasticity modulus of the surface layer material of the part after blade tool processing when it changes due to the force and thermal effect on the surface of the part in cutting process is proposed.*

**Keywords:** cutting processing, surface layer, hardening material, elasticity modulus.

### Введение

Как известно, механическая обработка заготовок из металлов и сплавов сопровождается пластическим деформированием материала. Пластическая деформация, независимо от локализации и природы воздействия, неизбежно приводит к повышению плотности дефектов кристаллического строения, в том числе дислокаций и, как следствие, к изменению физико-механических свойств материала. Эти изменения во многих случаях затрагивают не только параметры пластичности и сопротивления деформированию, но и параметры упругости, например модуль Юнга. Последний входит во все уравнения механики твердого тела и, следовательно, непременно используется в инженерных расчетах при проектировании машин, приборов и механизмов, при решении задач контактного взаимодействия деталей, трения и изнашивания и др.

Дислокации оказывают влияние на модуль упругости двояким образом благодаря двум причинам разной природы [1, 7]. Первая причина — релаксационной природы, состоящая в дополнительной неупругой деформации из-за прогиба дислокационных сегментов при нагружении в процессе изменения модуля. Эти обстоятельства имеют место при сравнительно малых степенях деформации, т.е. при сравнительно небольших плотностях дислокаций.

Однако известно, что дислокации увеличивают объем кристаллической решетки, увеличивая расстояние между атомами. Это неизбежно приводит к ослаблению межатомного взаимодействия и, следовательно, к уменьшению модуля упругости, подобно тому, как это имеет место при нагреве металла с приближением к температуре его плавления [2]

$$E/E_0 = 1 - 0,3 T/T_{\text{пл}},$$

где  $E$  — модуль Юнга материала после пластической деформации, Па;

$E_0$  — модуль Юнга недеформированного материала, Па;

$T$  — текущее значение температуры материала, К;

$T_{\text{пл}}$  — температура плавления материала, К.

Этот эффект становится заметным при больших плотностях дислокаций, формирующихся после черновых операций механической обработки заготовок, когда материал поверхностного слоя подвергается интенсивному упругопластическому деформированию и тепловому воздействию.

Так, в работе [2] показано, что модуль Юнга зависит от линейной относительной деформации кристаллической решетки, которая, в свою очередь, может быть обусловлена накоплением в металле дислокаций

$$E/E_0 = (1 - 1,5A\rho)^2,$$



где  $A$  — безразмерный численный коэффициент;  
 $\rho$  — относительная линейная деформация кристаллической решетки.

Именно такое явление происходит при механической обработке, когда качество поверхностного слоя материала детали определяется одновременным воздействием на него силы резания и теплоты, выделяемой в процессе обработки резанием [3].

**Цель работы** — установление количественной взаимосвязи между модулем Юнга материала детали и режимными параметрами механической обработки заготовки (на примере точения).

Количественно закономерность изменения модуля Юнга при пластической деформации можно описать, воспользовавшись результатами работы [5]:

$$\frac{E}{E_0} = e^{-A\rho} (2e^{-A\rho} - 1). \quad (1)$$

В свою очередь, линейная деформация кристаллической решетки металла  $\rho$  связана с изменением межатомного расстояния в результате привнесения дислокациями избыточного объема в процессе их накопления при пластической деформации.

Увеличение объема кристалла  $\Delta V$  на одно атомное расстояние вдоль линии дислокации определяется по формуле [6]

$$\Delta V \cong (1 \dots 4)b^2, \quad (2)$$

где  $b$  — вектор Бюргера, м.

Для случая больших деформаций относительное изменение объема материала при наличии дислокаций с плотностью  $\Lambda$  может быть выражено приближенным соотношением [4]

$$\frac{\Delta V}{V} = 2b^2\Lambda, \quad (3)$$

откуда получаем относительную линейную деформацию кристаллической решетки

$$\rho = \frac{2}{3}b^2\Lambda. \quad (4)$$

Принимая во внимание тот факт, что для большинства металлов значение коэффициента  $A$  близко к 4 и изменяется в весьма небольших пределах, формулу (1) можно упростить, при этом относительная погрешность будет составлять не более 5 % для диапазона значений  $\rho \in [0; 0,025]$

$$\frac{E}{E_0} = 1 - 12\rho. \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) получаем зависимость для количественной оценки вклада накопления дислокаций в изменение модуля Юнга при деформационном упрочнении материала

$$\frac{E}{E_0} = 1 - 8b^2\Lambda. \quad (6)$$

Плотность дислокаций  $\Lambda$  в материале поверхностного слоя детали может быть количественно оценена на основании теории деформационного упрочнения по формуле [8]

$$\Lambda = \left( \frac{0,32\Delta HV}{\alpha Gb} \right)^2 \approx \left( \frac{U_n}{100\%} \frac{\sigma_{0,2}}{\alpha Gb} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\Delta HV$  — изменение микротвердости материала, обусловленное деформационным упрочнением, Па;  
 $\alpha$  — параметр междислокационного взаимодействия,  $\alpha \approx 0,3$ ;

$G$  — модуль сдвига, Па;

$U_n$  — степень наклепа материала, %;

$\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести материала, Па.

В работе [3] установлена регрессионная зависимость между степенью и глубиной наклепа при точении ряда сталей и сплавов. С учетом этой зависимости формулу (7) можно представить в следующем виде:

$$\Lambda = \left( \frac{h_n}{k} \frac{\sigma_{0,2}}{\alpha Gb} \right)^2, \quad (8)$$

где  $h_n$  — глубина наклепа в материале поверхностного слоя, обусловленная силовым и тепловым воздействием в процессе резания, м;

$k$  — коэффициент, зависящий от предела прочности обрабатываемого материала.

Глубина наклепа  $h_n$ , учитываемая в формуле (8), определяется по глубине залегания пластических деформаций в поверхностном слое в соответствии с условием пластичности Хубера—Мизеса. К примеру, в случае обработки жаропрочных сплавов ХН73МБТЮ, ХН77ТЮР и стали 13Х12НВМА, выражение для глубины наклепа может быть представлено в следующем виде [3]:

$$h_n = \frac{0,76 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta^{0,36}}{\sqrt{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha'^{0,09} \gamma^{0,33}}, \quad (9)$$

где  $\tau_p$  — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па;

$S$  — подача, м/об.;

$t$  — глубина резания, м;

$\rho_1$  — радиус округления режущей кромки резца, м;

$v$  — скорость резания, м/с;

$r$  — радиус при вершине резца в плане, м;

$\varphi$  — главный угол резца в плане, °;

$\delta$  — высота площадки износа резца по задней поверхности, м;

$\alpha'$  и  $\gamma$  — задний и передний углы резца в плане, °.

После подстановки уравнения (8) в уравнение (6) получаем искомую зависимость, характеризующую относительное изменение модуля Юнга

материала поверхностного слоя детали после механической обработки

$$\frac{E}{E_0} = 1 - 8 \left( \frac{h_n \sigma_{0,2}}{k \alpha G} \right)^2. \quad (10)$$

### Заключение

Таким образом, расчетом по формуле (10) можно определить степень влияния упрочнения материала на изменение модуля упругости материала поверхностного слоя детали, полученной при обработке лезвийным инструментом, вследствие одновременного воздействия на поверхностный слой детали силы и температуры резания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Драпкин Б.М. О предельных значениях модулей упругости металлов // Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14. С. 908.

2. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. М.: Машиностроение, 2004. 256 с.

3. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.

4. Влияние абразивно-силового воздействия на физико-механические свойства поверхности металла / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.В. Тимофеев, М.А. Прокофьев // Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 8. С. 12–16.

5. Драпкин Б.М. Изучение поведения металлов при высоких температурах с помощью потенциала взаимодействия Морзе // Теплофизика высоких температур. М.: Изд-во АН СССР, 1980. Т. 18. С. 738–739.

6. Кульман-Вильсдорф Д. Дислокации // Физическое металловедение / под ред. Р. Кана. Вып. 3. М.: Мир, 1968. 484 с.

7. Драпкин Б.М. Влияние различных факторов на модуль Юнга металлов // Известия АН СССР. Металлы. 1980. № 3. С. 193–197.

8. Исследование запасенной металлом энергии деформации при вдавлении шарового индентора / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.А. Прокофьев, М.В. Тимофеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. № 4. Т. 71. С. 32–35.

УДК 621.787:621.91

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-11-498-503

А.А. Кречетов, В.Ю. Блюменштейн, К.П. Петренко

(Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово)

E-mail: blumenstein@rambler.ru

## Особенности напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя при свободном ортогональном резании\*

*Приведены методика и результаты исследований формирования параметров механического состояния поверхностного слоя при свободном ортогональном резании. Получено распределение компонент тензора напряжений, скоростей деформаций и интегральных показателей механического состояния вдоль линий тока. Установлено, что формирование параметров механического состояния при резании и ППД подчиняется общим закономерностям.*

**Ключевые слова:** ортогональное резание, технологическое наследование, напряженно-деформированное состояние, очаг деформации, программа нагружения.

*The technique and research results on creation of surface layer mechanical conditions parameters at free orthogonal cutting are presented. Stress tensor, strain rate tensor and general mechanical condition factors distribution along flow lines are obtained. It is demonstrated, that creation of surface layer mechanical condition parameters at metal cutting and surface plastic deformation methods obey common patterns. Experimental research results confirmed the validity of proposed analytical models for loading programs at metal cutting.*

**Keywords:** orthogonal cutting, technological inheritance, stress-strain state, deformation zone, loading program.

### Введение

Резание металлов — один из наиболее распространенных процессов обработки в машино-

строении. Правильно назначенные режимы резания позволяют обеспечить заданную точность размеров и качество поверхности деталей машин. В процессе резания металл подвергается большим пластическим деформациям с высокими скоростями в небольшой ограниченной области. Свободное ортогональное резание является широко используемой моделью для упрощения начальных

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587.

и граничных условий, которые в реальных процессах могут иметь достаточно сложный характер. Резание характеризуется сложным характером распределения напряжений и деформаций на границе "инструмент—стружка" и в поверхностном слое.

К настоящему времени известно большое количество работ, посвященных моделированию и исследованию процессов резания. Многие исследователи используют модель процесса резания с плоскостью или зоной сдвига [1—5]. Так, А.Г. Atkins применял МКЭ-моделирование с использованием аппарата механики вязкого разрушения [1]. В ходе исследований установлено, что угол наклона плоскости сдвига зависит от механических свойств материала, переднего угла и коэффициента трения. Автор вводит параметр, представляющий собой отношение ударной вязкости к скалывающему напряжению. Указанный параметр зависит от материала, предшествующей механической и термической обработки, а также скорости деформации и температуры. И.А. Масленников [2] установил, что угол сдвига не является постоянной величиной для данных условий резания. Утверждается, что имеется некоторая поверхность сдвигов, по которой развиваются наибольшие пластические деформации и происходит сдвиг материала, в ходе исследований получено аналитическое выражение поверхности сдвигов.

Большое количество работ посвящено распределению компонент напряженно-деформированного состояния в окрестности режущей кромки, на границе "стружка—инструмент", в самой стружке и т.д. В частности, V.P. Astakhov, M.O.M. Osman и M.T. Naayajneh исследовали распределение скоростей течения металла при свободном ортогональном резании [6]. Было установлено, что процесс образования стружки носит циклический характер, при этом каждый цикл имеет три стадии. В результате определена периодичность образования стружки, для количественной оценки разброса компонент напряжений и деформаций были проведены исследования микротвердости в деформационной зоне.

А. Raszynski и другие [7] применили эйлеровскую конечно-элементную модель для прогнозирования распределения напряжений, деформаций и сил резания в окрестности режущей кромки при обработке технически чистой меди. В ходе исследований авторы использовали как упругопластическую гидродинамическую модель течения металла, так и модель Джонсона—Кука. Авторы выделяют три зоны, в которых происходит деформация металла: первичную, вторичную и обработанную поверхность. Установлено, что максимальные напряжения возникают в области верши-

ны реза. Глубина проникновения пластической деформации (400 мкм) и ширина вторичной деформационной зоны (60 мкм), рассчитанные по моделям, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Р.Ю. Некрасов и другие исследовали взаимосвязь деформаций в срезаемом слое с распределением напряжений в зоне резания при точении жаропрочных сталей и сплавов [8]. В результате проведенных исследований установлены параметры деформирования срезаемого слоя и совокупность напряжений, действующих в зоне резания, позволяющие сформировать модель нагружения режущего инструмента в целях прогнозирования его работоспособности.

J.M. Rodriguez, P. Jonson и A. Svoboda [9] применили модель плотности дислокаций, а также МКЭ-моделирование для изучения ортогонального резания нержавеющей стали в условиях плоского деформированного состояния. В результате получено распределение скоростей деформаций, плотности дислокаций и избыточной концентрации вакансий в поверхностном слое и на границе "инструмент—стружка".

Ряд авторов использовали современные методы расчета напряженно-деформированного состояния процессов резания [10—12]. Т. Baizeau и другие исследовали поле напряжений при свободном ортогональном резании алюминиевого сплава с использованием камеры для высокоскоростной съемки с пульсирующим лазерным излучателем [10]. Поля смещений получали на основе метода цифровой корреляции изображений. Авторы рассчитали поле остаточных напряжений, поле смещений и поле эквивалентных деформаций по глубине поверхностного слоя. Особенностью данной работы является то, что авторы большое внимание уделили именно формированию поверхностного слоя в отличие от процесса образования стружки.

Dong Zhang и другие предложили новый способ расчета полей напряжений при резании [11]. Поля напряжений, содержащие как упругие, так и пластические составляющие, были получены методом цифровой корреляции изображений. Для компенсации неточности определения упругих составляющих была предложена специальная методика корректировки среднего нормального напряжения (гидростатического давления). Авторы определили геометрические параметры плоскости сдвига и линии разделения потоков металла в окрестности режущей кромки, а также получили распределение напряжений вдоль передней поверхности инструмента и плоскости сдвига.

Многие исследователи используют энергетические подходы для исследования процесса резания.

Так, Нао Ран с соавторами [13] проводили МКЭ-моделирование свободного ортогонального резания алюминиевого сплава с использованием критерия разрушения Джонсона—Кука. В основе указанного критерия лежит отношение работы пластической деформации к объему, т.е. по терминологии авторов плотность энергии пластической деформации. Моделирование проводили для широкого диапазона варьирования переднего угла и глубины резания. Было установлено, что размер поврежденного пограничного слоя составляет порядка 35 мкм и не зависит от глубины резания и переднего угла в условиях образования сливной стружки. Результаты аналитических расчетов и моделирования показали повышение ударной вязкости в диапазоне малых значений переднего угла. По мнению авторов, это связано с возрастающей долей касательных напряжений по сравнению с растягивающими. Подобный подход использовался в работе [14], в которой авторы разработали математическую модель расчета удельной накопленной энергии деформации по глубине упрочненного слоя с учетом исходного состояния материала, а также представили зависимости удельной накопленной энергии деформации от параметров процесса резания при точении.

С точки зрения формирования заданных параметров и свойств поверхностного слоя целесообразно рассматривать напряженно-деформированное состояние, возникающее в зоне резания, с единых позиций в рамках теории технологического наследования [15].

### Механика технологического наследования при резании

Согласно основным положениям теории технологического наследования в процессах обработки и эксплуатации деталей машин происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя. Основными параметрами механического состояния являются среднее нормальное напряжение  $\sigma$ , интенсивность касательных напряжений  $T$ , накопленная степень деформации сдвига  $\Lambda$ , показатель напряженного состояния  $\Pi$ , степень исчерпания запаса пластичности  $\Psi$ .

При внедрении инструмента в поверхностный слой возникает очаг деформации (ОД), в котором вдоль линий пластического течения металла (линий тока) происходит накопление деформации, исчерпание запаса пластичности и формирование свойств поверхностного слоя (рис. 1).

В ОД выделяют два потока металла — один поток уходит в стружку, другой движется под ин-

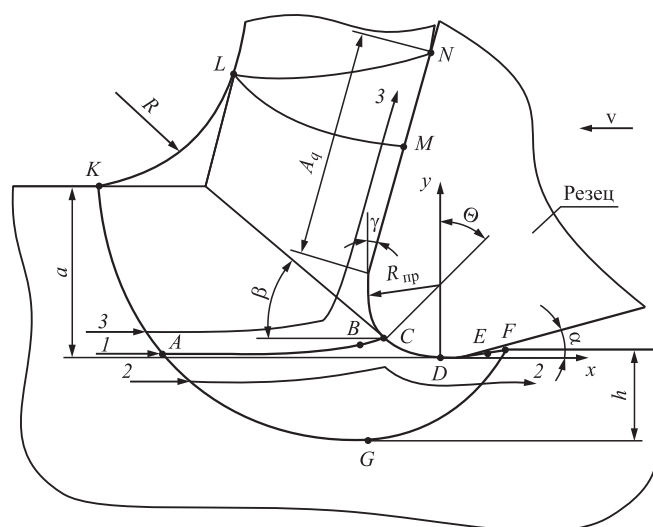


Рис. 1. Схема очага деформации с характерными точками при резании

струмент и формирует поверхностный слой изделия. Разделение потоков металла происходит вдоль критической линии тока — в точке С.

Ключевым элементом механики технологического наследования является программа нагружения (ПН), представляющая собой зависимость накопленной степени деформации сдвига  $\Lambda$  от показателя напряженного состояния  $\Pi$ . ПН имеет три участка квазимонотонной деформации, на которых накопление деформации и исчерпание запаса пластичности происходят в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. Программа нагружения формируется под воздействием режимов обработки и определяет характер накопления деформации и формирование наследуемых свойств поверхностного слоя.

Структура типовых технологических процессов упрочняющей механической обработки включает в себя резание и поверхностное пластическое деформирование (ППД). Окончательное формирование свойств поверхностного слоя происходит на операциях ППД с учетом ранее накопленных свойств. Операции резания формируют требуемую форму и размеры изделия. Исследования показали [16], что формирование параметров механического состояния, а также программ нагружения в процессах резания и ППД подчиняется общим закономерностям и может быть описано аналитическими моделями на основе параметров ОД.

### Методика исследований

В целях проверки корректности полученных аналитических моделей были проведены экспериментальные исследования формирования про-

Условия проведения экспериментальных исследований

Номер образца	Скорость резания $v$ , м/мин	Профильный радиус $\rho$ , мм	Передний угол $\gamma$ , °	Задний угол $\alpha$ , °	Толщина срезаемого слоя $a$ , мм
12	0,070	0,15	35	10	0,3
13	0,050				
14	0,025				
15	0,034				
16	0,100				

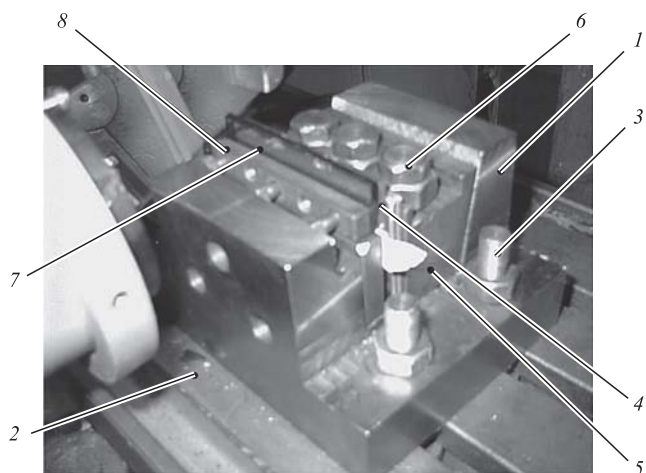


Рис. 2. Приспособление, установленное на столе горизонтально-фрезерного станка

грамм нагружения по схеме свободного ортогонального резания на горизонтально-фрезерном станке образцов из стали 45 (таблица).

Экспериментальные образцы закрепляли в специальном приспособлении (рис. 2) с клиновым зажимом, которое устанавливали на столе фрезерного станка.

Корпус приспособления 1 на столе горизонтально-фрезерного станка 2 закрепляли с помощью винтов 3. Плоский образец 4, имеющий специальную геометрию, устанавливали в корпус и фиксировали клиновым зажимом 5 посредством винтов 6. Для соблюдения условия плоской деформации и обеспечения съемки процессов нагружения поверхностного слоя устанавливали пластину 7, изготовленную из закаленного отполированного стекла. Регулировали положения образца и стеклянной пластины пластиной с винтами 8. Геометрию инструмента обеспечивали обработкой стандартных пластин из твердого сплава ВК8 на оптико-шлифовальном станке и державками, изготовленными из стали 40Х.

Компоненты напряженно-деформированного состояния и параметры механического состояния поверхностного слоя рассчитывали методом делительных сеток (МДС) и методом конечных элементов (МКЭ). При моделировании МКЭ заготовку жестко закрепляли, в нее внедряли абсолютно жесткий индентор (резец) и смещали в горизонтальном направлении на величину подачи. Начальными условиями при моделировании являлись кривая течения обрабатываемого материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, а также коэффициент трения на контактной поверхности резца и заготовки. В качестве граничных условий использовали геометрические параметры ОД [17]. На рис. 3 показана деформированная делительная сетка для образца № 16, на рис. 4 представлена картина распределения интенсивности напряжений для образца № 16, рассчитанная с помощью МКЭ.

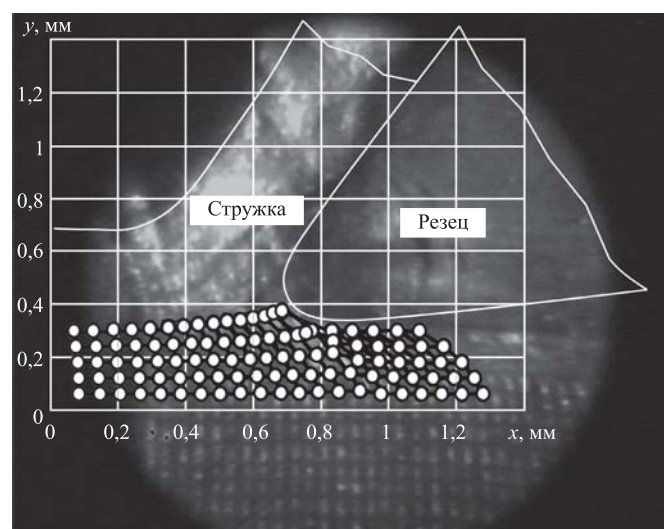


Рис. 3. Деформированная делительная сетка для образца № 16

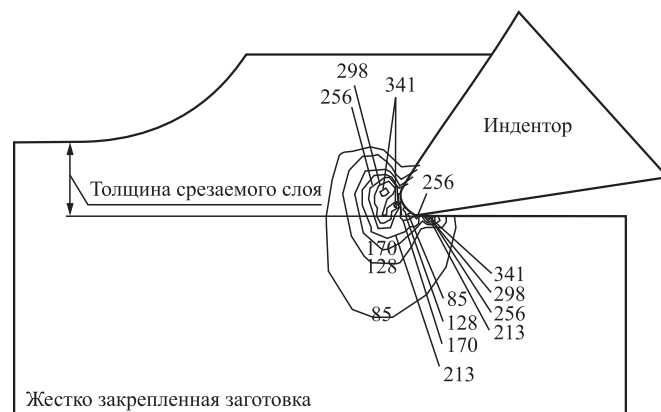


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений, МПа, для образца № 16

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 5, 6 приведены соответственно компоненты тензора напряжений, тензора скоростей

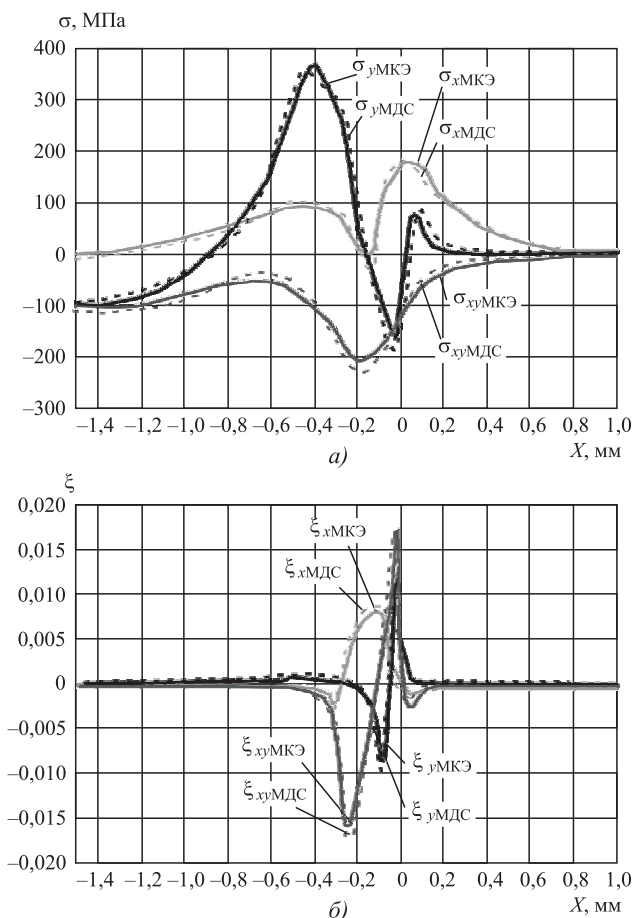


Рис. 5. Распределение компонент тензора напряжений (а) и скоростей деформаций (б) вдоль критической линии тока

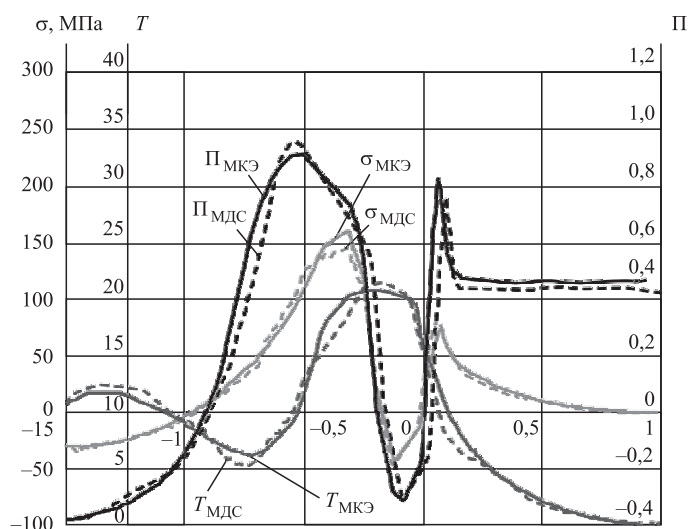


Рис. 6. Значения интегральных показателей напряженного состояния вдоль критической линии тока

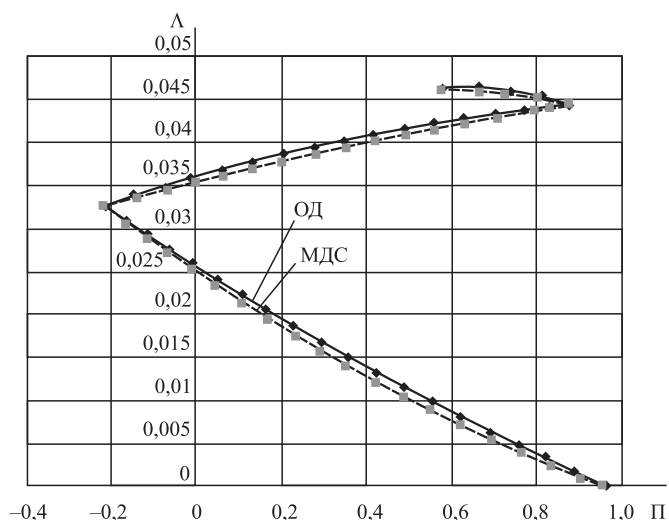


Рис. 7. Аналитическая (ОД) и экспериментальная (МДС) программа нагружения вдоль критической линии тока

деформаций и интегральных показателей напряженного состояния вдоль критической линии тока 1 для образца № 16 (см. рис. 1).

На рис. 7 показаны аналитическая (рассчитанная по параметрам очага деформации) и экспериментальная программы нагружения для образца № 16.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что максимальные значения напряжений и деформаций наблюдаются в области вершины резца. Перед резцом образуется зона сжимающих напряжений. Растягивающие напряжения возникают в зоне за инструментом, их появление обуславливается контактным трением инструмента и влиянием образующей стружки. Максимальные касательные напряжения формируются в зоне под радиусом закругления резца. В этой же зоне возникает максимальная деформация.

Резкое изменение касательных напряжений по мере приближения к закруглению резца по оси свидетельствует об изменении направления движения металла в этой зоне — материальные частицы попадают в поток металла, уходящий в стружку. Возникновение максимальной деформации в этой зоне обуславливает разрушение металла — разделение потоков металла в стружку и под инструмент.

Выводы

1. Показано, что формирование параметров механического состояния при резании и ППД подчиняется общим закономерностям.

2. Анализ распределений параметров механического состояния вдоль линий тока в процессах резания и ППД показал, что подобие характерно как для отдельных компонент тензоров напряжений и деформаций, так и для интегральных показателей механического состояния поверхностного слоя.

3. Распределения напряжений, скоростей деформаций, среднего нормального напряжения и показателя напряженного состояния вдоль линий тока имеют три участка, на которых происходит их монотонное возрастание или убывание. Это свидетельствует о наличии трех участков квазимоноотонной деформации в очаге деформации в процессе резания.

3. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанных аналитических моделей формирования программ нагружения в процессах резания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Atkins A.G.** Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. 45. P. 373–396.1.

2. **Масленников И.А.** Исследование формы поверхности сдвигов в процессе стружкообразования при обработке резанием пластичных материалов // *Металлообработка*. 2014. № 5. С. 11–18.

3. **Максаров В.В.** Моделирование процесса стружкообразования на основе реологических свойств металлов // *Металлообработка*. 2014. № 6. С. 26–33.

4. **Грубый С.В.** Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2017. № 1. С. 25–37.

5. **Коврижных А.М.** Жесткопластическая модель образования стружки скалывания при резании металлов // *Прикладная механика и техническая физика*. 2005. Т. 46. № 4. С. 609–614.

6. **Astakhov V.P., Osman M.O.M., Nayajneh M.T.** Re-evaluation of the basic mechanics of orthogonal metal cutting: velocity diagram, virtual work equation and upper-bound theorem // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001. 41. P. 393–418.

7. **Raczy A., Altenhof W.J., Alpas A.T.** An Eulerian Finite Element Model of the Metal Cutting Process // 8<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, Metal Forming (1). P. 9-11–9-26.

8. **Модель** системы напряжений и параметров деформирования срезаемого слоя в зоне резания / Р.Ю. Некрасов, У.С. Путилова, Е.В. Корешкова, Д.А. Харитонов // *Системы. Методы. Технологии*. 2013. № 4. С. 83–87.

9. **Rodriguez J.M., Jonson P., Svoboda A.** Simulation of metal cutting using the particle nite-element method and a physically based plasticity model // *Comp. Part. Mech*. 2017. 4. P. 35–51.

10. **Kinematic Field Measurements During Orthogonal Cutting Tests via DIC with Double-frame Camera and Pulsed Laser Lighting** / T. Baizeau, S. Campocasso, G. Fromentin, R. Besnard // *Experimental Mechanics*. 2017. 57 (4). P. 581–591.

11. **Stress Field Analysis in Orthogonal Cutting Process Using Digital Image Correlation Technique** / Dong Zhang, Xiao-Ming Zhang, Wen-Jie Xu, Han Ding // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017. Vol. 139. P. 031001-1–031001-13.

12. **Hao Pan, Jian Liu, Youngsik Choi et al.** Zones of material separation in simulations of cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. 115–116. P. 262–279.

13. **An explicit** finite element model to study the influence of rake angle and friction during orthogonal metal cutting / P.L. Menezes, I.V. Fvdeev, M.R. Lovell, C.F. Higgs // *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 2014. 73. P. 875–885.

14. **Влияние** геометрических параметров режущего лезвия на формирование области пластической деформации при резании титанового сплава ОТ4 / Г.И. Коровин, А.В. Филиппов, А.В. Проскоков, В.В. Горбатенко // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 3. С. 56–64.

15. **Yung-Chang Yen.** Modeling of Metal Cutting and Ball Burnishing – Prediction of Tool Wear and Surface Properties – Dissertation – Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University The Ohio State University 2004, p. 254.

16. **Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Виноградова Н.В.** Исследование влияния технологических условий механической обработки на накопленную энергию деформации в поверхностном слое деталей // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2015. № 43. С. 131–144.

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

18. **Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П.** Аналитическое описание программ нагружения на стадиях механической обработки // *Вестник КузГТУ*. 2009. № 6. С. 77–83.

19. **Петренко К.П.** Определение параметров наследственных очагов деформации в процессах резания и поверхностного пластического деформирования // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 6. С. 3–7.

А.В. Щедрин, А.А. Бекаев, И.Ю. Игнаткин, Д.О. Онищенко  
 (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана),  
 Н.Ю. Чихачёва  
 (МОО "Академия проблем качества", МБОУ СОШ № 1, г. Покров)  
 E-mail: bekaev@list.ru

## Влияние состава металлоплакирующей смазки и технологии ее применения на контактные характеристики методов комбинированного дорнования отверстий

С использованием основных положений фундаментального научного направления "трибология на основе самоорганизации" и научных основ "искусственного технологического интеллекта" сравнительно проанализированы контактные характеристики методов комбинированного дорнования отверстий в условиях применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского".

**Ключевые слова:** дорнование отверстий, регулярный микрорельеф, металлоплакирующая смазка, эффект безызносности при трении.

The contact characteristics of combined hole mandrelling methods in the conditions of using of innovative metal-cladding lubricants that implement the "of Garkunov—Kragel'sky friction wearlessness effect" are comparatively analyzed using the main provisions of the fundamental scientific direction "tribology based on self-organization" and the scientific foundations of "artificial technological intelligence".

**Keywords:** hole mandrelling, regular microrelief, metal-cladding lubricant, wearlessness friction effect.

Дорнование отверстий — эффективный, комплексный метод получения изделий с высокими параметрами качества поверхностного слоя заготовок из различных материалов разных форм и размеров [1—6].

В настоящее время методы дорнования отверстий системно [7, 8] совершенствуются за счет совместного использования регулярной микрогеометрии воздействующих поверхностей и различных технологий применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [9—16]. Это позволяет на 25...39 % снизить силы дорнования [12, 13], в два и более раза повысить технологическую стойкость инструмента при обработке значительных (до 1,5 млн шт.) партий заготовок ответственных деталей [10], реализовать более благоприятный режим трения [11, 16], более интенсивно исправлять исходные погрешности отверстий [14], сформировать оптимальную текстуру поверхностного слоя отверстия под последующее или параллельное режущее воздействие [8, 9, 14, 15].

На рис. 1 представлены технологические схемы дорнования отверстий, которые применяли при проведении исследований.

Схема-исполнение I реализует традиционную обработку без использования противодавления

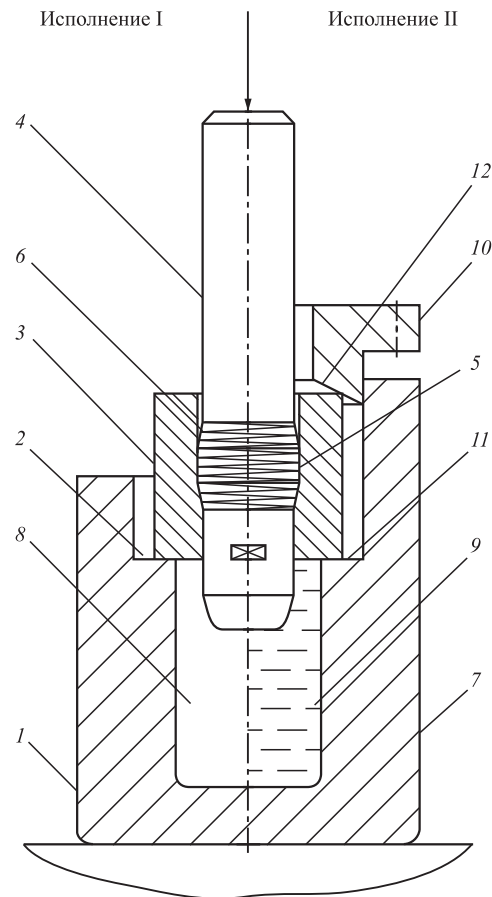


Рис. 1. Схемы дорнования отверстий



смазки. Она осуществляется с помощью опоры 1, на торец 2 которой устанавливают образец-заготовку 3 с дорном 4, рабочий элемент 5 которой упрочнен регулярным микрорельефом (РМР) 6. При этом на поверхность отверстия образца-заготовки и дорна предварительно наносят смазку.

Схема-исполнение II реализует обработку с самовозбуждающим противодавлением смазки [11, 13]. Она осуществляется с помощью обоймы 7, имеющей внутреннюю полость 8, которая заполняется соответствующей смазкой 9. Образец-заготовка 3 центрируется с помощью крышки 10 по торцу 11 и конусу 12.

Перед дорнованием доливают смазку примерно до уровня верхнего (входного) торца образца-заготовки 3. При движении дорна 4 в полости 8, а также в полости отверстия заготовки за счет сокращения объема создается противодействие смазки 9 и происходит ее истечение по канавкам микрорельефа 6 [11, 13].

В качестве экспериментальных образцов-заготовок по аналогии с работами [12, 17] использовали цилиндрические втулки из дюралюминия Д1Т (116 НВ) с наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм. Предварительная обработка отверстий образцов-заготовок — растачивание с параметром шероховатости поверхности  $Ra_3 = 0,77...3,7$  мкм. В качестве инструмента также по аналогии с работами [9, 12] использовали сборную однозубую дорн-прошивку 4 (см. рис. 1) со сменным деформирующим элементом 5 из быстрорежущей стали марки Р6М5: диаметры по калибрующей ленточке 20,13 и 20,2 мм; угол рабочего и обратного конусов  $5^\circ$ ; ширина калибрующей ленточки 7 мм. Воздействующая поверхность деформирующего элемента 5 упрочнена регулярным микрорельефом 6 в виде однозаходных винтовых канавок [8] радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки 8 мкм. Продольные профилограммы калибрующей ленточки приведены в работе [9].

РМР выполняли на универсальном токарно-винторезном станке с помощью алмазного выглаживателя. В качестве технологической смазки для сопоставимости применяли минеральное масло марки И-40 без и с добавкой инновационной металлоплакирующей присадки "Валена", реализующей эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского [16]. Объемную долю присадки  $C$  варьировали от 0 до 20 % через интервал 10 %. Абсолютную номинальную деформацию отверстия образцов-заготовок на диаметр  $i_n$  изменяли в диапазоне 0,05...0,25 мм через 0,05 мм. Скорость дорнования 0,05 м/мин.

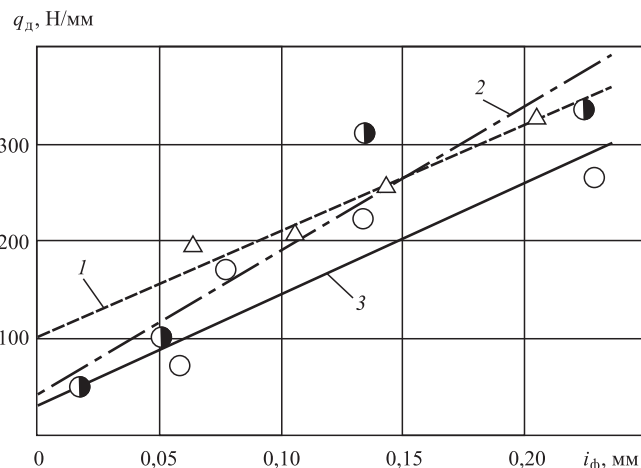


Рис. 2. Зависимость удельной силы дорнования  $q_d$  от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка без противодействия смазки):

1 —  $C = 0 \%$ ; 2 —  $C = 10 \%$ ; 3 —  $C = 20 \%$

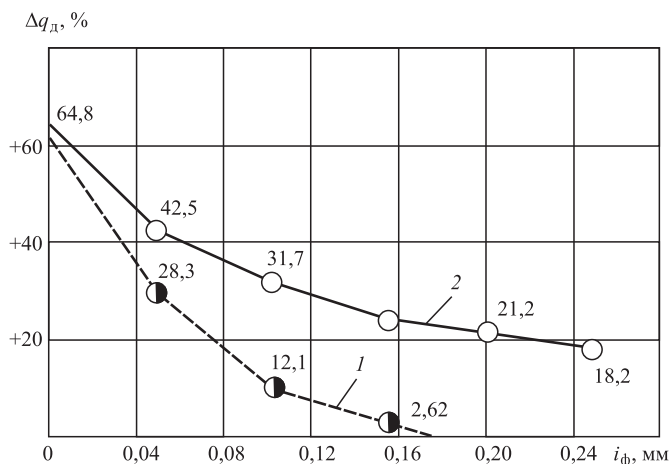
На рис. 2 представлена зависимость удельной силы дорнования [9, 11—14] от абсолютной фактической деформации  $i_\phi$  и содержания металлоплакирующей присадки при обработке без противодействия смазки (технологическая схема I на рис. 1).

Аналитически данная зависимость аналогично [12] может быть представлена в виде

$$\begin{cases} q_d(C = 0 \%) = 104,5 + 1122,5i_\phi, \\ q_d(C = 10 \%) = 39,7 + 1507,9i_\phi, \\ q_d(C = 20 \%) = 38,745 + 1111,75i_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

Совместный анализ графической (см. рис. 2) и аналитической (1) зависимостей показывает, что по сравнению с "чистым" маслом И-40 смазка, содержащая 10 % металлоплакирующей присадки, обеспечивает снижение удельной силы дорнования в диапазоне абсолютной фактической деформации  $i_\phi$  до 0,168 мм, а смазка, содержащая 20 % присадки, обеспечивает энергосиловой эффект во всем диапазоне варьирования  $i_\phi$ . Используя по аналогии с работой [12] сравнительный критерий в виде относительного процентного уменьшения удельной силы дорнования, построили сравнительную зависимость (рис. 3), анализ которой показывает, что в диапазоне  $i_\phi = 0,05...0,15$  мм при содержании присадки 10 % удельная сила дорнования может быть уменьшена на 28,3...2,62 %, а при содержании присадки 20 % в диапазоне  $i_\phi = 0,05...0,25$  мм энергосиловой эффект составляет 42,5...18,2 %.

Другой эффект от применения металлоплакирующих смазок заключается в увеличении абсо-



**Рис. 3. Зависимость относительного процентного уменьшения удельной силы дорнования  $\Delta q_d$  от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка без противодействия смазки):**  
 1 —  $C = 10\%$ ; 2 —  $C = 20\%$

лутной фактической деформации  $i_\phi$  при равной силе (см. рис. 2) [12]. Это объясняется пластифицированием деформируемого слоя отверстия поверхностно-активными компонентами металлоплакирующей смазки (эффект Ребиндера).

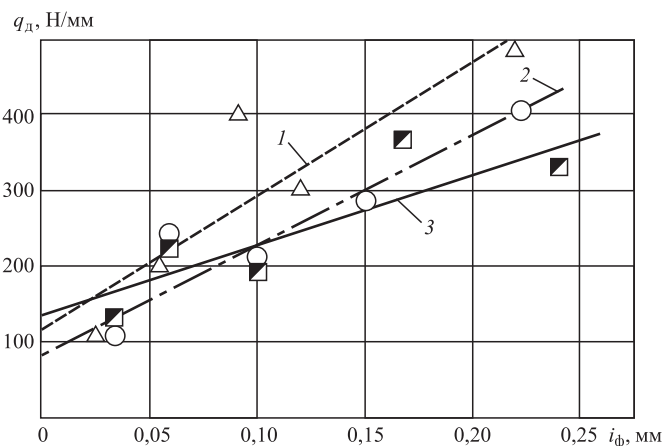
На рис. 4 представлена зависимость удельной силы дорнования от абсолютной фактической деформации  $i_\phi$  и содержания металлоплакирующей присадки при обработке с противодействием смазки (технологическая схема II на рис. 1). Аналитически данная зависимость может быть представлена в виде

$$\begin{cases} q_d(C = 0\%) = 112,92 + 1713,5i_\phi, \\ q_d(C = 10\%) = 94,51 + 1276,68i_\phi, \\ q_d(C = 20\%) = 126,7 + 969,43i_\phi. \end{cases} \quad (2)$$

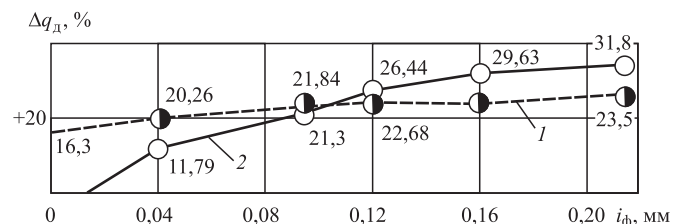
Совместный качественный и количественный анализ аналитической (2) и графической зависимостей (рис. 4, 5) свидетельствует о более существенном энергосиловом эффекте от применения металлоплакирующих смазок при их самовозбужденном противодействии и истечении по канавкам РМР воздействующей поверхности инструмента. При этом дополнительно, в отличие от обработки без противодействия (см. рис. 2, 3) [12], при наличии присадки в условиях противодействия наблюдается повсеместное качественное феноменальное явление в виде снижения удельной силы дорнования с увеличением абсолютной фактической деформации  $i_\phi$  (см. рис. 5). Это связано с интенсификацией подачи металлоплакирующей

смазки в очаг деформации на микроуровне через канавки РМР, в результате чего реализуется более благоприятный режим трения, близкий к жидкостному, а также интенсифицируются образование медной сервовитной пленки и проявление эффекта Ребиндера [16].

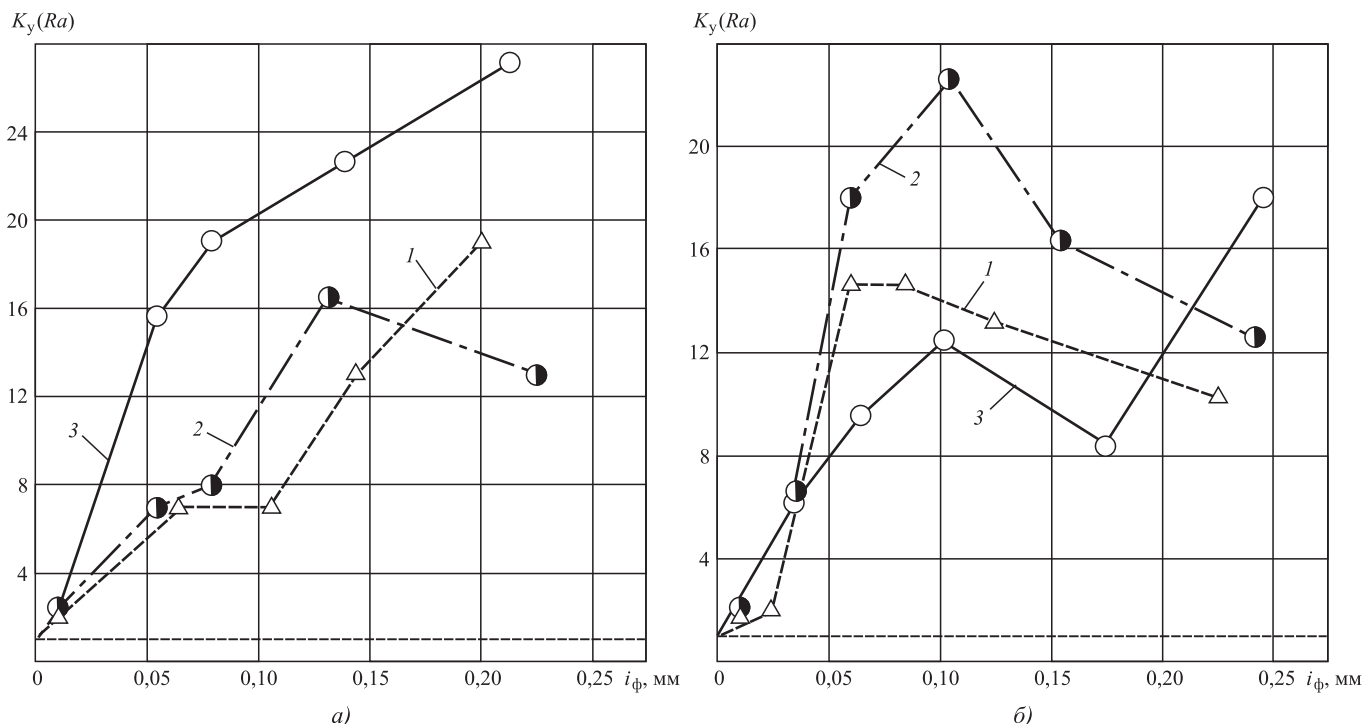
Другой аспект энергосилового анализа — резкое расхождение первых выражений аналитических зависимостей (1) и (2) и, наоборот, схождение вторых и третьих выражений зависимостей (1) и (2) соответственно по мере увеличения  $i_\phi$ . Так, при содержании присадки 10% зависимости при обработке без и с противодействием сходятся при  $i_\phi = 0,237$  мм, а при содержании присадки 20% — при  $i_\phi = 0,632$  мм. Это означает существенное улучшение протекания контактных процессов в условиях противодействия металлоплакирующих смазок и исключение приведенного выше значительного энергосилового различия, которое также имеет место при применении традиционных смазок [11].



**Рис. 4. Зависимость удельной силы дорнования  $q_d$  от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка с противодействием смазки):**  
 1 —  $C = 0\%$ ; 2 —  $C = 10\%$ ; 3 —  $C = 20\%$



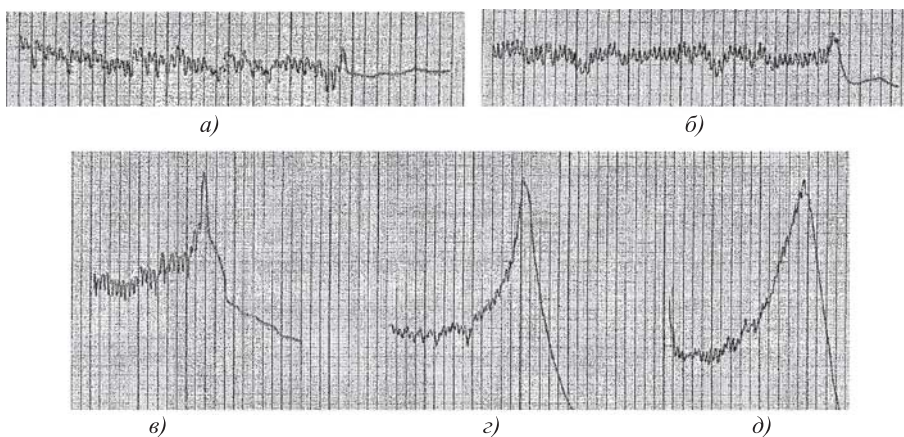
**Рис. 5. Зависимость относительного процентного уменьшения удельной силы дорнования  $\Delta q_d$  от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка без противодействия смазки):**  
 1 —  $C = 10\%$ ; 2 —  $C = 20\%$



**Рис. 6. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки:**  
 а — обработка без противодействия; б — обработка с противодействием; 1 —  $C = 0\%$ ; 2 —  $C = 10\%$ ; 3 —  $C = 20\%$

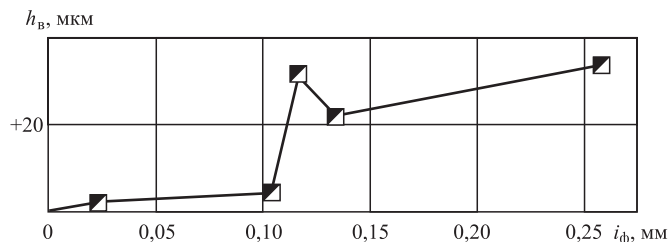
На рис. 6 приведены зависимости коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстия после дорнования [9—12]. Их анализ показывает, что содержание металлоплакирующей присадки и технология применения соответствующей смазки являются существенными факторами формирования шероховатости поверхности получаемых отверстий.

Другим элементом выполненных экспериментальных исследований является оценка геометрических параметров очага деформации в виде формы, знака и размера волны внеконтактной деформации. Как показывает анализ профилограмм очагов деформации, образованных рабочим конусом деформирующего элемента (рис. 7), волна имеет положительное значение и возрастает с увеличением степени деформации отверстия  $i_\phi$  (рис. 8). Положительная волна внеконтактной деформации при обработке существенно (до 60 %) увеличивает площадь контакта инструмента с заготовкой, затрудняет поступление технологиче-



**Рис. 7. Продольные профилограммы очагов деформации (обработка без противодействия смазки,  $C = 20\%$ , вертикальное увеличение  $\times 1000$ , горизонтальное увеличение  $\times 8$ ):**

а —  $i_\phi = 0,0534$  мм; б —  $0,1025$  мм; в —  $0,1317$  мм; г —  $0,1167$  мм; д —  $0,2575$  мм



**Рис. 8. Зависимость высоты волны  $h_b$  внеконтактной деформации от абсолютной фактической деформации (обработка без противодействия смазки,  $C = 20\%$ )**

ской смазки в очаг деформации, препятствуя реализации гидродинамического режима трения.

Для оценки влияния состава металлоплакирующей смазки и технологии ее применения на коэффициент трения скольжения экспериментально исследованных методов комбинированного дорнования отверстий используем упрощенную формулу И.В. Крагельского [17]:

$$f = f_a + f_d = \left( \frac{\tau_0}{HB_3} + \beta \right) + \left( 0,4 \sqrt{\frac{\varepsilon_3 H_{3 \max}}{R_{\text{пр}}}} \right), \quad (3)$$

где  $f_a$  и  $f_d$  — адгезионная и деформационная составляющие коэффициента трения скольжения соответственно;

$\tau_0$  — прочность адгезионной связи при отсутствии нормального контактного давления, МПа;

$HB_3$  — исходная твердость материала образцов-заготовок по Бринеллю, МПа;

$\beta$  — пьезокоэффициент влияния нормального контактного давления на прочность адгезионной связи;

$\varepsilon_3$  — относительная деформация максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстия образцов-заготовок;

$H_{3 \max}$  — высота максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстия образцов-заготовок, мкм;

$R_{\text{пр}}$  — приведенный радиус кривизны при вершине единичного микровыступа шероховатой поверхности деформирующего элемента дорна-прошивки, мкм.

Методика определения коэффициента трения скольжения (3) изложена в работе [18]. Для определения среднего контактного давления используем формулу [6, 17]

$$q_N = \frac{q_d D_d}{D_c L_\phi (\sin \alpha + f \cos \alpha)}, \quad (4)$$

где  $D_d$  — диаметр деформирующего элемента дорна-прошивки по калибрующей ленточке, мм;

$D_c$  — диаметр рабочего конуса деформирующего элемента дорна-прошивки по середине ширины контакта с отверстием образца-заготовки, мм;

$L_\phi$  — фактическая ширина контакта рабочего конуса деформирующего элемента дорна-прошивки с отверстием образца-заготовки, мм;

$\alpha$  — угол рабочего конуса деформирующего элемента дорна-прошивки, °.

$$\begin{cases} L_\phi = \frac{0,5 i_\phi + h_b}{\sin \alpha}, \\ D_c = 0,5(2D_d - (i_\phi + 2h_b)). \end{cases} \quad (5)$$

Первоначально было проанализировано влияние параметров очага деформации (см. рис. 7, 8)

на величину среднего нормального контактного давления (4).

Для предельной оценки возьмем крайнюю экспериментальную точку зависимости 3 (см. рис. 2), соответствующую абсолютной фактической деформации отверстия образца-заготовки  $i_\phi = 0,225$  мм.

По зависимости параметров очага деформации (см. рис. 8) для этого значения  $i_\phi$  высота волны внеконтактной деформации  $h_b = +0,03$  мм. Тогда скорректированное значение  $i_\phi = 0,225 + 2h_b = 0,285$  мм. Исходные данные и результаты расчета среднего нормального контактного давления с учетом и без учета параметров очага деформации приведены в табл. 1, где  $F_d$  — суммарная сила дорнования.

Сравнение результатов табл. 1 показывает, что положительная волна внеконтактной деформации уменьшает среднее нормальное контактное давление на 21 %, что связано с увеличением ширины и площади контакта отверстия образца-заготовки с рабочим конусом деформирующего элемента дорна-прошивки.

Полученные результаты необходимо учитывать при структурно-параметрическом синтезе методов дорнования отверстий [7, 8, 17].

В табл. 2 представлены исходные данные и результаты определения коэффициента трения скольжения (3) и среднего нормального контактного давления (4) для случая дорнования отверстий с противодействием различных технологических смазок (схема-исполнение II на рис. 1, силовые зависимости на рис. 4 и система уравнений (2)).

Используя значения  $q_N$  и  $f$ , можно дополнительно определить среднюю удельную силу трения:

$$\tau = f q_N. \quad (6)$$

Анализ данных табл. 1 и 2 и построенных графических зависимостей (рис. 9 и 10) показывает, что состав и технология применения металлоплакирующей смазки позволяют существенно влиять на контактные характеристики методов дор-

Таблица 1

**Исходные данные и результаты расчета среднего контактного давления при дорновании без противодействия смазки**

Параметры	$F_d$ , Н	$D_c$ , мм	$L_\phi$ , мм	$f$	$q_N$ , МПа
$h_b = 0$ мм, $i_\phi = 0,225$ мм, $C = 20$ %	16 700	20,0175	1,2916	0,0529	1472
$h_b = +0,03$ мм, $i_\phi = 0,285$ мм, $C = 20$ %		19,9875	1,636	0,0529	1164

Исходные данные и результаты расчета контактных характеристик при дорновании с противодействием смазки

$C, \%$	0					10					20				
$i_{\phi}, \text{мм}$	0,0259	0,0584	0,0892	0,1342	0,2242	0,0367	0,0625	0,105	0,155	0,2409	0,0375	0,0609	0,1017	0,175	0,2492
$H_{3 \max}, \text{мкм}$	22,0	15,8	8,7	19,0	10,0	13,0	5,6	16,7	21,0	15,0	16,0	11,7	19,0	19,9	17,0
$\varepsilon_3$	0,534	0,932	0,932	0,927	0,895	0,859	0,944	0,956	0,937	0,924	0,852	0,903	0,922	0,879	0,944
$\tau_0, \text{МПа}$	16,13					13,5					18,1				
$f_a$	0,0139					0,0116					0,0156				
$f_d$	0,0499	0,0501	0,0371	0,0549	0,0398	0,0441	0,0300	0,0522	0,0583	0,049	0,0483	0,0425	0,055	0,0546	0,0523
$f$	0,0588	0,064	0,0512	0,0688	0,0537	0,0557	0,0416	0,0638	0,0699	0,0606	0,0639	0,0581	0,0706	0,0702	0,0679
$F_d, \text{Н}$	6900	12 300	24 600	18 900	30 600	6800	14 600	13 400	18 100	25 400	8400	13 600	12 300	23 400	20 600
$D_c, \text{мм}$	20,117	20,1008	20,0854	20,0629	20,0179	20,1116	20,0987	20,0775	20,0525	20,009	20,1112	20,0995	20,0791	20,0425	20,0054
$L_{\phi}, \text{мм}$	0,1486	0,3352	0,5120	0,7703	1,2840	0,2106	0,3587	0,6027	0,8897	1,3820	0,2150	0,3495	0,5838	1,0040	1,4300
$q_N, \text{МПа}$	5046	3855	5516	2503	2692	3588	5019	2537	2061	1984	4105	4255	2123	2359	1482
$\tau, \text{МПа}$	296,7	246,7	282,4	172,2	144,5	199,8	208,7	161,8	144,1	120,2	262,3	242,2	149,8	165,6	100,6

Примечания. 1. Определение  $f, q_N, \tau$  выполнено без учета параметров очага деформации.  
2.  $R_{np} = 938 \text{ мкм}; H_{B3} = 1160 \text{ МПа}$ .

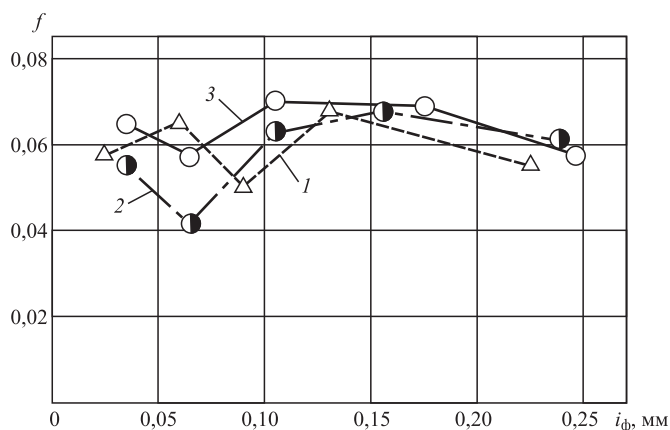


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения скольжения от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка с противодействием смазки):

1 —  $C = 0 \%$ ; 2 —  $C = 10 \%$ ; 3 —  $C = 20 \%$

нования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов на примере дюралюминия Д1Т, обладающего повышенной склонностью к адгезионному наростообразованию и схватыванию с инструментом [12, 19].

В частности, минимум коэффициента трения скольжения (см. рис. 9) в диапазоне  $i_{\phi} = 0,05...0,10$  мм связан с истечением смазки по канавкам РМР деформирующего элемента [11]. Уменьшение среднего контактного давления (см. рис. 10) при

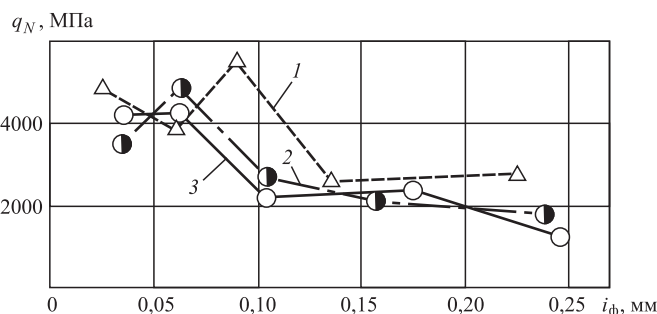


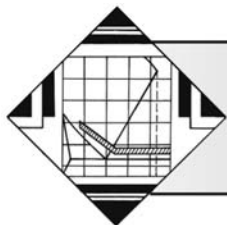
Рис. 10. Зависимость среднего нормального контактного давления от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка с противодействием смазки):

1 —  $C = 0 \%$ ; 2 —  $C = 10 \%$ ; 3 —  $C = 20 \%$

увеличении деформации  $i_{\phi}$  связано с тем, что фактическая ширина контакта  $L_{\phi}$  растет быстрее, чем суммарная сила дорнования  $F_d$  [6, 17]. Полученные результаты расширяют информационную базу алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" для системного структурно-параметрического синтеза [7, 8, 16, 17] инновационных методов дорнования отверстий [19, 20].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кузнецов А.М.** Технологические основы создания методов обработки в машиностроении: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: МАМИ, 1975. 317 с.
2. **Кузнецов В.А.** Синтез и исследование технологических структур методов механической обработки поверхностей деталей машин: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: МАМИ, 2000. 421 с.
3. **Сивцев Н.С.** Развитие теории и технологии дорнования отверстий в нестационарных условиях трения инструмента с заготовкой: дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск: ИЖГТУ, 2005. 298 с.
4. **Воронцов А.Л.** Промышленное апробирование результатов исследований совмещенного процесса редуцирования-дорнования // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 9. С. 3–10
5. **Энциклопедия** поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: ИРНТИУ, 2015. 396 с.
6. **Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю.** Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. Томск: ТПУ, 2005. 91 с.
7. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20–26.
8. **Трибологическая** концепция системного анализа-синтеза комбинированных методов деформирующе-режущей обработки / А.В. Щедрин и др. // Техника машиностроения. 2001. № 4 (32). С. 53–59
9. **Повышение** эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхностей рабочих элементов инструмента / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 14–19.
10. **Щедрин А.В., Таненгольц А.Б.** Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий // Машиностроитель. 2002. № 11. С. 20–23.
11. **Совершенствование** технологий применения смазочно-охлаждающих сред в комбинированных методах обработки проката / А.В. Щедрин и др. // Металлург. 2006. № 3. С. 56–57
12. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76–79.
13. **Технологические** возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 30–35.
14. **Исследование** явления технологического наследования в методах комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2020. № 1. С. 23–28.
15. **Исследование** закономерностей формирования параметров качества поверхностного слоя при резании по предварительно деформированному слою в методах комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2020. № 2. С. 21–26.
16. **Новое** научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 6. С. 18–25.
17. **Математическая** модель для прогнозирования сил дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях противодействия металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 2. С. 71–76.
18. **Влияние** характера и параметров микрогеометрии поверхности инструмента на коэффициент трения в методах комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 1. С. 24–30.
19. **Влияние** угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 20–24.
20. **Повышение** эффективности комбинированного дорнования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности отверстия обрабатываемой заготовки / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 7. С. 314–317.



Е.Н. Еремин, А.С. Лосев, И.А. Пономарев, С.А. Бородихин  
(Омский государственный технический университет)  
E-mail: weld\_techn@mail.ru

## Жаростойкость металла покрытий, наплавленных никельмарганцеволибденовой порошковой проволокой\*

Исследована жаростойкость покрытия из наплавленной стали 15Н8Г6МЗФТБ, подверженной поверхностному окислению при температуре 900 °С. Установлено, что основной прирост массы окалины для данной стали происходит в первые часы, а в дальнейшем эта зависимость практически прямолинейна. Средний прирост массы окалины металла такого покрытия при 900 °С составляет 0,0128 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Показано, что основой окалины металла состава 15Н8Г6МЗФТБ является гематит Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, а также MnO, обладающие защитными свойствами. Количество других фазовых соединений с высокими защитными свойствами незначительно. Покрытие из стали 15Н8Г6МЗФТБ можно использовать для нанесения на поверхности деталей, работающих в условиях повышенных температур.

**Ключевые слова:** наплавка, никельмарганцеволибденовая сталь, порошковая проволока, легирование, жаростойкость.

*The heat-resistance of coating from deposited steel 15N8G6M3FTB at temperature of 900 °C is studied. It is established that this dependence occurs in the first hours. The average mass gain of the metal scale of such coating at 900 °C is 0.0128 kg/(m<sup>2</sup>·h). It is shown that the basis of metal scale of the composition 15N8G6M3FTB is hematite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, as well as MnO, which have protective properties. The number of other phase compounds with high protective properties is negligible. The coating from steel 15N8G6M3FTB can be used for applying to the surface of parts operating at elevated temperatures.*

**Keywords:** surfacing, nickel-manganese-molybdenum steel, cored wire, alloying, heat-resistance.

### Введение

Различные детали нефтехимического, энергетического и другого оборудования работают в условиях изнашивания при повышенных температурах. При нагреве поверхность металла взаимодействует с кислородом с образованием окалины [1]. В результате изменения химического состава поверхностного слоя металла снижаются его механические и эксплуатационные свойства [2]. Поэтому проблема выхода из строя деталей, работающих в условиях не только износа, но и высоких температур является исключительно важной.

Повысить ресурс работы таких деталей можно наплавкой рабочих поверхностей порошковы-

ми проволоками [3, 4]. Широкое применение для наплавки износостойких покрытий, работающих при повышенных температурах, нашли проволоки на железохромистой основе 12Х2М1, 12Х13, 12Х15Г2, 30Х2В8 и др. [5–7].

В то же время все более широкое применение для наплавки находят стали с эффектом вторичного твердения в результате отпуска в определенном температурно-временном интервале [8–10]. Применение таких сталей в качестве наплавленного металла имеет ряд преимуществ перед металлом мартенситного класса: возможность наплавки без предварительного и сопутствующего подогревов; сравнительно невысокую исходную твердость, что позволяет производить механическую обработку наплавленного металла резанием; получение высоких эксплуатационных свойств в результате отпуска после механической обработки.

Особое внимание заслуживают экономно-легированные инструментальные мартенситно-

\*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01224).

стареющие стали [8, 11, 12]. Среди них наиболее изучены стареющие стали системы Fe—Ni. Для сталей этой системы характерно комплексное легирование, когда распад мартенсита сопровождается выделением частиц и упрочняющих фаз двух или нескольких типов.

В перспективных экономно-легированных сталях, содержащих пониженное количество никеля, в целях повышения их степени упрочнения в их состав вводят марганец и молибден [8, 11]. Такая композиция легирования используется в известной стали Н8Г6МЗ [11], применяющейся для изготовления конструкций повышенной прочности. Однако такая сталь имеет сравнительно невысокую твердость и, как следствие, низкую износостойкость и не может использоваться в качестве материала для наплавки упрочняющих покрытий.

Высокий эффект упрочнения сталей может обеспечиваться путем создания различных дисперсных промежуточных фаз. Эффективность упрочнения такими фазами определяется составом и строением выделяющихся частиц, размером, характером распределения в матрице, взаимодействием с ней, влиянием выделений на структуру [13, 14]. Эти факторы обуславливают служебные свойства стали. Известна возможность повышения прочностных характеристик мартенсита введением углерода [14]. Отмечается, что для сохранения высоких механических и технологических свойств его содержание не должно превышать 0,2 %. К эффективным фазам, вызывающим значительное упрочнение, относят карбиды, нитриды, интерметаллиды ванадия, титана, ниобия и комплексные соединения на их основе.

В связи с вышеизложенным, представляет интерес использование в качестве покрытия стали 15Н8Г6МЗ, легированной ванадием, титаном и ниобием.

Проведенными ранее исследованиями установлено, что такая сталь в результате старения имеет значительный эффект упрочнения [15] и обладает повышенной износостойкостью, однако ее жаростойкость не изучена.

**Цель работы** — исследование окалинообразования, изменения структуры и фазового состава стали системы Fe—C—Ni—Mn—Mo—V—Ti—Nb в результате воздействия высоких температур в воздушной атмосфере.

### Материалы и методика исследований

Объектом исследований являлся образец литой стали с покрытием, наплавленным порошковой проволокой, созданной на основе стали

15Н8Г6МЗФТБ, состава, %: 8,5 Ni; 6,0 Mn; 3,5 Mo; 3,0 FeV; 5,2 FeTi; 3,3 FeNb; 0,3 Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>; 17,6 Fe.

Для сравнения исследовали металл, полученный наплавкой хромовольфрамовой сталью 30Х2В8Ф, широко используемой для нанесения покрытий, работающих при повышенных температурах.

Испытания экспериментального состава металла покрытия на окалиностойкость (жаростойкость) проводили в условиях спокойной воздушной атмосферы по ГОСТ 6130—71. В качестве характеристики окалиностойкости выбран прирост массы образцов при температуре 900 °С за время испытаний 25 ч.

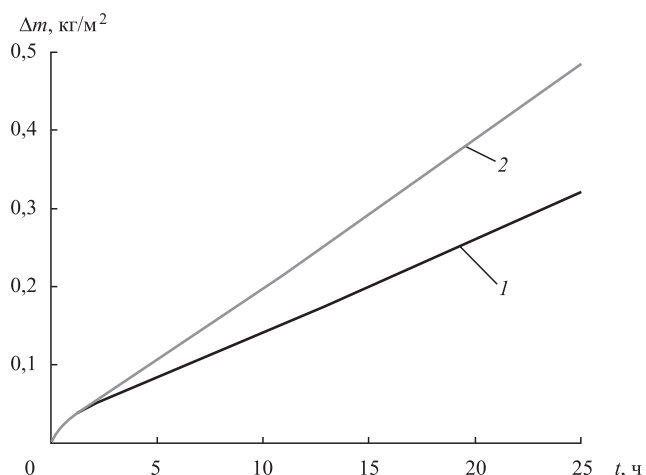
Металлографические исследования окисленных образцов проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JCM—5700 с энергодисперсионным спектрометром JED-2300.

Рентгенофазовый анализ продуктов окисления осуществляли на многофункциональном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Для обработки и анализа дифракционных спектров применили пакет программ Match! версии 3.8.1.151.

### Результаты исследований и их обсуждение

Изменение прироста массы металла, наплавленного порошковой проволокой состава 15Н8Г6МЗФТБ, и металла, наплавленного проволокой 30Х2В8Ф, в зависимости от времени выдержки в окислительной атмосфере представлены на рис. 1.

Как видно, основной прирост массы окалины на поверхности покрытия 15Н8Г6МЗФТБ происходит в первые часы, а в дальнейшем эта зависимость практически прямолинейна. Если за 1 ч испытаний прирост массы окалины составил около



**Рис. 1.** Изменение прироста массы  $\Delta m$  металла покрытий из сталей 15Н8Г6МЗФТБ (1) и 30Х2В8Ф (2) в зависимости от времени выдержки при 900 °С



0,0432 кг/м<sup>2</sup>, то за 5 ч — 0,0785 кг/м<sup>2</sup>, после 25 ч — только 0,3209 кг/м<sup>2</sup>. При этом толщина окалины после 1 ч испытаний при 900 °С составляет 46,79...49,83 мкм, а после 5 ч — 64,31...73,37 мкм. На поверхности образца, прошедшего 25 ч испытаний, образовался толстый слой темно-серой, рыхлой пузырчатой окалины, при охлаждении которого произошло частичное отслоение окалины с поверхности из-за возникновения внутренних напряжений. Толщина оставшейся части окалины составляет 200,18...244,49 мкм.

Показатели окалинообразования покрытия 30Х2В8Ф значительно хуже, чем 15Н8Г6МЗФТБ. Так, если за 1 ч испытаний прирост массы окалины составил около 0,0397 кг/м<sup>2</sup>, то за 5 ч — 0,0986 кг/м<sup>2</sup>, а после 25 ч — 0,4858 кг/м<sup>2</sup>. При этом толщина окалины после 1 ч испытаний при 900 °С составляет 44,17...52,29 мкм, а после 5 ч — 70,07...81,17 мкм. На поверхности образца стали 30Х2В8Ф после 25 ч толщина оксидного слоя значительно увеличилась и составила 491,67...519,37 мкм.

Для выявления причины высокой окалинотойкости металла, наплавленного порошковой проволокой 15Н8Г6МЗФТБ, проведены исследования структуры и фазового состава наплавленного металла и окалины.

Микроструктура шлифа боковой поверхности металла 15Н8Г6МЗФТБ с окалиной, полученной после выдержки 25 ч, с расположением точек сканирования приведена на рис. 2, химический состав сканированных областей — в табл. 1.

Из рис. 2 видно, что окалина слоистая, со множеством выходящих наружу полостей различной формы и размеров. В наружном слое окалины количество и дисперсность остатков не окисленного металла значительно меньше чем в слое, прилегающем к металлу.

Результаты химического анализа показывают, что концентрация Nb и Mo в металле повышается по мере приближения к переходному слою (точки № 1, 2, 3), а концентрация Ti, V, Mn, Ni снижается. В переходном слое (точка № 4) появляется азот и кислород, концентрация всех основных легирующих элементов кроме Ni высока. В последующем слое окалины (точка № 5) присутствуют в основном Fe, Mn, Ni. Непосредственно в поверхностном слое (точка № 6) присутствуют только Fe и Mn.

Полученные результаты говорят о формировании в процессе окисления химической микро неоднородности в наплавленном покрытии. По мере приближения к окалине наблюдается обеднение металла основными легирующими элементами. Снижение концентрации основных

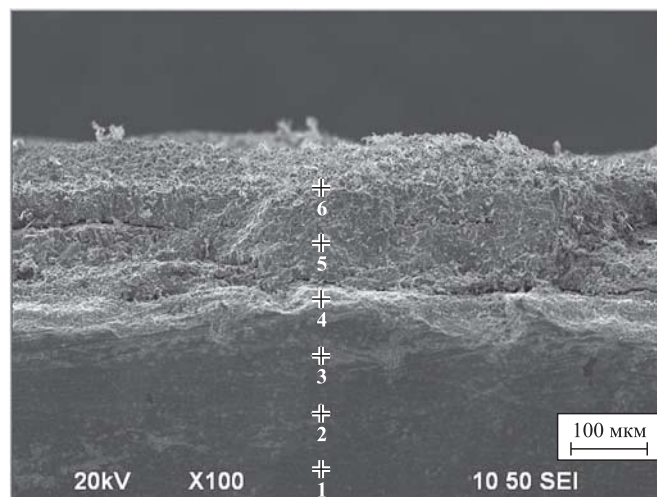


Рис. 2. Боковая поверхность шлифа с покрытием 15Н8Г6МЗФТБ с оксидным слоем после испытания на жаростойкость при 900 °С, 25 ч, с расположением областей сканирования в точках

Таблица 1

Химический состав, %, сканированных областей металла состава 15Н8Г6МЗФТБ после испытания на жаростойкость при 900 °С, 25 ч

Номер точки	N	O	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo
1	0	0	1,15	1,99	5,60	70,05	13,29	3,57	4,35
2	0	0	0,58	1,42	4,43	76,29	10,62	2,03	4,63
3	0	0	0,94	1,28	4,77	70,87	7,90	4,17	10,07
4	3,29	13,86	2,31	2,31	2,95	63,42	1,90	5,13	4,83
5	1,28	16,37	0,05	0	3,26	75,14	3,60	0,23	0,07
6	0	4,04	0	0	12,46	82,36	0,45	0	0,69

легирующих элементов связано с их активным участием в диффузионных процессах вследствие воздействия высоких температур [16].

Характерная структура поверхностного участка окалины с расположением точек сканирования приведена на рис. 3, химический состав сканированных объектов — в табл. 2.

Видно, что поверхностный слой окалины представляет собой смесь большей частью крупных частиц округлой формы размером до 30 мкм и небольшого количества мелких частиц также округлой формы размером до 5 мкм. Крупные частицы содержат в основном Fe и немного Mn (точки № 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9), более мелкие частицы содержат Fe и большое количество Mn (точки № 2, 3, 10, 11, 12, 13). Содержание всех основных легирующих элементов в частицах незначительно,

Таблица 2

Химический состав, %, сканированных областей поверхности оксидного слоя металла состава 15Н8Г6М3ФТБ после испытания на жаростойкость при 900 °С, 25 ч

Номер точки	N	O	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo
1	4,82	19,76	0,34	0	7,85	67,23	0	0	0
2	4,60	15,75	0	0	41,62	38,03	0	0	0
3	5,04	16,57	0	0,07	40	37,85	0	0	0,47
4	2,66	15,19	0,21	0,18	6,11	75,38	0,27	0	0
5	0	8,82	0	0	4,90	85,54	0,21	0,53	0
6	0	20,74	0,14	0,04	5,17	73,50	0,41	0	0
7	6,48	18,07	0	0	3,73	71,27	0,45	0	0
8	2,16	13,32	0	0	5,55	78,49	0	0	0,48
9	7,60	15,25	0	0,21	4,35	70,81	0,42	0,91	0,45
10	12,48	11,66	0,23	0	35,58	38,68	0	1,01	0,36
11	0,32	0,48	0,20	0	37,79	60,61	0,46	0,14	0
12	4,22	11,46	0	0	34,41	49,91	0	0	0
13	9,78	15,72	0	0,18	32,78	40,66	0	0,09	0,79

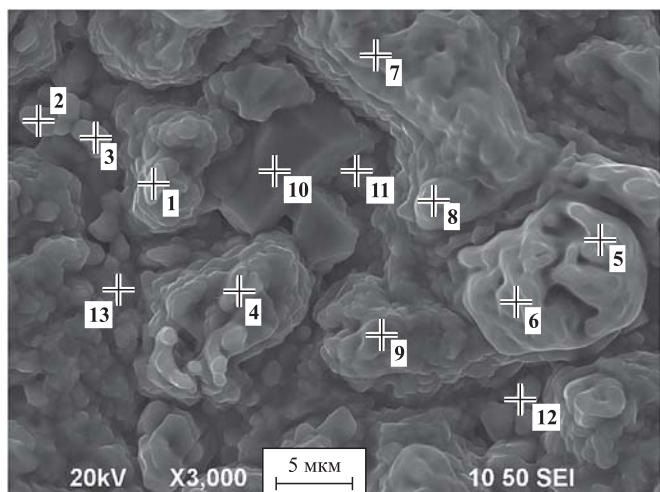


Рис. 3. Поверхность оксидного слоя покрытия 15Н8Г6М3ФТБ после испытания на жаростойкость при 900 °С, 25 ч, с расположением областей сканирования в точках

либо они вовсе отсутствуют. Практически во всех объектах содержатся азот и кислород.

Результаты рентгеноструктурного анализа окалина покрытия 15Н8Г6М3ФТБ после выдержки 25 ч при температуре 900 °С приведены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что основной окалины покрытия 15Н8Г6М3ФТБ большей частью являются Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и MnO. В то же время отмечено наличие таких соединений как Fe<sub>3</sub>C<sub>0,279</sub>N<sub>1,116</sub>, Ni<sub>0,906</sub>Ti<sub>0,094</sub>, Ni<sub>3</sub>C, TiC, TiV.

Таким образом, наличие в составе окалина соединений с высокими защитными свойствами обуславливает повышенную окалиностойкость наплавленного металла. Прирост массы окалина такого металла в 1,5 раза меньше, чем у металла, наплавленного проволокой 30Х2В8Ф.

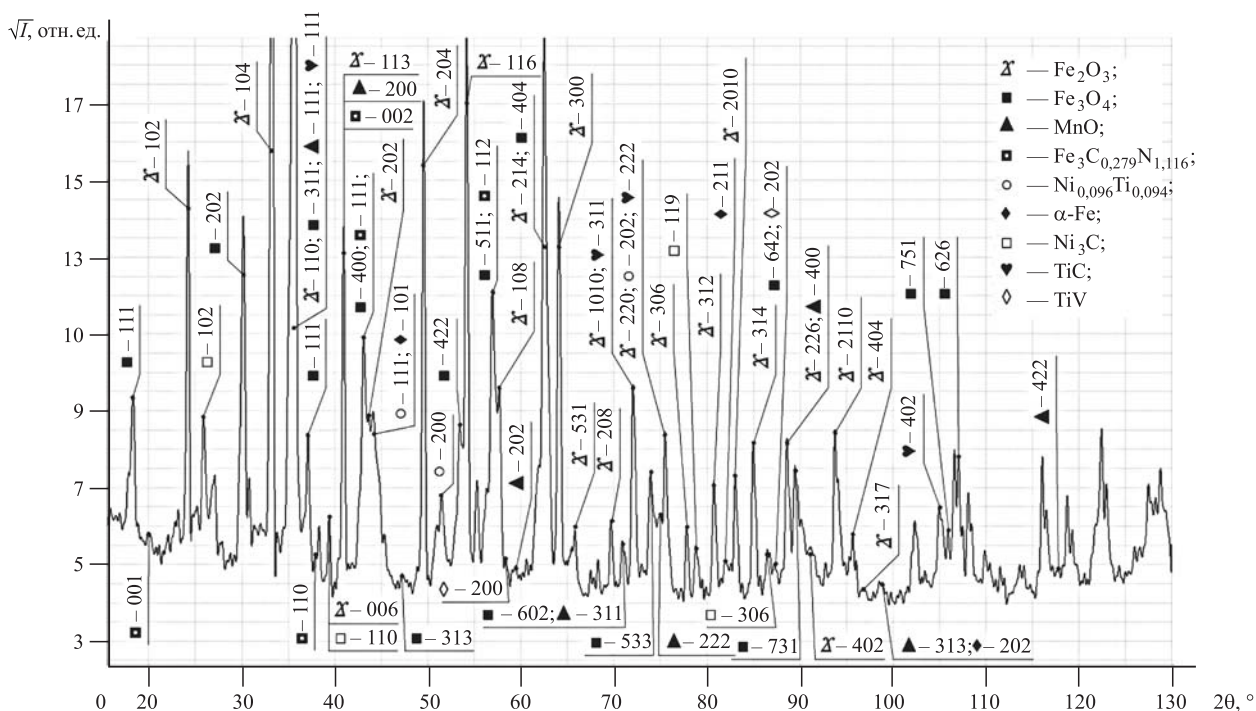


Рис. 4. Дифрактограмма окалина на покрытии из 15Н8Г6М3ФТБ после выдержки при температуре 900 °С, 25 ч

## Выводы

Наплавленное покрытие из стали 15Н8Г6МЗФТБ подвержено незначительному поверхностному окислению. Средний прирост массы окисления металла такого покрытия при 900 °С составляет 0,0128 кг/(м<sup>2</sup>·ч), что в 1,5 раза меньше, чем у металла, наплавленного проволокой 30Х2В8Ф. Порошковую проволоку ПП15Н8Г6МЗФТБ можно использовать для нанесения покрытий с высокими показателями износостойкости и жаростойкости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тепляков Ю.Н.** Высокотемпературное окисление металлов. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2017. 215 с.
2. **Орыщенко А.С.** Жаростойкие, жаропрочные сплавы. СПб.: Наука, 2011. 191 с.
3. **Рябцев И.А.** Наплавка деталей машин и механизмов. Киев: Екотехнологія, 2004. 159 с.
4. **Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А.** Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) // Автоматическая сварка. 2010. № 12. С. 34—42.
5. **Толстых Л.Г., Фурман Е.Л.** Наплавочные материалы и технологии наплавки. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2004. 102 с.
6. **Коротков В.А., Михайлов И.Д., Бабайлов Д.С.** Исследование наплавленного слоя опорных роликов

машин непрерывного литья заготовок // Сварочное производство. 2007. № 1. С. 30—33.

7. **Наплавочные материалы стран — членов СЭВ /** под ред. И.И. Фрумина. Киев — Москва, 1979. 620 с.
8. **Малинов Л.С., Малинов В.Л.** Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. 346 с.
9. **Кондратьев И.А., Рябцев И.А., Черняк Я.П.** Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситно-старееющей стали // Автоматическая сварка. 2006. № 4. С. 50—53.
10. **Рябцев И.А., Кусков Ю.М., Рябцев И.И.** Наплавочный сплав с повышенным эффектом вторичного твердения // Материаловедение. 2006. № 12. С. 37—41.
11. **Бирман С.Р.** Экономнолегированные мартенситно-старееющие стали. М.: Металлургия, 1974. 208 с.
12. **Русаненко В.В., Еднерал А.Ф.** Многофункциональные мартенситно-старееющие сплавы // Физика металлов и материаловедение. 2003. Т. 6. Вып. 1. С. 108—113.
13. **Чернышова Г.А., Кобелева Л.И., Шебо П., Панфилов А.В.** Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями. М.: Наука, 1993. 272 с.
14. **Гольдштейн М.И., Фарбер В.М.** Дисперсионное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
15. **Structure and properties of the weld metal N8G6M3FTB after aging / E.N. Eremin, A.S. Losev, I.A. Ponomarev et al. // AIP Conference Proceedings: Oil and Gas Engineering. 2019. Vol. 2141. P. 040004-1-040004-6. Doi: doi.org/10.1063/1.5122123.**
16. **Анастасиади Г.П.** Формирование химической микронеоднородности в литейных сплавах. СПб.: Политехника, 1991. 148 с.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

## "УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,  
тел.: (495) 785-6069,  
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

Е.А. Жуковский, А.В. Артамонов, Л.Х. Балдаев, В.М. Неуймин  
(ООО "Технологические системы защитных покрытий", Москва, г. Щербинка)  
E-mail: v.neuimin@tspc.ru

## Моделирование горения и течения продуктов сгорания по тракту горелки К-2 для газотермического напыления защитных покрытий

Метод конечных объемов для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса в модели SST совместно с уравнением для полной энергии с учетом вязкости применен для анализа горения и течения продуктов сгорания в тракте керосин-кислородной горелки, используемой для высокоскоростного газопламенного напыления защитных покрытий (технология HVOF). Расчитаны распределения температуры пламени и скорости течения смеси газов. Найден наиболее теплонапряженный участок устройства. Сравнены две методики расчета — моделирование химической реакции в камере сгорания и истечение смеси продуктов реакции окисления горючего фиксированного (замороженного) состава, определенного термодинамическим расчетом изобарной камеры сгорания. Термодинамический расчет проводили в рамках специально созданной для этого компьютерной программы, основанной на минимизации термодинамического потенциала продуктов сгорания. Сравнительный анализ проведен для обедненной, обогащенной и стехиометрической смеси горючего и окислителя. Сделан методически важный вывод о возможности замены сложного расчета с химической реакцией более простым расчетом с течением предварительно определенного термодинамически равновесного состава газов. Ошибка при этом составила около 3 %.

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, HVOF горелка, уравнения Рейнольдса, метод конечных объемов, газодинамика продуктов сгорания

*The finite volume method to solve of the Reynolds-averaged Navier—Stokes equations in the SST model together with the equation for the total energy with the viscosity terms is used to analyze of combustion and combustion products flow in kerosene-oxygen torch used for protective coatings high-velocity spraying (HVOF technology). The distributions of the flame temperature and the flow velocity of the gas mixture are calculated. The most heat-stressed section of the device is found. Two calculation methods are compared. These are the modeling of chemical reaction in combustion chamber and the flow of mixture of oxidation reaction products of fixed (frozen) composition determined by thermodynamic calculation of isobaric combustion chamber. The thermodynamic calculation is carried out by means of specially created computer code. It is based on the thermodynamic potential minimization. Comparative analysis is carried out for lean, enriched, and stoichiometric mixture of fuel and oxidizer. Methodically important conclusion is made on the possibility of replacing of complex calculation with chemical reaction by simpler calculation with predetermined thermodynamically equilibrium gases composition. The error is about 3 %.*

**Keywords:** thermal spraying, HVOF torch, Reynolds equations, finite volume method, gas dynamics of combustion products.

### Введение

Газотермические методы создания многофункциональных покрытий прочно вошли в технологии производства и ремонта ответственных деталей устройств, работающих в неблагоприятных внешних условиях (например, при комбинации высоких тепловых и динамических нагрузок, при работе в агрессивных средах). Одним из методов нанесения покрытий является технология высокоскоростного газопламенного напыления. В основе технологии лежит специальное напылительное устройство — пушка, прототипом которой является жидкостный ракетный двигатель. В качестве горючего могут быть использованы как

жидкости, так и газы, а в качестве окислителя используется либо чистый кислород (HVOF — high velocity oxygen fuel), либо воздух (HVOF — high velocity air fuel). Типичным примером технологии HVOF является напыление с помощью керосин-кислородных горелок. Такие устройства позволяют получать высокоскоростные и высокотемпературные потоки продуктов сгорания, в которые вводят специальные порошки либо суспензии для осаждения их на детали, где и формируется защитное покрытие [1]. Свойства покрытий во многом определяются свойствами несущего частицы горячего газового потока. Его анализ актуален для построения адекватной модели технологического процесса.

### Устройство горелки и принцип работы

Схема устройства изображена на рис. 1. Топливо, состоящее из горючего (керосина) и окислителя (кислорода) направляется в камеру сгорания через головку камеры сгорания, в которой расположены центробежная форсунка для впрыска горючего, отверстия для ввода окислителя и свеча зажигания. Для придания потоку горячих газообразных продуктов реакции горения топлива сверхзвуковой скорости камера сгорания на выходе имеет сужающуюся и расширяющуюся части (сопло Лавала). За критическим сечением располагается узел ввода порошка в поток инертного газа (аргона). Далее следует длинный цилиндрический насадок — сопло, в котором порошок нагревается и ускоряется до температур и скоростей, необходимых для формирования покрытия на детали, располагаемой на некотором расстоянии от среза сопла.

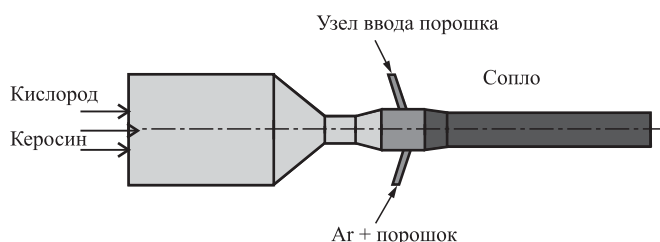


Рис. 1. Схема горелки К-2

Параметры работы горелки: расход кислорода в режимах горения — 600...900 л/мин, расход керосина в режимах горения — 15...26 л/ч. Горелка охлаждается водой, теплосъем на уровне 60 кВт.

**Цель работы** — найти распределение температуры по длине тракта, скорость газов на срезе сопла, конвективный поток в стенку камеры сгорания и сопла.

### Адиабатическая температура горения и состав продуктов сгорания

При попадании в камеру сгорания керосин быстро испаряется и компоненты топлива оказываются перемешанными. Скорость горения при этом лимитируется турбулентным перемешиванием горючего и окислителя. Фронт горения условно плоский. Горючее — керосин, моделируется углеводородом  $C_{12}H_{23}$ , окислитель — кислород  $O_2$ .

Для нахождения температуры в камере сгорания и равновесных продуктов реакции окисления горючего была создана программа, использующая

алгоритм минимизации термодинамического потенциала [2]. При минимизации итерационным методом Ньютона—Рафсона решается система нелинейных уравнений. Диагонализация матриц линеаризованных уравнений на каждом шаге итераций выполнена методом LU-разложения по алгоритму Краута [3—5]. Языком программирования был выбран VBA, что позволило реализовать программу термодинамического расчета в виде приложения для программы Excel, обладающей хорошими возможностями аналитики, построения диаграмм и графиков. Интерфейс пользователя создан на базе инструмента форм VBA.

Типичный состав продуктов реакции окисления горючего:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $O_2$  и более легкие, по сравнению с исходным, углеводороды (их доля, как показывает расчет, ничтожно мала в интересующей нас области параметров). Стехиометрическое соотношение окислитель/горючее для указанной реакции составляет 3,3947 (коэффициент избытка окислителя равен 1). При расчете были приняты следующие значения плотностей: 1,429 г/л для кислорода при нормальных условиях и 819 г/л для керосина. Расчеты адиабатических температур в изобарной камере сгорания и равновесного состава продуктов сгорания были проведены в диапазонах расходов керосина 15...26 л/ч и кислорода 600...900 л/мин с помощью созданной программы. Для каждого из этих составов топлива необходимые для расчета давления в камере сгорания известны из эксперимента. Поверхность адиабатических температур представлена на рис. 2.

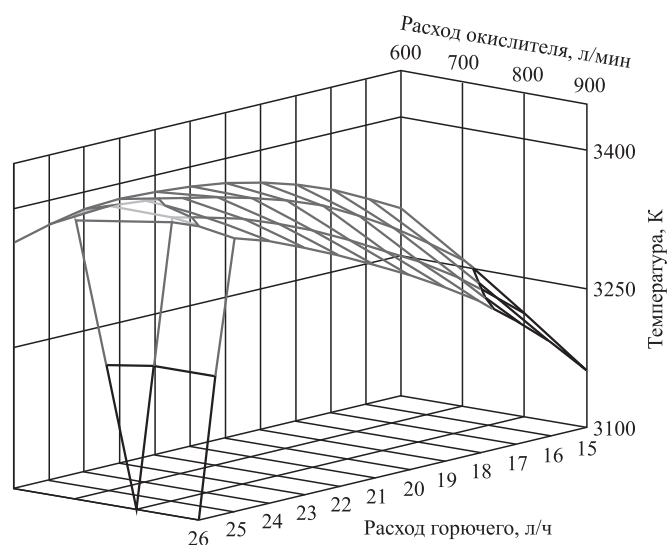


Рис. 2. Адиабатические температуры в зависимости от состава топлива

**Свойства продуктов сгорания  
в зависимости от состава топлива**

Параметр	Состав топлива		
	№ 1	№ 2	№ 3
Соотношение расхода: окислитель, л/ч/ горючее, л/мин	800/25	600/26	900/15
Коэффициент избытка окислителя	0,987	0,712	1,850
Давление в камере сгорания, бар	7,0	5,9	6,1
Температура горения, К	3392	3364	3160
Массовый расход топлива, г/с	24,72	20,22	24,84
Массовая доля:			
CO	0,26788	0,44294	0,07330
CO <sub>2</sub>	0,30473	0,22811	0,31833
H	0,00148	0,00243	0,00033
H <sub>2</sub>	0,00382	0,00966	0,00071
H <sub>2</sub> O	0,20081	0,22824	0,13504
O	0,02745	0,01282	0,02394
OH	0,06892	0,04955	0,04853
O <sub>2</sub>	0,12491	0,02625	0,39982
Молярная масса смеси, кг/кмоль	24,589	22,025	28,675
Показатель адиабаты смеси $\gamma$	1,1212	1,1282	1,1218

Для моделирования были выбраны три состава топлива — близкий к стехиометрии, максимально обедненный и максимально обогащенный по горючему. Расчетные данные для этих составов приведены в таблице.

**Геометрия, сетка моделируемой  
области течения и граничные условия**

В соответствии с конструктивными размерами горелки была построена трехмерная модель расчетной области. Вследствие осевой симметрии рассматриваемой задачи расчетная область ограничена сектором (рис. 3) для экономии ресурсов компьютера и времени расчета.

На данной рабочей области в сеточном генераторе была построена гексаэдрическая блочная сетка, на которой в дальнейшем выполнялся расчет течения продуктов сгорания по тракту горелки. После построения расчетная сетка передается в модуль для подготовки задачи и передачи ее в решатель. Расстановка граничных условий в расчетной области поясняется на рис. 4 (см. обложку).

**Моделирование и результаты расчета**

В первую очередь проведем моделирование течения продуктов сгорания по тракту горелки для состава, близкого к стехиометрии. Работа центробежной форсунки для подачи керосина не моделируется в данной работе. Мы ограничимся следующими постановками задачи:

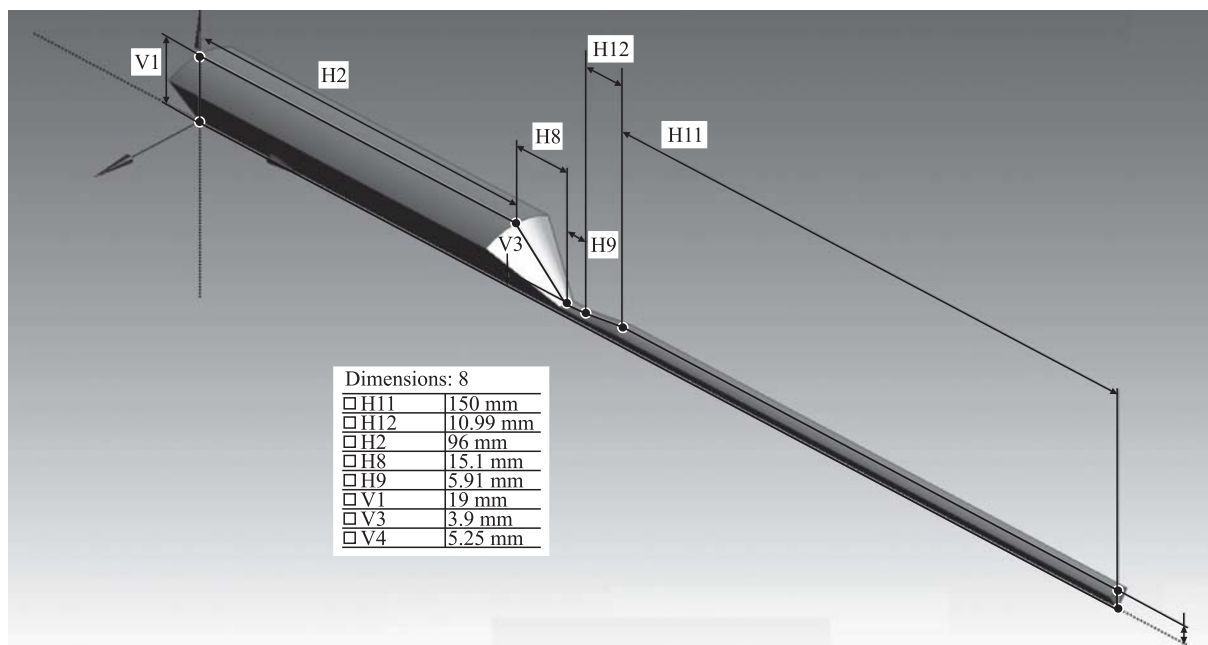


Рис. 3. Расчетная область

1. Подача на вход рабочей области смеси продуктов сгорания фиксированного состава, определенного из соображений термодинамического равновесия для данного состава топлива (см. таблицу).

2. Подача на вход рабочей области горючего и окислителя в определенном соотношении и моделирование реакции горения в предположении очень быстрой химической реакции, так что скорость горения определяется скоростью турбулентного перемешивания компонентов топлива — модель Eddy Dissipation.

Водяное охлаждение стенок сопла и камеры сгорания будем моделировать заданием неадиабатической стенки с постоянной температурой 100 °С.

Используем метод конечных объемов для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса в модели SST [6] совместно с уравнением для полной энергии с учетом вязкости со стандартными параметрами этой модели в ANSYS CFX. Уровень среднеквадратичных невязок для импульсов и энергии системы и турбулентных характеристик устанавливается на уровне  $10^{-4}$ , требуется соблюдение баланса потоковых характеристик на уровне 0,01.

### Результаты расчета смеси фиксированного состава

В результате расчета найдены следующие характеристики течения. Как следует из рис. 5 (см. обложку), в критической области имеется особенность на графике числа Маха. Такое поведение авторы связывают с наличием скачка давления в критической области, вызванного резким изменением профиля при переходе от сужающегося участка камеры сгорания в область критического сечения, что наглядно видно на рис. 6 (см. обложку), где изображен рассчитанный градиент давления.

Поле температуры приведено на рис. 7 (см. обложку). На врезке показана область холодной стенки ( $T = 373$  К) с пристеночным слоем. Для нахождения наиболее теплонапряженного участка устройства рассчитана плотность конвективного теплового потока в стенку (рис. 8, см. обложку).

Как следует из расчета, наиболее теплонапряженным участком с плотностью теплового потока около 3 МВт/м<sup>2</sup> является область перехода в критическое сечение. Конструкция охлаждения устройства должна обеспечить наибольший теплосъем с сопла и области критического сечения. При пересчете на площадь всего устройства получаем выделяющуюся мощность теплового конвективного потока на уровне 50 кВт, что согласуется

с начальными данными эксперимента и служит обоснованием для выбора температуры стенки на уровне 100 °С.

### Моделирование химической реакцией горючего и окислителя

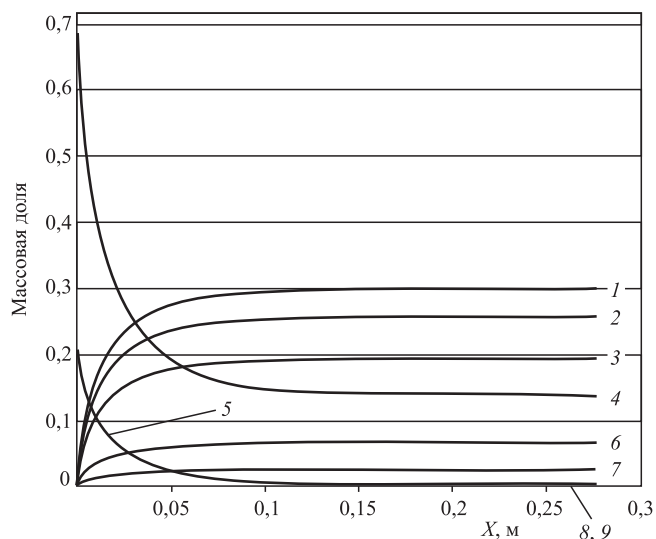
Во второй постановке задачи мы моделируем реакцию  $C_{12}H_{23} + O_2$  для стехиометрического состава, что очень близко к случаю состава топлива 800/25. Стехиометрические коэффициенты реакции найдены исходя из известных массовых долей продуктов реакции. Применяли модель реакции Eddy Dissipation, т.е. считали, что характерное время химической реакции лимитируется только временем турбулентного смешения компонентов топлива. В этой постановке на вход расчетной области подаем горючее и окислитель с начальной температурой 20 °С и массовым расходом топлива 4,12 г/с. В секторной постановке расход 24,72 г/с, приходящийся на все устройство, нужно пересчитать на задействованную площадь входа: в нашем случае брали сектор 60°, т.е. на вход в расчетную область нужно подать в 6 раз меньше топлива.

Рассмотрим расчетное распределение температуры по тракту горелки в этом случае и сравним со случаем подачи на вход расчетной области уже готовой смеси продуктов сгорания с фиксированным составом (рис. 9, см. обложку).

Как следует из результатов расчета, распределение температуры мало отличается для этих двух случаев в критической области и сопле. Аналогично для скоростей течения имеем следующий результат, приведенный на рис. 10 (см. обложку).

Как видно из рис. 10, распределения также оказываются близкими для двух рассматриваемых случаев. На графике изображены скорости вдоль оси. Черным цветом дана разность скоростей. Она не превышает 55 м/с, что составляет около 3 % погрешности при замене одного графика другим.

Рассмотрим расчетное распределение массовых долей продуктов реакции на оси устройства (рис. 11). Как следует из результатов расчета, состав смеси продуктов сгорания становится постоянным по тракту после критического сечения, что вполне соответствует нашему представлению о протекании реакции в основном в камере сгорания. При этом массовые доли получившейся смеси соответствуют расчетным для случая с фиксированным составом смеси. Это оправдано, так как стехиометрические коэффициенты были найдены, исходя из данного состава смеси, и кроме того, при решении специально отслеживались балансовые характеристики системы на уровне 1 %.



**Рис. 11. Распределение массовых долей продуктов реакции на оси устройства:**  
 1 — CO<sub>2</sub>; 2 — CO; 3 — H<sub>2</sub>O; 4 — O<sub>2</sub>; 5 — керосин; 6 — OH; 7 — O; 8 — H<sub>2</sub>; 9 — H

Отметим, что невязки по массовым долям были стабильны, начиная с 1000-й итерации и находились на уровне 10<sup>-3</sup> в ходе решения. Невязки по энергии были на уровне 10<sup>-4</sup>, по импульсам — на уровне 10<sup>-5</sup>. Вычисления были остановлены по стабилизации невязок по массовым долям: по достижении примерно 1000 итераций невязки перестали изменяться и оставались неизменными на указанном уровне вплоть до останова вычислений (всего около 2000 итераций).

Расчеты на сетке с другим измельчением показали хорошую устойчивость результатов к изменению размеров сетки. Это позволяет считать сходимость по сетке достигнутой.

Приведенные результаты и сравнение двух случаев решения задачи позволяют сделать вывод о возможности рассмотрения течения продуктов сгорания на выходе камеры сгорания и далее по тракту устройства в постановке с фиксированным составом смеси, т.е. без моделирования реакции, что существенно стабилизирует сходимость задачи и облегчает расчет.

Расчеты с фиксированными составами смеси на входе в расчетную область были проделаны для случаев обогащенного и обедненного топлива (см. таблицу). Распределение температур течения на срезе сопла для этих случаев даны на рис. 12 (см. обложку).

Как следует из рисунка, обедненная смесь горит при более низкой температуре и дает меньшую температуру газов на выходе из устройства. В случае обедненной смеси следует ожидать

меньших скоростей газов и меньших температур и скоростей движения частиц порошка на выходе из устройства и при подлете их к напыляемой подложке. Оба эти обстоятельства ухудшат адгезионные характеристики покрытия, поэтому режимы с обедненными составами топлива следует применять с осторожностью. К тому же в этих режимах больше вероятность окисления частиц порошка избыточным кислородом.

Рассмотрим теперь распределение скоростей на срезе сопла для этих трех случаев составов топлива, представленные на рис. 13 (см. обложку).

Понижение скорости на срезе сопла для случая обедненной смеси можно объяснить из следующих соображений. Число Маха  $M$  для газа на срезе сопла определяется отношением площади среза сопла  $S$  к площади критического сечения  $S_c$  и показателем адиабаты  $k$ , согласно формуле [5]:

$$\frac{S}{S_c} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) M^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2}} \right\}^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (1)$$

При этом скорость потока  $v$  и число Маха  $M$  по определению связаны через локальную скорость звука  $c$ :

$$v = Mc; \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{\mu} T}, \quad (3)$$

где  $R = 8314,5$  Дж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная;

$\mu$  — молярная масса, кг/кмоль.

Как видно из таблицы, показатели адиабаты для трех смесей близки, следовательно, близки будут и числа Маха на срезе сопла, так как геометрия остается постоянной, что можно видеть на рис. 14 (см. обложку).

Согласно выражению для скорости звука (3), сама скорость звука, а с нею и скорость потока (2) при постоянном числе Маха будет ниже для случая обедненной смеси из-за меньшей температуры и большей молярной массы смеси.

### Выводы

Данная работа носит методический характер. Для рассмотрения вопроса о детальном сравнении расчета с экспериментом авторы не располагают данными эксперимента по внутренним параметрам тракта горелки (доля тех или иных



продуктов горения, характер течения продуктов горения по тракту горелки, изменение параметров продуктов горения внутри горелки и др.). Представляется целесообразным в дальнейшем рассчитать течение затопленной струи продуктов сгорания в атмосфере воздуха в целях сравнения расчетных параметров затопленной струи с наблюдаемыми, а также ввести в газовый поток частицы порошка и рассчитать их модельные характеристики для сравнения с экспериментом.

При дальнейшем моделировании динамики и нагрева частиц порошка в тракте горелки и, что очень важно, за ее пределами можно обоснованно ограничиться решением задачи с продувкой смесью продуктов сгорания фиксированного состава при расчете выходных температур, скоростей газов и движения частиц порошка.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Газотермическое** напыление: учеб. пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: ООО "Старая Басманная", 2015. 540 с.
2. **Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А.** Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. В 5 т. Т. 1. Методы расчета. М., 1971. 266 с.
3. **Самарский А.А., Гулин А.В.** Численные методы. М.: Наука, 1989.
4. **Ортега Дж.** Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. М.: Мир, 1991.
5. **Писсанецки С.** Технология разреженных матриц. М.: Мир, 1988.
6. **Ramsey Ch.** NASA turbulence modeling resource. <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>.
7. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Наука, 1987. 840 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



# СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

*Под общей редакцией А.Г. Сулова*

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

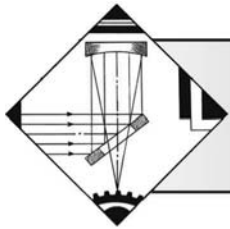
Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

**ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ**

по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)



**И.А. Безбородов**

(ООО Научно-технологический центр "Детонация", г. Новосибирск)

E-mail: bezborodov1942@yandex.ru

## Детонационно-газовое напыление покрытий как управляемая система направленного формирования адгезии покрытий при восстановлении элементов механических систем автотракторных ДВС

*Представлена разработка многофакторной математической модели взаимосвязи параметров режима детонационно-газового напыления и уровня остаточных напряжений с прочностью сцепления покрытий. Приведен расчетный метод определения требуемой прочности сцепления напыляемых покрытий для восстановления шеек коленчатых валов ДВС разной мощности. Общие результаты исследований представлены системой уравнений для компьютерной программы условной оптимизации режимов детонационно-газового напыления для групповых технологий восстановления механических систем.*

**Ключевые слова:** детонационно-газовое напыление, математическая модель, прочность сцепления, диаметр частиц напыляемого материала, содержание кислорода в газовой детонационной смеси, технологические остаточные напряжения, система уравнений для компьютерной программы, оптимизация параметров.

*The development of multi-factor mathematical model of the relationship between the parameters of the detonation-gas deposition mode and the adhesion strength of the coating, as well as the results of the formation of the technological residual stresses level from the influence of the coating thickness are presents. Calculated method for determining of the minimum adhesion strength of sprayed coatings for restoring of the necks of crankshafts of internal combustion engines of different power is given. The general results are presented by system of equations for computer program for conditional optimization of detonation-gas deposition modes for the directional formation of properties of restored crankshaft necks of automobile and tractor internal combustion engines of different power.*

**Keywords:** detonation-gas deposition, mathematical model, adhesion strength, sprayed material particles diameter, oxygen content in gas detonation mixture, technological residual stresses, set of equations for computer program, parameter optimization.

### Введение

Восстановление деталей машин и оборудования напылением является перспективным вследствие универсальности данного способа — он обеспечивает технологическую совместимость широкого класса материалов. Особенно процессы напыления покрытий динамично развиваются применительно для восстановления коленчатых валов автотракторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1, 2]. Результаты исследований покрытий, создаваемых напылением, отражены в десятке монографий и в сотнях научных статей. Повышение эффективности процесса напыления достигается путем совершенствования технических параме-

тров, обеспечивающих, например, сверхзвуковые скорости при детонационно-газовом напылении.

Обычно исследования технологических способов формирования свойств элементов восстановления навливаемых и (или) упрочняемых элементов механических систем проводят по следующим направлениям: 1) установление закономерностей взаимосвязи технологических параметров с косвенными параметрами, характеризующими работоспособность покрытий; 2) установление зависимостей технологических управляемых параметров режима детонационного напыления с параметрами, определяющими работоспособность механической системы. Например, за параметры оптимизации обычно принимают температуру или скорость

Таблица 1

Значения управляемых параметров режима детонационного напыления для кодовых уровней факторов

Обозначение технологических параметров режима напыления	Уровни значений факторов		
	-1	0	+1
$L_n(x_1)$ — дистанция от среза ствола до напыляемой поверхности, мм	50	100	150
$S_{пм}(x_2)$ — глубина ввода порошка в канал ствола детонационной установки, мм	200	400	600
$d_ч(x_3)$ — диаметр частиц напыляемого порошкового материала, мкм	20	50	80
$O_2(x_4)$ — содержание кислорода в детонационной газовой смеси, %	25	50	75
$g_m(x_5)$ — разовая порция загрузки напыляемого порошка, мг	50	75	100
$Rz(x_6)$ — высотный параметр шероховатости напыляемой поверхности, мкм	20	50	70

соударения частиц с напыляемой поверхностью [3, 4]. Однако такие закономерности имеют ограниченные возможности в направленном формировании эксплуатационной надежности механических систем [5, 6]. Следовательно, максимальные возможности детонационно-газового способа напыления покрытий могут быть реализованы только при комплексном благоприятном сочетании уровней параметров режима детонационно-газового напыления. Для этого необходимо получить многофакторную математическую модель, устанавливающую взаимосвязь всех технологических управляемых параметров с прочностью сцепления напыляемого покрытия [7].

**Цель работы** — разработка системы уравнений для компьютерной программы направленного формирования прочности сцепления покрытий при восстановлении механических систем.

### Результаты исследования

Для реализации многофакторного эксперимента была изучена априорная информация о закономерностях влияния каждого фактора на параметры оптимизации детонационных покрытий. На рис. 1 представлена схема системы взаимосвязей управляемых технологических параметров режима детонационно-газового напыления с параметрами оптимизации, определяющими работоспособность напыляемых покрытий. Технологические управляемые параметры режима напыления представлены в табл. 1.

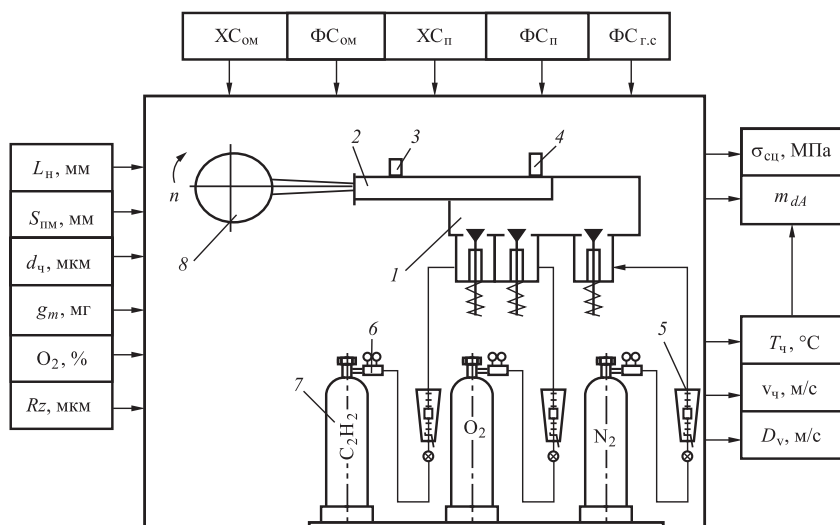


Рис. 1. Схема технологической среды направленного формирования свойств детонационных покрытий:

1 — блок приготовления детонационной смеси; 2 — ствол детонационной установки; 3 — дозатор порошковой смеси; 4 — свеча зажигания; 5 — ротаметр расхода газа; 6 — регулировочный кран с манометром; 7 — баллон с газом; 8 — напыляемая деталь

Выходные параметры оптимизации:  $\sigma_{сц}$  — прочность сцепления покрытия с напыляемой поверхностью, МПа;  $m_{dA}$  — число межатомных расстояний;  $T_ч$  — температура частиц в момент контакта с напыляемой поверхностью, К;  $v_ч$  — скорость соударения частиц с напыляемой поверхностью, м/с;  $D_v$  — скорость детонации, м/с.

Константы:  $XС_п$  — химический состав напыляемого порошка;  $ФС_п$  — физические свойства напыляемого порошка;  $T_п$  — температура напыляемой поверхности, К;  $XС_ом$  — химический состав материала основы напыляемой поверхности;  $ФС_ом$  — физические свойства основного металла напыляемой поверхности;  $ФС_г.с$  — физические свойства детонирующей газовой смеси.

На основании априорной информации были выбраны численные значения пяти управляемых технологических параметров режима детонационно-газового напыления на нижнем (-1), среднем (основном) и верхнем (+1) уровнях. В табл. 1 представлены численные значения управляемых факторов для их кодового обозначения соответствующего уровня. Для разного сочетания значений уровней пяти факторов были проведены опыты по специальной матрице планирования эксперимента. Для этого в качестве плана эксперимента

была реализована 1/4 — реплики ( $2^{5-2}$ ) от полного факторного эксперимента  $2^5$ . Принятая реплика задана генерирующими соотношениями  $x_4 = x_1x_2$ ;  $x_5 = x_1x_2x_3$ .

В табл. 2 представлена матрица планирования с результатами трехкратных параллельных опытов с расчетом средних значений отклика по прочности сцепления напыляемого покрытия.

Значения коэффициентов линейной модели определяли по следующей формуле:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}y_j, \quad (1)$$

где  $x_{ij}$  — кодированное значение ( $\pm 1$ )  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте;

$y_j$  — значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте;

$N$  — число опытов в матрице планирования эксперимента.

После определения всех коэффициентов получено линейное уравнение регрессии формирования прочности сцепления покрытия в следующем виде:

$$y_j = 124,5 + 3,1x_1 + 11,5x_2 - 23,1x_3 + 12,5x_4 + 2,4x_5. \quad (2)$$

Дисперсию  $S_y^2$  параметра оптимизации вычисляли по результатам четырех опытов в центре плана, т.е. на уровне  $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = 0$ . Результаты расчета параметра оптимизации представлены в табл. 3.

Дисперсия параметра оптимизации определяется по следующей формуле:

$$S_y^2 = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^N (y_u - \bar{y})^2,$$

где  $y_u, \bar{y}$  — соответственно опытное значение и среднее расчетное значение параметра оптимизации в  $u$ -м опыте центра плана эксперимента;

$f$  — число степеней свободы, определяемое по соотношению  $f = N - (k + 1)$ , где  $k$  — число факторов, равное 5.

Дисперсии коэффициентов регрессии с учетом значения  $S_y^2$  составляют

$$S^2\{b_i\} = \frac{S_y^2}{nN} = \frac{15,33}{3 \cdot 8} = 0,639, \quad (3)$$

где  $S_y^2$  — дисперсия параметра оптимизации.

Доверительный интервал коэффициентов составляет

$$\Delta b_i = \pm t S\{b_i\} = \pm 2,10 \sqrt{0,639} = \pm 1,68,$$

где  $t$  — табличное значение критерия Стьюдента, равное 2,10 при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	Сочетания уровней технологических факторов					Отклик	
	$x_1$ ( $L_H$ )	$x_2$ ( $S_{HM}$ )	$x_3$ ( $d_{\text{ч}}$ )	$x_4$ ( $O_2$ )	$x_5$ ( $g_m$ )	$y_{ij}$	$\bar{y}_j$
1	-1 (50)	-1 (200)	-1 (20)	+1 (75)	-1 (50)	140, 148, 138	142,25
2	+1 (150)	-1 (200)	-1 (20)	-1 (25)	+1 (100)	129, 136, 130	131,75
3	-1 (50)	+1 (600)	-1 (20)	-1 (25)	+1 (100)	141, 140, 148	143,25
4	+1 (150)	+1 (600)	-1 (20)	+1 (75)	-1 (50)	173, 168, 178	173,0
5	-1 (50)	-1 (200)	+1 (80)	+1 (75)	+1 (100)	103, 107, 98	102,75
6	+1 (150)	-1 (200)	+1 (80)	-1 (25)	-1 (50)	78, 77, 70	75,25
7	-1 (50)	+1 (600)	+1 (80)	-1 (25)	-1 (50)	94, 99, 100	97,75
8	+1 (150)	+1 (600)	+1 (80)	+1 (75)	+1 (100)	131, 128, 133	130,75
$\sum_{j=1}^N x_{ij}y_j$	+24	-92	-184,5	+100	-19,5	—	996
$b_i$	+3,1	+11,5	-23,1	+12,5	+2,4	—	124,5

Обозначение:  $y_{ij}$  — прочность сцепления частиц с напыляемой поверхностью, МПа.

$f = (n - 1)N = 18$ ;  $N$  — число опытов в матрице планирования;  $n$  — число параллельных опытов.

Так как все абсолютные значения коэффициентов регрессии больше доверительного интервала, то все они являются статистически значимыми.

Для проверки гипотезы адекватности полученного уравнения (2) находим дисперсию по результатам опытов по формуле

Таблица 3

Расчет дисперсии  $S_y^2$  по параллельным опытам в центре плана

Номер опыта	$y_u$	$\bar{y}$	$y_u - \bar{y}$	$(y_u - \bar{y})^2$	$S_y^2$
1	126	$\frac{498}{4} = 124,5$	1,5	2,25	$\frac{\sum_{u=1}^4 (y_u - \bar{y})^2}{n-1} = \frac{46}{3} = 15,33$
2	120		-4,5	20,25	
3	129		4,5	20,25	
4	123		-1,5	2,25	
$\Sigma$	498	—	—	$\sum_{u=1}^4 (y_u - \bar{y})^2 = 46,0$	—

Таблица 4

Результаты вспомогательного расчета для определения дисперсии адекватности  $S_{ад}^2$  полученного уравнения (2)

Номер опыта	$\bar{y}$	$y_j$	$y_j - \bar{y}$	$(y_j - \bar{y})^2$
1	142,25	143,1	-0,85	0,72
2	131,75	129,1	+2,65	7,02
3	143,25	141,1	+2,15	4,62
4	173,0	172,3	+0,70	0,49
5	102,75	101,7	+1,05	1,10
6	75,25	78,1	-2,85	8,12
7	97,75	94,6	+3,15	9,92
8	130,75	130,9	-0,15	0,022
—				$\sum_{j=1}^8 (y_j - \bar{y})^2 = 32,01$

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2, \quad (4)$$

где  $y_j, \bar{y}_j$  — соответственно опытное и среднее расчетное значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте плана эксперимента.

Дисперсия адекватности уравнения (2) по данным расчета, представленного в табл. 4, составляет

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2 = \frac{3,43}{8 - (5 + 1)} = \frac{32,01}{2} = 16,0.$$

Адекватность математической модели определяем по расчетному критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{16,0}{15,3} = 1,045. \quad (5)$$

Так как  $F_p < F_T$ , полученная математическая модель является адекватной.

Для того, чтобы полученное уравнение было удобным для интерпретации и практических расчетов, преобразуем кодированные значения факторов в натуральные значения по следующим соотношениям:

$$x_1 = \frac{L_n - L_{n(0)}}{\Delta L_n}; x_2 = \frac{S_n - S_{n(0)}}{\Delta S_n}; x_3 = \frac{d_q - d_{q(0)}}{\Delta d_q}; \quad (6)$$

$$x_4 = \frac{O_2 - O_{2(0)}}{\Delta O_2}; x_5 = \frac{g_m - g_{m(0)}}{\Delta g_m},$$

где  $L_{n(0)}, S_{n(0)}, d_{q(0)}, O_{2(0)}, g_{m(0)}$  — натуральные значения факторов в центре плана эксперимента;

$\Delta L_n, \Delta S_n, \Delta d_q, \Delta O_2, \Delta g_m$  — значения интервалов варьирования.

Численные соотношения (6) в эксперименте принимают вид:

$$x_1 = \frac{L_n - 100}{50}; x_2 = \frac{S_n - 400}{200}; x_3 = \frac{d_q - 50}{30};$$

$$x_4 = \frac{O_2 - 50}{25}; x_5 = \frac{g_m - 75}{25}.$$

Подставляя соотношения (6) в уравнение (2), получаем математическую модель для определения прочности сцепления напыляемых покрытий в следующем виде:

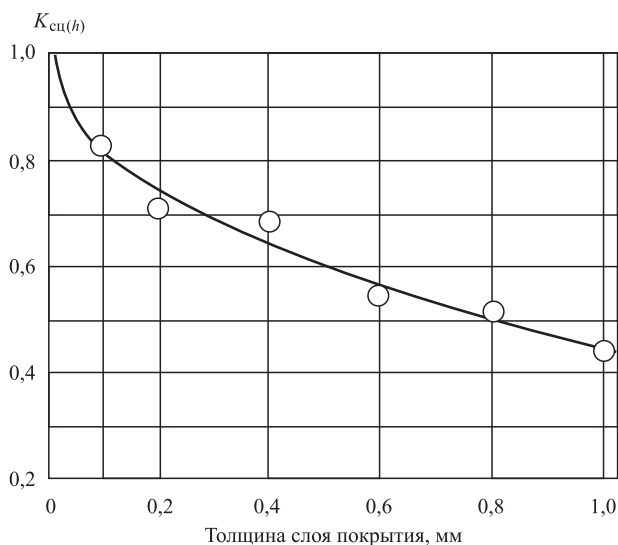
$$\sigma_{сц} = 101,3 + 0,062L_n + 0,057S_n - 0,77d_q + 0,5O_2 + 0,096g_m. \quad (7)$$

При получении математической модели (7) было установлено, что эта формула адекватна только для области изменения переменных параметров в пределах, принятых в плане эксперимента, в соответствии с табл. 2. Для области увеличения пределов изменения переменных параметров численные значения коэффициентов и их знаки принимают другие значения.

### Исследование влияния остаточных напряжений на прочность сцепления покрытий

Исследование закономерности влияния толщины покрытия на прочность их сцепления с напыляемой поверхностью при детонационно-газовом напылении представлены графиком на рис. 2. Из характера кривой следует, что с увеличением толщины слоя покрытия прочность сцепления уменьшается. Закономерность изменения характера кривой объясняется влиянием технологических остаточных напряжений (ТОН), формируемых в напыляемых покрытиях. При анализе полученной зависимости (см. рис. 2) обращает внимание более интенсивное снижение кривой на участке толщины слоя покрытия от 0,10 до 0,25 мм. Объяснить это можно тем, что после абразивно-струйной обработки на поверхности образовались отрицательные остаточные напряжения, которые при напылении первых слоев покрытия трансформировались в положительные остаточные напряжения.

В частности, по данным В.А. Барвинка [8], после струйно-абразивной обработки образуются сжимающие ТОН, которые могут достигать уровня 550 МПа, а глубина их распространения до 0,18 мм. Плавный характер снижения значений коэффициента ТОН на участке от 0,5 до 1,2 мм можно объяснить выравниванием общей температуры последующих элементарных слоев покрытия с предыдущими. Общее снижение прочности сцепления покрытия с основным металлом объясняется формированием в покрытиях растягивающих



**Рис. 2.** Характер влияния толщины слоя покрытия на прочность сцепления покрытия, созданного детонационно-газовым напылением

остаточных напряжений в связи с более высокой температурой покрытия по сравнению с температурой основного металла. На основе математической обработки опытных значений графической зависимости (см. рис. 2) получено уравнение регрессии зависимости коэффициента ТОН от толщины слоя покрытия в следующем виде:

$$K_{сц(h)} = 1 - 1,7\sqrt{0,1h_{п}}, \quad (8)$$

где  $h_{п}$  — толщина слоя покрытия, мм.

Отклонение численных значений прочности сцепления покрытия на сдвиг от среднего значения находится в пределах 16...29 %, против 30...65 % по методу отрыва штифта, что является свидетельством достоверности и преимущества метода определения ТОН по прочности сцепления на сдвиг. Отличие характера кривой изменения прочности сцепления на участке тонких слоев покрытия объясняется особенностями способов испытания их на прочность сцепления с основным металлом. Дальнейшее снижение прочности сцепления при увеличении толщины слоя покрытия наступает с увеличением ТОН в них. При этом истинная прочность сцепления покрытия остается постоянной при изменении толщины слоя.

### Система уравнений компьютерной программы условной оптимизации параметров режима детонационно-газового напыления

Ниже приведена программа условной оптимизации, которая представляет собой систему уравнений, состоящую из целевой функции (7) и тех-

нологических остаточных напряжений с учетом ограничений диапазона изменения переменных параметров целевой функции:

$$\left. \begin{aligned} &K_{сц(h)}[101,5 + 0,062L_{п} + 0,057S_{п} - \\ &- 0,77d_{ч} + 0,5O_2 + 0,09g_m] \geq \sigma_{сц(\min)}; \\ &K_{сц(h)} = 1,0 - 1,7\sqrt{0,1h_{п}}; \\ &150 \geq L_{п} \geq 50; \\ &600 \geq S_{п} \geq 200; \\ &75 \geq d_{ч} \geq 25; \\ &75 \geq O_2 \geq 0,25; \\ &150 \geq g_m \geq 50; \\ &0,35 \geq h_{п} \geq 0,25. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Система уравнений (9) представляет собой программу условной оптимизации режима детонационного напыления покрытия для восстановления коленчатых валов автотракторных двигателей разной мощности. Для установленной эксплуатационной группы ДВС определяют численное значение минимальной прочности сцепления покрытия  $\sigma_{сц(\min)}$  по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{сц(\min)}^п &\geq \frac{F_{тр}}{S_{к}mK_{сц(h)}} = \\ &= \frac{K_{пр}M_{e(\max)}f_{тр}}{(R_{кр} + r_{ш.ш})S_{к}m(1 - 1,7\sqrt{0,1h_{п}})}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $F_{тр}$  — сила трения в шатунном подшипнике, кН;  
 $S_{к}$  — площадь контакта шатунного подшипника,  $см^2$ ;

$K_{пр}$  — коэффициент пропорциональности сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала ДВС;

$M_{e(\max)}$  — максимальный крутящий момент ДВС;  
 $f_{тр}$  — коэффициент трения шатунного подшипника;

$m$  — показатель соотношения между численными значениями прочности сцепления покрытия, определяемыми по сдвигу и штифтовым методом, определяют из следующего выражения:

$$\tau_{сц}^п = m\sigma_{сц}^п;$$

$R_{кр}$  — радиус кривошипа коленчатого вала, мм;

$r_{ш.ш}$  — радиус шатунной шейки коленчатого вала.

Показатель  $m$ , в зависимости от способа подготовки поверхности под напыление, имеет следующие значения:

— при подготовке поверхности под напыление пескоструйной обработкой  $m = 2,6...2,8$ ;

— при подготовке поверхности напылением подслоя молибдена  $m = 2,5...4,2$ ;

— при подготовке поверхности под напыление созданием рваной резьбы с напылением подслоя молибдена  $m = 2,3...6,7$ .

Коэффициенты пропорциональности сил  $K_{пр}$ , действующих на шатунную шейку коленчатого вала ДВС, определяют из следующего соотношения:

$$K_{пр} = \frac{R_{ш.ш}}{\tau_{M(max)}}, \quad (11)$$

где  $R_{ш.ш}$  — суммарно-результатирующая сила, действующая на шатунную шейку коленчатого вала;

$\tau_{M(max)}$  — окружная сила максимального крутящего момента:

$$\tau_{M(max)} = \frac{M_{e(max)}}{R_{кр} + r_{ш.ш}}. \quad (12)$$

Численные значения суммарной результирующей силы, действующей на шатунную шейку коленчатого вала, определяются сложным графоаналитическим методом, которые приведены в работе [9]: для бензиновых 4-цилиндровых ДВС легковых автомобилей средние результирующие значения силы равны  $R_{ш.ш(ср)} = 11,1$  кН, максимальные значения  $R_{ш.ш(max)} = 18,4$  кН. Для дизельных ДВС средние результирующие значения сил, действующие на шатунные шейки, равны  $R_{ш.ш(ср)} = 22,9$  кН, максимальные результирующие значения сил  $R_{ш.ш(max)} = 92,5$  кН.

Тогда численные значения коэффициента пропорциональности для ДВС разной мощности и эксплуатационных групп по формуле (11) будут равны:  $K_{пр} = 6,5$  — для ДВС легковых и грузовых автомобилей,  $K_{пр} = 8,6$  — для дизельных ДВС,  $K_{пр} = 12,5$  — для высокофорсированных дизельных ДВС.

Площадь контакта шатунного подшипника коленчатого вала определяется по формуле

$$S_k = B_{шп} \pi d_{ш.ш} (2\varphi_0 / 360), \quad (13)$$

где  $B_{шп}$  — ширина шатунного вкладыша, см;

$d_{ш.ш}$  — диаметр шатунной шейки коленчатого вала ДВС, см;

$2\varphi_0$  — угол охвата длины контакта шатунной шейки коленчатого вала.

Известно, что существующий широкий модельный ряд коленчатых валов ДВС имеет подобие по конструкторским, размерным и структурно-техническим признакам. Вместе с этим их рабочие характеристики оцениваются одинаковыми контрольными параметрами рабочей характеристики ДВС. В связи с этим все коленчатые валы целесообразно распределить на группы, определяемые максимальным крутящим моментом ДВС. На рис. 3 представлены графики требуемой прочности сцепления покрытий для коэффициента запаса

прочности сцепления покрытия, равного единице, полученные расчетным путем по формуле (10).

Характер графиков изменения требуемой прочности сцепления напыляемых покрытий от толщины покрытия для шатунных шеек коленчатых валов автотракторных ДВС разной мощности характеризуется влиянием технологических остаточных напряжений в покрытиях в соответствии с формулой (8). Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что для максимальных крутящих моментов  $M_{e(max)} = 94...122$  Н·м бензиновых ДВС легковых автомобилей требуемая прочность сцепления покрытий  $\sigma_{сц(min)}$  при толщине покрытия 0,2 мм составляет 29,5...32,1 МПа. Для максимальных крутящих моментов  $M_{e(max)} = 284...402$  Н·м, бензиновых ДВС грузовых автомобилей требуемая прочность сцепления покрытий  $\sigma_{сц(min)}$  при толщине покрытия 0,2 мм составляет 39,5...49,8 МПа.

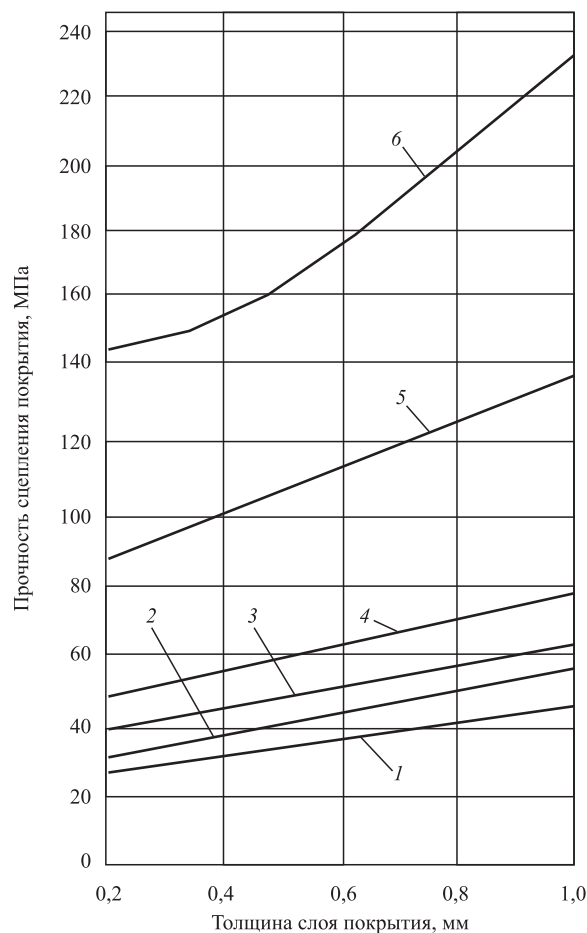


Рис. 3. Зависимости изменения требуемой прочности сцепления напыляемых покрытий от толщины слоя покрытия для шеек коленчатых валов ДВС бензиновых легковых автомобилей (1, 2), ДВС грузовых автомобилей (3, 4) и дизельных типов ДВС (5, 6) при различных максимальных крутящих моментах, Н·м:

1 — 94; 2 — 122; 3 — 284; 4 — 402; 5 — 636; 6 — 1178

Для максимальных крутящих моментов  $M_{e(max)} = 636...1178$  Н·м дизельных ДВС требуемая прочность сцепления покрытий  $\sigma_{сц(min)}$  при толщине покрытия 0,2 мм составляет 87,0...146,0 МПа.

При толщине покрытия 0,6...1,0 мм обеспечить требуемую прочность сцепления на уровне 191...233 МПа даже для детонационно-газового напыления невозможно. В таких случаях для повышения прочности сцепления покрытия могут применяться специальные технологические способы. Например, способ электроконтактного оплавления покрытия на участках галтелей и выхода отверстий смазки шатунных шеек коленчатого вала способствует повышению прочности сцепления в 1,5...2 раза. В частности, результаты исследования эксплуатационной надежности коленчатых валов ДВС группы Д, Е [1], восстановленных групповым технологическим процессом, свидетельствуют о высоком эффекте применения способа электроконтактного оплавления. Для коленчатых валов ДВС эксплуатационных групп от А до Г в групповых технологических процессах способ электроконтактного оплавления отдельных участков шеек коленчатых валов будет избыточным, поскольку приведет к значению коэффициента запаса прочности сцепления выше требуемого уровня. Таким образом, при проектировании технологических процессов восстановления механических систем необходимо исходить из условия обеспечения требуемой прочности сцепления покрытия, соответствующей эксплуатационной группы предмета производства.

### Выводы

1. Минимальное значение прочности сцепления напыляемых покрытий для восстановления шатунных шеек коленчатых валов может быть установлено только с учетом суммарной результирующей силы, действующей в шатунном подшипнике.
2. Полученная многофакторная математическая модель может быть использована в качестве целевой

функции в компьютерной программе условной оптимизации режимов детонационного напыления. При использовании упомянутой математической модели следует помнить, что она применима только для области изменения переменных параметров в пределах, принятых в плане эксперимента, и не может быть использована для экстраполяции.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безбородов И.А., Гавриленко Т.П.** Надежность коленчатых валов, восстановленных детонационным напылением // Вестник НГАУ. 2012. № 4 (25). С. 81—86.
2. **Безбородов И.А.** Управление технологическим формированием свойств базовых деталей и их соединений при ремонте автотракторных двигателей. Новосибирск, 2006. 187 с.
3. **Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А.** Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
4. **Хасуй 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.
5. **Безбородов И.А.** Методология разработки технологических проектов ремонта, восстановления и модернизации механических объектов. Часть 1. Структура, общие определения и понятия // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 3. С. 41—47.
6. **Безбородов И.А.** Методология разработки технологических проектов ремонта, восстановления и модернизации механических систем. Часть 2. Фонд физико-математических моделей прогноза направленного формирования эксплуатационной надежности при ремонте автотракторных ДВС // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 4. С. 41—48.
7. **Спиридонов А.А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
8. **Барвинок В.А.** Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
9. **Колчин А.И., Демидов В.П.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 469 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 07.09.2020 г. Подписано в печать 26.10.2020 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru