

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 17  
2021  
№ 8 (200)  
август

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.

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:**

А.В. ОРЛОВА

С.В. ЧЕРНЫЙ

## СОДЕРЖАНИЕ



### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Жуков В.В., Степанов С.А.** Перспективы использования пескоструйной обработки в производстве полупроводниковых диодов ..... 339

**Иванов А.Г.** Механизм упрочнения в задачах переноса теплоты ..... 345



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Безъязычный В.Ф., Плешкун В.В., Федонин О.Н.** Теоретический анализ влияния наклепа материала поверхностного слоя обрабатываемой детали на коррозионную стойкость поверхности в процессе эксплуатации ..... 351

**Головкин П.А., Милутинович М.М.** Влияние способа изготовления и термической обработки на характеристики и размерную стабильность сплава МНК ..... 356

**Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю., Тебенко Ю.М.** Совершенствование способа и устройства для упрочнения пружин конической формы или формы параболоида вращения ..... 360

**Саблин П.А., Щетинин В.С.** Влияние микропрофиля обработанной поверхности на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей машин ..... 368



### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

**Балановский А.Е., Астафьева Н.А., Тихонов А.Г., Нгуен Ван Чьеу.** Исследование износостойкости плазменных покрытий из смеси сплавов CuSn/Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub> ..... 371

**Ненахов Н.Н., Смоленцев В.П., Мозгалин В.Л., Портных А.И.** Подготовка поверхности заготовок под теплозащитное покрытие ..... 377

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

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.

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 17  
2021  
№ 8 (200)  
August

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. BEZYAZHCHNYI

**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  
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. SUKHOICHEV  
V.P. TABAKOV  
V.A. SHULOV  
M.L. KHEIFETS  
Jan SUCHANEK  
Marian SZCZEREK  
Wojciech HOMIK

**Edition:**

A.V. ORLOVA  
S.V. CHERNY

## CONTENTS

### GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

**Zhukov V.V., Stepanov S.A.** The sandblasting use prospects in the semiconductor diodes production ..... 339

**Ivanov A.G.** Hardening mechanism in heat transfer problems ..... 345

### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

**Bez'yazychny V.F., Pleshkun V.V., Fedonin O.N.** Theoretical analysis of the effect of the surface layer material hardening on the corrosion resistance of the surface during operation ..... 351

**Golovkin P.A., Milutinovich M.M.** The influence of process of manufacturing and heat treatment on performance and dimensional stability of the Cu—Ni—Si alloy ..... 356

**Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Yu., Tebenko Yu.M.** Method and device improvement for conical shape or rotation paraboloid shape springs hardening ..... 360

**Sablin P.A., Shchetinin V.S.** Influence of the micro profile of the treated surface on the strength and performance characteristics of machine parts ..... 368

### PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

**Balanovsky A.E., Astafeva N.A., Tikhonov A.G., Nguyen Van Trieu.** Study of wear resistance of plasma coatings from a mixture of CuSn/Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub> alloys ..... 371

**Nenakhov N.N., Smolentsev V.P., Mozgalin V.L., Portnykh A.I.** Preparation of the surface of workpieces for a heat-shielding coating ..... 377

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

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



**В.В. Жуков**, канд. техн. наук, **С.А. Степанов**  
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)  
E-mail: zhukov-vv@yandex.ru

## Перспективы использования пескоструйной обработки в производстве полупроводниковых диодов

*Рассмотрен процесс изготовления полупроводниковых компонентов для производства СВЧ-диодов. Представлены научно обоснованные рекомендации по разделению относительно толстых (до 1,5 мм), пакетированных полупроводниковых подложек на кремниевой основе пескоструйным способом, основанным на маскировании и пневматической струйной резке подложки микроабразивным порошком. Описаны способы маскирования и принципы выбора режимных параметров струйной обработки пакетированной подложки, которые были апробированы с положительным результатом на опытно-промышленной пескоструйной установке.*

**Ключевые слова:** СВЧ-диод, диск-кристалл, пескоструйная резка, маскирование, защитные экраны, пакетирование, полупроводниковая подложка на кремниевой основе, абразивный порошок.

*The process of manufacturing semiconductor components for the production of microwave diodes is considered. Scientifically based recommendations are presented for the separation of relatively thick, up to 1.5 mm, stacked silicon-based semiconductor substrates by the so-called sandblasting method, based on masking and pneumatic jet cutting of the substrate with micro abrasive powder. It is described the masking method and the principals of setting of the operating parameters of the packaged substrate jet processing, which were tested with a positive result on a pilot industrial sandblasting plant currently used by a domestic enterprise.*

**Keywords:** microwave diode, silicon plate, disk-crystal, jet-abrasive processing, sandblasting cutting, abrasive material.

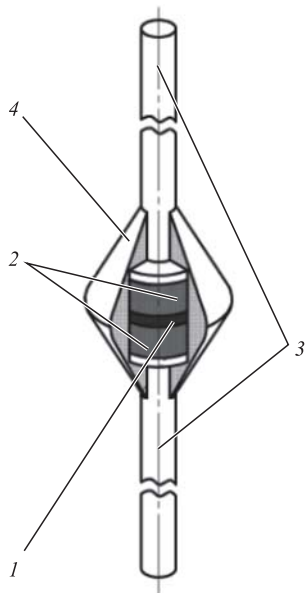
### Введение

Одним из приоритетов отечественной электронной промышленности на международном рынке является выпуск современных полупроводниковых приборов. Запущено серийное производство гаммы СВЧ-диодов для отечественного потребителя и разработана оригинальная технология производства корпусных диодов с модифицированными компонентами. Полупроводниковые компоненты для таких диодов изготавливают в форме круглого диска-кристалла из пакетированной подложки, состоящей из нескольких тонких полупроводниковых подложек на кремниевой основе. Для разделения подложек на круглые диски-кристаллы используется пескоструйная технология.

Пескоструйное оборудование для этих целей стало применяться на отечественном предпри-

ятии с начала текущего столетия. Его появлению предшествовало сотрудничество с одним из лидеров в производстве современных полупроводниковых приборов, — голландской фирмой Philips, предложившей российским производителям участвовать в совместном выпуске выпрямительных СВЧ-диодов с гибкими выводами для телевизионных приемников [1].

Предполагалось использовать оригинальные (базовые) комплектующие для диодов, производство которых было локализовано в Голландии и США. На голландском предприятии при помощи пескоструйной технологии разделяли тонкие (до 350 мкм) кремниевые подложки на диски-кристаллы круглой формы диаметром 1,5...3,2 мм в целях их последующей поставки вместе с другими комплектующими — проволочными выводами из платинита и молибденовыми штифтами производства США, для окончательной сборки диодов



**Рис. 1. Выпрямительный диод Д-237К:**  
1 — кремниевый элемент; 2 — молибденовые штифты;  
3 — выводы; 4 — остеклованная поверхность

на российском предприятии. На рис. 1 схематично представлен совместно выпускавшийся классический СВЧ-диод Д237К (2Д510А).

Впоследствии авторы настоящей статьи осуществили разработку, изготовление и запуск в эксплуатацию (по программе импортозамещения) опытного образца пескоструйной установки-аналога, до настоящего времени используемого предприятием для изготовления тонких дисков-кристаллов из стандартных полупроводниковых подложек.

В результате дальнейших исследований были созданы пакетированные полупроводниковые подложки из нескольких тонких подложек, соединенных между собой пайкой. Модифицированные диски-кристаллы, полученные из таких пакетированных подложек, позволят перейти к выпуску более совершенных корпусных диодов.

На рис. 2 в качестве примера представлен корпусный диод 2Д220 с модифицированным диском-кристаллом (рис. 2, б).

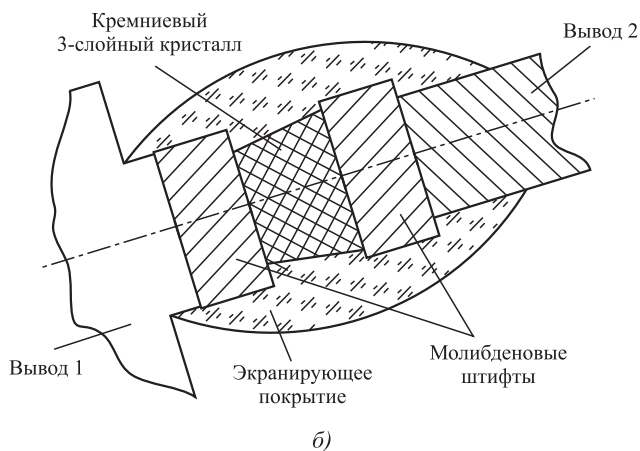
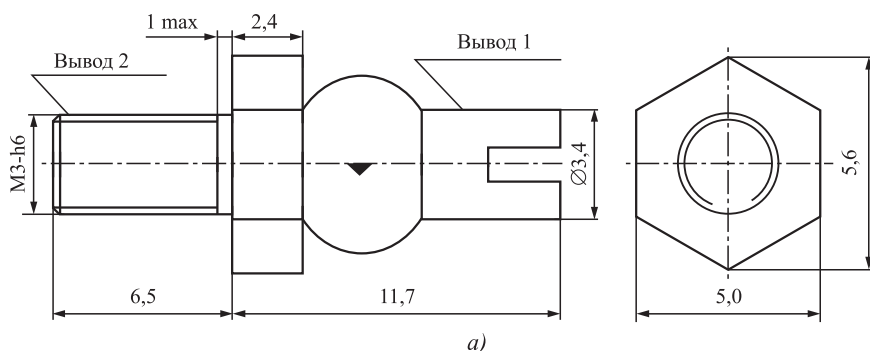
Однако действующая на предприятии опытная установка пескоструйной резки изначально не предназначалась для резки "тол-

стых" пакетированных подложек и прикратно увеличенной толщине заготовки могла быть полезна только для исследования элементов технологического процесса, таких как маскирование, длительность обработки подложки, изготовление образцов дисков-кристаллов и проверка их параметров в процессе изготовления и др.

Для запуска в серию корпусных диодов с модифицированными дисками-кристаллами были предложены исследования механизмов струйно-абразивной резки пакетированных «толстых» полупроводниковых подложек.

Пескоструйной технологии резки свойственна клинообразная форма поверхности разделения маскированной подложки между дисками-кристаллами, задающая конусность боковой поверхности диска-кристалла [2—4] и, следовательно, разницу диаметров кристалла по торцам.

Ранее мы рассматривали альтернативные технологии получения дисков-кристаллов, в том числе связанные с лезвийной обработкой относительно "толстых" кремниевых подложек алмазными дисками. Были проведены необходимые тесты на соответствующем промышленном оборудовании.



**Рис. 2. Конструкция диода 2Д220 (а) и модифицированный диск-кристалл диода между цилиндрическими штифтами (б)**

При резке образца пакетированной подложки алмазным диском на современной полуавтоматической установке [7] при различных режимах были получены неудовлетворительные результаты. Увеличение толщины образца до 1,1 мм приводило к пятикратному увеличению времени резки из-за критического снижения скорости автоматической подачи режущего диска (менее 2,5 мм/с).

Также были проведены тесты по разделению маскированной кремниевой подложки методом плазмохимического травления в вакуумной установке, которые тоже не дали положительного результата, поскольку выяснилось, что под действием обрабатывающей среды (плазмы) происходит модификация свойств полупроводниковой структуры подложки.

Сравнительный анализ показал, что пескоструйная обработка при изготовлении дисков-кристаллов полупроводниковых диодов пока не может быть заменена альтернативной технологией.

### Методика проведения эксперимента

Два основных перехода этой операции — маскирование и обработка маскированной части поверхности подложки потоком микроабразивных частиц являются взаимосвязанными в случае, когда требуется получить одинаковые по размерам диски-кристаллы.

Разделение подложки, т.е. резка-эрозия кремния между защитными экранами завершается в так называемой пограничной зоне обработки, характеризующейся малыми углами «клина» боковых поверхностей дисков-кристаллов. Процесс разделения подложки следует завершать до начала разрушения защитных экранов под действием потока абразивных частиц [3, 4].

Критерием завершения процесса разделения пакетированной подложки можно считать значения конусности боковых поверхностей дисков-кристаллов в пределах 13...15°, как и для тонкой подложки.

Продолжительность обработки пакетированной подложки при ее известной толщине устанавливается в режиме отладки на действующей установке по динамике изменения угла конусности боковых поверхностей дисков-кристаллов до заданных значений. При этом необходимо контролировать размеры защитных экранов, диаметры которых могут уменьшаться за счет абразивного изнашивания не более чем на 0,10...0,15 мм.

*Подготовка образцов.* По аналогии с тонкой подложкой обрабатывали пакетированный аналог (подложку, состоящую из трех пластин) толщи-

ной ( $1,05 \pm 0,045$ ) мм, который также наклеивали на стеклянную пластину, а затем маскировали защитными экранами в виде металлических пластин квадратной формы для удобства измерений.

Диски предварительно загружали в трафарет с равномерно расположенными квадратными отверстиями, а затем с помощью скотча извлекали из него и переносили на подложку. Зазоры между защитными экранами формировали согласно варьируемой толщине перемычек между отверстиями трафарета.

Фиксацию защитных экранов на подложке осуществляли с помощью специального термостойкого клея, который предварительно наносили на нагретую поверхность подложки.

Для получения маски с защитными экранами на подложке использовали трафарет, состоящий из пластины и маски, изготовленной из тонколистовой стали. Основание трафарета изготавливали из микропористой стальной пластины, на лицевой стороне которой закрепляли маску, а на обратной стороне — полужамкнутую тонкостенную оболочку, предназначенную для соединения микропор пластины с подсоединяемым к трафарету вакуумным насосом.

Предварительно защитные экраны навалом загружали на трафарет.

В результате вибрационной загрузки защитные экраны заполняли отверстия маски и удерживались в них в ориентированном положении за счет откачки воздуха через микропоры пластины. До переноса экранов на ленту скотча избыточное количество защитных экранов вручную удаляли с трафарета. Далее от ленты скотча отрезали фрагмент с защитными экранами, который наклеивали на подложку с подогретым клеевым слоем.

На рис. 3 представлена экспериментальная маска трафарета, используемая при маскировании образцов.

Маска была разделена на четыре сектора, каждый из которых состоял из набора одинаковых квадратных отверстий, находящихся друг относительно друга на разных расстояниях. Ширина перемычек между отверстиями варьировалась по секторам  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , а именно: в первом секторе — 0,4; 0,6; 0,7; 0,8 мм; во втором секторе — 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 мм; в третьем и четвертом — 1,4; 1,6; 1,8 и 2,0 мм. Допуск на размеры перемычек составлял  $\pm 0,05$  мкм.

Следующий технологический переход после маскирования выполняли на опытной пескоструйной установке предприятия.

С помощью шести инжекционных сопел на маскированную подложку подавали высокоскоростной поток микроабразивных частиц — электро-

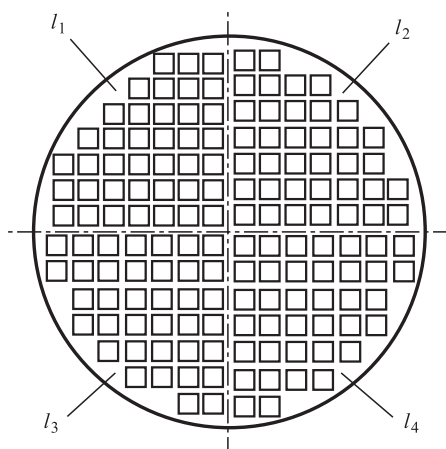


Рис. 3. Экспериментальная маска трафарета

корунда марки М40, расход которого в потоке сжатого воздуха составлял  $4,5...5,5$  г/с через одно сопло.

При необходимости экспериментальные образцы пакетированных подложек обрабатывали повторно, вручную загружая кассеты с образцами в зону пескоструйной резки.

Обработку образцов выполняли при режиме, который применялся ранее для резки тонких кремниевых подложек, а именно: ширина эрозии поверхности образца от потока абразивных частиц из сопла "в статике" составляла  $10...12$  мм; амплитуда перемещения сопел —  $90$  мм; скорость движения кассеты с образцами в зоне обработки — в пределах  $0,28...0,30$  мм/с; время двойного хода рабочих сопел "вверх-вниз" —  $1$  с; режим истечения сжатого воздуха из воздушного патрубка сопла — критический; входное давление  $(0,3 \pm 0,02)$  МПа.

Время обработки одного образца подложки задавалось скоростью его перемещения относительно вертикальной плоскости сканирования сопла и в экспериментах составляло  $(4,5 \pm 0,2)$  мин.

Инструментальный контроль выполняли с помощью заводского инструментального микроскопа с ценой деления  $1,0$  мкм. В процессе обработки измеряли глубину прорезания подложки в зазорах между защитными экранами в секторах  $l_1-l_4$  образца и размеры кристалла на уровне экрана и на уровне основания подложки при переходе на резку стеклянного основания.

На рис. 4 показана связь между глубиной прорезанного слоя пакетированной подложки и числом циклов обработки (число сопел  $Z$ ) образцов подложки толщиной  $1,05$  мм при варьировании зазора между защитными экранами. Для вычисления текущего времени обработки соответствующее число сопел необходимо умножить на

длительность цикла резки образца одним соплом, равного в экспериментах  $(4,5 \pm 0,2)$  мин.

Данным графиком экспериментально подтверждается ранее высказанная гипотеза о целесообразности ранжирования зазоров между защитными экранами [2].

В частности, при зазоре между защитными дисками, равном  $0,75...0,80$  мм, прорезание до определенной глубины и дальнейшее углубление прекращается на некоторое время (зона I на рис. 4) и энергия потока абразивных частиц расходуется на расширение клинообразного паза между защитными экранами. При достаточной стойкости экранов это приводит к уменьшению конусности боковой поверхности дисков-кристаллов, которые при этом как бы подрезаются; в противном случае конусность может только увеличиваться.

Имеющаяся временная пауза в обработке и ее длительность весьма важны (время зависит от стойкости защитных дисков), поскольку в этот период обеспечивается, с одной стороны, выравнивание размеров обрабатываемых кристаллов в разных точках подложки, разброс значений которых возникает из-за неравномерности подачи обрабатываемой среды, а с другой — однозначно определяется момент окончания резки при сохранении первоначальных зазоров между защитными экранами.

На рис. 5 показана динамика изменения размеров диска-кристалла при обработке пакетированной подложки толщиной  $1$  мм, состоящей из двух кремниевых пластин, через равные промежутки времени.

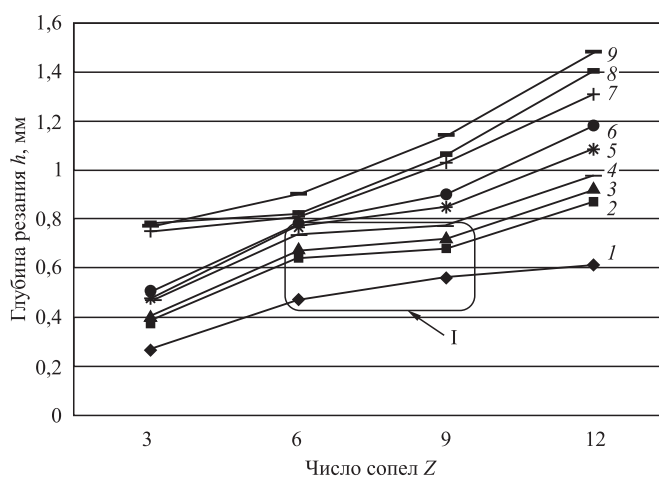
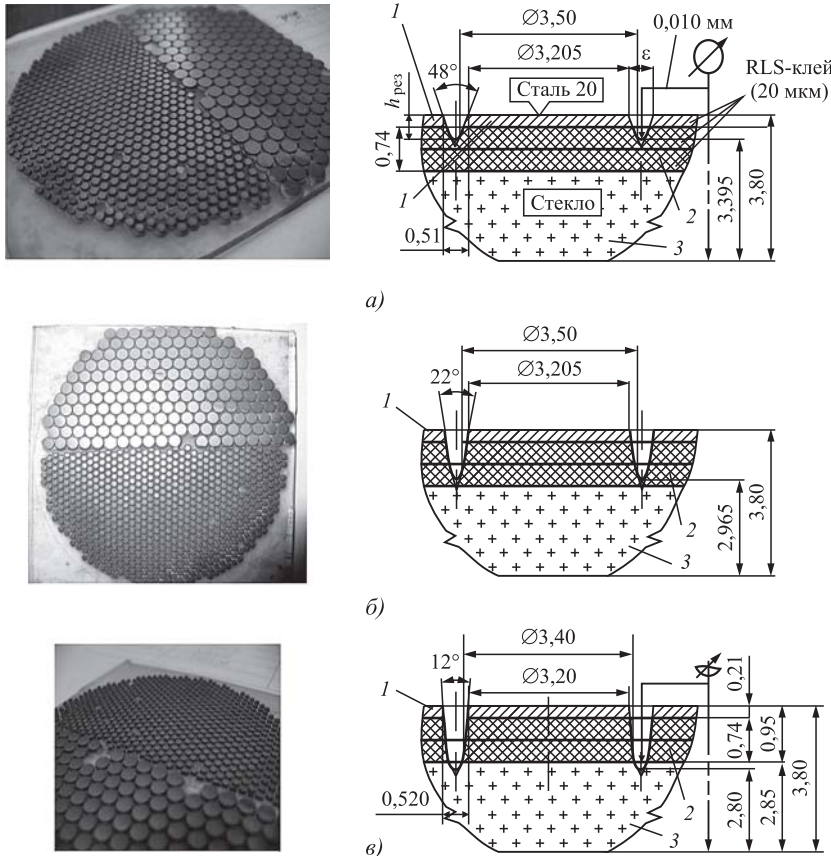


Рис. 4. Зависимость глубины резки маскированной подложки  $h_{рез}$  от числа циклов обработки (числа сопел)  $Z$  при различных зазорах между экранами  $\epsilon$ , мм: 1 —  $0,4$ ; 2 —  $0,6$ ; 3 —  $0,7$ ; 4 —  $0,8$ ; 5 —  $1,0$ ; 6 —  $1,2$ ; 7 —  $1,4$ ; 8 —  $1,6$ ; 9 —  $1,8$



**Рис. 5. Динамика изменения размеров диска-кристалла в зависимости от времени обработки  $t_{обр}$  и глубины прорезания  $h_{рез}$ :**  
 а —  $t_{обр} = 1,5$  мин,  $h_{рез} = 0,405$  мм; б —  $t_{обр} = 3,0$  мин,  $h_{рез} = 0,835$  мм;  
 в —  $t_{обр} = 4,5$  мин,  $h_{рез} = 1,0$  мм; 1 — защитный экран трафарета; 2 — двухслойная кремниевая пластина; 3 — стеклянная подложка

**Обсуждение результатов**

В экспериментах на опытной установке определяли режимные параметры обработки, необходимые для разделения пакетированных подложек, состоящих из трех и четырех тонких пластин.

Была исследована зависимость (см. рис. 4) глубины резки маскированной подложки от зазора между защитными экранами при прочих равных условиях и изменение скорости резания при различной глубине резки подложки (по числу циклов обработки).

При сравнительно малых зазорах, до 1 мм, было выявлено существенное уменьшение скорости прорезания подложки (зона I на рис. 4) на границе ее контакта с опорной стеклянной пластиной.

В период замедления завершается формообразование дисков-кристаллов: выравниваются их размеры на обрабатываемой поверхности подложки и уменьшается конусность кристаллов от начальных значений, превышающих 32°, до минимальных в диапазоне 12...18°.

При увеличении времени обработки (выходе за временные параметры зоны I) наблюдали увеличение глубины резки за счет увеличения зазоров между защитными экранами из-за их ускоренного абразивного износа и нагрева.

Из графиков видно, что эффект замедления скорости резки подложки является наибольшим в случае зазора между защитными экранами менее 1,0 мм, но и при больших зазорах скорость резки может меняться из-за недостаточного расхода обрабатываемой среды через струйные сопла, который суммарно за время обработки не смог удалить требуемое количество кремния с подложки и процесс дошел до разрушения защитных экранов, стойкость которых лимитирована по времени.

Кроме того, на скорость резки влияют различные факторы, не связанные с маскированием, например, условия отвода абразивных частиц из клинообразных "пазов" поверхности резания между защитными экранами.

Вертикальное положение заготовки на транспортере, использованное в опытной установке, оказалось предпочтительнее горизонтального, так как способствовало отводу частиц

абразива из пазовой поверхности резки, что обеспечило сокращение времени обработки на завершающей стадии.

Хотя специфику обработки немаскированных участков кремния на пластине специально не изучали, в ходе экспериментов было замечено, что скорость съема кремния с немаскированной поверхности пластины в 2,0...2,5 раза больше скорости эрозии кремния в зазорах между экранами маскированной пластины.

**Абразивный порошок.** При пескоструйной обработке использовали два состава микрошлифпорошков по ГОСТ 3647—80, состоящих из частиц электрокорунда  $Al_2O_3$  и карбида кремния. Твердость этих материалов по "узловой" шкале твердости для неметаллов, как известно, различна и составляет:

алмаз . . . . .	8000;
карбид бора . . . . .	2760;
<b>карбид кремния . . . . .</b>	<b>2480;</b>
<b>электрокорунд . . . . .</b>	<b>2100;</b>
стекло . . . . .	530.

В штатном режиме обработки на опытной установке использовали электрокорунд зернистостью М40 (40...28 мкм).

Экспериментально было установлено, что указанная зернистость является предельно допустимой, поскольку при попытке использовать абразив меньшей зернистости и, таким образом, уменьшить шероховатость обрабатываемой поверхности подложки, резка фактически прекращалась, а подложка интенсивно нагревалась, что приводило к разрушению клевого соединения подложки с защитными экранами.

**Износ абразивного порошка.** После нескольких смен абразивного порошка в опытной установке размеры его частиц и острота граней уменьшались, что вызывало снижение скорости резки подложки.

Кроме того, абразивный порошок, которым разделяли пластины на диски-кристаллы, постепенно терял режущую способность из-за уменьшения и неполного дробления частиц до размеров 23...28 мкм. Эти частицы замедляли резку, так как продолжали циркулировать в опытной установке вместе с вновь загружаемым абразивным порошком (компенсирующим потери порошка при загрузке-выгрузке кассет) и в течение 15...20 рабочих смен снижали скорость резки на 20...30 %. В результате требовалась полная замена абразивного материала в объеме 8...9 л.

В качестве альтернативного обрабатываемого материала был испытан карбид кремния той же зернистости, что и электрокорунд. Как более твердый материал, он оказался и более чувствительным к адсорбции влаги из воздуха, вследствие чего быстро ее впитывал и коагулировался в агломераты с отходами обработки (клеем, стеклом и др.); в результате снижались его режущие свойства. Ударная прочность карбида кремния оказалась ниже, чем у электрокорунда, и поэтому он быстрее дробился, образуя микрочастицы, которые замедляли процесс разделения пластины.

Опытным путем было установлено, что скорость снятия кремния с обычной пластины на опытной установке карбидом кремния составляла 290 мкм/мин, а электрокорундом — 370 мкм/мин.

Стоимость электрокорунда выше, чем карбида кремния, его цена 104 тыс. руб./т, а карбида кремния — 89 тыс. руб./т. Материал на основе  $Al_2O_3$  нетоксичен, однако его частицы размером 1 мкм и менее могут накапливаться в дыхательных путях оператора, поэтому при работе на пескоструйной установке рекомендовано постоянно использовать средства индивидуальной защиты, хранить и производить работы с абразивным материалом в закрытом помещении.

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно составить следующие рекомендации для организации технологического процесса:

— для изготовления износостойких защитных экранов следует использовать сталь, не склонную к наклепу, например листовую сталь АРМКО толщиной от 0,2 мм либо конструкционную сталь Ст. 12;

— обеспечить расчетные значения минимальных зазоров между защитными экранами при маскировании пакетированной подложки, фиксировать экраны термостойким клеем (с температурой плавления не ниже 95 °С);

— использовать для обработки подложек унифицированные струйно-инжекторные сопла с выходным номинальным диаметром для воздушно-абразивной смеси в диапазоне 6...8 мм, иметь расход абразивного порошка через каждое сопло 4...12 см<sup>3</sup>/с, регулируя его в зависимости от толщины подложки;

— использовать при обработке подложек гранулированный шлифовальный порошок (электрокорунд или карбид кремния) зернистостью М40...М63;

— при обработке пакетированных полупроводниковых подложек толщиной 1,0...1,5 мм иметь возможность увеличения как минимум вдвое времени обработки (за счет количества струйных сопел) при фиксированной рабочей скорости подачи заготовок (не более 0,5 мм/с).

Результаты проведенных исследований, важная часть которых, по мнению авторов, конкретизирована в форме рекомендаций, предназначены для разработчиков технологического оборудования и оснастки для маскирования и пескоструйной резки различных типов полупроводниковых подложек на кремниевой основе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полупроводниковые приборы, диоды, диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы / под ред. А.В. Голомедова. М.: Энергоиздат, 1989.
2. Жуков В.В., Степанов С.А. Исследование точности пескоструйной резки пакетированных кремниевых пластин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 4. С. 43—47.
3. Жуков В.В., Степанов С.А., Горничев А.А. Исследование процесса формообразования при пескоструйной обработке пакетированных кремниевых подложек // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 3. С. 9—12.
4. Жуков В.В. Опыт создания технологии и оборудования для размерной пескоструйной обработки маскированных полупроводниковых материалов // Матер. междунар. конф. М.: МГТУ. 2005. С. 114—118.



5. **Расчет** и проектирование сухих пылеуловителей и туманоуловителей / под ред. С.В. Белова. М.: МВТУ им. Баумана, 1985.

6. **Жуков В.В., Степанов С.А., Бычков С.П.** Разработка систем регенерации абразивного порошка для установок резки маскированных кремниевых пластин

// Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 4. С. 9—12.

7. **Руководство** по установке, эксплуатации и техническому обслуживанию линии резки ProVECTUS. Фирма-изготовитель: Advanced Picing Technologies Ltd/ (ADT). Израиль. 2014. Полуавтоматическая установка дисковой резки серии ADT 7100. С. 24—32.

УДК 62-533.66-536.246

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-8-345-350

**А.Г. Иванов**, *д-р техн. наук*

(Чебоксарский кооперативный институт (филиал) Российского университета кооперации)

E-mail: animax1969@mail.ru

## Механизм упрочнения в задачах переноса теплоты

*Рассмотрена задача повышения интенсивности теплоотвода при намораживании сконденсированного слоя в испарителе морозильной камеры, используемой при реализации методов попеременного нагрева и охлаждения металла, что позволяет многократно повысить прочность сплавов. Решается задача высокой скорости охлаждения в морозильной камере и достижения низкой конечной температуры объекта из металла. Описана схема холодильного цикла с центробежным регулятором производительности.*

**Ключевые слова:** обработка металла холодом, остаточный аустенит, замораживание грунта (задача Стефана), холодильные системы, центробежный регулятор, турбулентность потока, хладон, параболоид вращения, корректирующая масса, жидкость, фазовые превращения, гидравлические системы, интенсивность теплоотвода, испаритель морозильной камеры.

*The problem of increasing the intensity of heat removal during freezing of the condensed layer in the evaporator of the freezer used in the implementation of methods of alternating heating and cooling of the metal, which makes it possible to increase the strength of alloys many times over, is considered. The problem of a high cooling rate in a freezer and a low final temperature of a metal object is solved. The scheme of the refrigeration cycle with a centrifugal capacity regulator is described.*

**Keywords:** processing of metals by cold, residual austenite, the problem of soil freezing (Stefan problem), refrigeration systems, centrifugal regulator, increasing the turbulence of the flow of freon in the evaporator, the paraboloid of revolution, corrective weight, liquid, phase transformations, hydraulic system, freezer evaporator.

В отечественной практике обработку холодом применяют для снижения количества остаточного аустенита в структуре закаленной стали [1]. Конструкционные стали обрабатывают холодом при температурах  $-60...-120$  °С. Особенно эффективна обработка холодом для легированных сталей при температурах  $-30...-120$  °С для превращения мягкого остаточного аустенита в мартенсит. С увеличением интенсивности теплоотвода количество остаточного аустенита в сталях уменьшается. Обработка холодом приводит к изменениям микроструктуры материала и увеличению износостойкости более чем на 30 % [1].

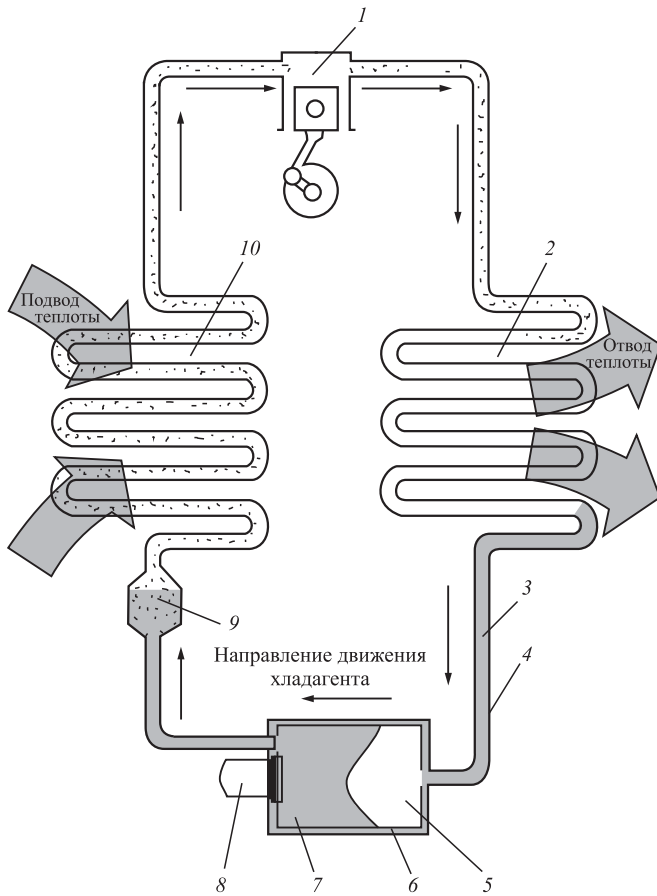
Хладагенты (пропан, этилен, фреоны) с разной холодопроизводительностью создают необходимую температурную разницу между кипящими и конденсирующими слоями. Для различных интервалов температур используют разные хлада-

генты, например, фреон R22 — до  $-60$  °С, фреон R13 — до  $-80$  °С [2].

Термообработку применяют не только для изменения твердости по объему материала, но и для увеличения твердости только поверхностного слоя изделия. Методы попеременного нагрева и охлаждения позволяют многократно повысить прочность сплавов металлов [2].

Управление процессом намораживания требуется для повышения интенсивности теплоотвода при намораживании сконденсированного слоя в испарителе морозильной камеры, достижения высокой скорости охлаждения и низкой конечной температуры изделия.

Для изучения воздействия на процессы теплопередачи в холодильном цикле при установке центробежного регулятора в замкнутую систему холодильной машины рассмотрим движение хладагента (рис. 1).



**Рис. 1. Схема холодильного цикла с установкой центробежного регулятора:**

1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — хладагент; 4 — трубопровод; 5 — центробежный регулятор производительности; 6 — внутренний барабан; 7 — дисбалансный груз; 8 — электродвигатель; 9 — дроссель; 10 — испаритель

По трубопроводу 4 хладагент 3 под давлением  $18 \cdot 10^5$  Па (для хладагента R404a), при температуре  $t_k = 40$  °С попадает внутрь корпуса центробежного регулятора 5. Внутри корпуса размещается барабан 6, на внутренней стенке которого закреплен дисбалансный груз 7. Барабан 6 установлен на ступенчатом валу ротора электродвигателя 8. Дополнительно ко дну внутреннего барабана закрепляется крыльчатка для центробежной активации жидкости. Жидкий хладагент 3 заполняет всю внутреннюю полость корпуса центробежного регулятора. Вращение барабана 6 вместе с крыльчаткой и дисбалансным грузом 7 осуществляется "под водой". Жидкость из внутреннего барабана отводится через кольцевое отверстие в дне.

Эксплуатация центробежного регулятора осуществляется на переходных режимах разгона и торможения без установившегося движения ротора, чтобы создать дополнительный импульс от

центробежных сил инерции, обеспечивающий перераспределение корректирующих масс жидкости в сторону, противоположную действию центробежных сил [3]. Данное перемещение корректирующих масс осуществляется во всем объеме внутренней полости центробежного регулятора.

Поток активируемой жидкости в центробежном поле сил смешивается с общим потоком 3 (см. рис. 1), нагнетаемым по трубопроводу от конденсатора к дросселю 9, и далее к испарителю 10.

Возникновение смешанного потока частиц жидкого хладагента 3, который переносит импульс от центробежных сил инерции (механическая активация жидкости), приводит к изменению параметров процесса теплопередачи в испарителе и в целом влияет на производительность его работы, выраженную в количестве тепловой энергии отбираемой из холодильной камеры за единицу времени.

В результате процесса смешивания создаются новые структура и режимы управления переносом и отводом теплоты. В такой системе управления можно косвенно воздействовать на фазовые изменения в других подсистемах холодильного цикла.

Косвенная взаимосвязь двух циклических процессов разной природы: механической активации жидкости в центробежном регуляторе и переноса и отвода теплоты в испарителе выражается аналитически следующим образом:

$$\rho \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} = \frac{\Delta m_{0кр}}{\Delta t S}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta \sigma$  — толщина пограничной зоны процесса конденсации, соответствующая границе сконденсированной и замороженной частей на поверхности испарителя, м;

$\Delta t$  — интервал времени, с;

$S$  — площадь рабочей поверхности испарителя, м<sup>2</sup>;

$\Delta m_{0кр} = |m_{0кр i} - m_{0кр i+1}|$  — величина, показывающая изменение критической дисбалансной массы, соответствующей устойчивому режиму образования асимметричных параболоидов вращения в  $i$ -м эксперименте и в  $(i + 1)$ -м эксперименте, кг;

$m_{0кр i}$  — значение критической массы в  $i$ -м эксперименте;

$m_{0кр i+1}$  — значение критической массы в  $i + 1$ -м эксперименте;

$\Delta m_{0кр}$  представляет собой разницу  $P_i - P_{i+1}$ , т.е.  $P_i$  — масса хладагента и критическая масса в системе трубопроводов в  $i$ -м эксперименте, кг;

$m_{0кр}$  — критическая масса дисбалансного груза, определяющая режим устойчивой активации жидкости в центробежном регуляторе.

При  $m_0 > m_{0кр}$  возникает потеря устойчивости центробежного движения жидкости, оно деактуализируется. Величина  $P_i$  включает в себя не только массу холодильного агента в системе трубопроводов, но и дисбалансную массу, т.е. дополнительно учитывается и критическая масса дисбалансного груза, величина которой может регулироваться путем установки или замены на новый дисбалансный груз.

При изменении критической дисбалансной массы изменяется эксцентриситет  $e$  вращающейся системы, а также размер замкнутой области в фазовом пространстве, в которой периодическое механическое неуравновешенное движение жидкости вблизи положения равновесия, совпадающего с симметричной вращающейся системой, является устойчивым [4, с. 161–162].

Массы хладагента и дисбалансного груза учитываются совместно при расчете изменения термодинамических параметров системы. Основной процесс, происходящий в испарителе, — перенос и отвод теплоты, идет с учетом уже измененной толщины пограничной зоны  $\Delta\sigma(t)$ , или границы между жидкой и замороженной частями конденсата.

Фазовые переходы и соответствующие им скорости внутри и снаружи испарителя можно представить в виде производной первого порядка и некоторой интегральной функцией  $\sigma(t)$  в формуле (1), отражающей изменение толщины пограничной зоны. Поэтому справедливо утверждение, что определение величины  $\frac{d\sigma}{dt}$  есть определение скорости фазовых переходов в системе жидкость—иней. Единицы измерения  $\frac{d\sigma}{dt}$  — м/с, а  $\left(\rho \frac{d\sigma}{dt}\right)$  — кг/(м<sup>2</sup>·с).

Такую же размерность имеет величина  $\frac{dm_{0кр}}{Sdt}$  в формуле (1). Это означает, что изменение общей массы системы (хладагента и неуравновешенной массы) может быть вызвано как изменением массы дисбалансного груза, отнесенного к площади поверхности испарителя в области устойчивого процесса теплопередачи, так и изменением интенсивности термодинамического превращения масс (фазовых переходов в системе жидкость—пар). Последняя присутствует в формуле (1) и представляется величиной  $\left(\rho \frac{d\sigma}{dt}\right)$ . Совмещение этих двух величин в формуле (1) представляет тождество, в левой и правой частях которого эквивалентно отражаются периодические изменения общей массы, вызванные фазовыми превращениями и механикой конечных масс.

Таким образом, данная система представления двух взаимодействующих процессов тождеством

(1) подтверждает влияние механических движений на процессы теплопередачи в холодильном цикле при установке центробежного регулятора в замкнутую систему холодильной машины.

Функция  $\sigma(t)$  при решении уравнений теплопроводности в нестационарном режиме при изменении агрегатного состояния рабочего тела является разрешающей и может служить характеристическим уравнением теплового баланса на границе раздела жидкого и замороженного конденсата.

В результате вращения поток жидкости под действием центробежных сил приобретает форму параболоида вращения, сечение которого изображено на рис. 2, и который можно представить в виде сечения конуса, образованного секущей плоскостью  $C$ , расположенной под углом  $\alpha$  к вертикальной оси конуса. Таким образом, мы можем получить большое разнообразие параболических сечений в диапазоне малых углов  $\alpha$ , соответствующих изменению ориентации вертикальной оси параболоида вращения в подвижной жидкостной системе.

С появлением дополнительного потока жидкости, вызванного центробежным, неуравновешенным ее вращением, возникает коррекция формы теплового потока. В соответствии с законом сохранения энергии изменение формы сечения потока жидкости ведет к изменению формы теплового потока. Поэтому допустимо рассматривать возникновение формы, отличной от цилиндрического теплового потока внутри змеевика испарителя, в том контрасте изменения формы, в котором этот контраст был создан: в поле центробежных сил инерции. Представление новой формы теплового потока показано на рис. 3.

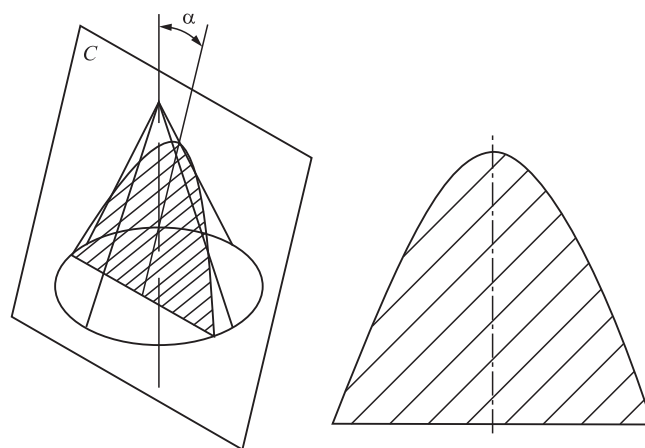
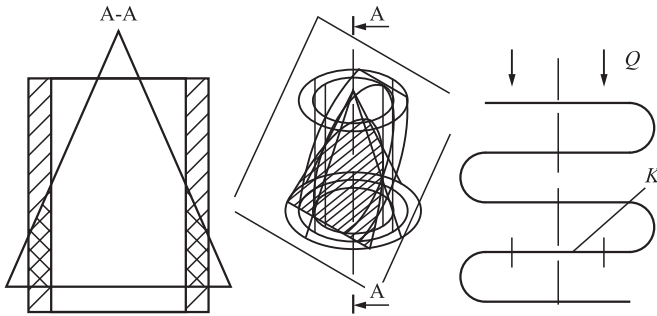


Рис. 2. Представление конического сечения в трубопроводе испарителя:

$C$  — плоскость сечения конуса под углом наклона  $\alpha$  к вертикальной оси; заштрихованная область — сечение конуса



**Рис. 3. Часть трубы змеевика испарителя и ее сечение А-А с обозначением фронта распространения теплового потока внутри воображаемого конуса:**

*K* — часть трубы змеевикового испарителя холодильной системы; А-А — сечение трубы с обозначением фронта распространения теплового потока в направлении выравнивания теплового поля; *Q* — энергия в виде теплоты, передающейся к змеевику из среды

В процессе образования слой инея состоит из двух разных зон, отличающихся по своему агрегатному состоянию. Обозначим индексом 1 сконденсировавшуюся влажную часть слоя, а индексом 2 замороженную часть слоя (рис. 4).

Составим уравнение теплопроводности для этих зон:

$$\frac{\partial T_1(d, t)}{\partial t} = \chi_1 \frac{\partial^2 T_1(d, t)}{\partial d^2} \text{ при } t > 0 \text{ и } 0 < d < \sigma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_2(d, t)}{\partial t} = \chi_2 \frac{\partial^2 T_2(d, t)}{\partial d^2} \text{ при } t > 0 \text{ и } \sigma < d < s, \quad (3)$$

где  $T_1(d, t)$  и  $T_2(d, t)$  — текущие значения температуры соответственно первой и второй зон;

$\chi_1$  и  $\chi_2$  — температуропроводность соответственно воды и снега,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$d$  — диаметральный размер, отсчитанный от оси симметрии испарителя, м;

$t$  — время, с;

$s$  — внешний диаметр сконденсированной части, м;

$\sigma = \sigma(t)$  — функция, описывающая расположение границы  $\Gamma$  замороженной и сконденсированной частей, м;

$d_{\text{тр}}$  — диаметр трубопровода испарителя, м.

На рис. 4 показаны сечение трубопровода испарителя холодильной камеры и геометрия возникающих частей приграничного слоя испарителя в результате переноса теплоты от воздуха холодильной камеры к хладагенту, циркулирующему внутри трубопровода. Геометрия замороженной и сконденсированной частей слоя в продольном сечении идеализирована. Расчеты в мгновенном сечении выполняются по уравнениям теплопроводности (2) и (3).

Определим краевые условия  $T_2(d_{\text{тр}}, 0) = T_{\text{исп}}$ , где  $T_{\text{исп}}$  — начальная температура замороженной части слоя на поверхности, соприкасающейся со стенкой испарителя, равна температуре стенки испарителя. Температура сконденсированной влажной части слоя на поверхности, соприкасающейся со стенкой испарителя, равна температуре стенки испарителя  $T_1(s, t) = T_0$ . Температура на границе замороженной и сконденсированной частей  $T_1(\sigma, t) = T_2(\sigma, t) = T_{\text{гр}} = \text{const}$ . Температура на нижней границе замороженной части постоянна во времени  $\frac{\partial T_2(d_{\text{тр}}, t)}{\partial t} = 0$ .

Тепловой баланс на границе  $\Gamma$  раздела сконденсированной и замороженной частей имеет следующий вид:

$$q_2 - q_1 = c_{\text{кр}} \rho \frac{d\sigma}{dt}; \quad (4)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(d, t)}{\partial d} - \lambda_1 \frac{\partial T_1(d, t)}{\partial d} = c_{\text{кр}} \rho \frac{d\sigma}{dt}, \quad (5)$$

где  $q_1$  — удельная теплота, распределенная в сконденсированной части слоя,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

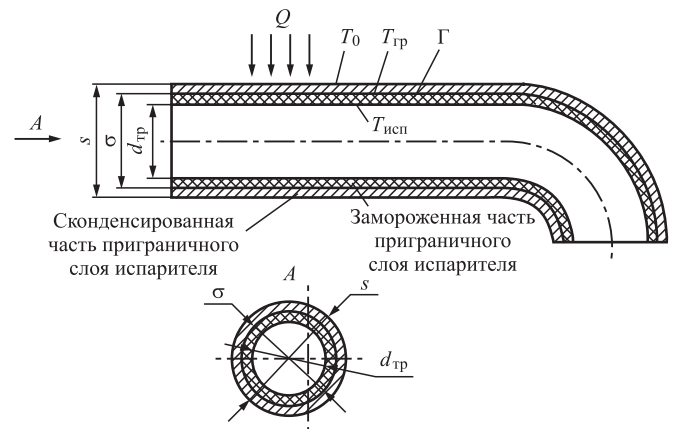
$q_2$  — удельная теплота, распределенная в замороженной части слоя,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\lambda_1$  — теплопроводность воды,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_2$  — теплопроводность снега,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$c_{\text{кр}}$  — теплота кристаллизации, Дж;

$\rho$  — плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .



**Рис. 4. Сечение трубопровода испарителя холодильной камеры:**

$\Gamma$  — граница между замороженной и сконденсированной частями;  $T_{\text{гр}}$  — температура на границе  $\Gamma$ ;  $T_{\text{исп}}$  — температура замороженной части слоя на поверхности, соприкасающейся со стенкой испарителя (равна температуре стенки испарителя);  $T_0$  — температура сконденсированной влажной части слоя;  $Q$  — энергия в виде теплоты, передающейся к змеевиковому испарителю из среды;  $s$  — внешний диаметр сконденсированной части;  $\sigma$  — текущее расположение границы  $\Gamma$ ;  $d_{\text{тр}}$  — диаметр трубопровода испарителя

Решение дифференциальных уравнений (2) — (5) приводит к характеристическому уравнению [5]:

$$\frac{\lambda_2(T_{гр} - T_{исп})}{\sqrt{\chi_2} \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_2 t}}\right)} e^{-\frac{\sigma^2}{4t\chi_2}} + \frac{\lambda_1(T_0 - T_{гр})}{\sqrt{\chi_1} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_1 t}}\right)} e^{-\frac{\sigma^2}{4t\chi_1}} = \frac{\sigma c_{кр} \rho \sqrt{\pi}}{2\sqrt{t}}, \quad (6)$$

где  $\operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_2 t}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_2 t}}} e^{-t^2} dt$  — функция ошибки;

$\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_1 t}}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{\chi_1 t}}\right)$  — комплиментарная функция ошибки.

В правой части уравнения (6)  $\frac{\sigma}{\sqrt{t}}$  характеризует скорость продвижения границы  $\Gamma$  сконденсированной и замороженной частей.

В задаче Стефана функция  $\sigma$  неизвестна, она определяется приближенным, графическим или аналитическим способом на основе известных на практике эмпирических функций  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $\sigma(t)$  как в работах [5] и [6, с. 6–10]. Представление таких функций при решении задачи теплопроводности при изменении агрегатного состояния рабочего тела затруднительно, так как форма равновесия не может быть описана точно, из-за сложности геометрии и неявных ее очертаний.

В нашей задаче управления переносом теплоты к испарителю известен вид функции  $\sigma(t)$ , связанный дифференциальным соотношением с функцией  $m_{0кр}(t)$ . Эта связь представлена формулой (1), используя которую, найдем вид функций  $\sigma(t)$  и  $m_{0кр}(t)$ . Запишем

$$\rho \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dm_{0кр}}{dt} \quad \text{или} \quad \rho \dot{\sigma} = \frac{1}{S} \dot{m}_{0кр}.$$

Получим

$$\frac{d\sigma}{dm_{0кр}} = \frac{1}{\rho S}, \quad \text{откуда} \quad d\sigma = \frac{1}{\rho S} dm_{0кр}.$$

Проинтегрируем левые и правые части последнего равенства, решая его как дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными,

$$\int d\sigma = \frac{1}{\rho S} \int dm_{0кр},$$

отсюда  $\sigma = m_{0кр} \rho S + C$ , где  $C$  — постоянная интегрирования, определяемая при начальных усло-

виях при  $t = 0$ ,  $\sigma = \sigma_0$ , а  $m_{0кр} = 0$ . Получим исходное выражение для функции  $\sigma$ :

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{m_{0кр}}{\rho S}. \quad (7)$$

Выражение (7) задает функцию  $\sigma$ , описывающую расположение границы  $\Gamma$ , замороженной и сконденсированной частей, в зависимости от величины критической неуравновешенной массы вращающейся системы в центробежном регуляторе. Таким образом, решение задачи Стефана упрощается, так как известен вид функции  $\sigma(t)$ . Вид функции  $m_{0кр}(t)$  в выражении (7) может быть определен для двух- и многопоточной жидкостной системы.

Изменение температуры по змеевику испарителя подчиняется линейному закону в первом приближении. Известна для такого случая формула расчета теплового потока  $Q_0$  в единицу времени [6, с. 10], который необходим для намораживания инея, формирования замороженной части слоя (см. рис. 4) диаметра  $\sigma$ , в виде полой цилиндрической шубы, за время  $t$  при температуре стенки испарителя  $T_{исп}$

$$Q_0 = S \rho c_{кр} \frac{\sigma}{t} + S \rho c_v \Delta T \frac{\sigma}{t},$$

где  $\Delta T = T_0 - T_{гр}$ , К;

$S$  — площадь поверхности испарителя, покрытая намерзшим инеем (замороженная часть слоя), м<sup>2</sup>;

$\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{кр}$  — теплота кристаллизации воды, Дж/кг;

$c_v$  — теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

Полная холодопроизводительность  $Q_0$ , Дж/с, определяется как в работе [6, с. 16]:

$$Q_0 = G_a q_0 = G_a (i_1 - i_4) = \frac{Q}{t},$$

где  $i_1$  и  $i_4$  — энтальпии хладагента на входе и выходе из испарителя, кДж/кг;

$G_a$  — массовый расход, кг/с.

Таким образом,

$$Q_0 = F \rho c_{кр} \frac{\sigma}{t} + F \rho c_v \Delta T \frac{\sigma}{t} = G_a (i_1 - i_4). \quad (8)$$

Последняя формула расчета производительности работы холодильной машины показывает, что механизм фазового перехода, работающий постоянно, собственно и определяет для данного объема пара рабочего вещества  $V$ , м<sup>3</sup>, образующегося в испарителе и поступившего в компрессор, скорость теплового потока (теплопередачи), необходимого для намораживания инея диаметром  $\sigma$  за время  $t$  при температуре стенки испарителя  $T_{исп}$ .

### Выводы

1. Необходимость повышения производительности холодильной машины обусловлена возможностью изменения условий внешней среды, повышения ее температуры, изменения давления. Наличие центробежного регулятора позволит компенсировать эти изменения без увеличения нагрузки на компрессор и другие устройства. Также возможна компенсация пиковых нагрузок при эксплуатации холодильной машины.

2. Решена задача управления переносом, отбором теплоты от воздуха холодильной камеры к испарителю в условиях действия механизма фазового перехода на границе раздела: твердое тело (замерзший иней) — вода (сконденсированная влага). Известная в теории задача определения температурных полей на границе замерзшего и талого грунта (задача Стефана) усовершенствована посредством нового критериального характеристического уравнения, учитывающего фазовые состояния в системе жидкость—лед и форму потока жидкости — хладагента в трубопроводе испарителя.

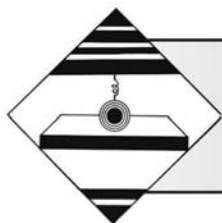
3. Оценка скорости изменения формы движения жидкости позволяет определить соответствие величины критической неуравновешенной массы  $m_{0кр}$  и формы фазовой траектории точек потока жидкости, представляемых в виде эквивалентного параболоида вращения, ориентированного в пространстве под углами  $\alpha$  и  $\beta$ , в проекции этой формы на фазовую плоскость, имеющую полярную систему отсчета радиуса  $r$  и угла  $\theta$ .

4. Модель образования формы теплового потока внутри испарителя связана с моделью образования формы движения жидкости, ее потока (числа струй) в центробежном поле, создаваемым неуравновешенным ее вращением.

5. Центробежное регулирование переноса теплоты путем изменения  $m_{0кр}$  — скорости изменения неуравновешенной массы позволяет управлять полной холодопроизводительностью агрегата, механизмом фазового перехода, определяющего скорость теплопередачи и описываемого распространением границы  $\Gamma$  баланса температур при изменении агрегатного состояния замороженного и сконденсированного слоев на поверхности испарителя. Центробежное регулирование приводит к нахождению лучшего по производительности режима работы холодильной машины, который не мог бы быть достижим без использования центробежного регулятора. Находится новый массовый расход  $G_d$  и разница энтальпий  $i_1, i_2$  на входе и выходе из испарителя.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кокорин Н.А.** Особенности криогенной обработки прокатных валков и оборудование для ее внедрения [Электронный ресурс] // ООО "НПЦ "КриоТехРесурс". URL: <http://www.cryotech.ru> (дата обращения: 19.04.2021).
2. **Холодильное** оборудование от "Ксирон-Холод". Низкотемпературные холодильные камеры до  $-75^{\circ}\text{C}$ . Вас интересуют технологии и оборудование охлаждения? [Электронный ресурс] // "Ксирон-Холод". URL: <http://www.xiron.ru/content/view/6459/83/> и <http://www.xiron.ru/> (дата обращения: 19.04.2021).
3. **Иванов А.Г.** Подвижные конструкции с корректируемыми массами. М.: Машиностроение-1, 2004. 253 с.
4. **Иванов А.Г., Скворцов В.Г.** Природа корректирующих масс и устойчивость подвижных систем. Чебоксары: АУ Чувашии ИУВ, 2012. 200 с.
5. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 602 с.
6. **Электробытовые** машины и приборы: сб. науч. тр. Киев: ВНИЭКИЭМП, 1970. 100 с.



**В.Ф. Безъязычный**, *д-р техн. наук*, **В.В. Плешкун**  
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва),  
**О.Н. Федонин**, *д-р техн. наук*  
(Брянский государственный авиационный технический университет)  
E-mail: technology@rsatu.ru

## Теоретический анализ влияния наклепа материала поверхностного слоя обрабатываемой детали на коррозионную стойкость поверхности в процессе эксплуатации

*Изложен анализ влияния технологических условий обработки и параметров качества материала поверхностного слоя детали, в том числе показателей упрочнения материала, на характеристики коррозионной стойкости материала детали. Приведены соответствующие расчетные зависимости.*

**Ключевые слова:** механическая обработка, поверхностный слой материала детали, шероховатость поверхности, глубина и степень наклепа материала, коррозионная стойкость.

*The analysis of the influence of technological processing conditions and material quality parameters of the surface layer of the part, including material hardening indicators, on the corrosion resistance characteristics of the part material is presented. The corresponding calculated dependences are given.*

**Keywords:** machining, surface layer of the part material, surface roughness, depth and degree of hardening of the material, corrosion resistance.

### Введение

При эксплуатации изделий машиностроения, в частности авиационных двигателей, в условиях коррозионного и эрозионного воздействия на детали стойкость последних будет определяться термодинамической стабильностью материала поверхностного слоя. Внутренние факторы, влияющие на термодинамическую стабильность материала поверхностного слоя детали, определяются комплексом параметров качества поверхностного слоя, включающим геометрические и физико-механические показатели состояния поверхностного слоя, которые формируются в процессе изготовления детали.

Обеспечение коррозионной стойкости деталей компрессора авиационного двигателя только механической обработкой зачастую невозможно из-за отсутствия научно обоснованных методик расчета и прогнозирования изменения термодинамической стабильности материала поверхностного слоя, выбора параметров качества поверхностных

слоев и условий механической обработки для обеспечения требуемой коррозионной стойкости. В этой связи актуальны исследования технологического обеспечения коррозионной стойкости деталей на основе рационального выбора методов и режимов обработки, а также изучение влияния параметров качества поверхностного слоя материала детали, в частности степени и глубины наклепа, на его коррозионную стойкость.

После механической обработки коррозионная стойкость деталей меняется, причем в большинстве случаев снижается. Причина тому — увеличение внутренней энергии материала в процессе механической обработки, которое можно рассматривать как процесс передачи энергии, затрачиваемой на процесс обработки, материалу обрабатываемой детали. Кроме внутренней энергии, на коррозионную стойкость деталей оказывает влияние и микрогеометрия поверхности. Это влияние объясняется тем, что во впадинах шероховатой поверхности возможно увеличение кон-

центрации реакционно-способных частиц коррозионной среды.

Так как формирование поверхностного слоя материала детали происходит в процессе механической обработки, то появляется возможность технологическими методами обеспечить коррозионную стойкость деталей, т.е. при разработке технологии их изготовления необходимо обеспечить заданную шероховатость поверхностного слоя подложки для адгезии с покрытием, обеспечивающим увеличение коррозионной стойкости.

### Методы и результаты исследования

Влияние технологических условий обработки (режимов резания и геометрических параметров режущей части инструмента, а также материала заготовки и режущей части инструмента) на коррозионную стойкость целесообразно исследовать посредством сопоставления скорости коррозии материала образца сравнения со скоростью коррозии материала детали, обработанной при принятых технологических условиях. При этом образец сравнения должен быть подвергнут отжигу для снятия остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое материала, обработан шлифовальной шкуркой для удаления с поверхности, подлежащей сравнению, окисных слоев металла и отполирован на войлочном круге с пастой ГОИ. В соответствии с исследованиями [1] образец сравнения должен иметь следующие параметры качества поверхностного слоя материала: степень наклепа  $U_H = 1,0$ ; параметр шероховатости поверхности  $Rz = 0,15$  мкм; относительную опорную длину профиля поверхности по средней линии  $tm = 50$  %.

Сопоставление скорости коррозии материала образца сравнения и скорости коррозии материала детали после механической обработки позволяет определить степень влияния технологических условий обработки на коррозионную стойкость материала обработанной поверхности. Комплексный параметр скорости коррозионного изнашивания  $KC$  в соответствии с исследованиями [1] определяется по формуле:

$$KC = b_0 U_H^{b_1} \left[ \frac{28 \cdot 10^6 Rv}{(100 - tm)^2 Sm^2} \right]^n, \quad (1)$$

где  $U_H$  — степень наклепа материала поверхностного слоя детали после механической обработки, %;

$Rv$  — наибольшая глубина впадины профиля, мкм;

$Sm$  — шаг неровностей на поверхности детали по средней линии, мкм;

$tm$  — относительная опорная длина профиля поверхности по средней линии, %;

$b_0$  и  $b_1$  — коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала: для нетермоупрочненной стали  $b_0 = 1,0$  и  $b_1 = 5,2$ ; для термоупрочненной низколегированной стали  $b_0 = 0,73$  и  $b_1 = 5,72$ ; для термоупрочненной среднелегированной стали  $b_0 = 0,74$  и  $b_1 = 5,57$ ;

$n$  — коэффициент, учитывающий вид коррозии;  $n = 0,66$  для коррозии в жидкости;  $n = 0,5$  для атмосферной коррозии.

В соответствии с работой [2] значение  $tm$  определяется по формуле

$$tm = 100 - \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4 Rz}{Sm}}, \quad (2)$$

а значение  $Rv = 0,55Rz$ .

С учетом значений  $tm$  и  $Rv$  формула для определения расчетного значения  $KC$  после математических преобразований примет вид

$$KC = b_0 U_H^{b_1} \left( \frac{770}{Sm} \right)^n. \quad (3)$$

Шаг неровностей на обработанной поверхности по средней линии может быть определен по следующим формулам [3]:

$$Sm = 2\sqrt{Rz(2r - Rz)} \text{ при } S \leq 2r \sin \varphi_1;$$

$$Sm = 2r \sin \left[ \varphi_1 - \arctg \frac{r - (1 - \cos \varphi_1) - 0,5Rz}{r \sin \varphi_1} \right] + Rz \operatorname{ctg} \varphi_1$$

при  $2r \sin \varphi_1 < S \leq r \left[ \frac{1 - \cos(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \right]; \quad (4)$

$$Sm = \frac{2r(1 - \cos \varphi_1)}{\sin \varphi_1} + 0,5Rz(\operatorname{ctg} \varphi + 3\operatorname{ctg} \varphi_1)$$

$$\text{при } S > r \left[ \frac{1 - \cos(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \right],$$

где  $S$  — подача, мм;

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

$\varphi$  и  $\varphi_1$  — главный и вспомогательный углы резца в плане, °;

$Rz$  — высота неровностей на обработанной поверхности, мкм.

При оптимальных скоростях резания, соответствующих минимуму износа режущего инструмента, высота неровностей на обработанной поверхности рассчитывается по формуле [3]:



$$Rz = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{0,6625a_1^{0,125} c_p \theta_0 \left[ 4,3(\sin \alpha)^{0,115} V_0^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left( \frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right]}{[\tau_p a^{-0,43} (\sin \alpha)^{0,025} V_0 \lambda t^{0,25} m^{0,74-n_0} c_0 b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma)]} \right\}^{\frac{2}{1-n_0}}, \quad (5)$$

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

$a_1$  — толщина сечения среза, м;

$\theta_0$  — оптимальная температура в зоне резания, обеспечивающая минимальный износ режущего инструмента, °С;

$c_p$  — удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м<sup>3</sup>·К);

$v_0$  — оптимальная скорость резания, м/с;

$\lambda$  и  $\lambda_p$  — коэффициенты теплопроводности материала обрабатываемой детали и режущего инструмента, Вт/(м · К);

$t$  — глубина резания, м;

$\alpha$  и  $\gamma$  — задний и передний углы резца, °;

$\beta$  и  $\varepsilon$  — угол заострения и угол при вершине резца в плане, °;

$a$  — температуропроводность материала обрабатываемой детали, м<sup>2</sup>/с;

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

$b$  — длина контакта режущей кромки инструмента с материалом обрабатываемой детали, м;

$m = a_1/S$  — коэффициент, зависящий от геометрических параметров режущего инструмента;

$S$  — подача, м/об;

$C_0$  и  $n_0$  — коэффициенты, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов, а также от соотношения радиуса округления режущей кромки инструмента и толщины сечения среза  $a_1$ ;

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

Степень наклепа материала поверхностного слоя детали при обработке лезвийным инструментом определяется по формуле

$$U_H = 1 + N = 1 + \frac{h_H}{125(\sigma_B/\sigma_{B0})^{0,8}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности на растяжение материала обрабатываемой детали, МПа;

$h_H$  — глубина наклепа в поверхностном слое материала детали при обработке, м.

Глубина наклепа определяется по формуле

$$h_H = \frac{0,76 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta^{0,36}}{\sqrt{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}, \quad (7)$$

где параметры имеют следующие размерности:  $\tau_p$  — Па;  $S$  — м/об;  $t$  — м;  $\rho_1$  — м;  $\alpha$ ,  $\gamma$ , а также  $\varphi$  — главный угол резца в плане, °;  $r$  и  $\rho_1$  — м;  $\delta$  — высота фаски износа режущего инструмента по задней поверхности, м;  $\sigma_{B0}$  — предел прочности на растяжение электротехнической стали, МПа;  $v$  — скорость резания, м/с.

Изложенная выше методика определения коэффициента  $K_C$  (комплексного параметра скорости коррозии) позволяет исследовать влияние на коррозионную стойкость как параметров качества поверхностного слоя (параметров шероховатости, степени и глубины наклепа материала поверхностного слоя), так и технологических условий обработки поверхности (режима резания и геометрических параметров режущей части инструмента), а также физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Оценка влияния степени коррозии на качество поверхностного слоя возможно посредством определения степени изменения высоты микронеровностей на исследуемой поверхности, обусловленной протеканием коррозионных процессов. Согласно исследованиям О.Н. Федонина, высота неровностей на поверхности детали после корродирования может быть определена по формуле [2]:

$$Rz = Rz_{исх} + \Delta Rz + \Delta \rho_w - \Delta \rho_m, \quad (8)$$

где  $Rz_{исх}$  — исходный параметр шероховатости обработанной поверхности;

$\Delta Rz = \rho_w$  — приращение высоты профиля шероховатости вследствие коррозии, так как в первую очередь коррозия происходит во впадинах профиля неровностей на обработанной поверхности;

$\Delta \rho_w = v_k \tau$  — изменение глубины питтинга коррозии во впадине профиля шероховатости;

$\Delta \rho_m = v_k \tau K_B$  — изменение радиуса скругления выступов профиля шероховатости;

$v_k$  — скорость коррозии материала детали в данных условиях;

$\tau$  — время корродирования;

$K_B = 1,28...2,0$  — коэффициент, учитывающий соотношение скорости коррозии материала выступов и впадин неровностей.

**Зависимость показателей коррозионного изнашивания обработанных поверхностей от степени износа режущего инструмента**

Высота фаски износа по задней поверхности режущего инструмента	$\delta$ , мм	0,05	0,2	0,3	0,5	0,7
Размерный износ режущего инструмента	$\Delta_{\text{изн}}$ , мм	0,014	0,054	0,081	0,135	0,189
Исходный параметр шероховатости обработанной поверхности	$Rz_{\text{исх}}$ , мкм	2,3	2,9	3,9	5,1	5,6
Глубина наклепа в поверхностном слое материала обработанной поверхности	$h_n$ , мкм	45,8	68,6	79,4	95,4	107,7
Степень наклепа в поверхностном слое материала обработанной поверхности	$U_n$	1,22	1,40	1,47	1,56	1,63
Шаг неровностей на обработанной поверхности	$Sm$ , мкм	135	152	176	201	211
Параметр шероховатости на обработанной поверхности после коррозионного изнашивания	$Rz$ , мкм	4,25	4,88	6,51	7,75	8,38
Соотношение	$\frac{Rz}{Rz_{\text{исх}}}$	1,848	1,683	1,670	1,520	1,496

Значение  $\rho_w$  определяется по формуле [2]

$$\rho_w = \sqrt[3]{\frac{3v_k \tau S_m Rz_{\text{исх}}}{4 \sin \beta}}, \quad (9)$$

где  $\beta$  — угол наклона профиля шероховатости.

Высота микронеровностей на обработанной поверхности, полученная вследствие коррозионных процессов, определяется по формуле

$$Rz = Rz_{\text{исх}} + \sqrt[3]{\frac{3v_k \tau S_m Rz_{\text{исх}}}{4 \sin \beta}} + v_k \tau (1 - K_B). \quad (10)$$

Для конкретных условий обработки выполним расчет параметра шероховатости обработанной поверхности после коррозионного изнашивания по изложенной выше методике.

Исходные условия обработки: материал обрабатываемой заготовки сталь 40; материал режущей части резца Т15К6; режим резания:  $S = 0,1$  мм/об;  $v = 3$  м/с;  $t = 0,5$  мм; геометрические параметры режущей части резца:  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $r = 1$  мм;  $\rho_1 = 30$  мкм;  $\delta = 0,2$  мм;  $\sigma_B/\sigma_{B0} = 1,7$ ; время корродирования 1 год;  $v_k = 0,019$  (по данным О.Н. Федониной) [2].

Расчет выполняли в следующей последовательности:

1. Степень наклепа обработанной поверхности — по формуле (3); при обработке резцом с фаской износа  $\delta = 0,2$  мм составляет  $N = 1,40$ .

2. Параметр шероховатости обработанной поверхности при обработке резцом с фаской износа  $\delta = 0,2$  мм при расчете по формуле (5) составляет  $Rz_{\text{исх}} = 2,9$  мкм.

3. Значение шага неровностей на поверхности образца, рассчитанное по формуле (1), при условии обработки резцом с износом  $\delta = 0,2$  мм, —  $Sm = 152$  мкм.

4. Параметр шероховатости обработанной поверхности после коррозионных процессов при

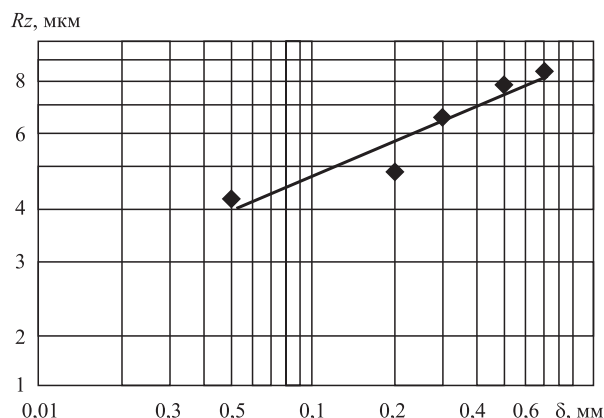
обработке резцом с фаской износа  $\delta = 0,2$  мм —  $Rz = 4,88$  мкм (по формуле (8)).

В соответствии с приведенным выше примером были выполнены расчеты высоты неровностей на обработанной поверхности вследствие коррозионного изнашивания этой поверхности при обработке резцом с различными значениями показателей износа режущего инструмента (таблица). По результатам расчета был построен график зависимости значений  $Rz$  от степени износа режущего инструмента (рис. 1), с использованием которого получена зависимость для определения показателей коррозионного изнашивания поверхности с учетом износа режущего инструмента. Параметр шероховатости обработанной поверхности после коррозионного изнашивания  $Rz$ , мкм:

$$Rz = 8,896(\Delta_{\text{изн}}/\text{tg}\alpha)^{0,27}, \quad (11)$$

где  $\Delta_{\text{изн}}$  — размерный износ режущего инструмента, мм;

$\alpha$  — задний угол резца,  $^\circ$ .



**Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости на обработанной поверхности  $Rz$  вследствие коррозионных процессов от размера фаски износа режущего инструмента  $\delta$**

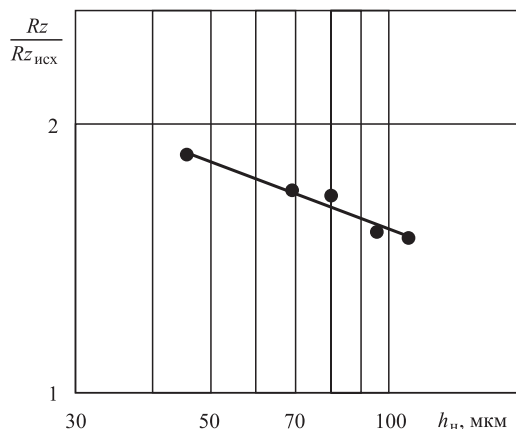


Рис. 2. Зависимость  $Rz/Rz_{исх}$  от глубины наклепа  $h_n$

Приведенные в таблице значения параметра шероховатости обработанной поверхности после коррозионного изнашивания  $Rz$  и после обработки  $Rz_{исх}$  характеризуют качество после обработки (до эксплуатации) и после определенного периода эксплуатации, а изменение их соотношения  $Rz/Rz_{исх}$  будет характеризовать влияние упрочнения материала поверхностного слоя детали на коррозионную стойкость. Зависимости, приведенные на рис. 2 и 3, позволили определить степень численного влияния степени упрочнения материала  $U_n$  и глубины наклепа материала поверхностного слоя детали  $h_n$  на изменение шероховатости поверхности после эксплуатации в результате коррозионного воздействия, которые можно определить по следующим формулам:

$$Rz/Rz_{исх} = 4,8936h_n^{-0,2525} \text{ при } R^2 = 0,9565; \quad (12)$$

$$Rz/Rz_{исх} = 2,162U_n^{-0,748} \text{ при } R^2 = 0,9538. \quad (13)$$

После преобразования получим:

$$Rz = 4,8936Rz_{исх} \cdot h_n^{-0,2525}; \quad (14)$$

$$Rz = 2,162Rz_{исх} \cdot U_n^{-0,748}. \quad (15)$$

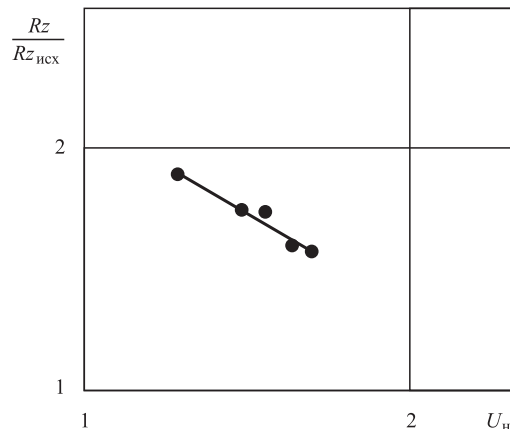


Рис. 3. Зависимость  $Rz/Rz_{исх}$  от степени наклепа на поверхности  $U_n$

### Заключение

Полученные в данной работе расчетные зависимости (14) и (15) позволяют оценить степень влияния исходных значений параметра шероховатости и параметров упрочнения материала поверхностного слоя детали на параметр шероховатости  $Rz$  после коррозионного изнашивания. С увеличением значения  $Rz_{исх}$  высота неровностей на рабочей поверхности при коррозионном воздействии увеличивается, при увеличении степени и наклепа — уменьшается, что объясняется повышением прочностных характеристик материала.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федонин О.Н. Инженерия поверхности детали с позиции ее коррозионной стойкости // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. № 10. 2001. С. 17–19.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
3. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение. 2012. 320 с.

П.А. Головкин, канд. техн. наук  
(АО "Плутон", г. Москва),  
М.М. Милутинович  
(ООО "Медар-сервис", г. Москва)  
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

## Влияние способа изготовления и термической обработки на характеристики и размерную стабильность сплава МНК

*Анализируются возможности улучшения свойств и повышения размерной стабильности материала специального сплава МНК для деталей электровакуумных СВЧ-приборов методами деформации и термической обработки.*

**Ключевые слова:** электронные приборы, механизм перестройки, стабильность характеристик, деформация, термическая обработка, свойства материала, поперечновинтовая прокатка, сложная ковка, размерная стабильность деталей, автодеформирование.

*The possibilities of improving the properties and increasing the dimensional stability of material of the special Cu—Ni—Si alloy for the parts of electric vacuum microwave devices by the deformation and heat-treatment methods are analyzed.*

**Keywords:** electronic devices, transformation mechanism, performance stability, deformation, heat treatment, material properties, cross rolling, complex forging, dimensional stability of parts, self-deforming.

### Общие положения

АО "Плутон", являющееся одним из лидеров в области разработки и выпуска специальных устройств СВЧ [1], использует в своей работе ряд материалов, имеющих ограниченное применение в других отраслях промышленности.

Рабочие параметры электровакуумных приборов СВЧ-диапазона, помимо заданной вакуумной плотности, обеспечиваются размерной стабильностью деталей, включая механизм перестройки их рабочей частоты. С учетом того, что температура рабочей зоны приборов в аппаратуре накаливаемого типа может достигать 400 °С, а в процессе настройки и испытаний и более [2], обеспечение размерной стабильности деталей становится непростой задачей. Между тем она напрямую предопределяет стабильность рабочих показателей СВЧ-приборов [2].

Одним из материалов, предназначенных для изготовления деталей электровакуумных приборов СВЧ, является медноникелевый сплав с добавкой кремния марки МНК, сочетающий заданный уровень жаропрочности и механических свойств [3, 4]. Важно, что автодеформирование и, как следствие, изменение размеров деталей и узлов в процессе отладки, испытаний и эксплуатации приборов может сделать параметры их работы

неприемлемыми [2], что требует особого внимания к размерной стабильности деталей приборов.

В данном случае изменение размеров деталей целесообразно рассматривать совместно с природой деградации и разрушения металлического материала, напрямую связанных с выделением на границах зерен нежелательных примесей и уровнем поверхностной энергии на этих границах [5]. На рис. 1 (см. обложку) показан пример зернограничного выкрашивания в тонкостенной детали из сплава МНК механизма перестройки рабочей частоты устройства СВЧ и внутренняя картина расслоений в материале исходного прутка. Комплексный анализ происходящих в металлическом материале процессов позволит выстроить технологический процесс изготовления исходного пруткового полуфабриката необходимым образом.

### Механизмы изменения размеров деталей и сопутствующих процессов

Деформация всегда увеличивает структурную неоднородность металла, чем естественно активизирует протекание диффузионных и фазовых превращений при нагреве [6]. При этом диффузионная пластичность является частью механизма изменения размеров в процессе отдыха металла и

его высокотемпературной ползучести, складывающейся из суммарно-осадительно-механического, межзеренной диффузии и самодиффузии [7]. При увеличении температуры, начиная от комнатной, на каждые 10...15 °С коэффициент диффузии возрастает примерно вдвое [8]. Если при температуре на 200...500 °С ниже точки плавления средние значения самодиффузии в зернах металлов составляют  $1 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>/с [8], то перемещение атомов по границам зерен происходит в 100...1000 раз активнее [5]. Поэтому измельчение зерен путем термической и деформационной обработки способствует замедлению диффузионных процессов. В свою очередь, термическая стабилизация уменьшает удельную нескомпенсированность полей межмолекулярных сил на межфазных поверхностях [5].

Важно, что границы и плоскости скольжения представляют собой области с сильно искаженной структурой и повышенной свободной энергией, достаточной для расплавления отдельных микрообъемов металлического материала и формирования нежелательных фаз [8]. Адсорбционное понижение прочности при появлении жидкой фазы на границах зерен является одной из причин прочностной деградации и разрушения металлического материала. Поэтому зарождение первичных трещин, как энергетически наиболее выгодное, происходит по тройным стыкам зерен со стенками, смоченными расплавом легкоплавких фаз [9] (см. рис. 1, в).

При этом возможно повышенное содержание в сплаве МНК, как и в других медных сплавах, таких элементов, как образующие легкоплавкие эвтектики Bi, Se и Te. Так, концентрация висмута на границах зерен может достигать 20 % при среднем содержании менее  $3 \cdot 10^{-4}$  % [10]. Легкоплавкие эвтектики BiPb и CuBi с температурами плавления 124 и 271,44 °С [10] находятся в рамках рабочих температур электровакуумных приборов [2]. То же касается селенида меди CuSe и теллурида меди CuTe с температурами конгруэнтного плавления 367 и 453 °С соответственно [11]. Все это может привести к разрушению деталей по границам зерен при механической обработке и тепловой нагрузке.

Согласно принципу Ле-Шателье, в состоянии растяжения на поперечных границах зерен происходит наибольшая генерация вакансий и накопление примесей [9]. Их негативное воздействие тем сильнее, чем крупнее зерно и толще границы. В таком состоянии даже при отсутствии магистральных трещин превращения в металлическом материале образуют у поперечных границ микропустоты, а это значит, что применение ковочных операций при изготовлении прутка в данном случае предпочтительнее прокатки [12].

## Условия и результаты эксперимента

Для численного измерения влияния процесса рекристаллизации при нагреве деталей из сплава МНК в конструкции электровакуумных приборов были изготовлены образцы из исходного пруткового материала диаметром 45 мм. Эксперимент включал изготовление исходного образца с размерами 40×24×7 мм на щадящих режимах, обеспечивающих по возможности наименьший уровень нагартовки.

Контрольные размеры были выполнены с допуском в пределах  $\pm 2$  мкм. Исходя из проведенных работ и литературных данных, отслеживали изменение размеров после проведения ряда технологических воздействий. Выполнили моделирующий пайку двухступенчатый отжиг, включающий нагрев со скоростью 30 °С/мин, выдержку при 750 °С в течение 20 мин, дальнейший нагрев до 870 °С с выдержкой 1,5 мин и охлаждение со скоростью около 60 °С/ч. Такое воздействие вызвало уменьшение размеров образца в направлении, перпендикулярном к направлению проката, на 0,02...0,10 %. Казалось бы, в процессе снятия напряжений при отжиге, поперечный размер образца должен был увеличиться, однако противоречия здесь нет.

Дело в том, что состоянию прокатанного прутка соответствуют высокие растягивающие напряжения ближе к центру его сечения, вызванные явлением более быстрого перемещения внешних слоев материала относительно внутренних слоев при его прокатке — так называемым опережением при прокатке [13]. Это и обусловило уменьшение линейного размера в поперечном относительно прокатки направлении. Напротив, такое изменение размеров лишь дополнительно указывает на высокий уровень внутренних напряжений в материале полученного поперечно-винтовой прокаткой (ПВП) прутка [13].

При этом имеют место повышенные напряжения растяжения как в продольном относительно направления проката, так и в поперечном направлениях. Соответственно, "усадка" материала растет по мере приближения к центру сечения прутка. Если вблизи концов диаметра заготовки изменение размеров практически отсутствует, то ближе к центру сечения прутка она достигает 0,1 % от линейного размера образца. Для таких точных устройств, как электровакуумные СВЧ-приборы, даже на первый взгляд незначительное изменение линейных размеров деталей должно быть учтено, поскольку может неприемлемо изменить их рабочие характеристики.

В процессе отжига после закалки изменения размеров опытных образцов составили около

0,05 % с минимальным разбросом по площади сечения, что свидетельствует об исходном более стабильном состоянии металлического материала. Это также означает, что проведение закалки существенно снижает уровень напряжений и микрохимической неоднородности материала прутка, хотя и не может нивелировать нежелательное воздействие опережения при прокатке полностью.

### Рекомендуемые режимы изготовления прутков из сплава МНК

В ходе исследований установлено, что характерные для поперечно-винтовой прокатки напряжения в материале прутка формируют структуру материала, характеризующуюся низкой твердостью, составляющей минимум 50...55 НВ, и, как следствие, неудовлетворительными обрабатываемостью резанием и технологичностью сборки. В то же время распределение напряжений и деформаций в процессе свободнойковки и протяжки заготовок на прутковый сортамент обеспечивает проработку и уплотнение металлического материала по всему сечению прутка, обеспечивая удовлетворительную твердость 110...120 НВ.

Практика работы АО "Плутон" показала, что хорошие характеристики исходного пруткового полуфабриката обеспечиваются специальными технологическими воздействиями. Очищенный от окисленной корочки слиток следует гомогенизировать при температуре 830 °С в течение 15 ч и далее ковать после нагрева до 930 °С по сложным схемам с подогревами, завершая протяжкой по схеме квадрат → квадрат → круг. По мере проковки температуру нагрева заготовок целесообразно понижать на 30...50 °С, ограничивая температуру концаковки диапазоном 820...830 °С. Типичная микроструктура кованых прутков с размером зер-

на в пределах 70...100 мкм показана на рис. 2. Далее, для уменьшения химической неоднородности и снятия напряжений после ковочного нагрева, заготовки целесообразно подвергать закалке в воде, и после вылеживания в течение 12 ч упрочняющему старению при температуре 500 °С в течение 3 ч с охлаждением с печью. Важно отметить, что превышение температуры концаковки и, соответственно, закалки в воде приведет к существенному росту зерна и огрублению структуры. Для исключения такой опасности закалку следует проводить в виде отдельной операции, понизив температуру нагрева до 800 °С.

Здесь необходимо обратить внимание на то, каким образом при изготовлении исходного расплава производится его раскисление и модифицирование. Важно был ли расплав раскислен и модифицирован только лишь мишметаллом на основе лантана и цезия или имело место добавление циркония. Дело в том, что даже в малых количествах добавки циркония оказывают существенное влияние на твердость материала получаемого прутка. Так, при отсутствии циркония, после закалки материал прутка показывает твердость в пределах 65...70 НВ, при его наличии — 80...85 НВ, однако оба интервала не обеспечивают хорошую обрабатываемость резанием, что препятствует изготовлению точных деталей. Старение увеличивает твердость более чем вдвое, до 170...180 НВ и 210...220 НВ, при отсутствии и при наличии циркония соответственно, обеспечивая хорошую обрабатываемость и стабильность размеров деталей при неизменном размере зерна в пределах 70...100 мкм. Таким образом, наличие циркония на 15...17 % увеличивает прочностные показатели сплава при комнатной температуре и еще значительно — при повышенных температурах, соответствующих режимам настройки и работы СВЧ-приборов [13].

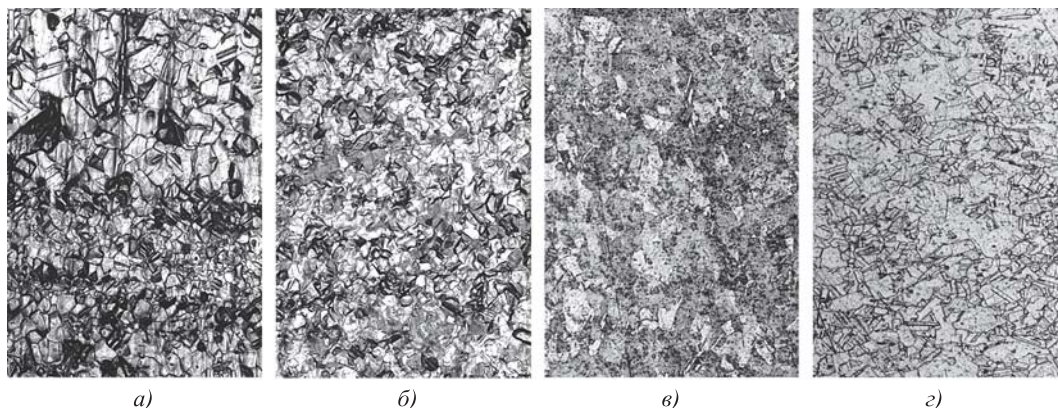


Рис. 2. Долевая структура прутка ( $\times 100$ ):

*a* — катаного; *b* — кованого; *v* — после закалки в воду; *z* — после закалки и искусственного старения при 500 °С

Представленные на рис. 2 типы структур материала прутков расположены по порядку уменьшения склонности к автодеформации и прочностной деградации. Наименее желательной является нестабильная структура направленной полосчатости и самоотпуска, представленная рис. 2, а. Она сочетает склонность к адсорбционному понижению прочности из-за скопления легкоплавких примесей на границах крупных рекристаллизованных зерен с напряжениями и большим количеством вакансий у поперечных границ вытянутых зерен.

Нестабильность структуры дополнительно понижает ее прочность ввиду развития микрохимической неоднородности. Практика показывает, что подобные структуры часто имеют место при получении исходных прутков методом ПВП [13]. Более предпочтительной является равномерно деформированная структура прутков, полученных с использованиемковки по сложным схемам, представленная на рис. 2, б. Она менее склонна как к прочностной деградации, так и к автодеформированию при тепловом воздействии.

Обеспечить уровень микрохимической неоднородности можно проведением термической обработки в виде закалки в воду. Получаемая структура отличается пониженным уровнем остаточных напряжений, однако и малой твердостью, и, как следствие, плохой обрабатываемостью и малой прочностью. Пример такой структуры представлен рис. 2, в.

Однако для эксплуатации в качестве материала деталей электровакуумных СВЧ-приборов наиболее целесообразно применение сплава МНК после закалки и старения. Такая обработка предполагает, что в процессе закалки снимаются внутренние напряжения, оставшиеся после деформации, а применение технологии старения приводит к повышению прочности вследствие выделения эвтектоидов мишметалла и циркония по границам зерен и фаз [7, 8]. Пример структуры с характерными двойниками отжига приведен на рис. 2, г.

Сложность процессов изготовления исходного полуфабриката и конечных деталей из сплава МНК, многоплановость требований к деталям специальных электровакуумных устройств СВЧ не позволяют в рамках одной статьи провести развернутый анализ и полностью оценить уникальность технологических решений. Данное исследование опирается лишь на один из множества подходов к решению рассматриваемых задач и не рассматривает, например, вопросы высокотемпературной ползучести и автодеформирования металлических материалов при циклическом тепловом воздействии.

## Выводы

1. Способы получения исходных прутков из сплава МНК напрямую влияют на микрохимическую неоднородность, которая, в свою очередь, предопределяет возможное адсорбционное понижение прочности при появлении легкоплавких жидких фаз на границах зерен. Вкупе с межзеренными напряжениями такая прочностная деградация может вызвать выкрашивание зерен по их границам.

2. Материал катаных методом ПВП прутков характеризуется склонностью к повышению размерных показателей в направлении, перпендикулярном к направлению проката в течение первой теплосмены, моделируемой в виде отжига. В то же время напряжения растяжения в материале центральной части прутков настолько значительны, что перекрывают уширение образцов вследствие эффекта возврата вытянутых деформированных зерен к исходному более равновесному состоянию.

3. Уменьшение линейных размеров образцов материала прутков, полученных методом ПВП, составляет от 0,02 до 0,1 %, причем чем ближе к центру поперечного сечения прутка, тем оно больше, и может оказаться критическими для работы СВЧ-устройств. Применение стабилизирующей и упрочняющей обработки в виде закалки и старения уменьшает степень изменения размеров контрольных образцов в процессе моделирования пайки по всему их сечению до 0,05 %.

4. Минимальное изменение размеров при прохождении теплосмен может быть обеспечено получением равномерной мелкозернистой структуры с минимальной исходной анизотропией свойств и микрохимической неоднородностью, что достигается применением сложных схемковки при изготовлении исходного прутка и термической стабилизацией в виде закалки и последующего старения. Получаемая упрочненная структура обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик и хорошую обрабатываемость резанием, а также стабильность размерных характеристик деталей в процессе теплосмен, характерных для изготовления, наладки и работы специальных электровакуумных СВЧ-устройств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Плутон.** 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее. М.: ООО "Пилотаж", 2019. 232 с.
2. **Коваленко В.Ф.** Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Советское радио, 1975. 216 с.
3. **Прутки** из сплава марки МНК вакуумной плавки. Технические условия: Яе0.021.036 ТУ. 1981.

4. **Металлы** и сплавы для электровакуумных приборов / А.С. Гладков и др. под общ. ред. А.И. Шокина. М.: Энергия, 1969. 600 с.
5. **Бокштейн Б.С., Капецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С.** Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
6. **Бочвар А.А.** О разных механизмах пластичности в металлических сплавах. М.: Известия АН СССР, № 5. 1948.
7. **Корнеев Н.И., Скугарев И.Г.** Пластическая деформация высоколегированных сплавов. М.: МАП, Оборонгиз, 1955. 204 с.
8. **Пикунов М.В., Десипри А.И.** Металловедение: учебное пособие для техникумов. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
9. **Новиков И.И.** Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М.: Наука, 1966. 300 с.
10. **Ватрушкин Л.С., Осинцев В.Г., Козырев А.С.** Бескислородная медь. М.: Металлургия, 1982. 192 с.
11. **Лебедь А.Б., Набойченко С.С., Шунин В.А.** Производство селена и теллура на ОАО "Уралэлектромедь": учебное пособие / под ред. С.С. Набойченко. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2015. 112 с.
12. **Галкин В.И., Головкин П.А.** О влиянии механизмов деформации на структуру и свойства металлического материала // Упрочняющие технологии и покрытия, № 5. 2021. С. 207–214.
13. **Тетерин П.К.** Теория поперечно-винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1971. 368 с.

УДК 621.778.27.014(043)

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-8-360-367

**Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова**, канд. техн. наук  
(Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь),  
**Ю.М. Тебенко**  
(ООО КПК "Автокрансервис", г. Ставрополь)  
E-mail: nikita3535@mail.ru

## Совершенствование способа и устройства для упрочнения пружин конической формы или формы параболоида вращения\*

*Описаны механизм упрочнения пружин, способы создания упрочненных зон на внутренней и наружной поверхностях пружины конической формы или формы параболоида вращения и на поверхности по линии контакта витков между собой упрочненные зоны. Представлена конструкция и порядок работы устройства, позволяющего реализовать упрочнение конической или параболической пружины методом контактного заневоливания.*

**Ключевые слова:** способ упрочнения пружин, устройство для упрочнения пружин, заневоливание, конические пружины, параболоидные пружины.

*The mechanism of hardening of springs, methods of creating hardened zones on the inner and outer surfaces of the spring with a conical shape or the shape of a paraboloid of revolution, and on the surface along the line of contact of the coils, hardened zones are described. The article presents the design and operation of a device that makes it possible to implement the strengthening of a conical or parabolic spring by the method of contact deflection.*

**Keywords:** springs hardening method, device for springs hardening, predeformation, conical springs, paraboloid springs.

### Введение

Пружины входят в устройство узлов и механизмов сельскохозяйственной, железнодорожной, авиационной, автомобильной и другой техники.

Для практического применения часто предпочтительны конические и параболоидные пружины, поскольку по сравнению с цилиндрическими пружинами они более устойчивы и в сжатом состоянии имеют меньшую высоту. Однако существует эксплуатационное ограничение: для их упрочнения не подходят известные способы и устройства, применяемые для упрочнения цилиндрических пружин.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (проект СП-3658.2021.1).



Совершенствование технологий упрочнения и изготовления пружин из пружинных сталей является актуальным научным направлением [1, 2].

Широко применяются технологии восстановления эксплуатационных характеристик пружин с применением дробеметной обработки и заневоливания [3].

При производстве пружин распространенной операцией упрочнения является дробеметная обработка, при этом на поверхности витков создаются двухсторонние остаточные напряжения сжатия, препятствующие раскрытию усталостных трещин и повышающие предел выносливости на 40...80 % [4].

При дробеметной обработке пружин требуется равномерная обработка витка по его длине и по диаметру поперечного сечения, однако обработке внутренней поверхности витка препятствует рикошетирование дроби от боковых поверхностей витка, вследствие чего происходит снижение энергии части потока дроби, проходящей по межвитковому зазору к внутренней поверхности витка, уменьшая таким образом общую эффективность дробеметной обработки [5]. Дробеметная обработка не устраняет неравномерность распределения напряжений по сечению витка пружины. Витки конических и эвольвентных пружин, как правило, имеют значительную кривизну, что приводит к превышению до 40 % напряжений на внутреннем волокне витков, по сравнению с напряжениями, возникающими на наружном волокне витков [6]. Поэтому в процессе работы пружины на внутренней стороне сечения витков развиваются усталостные трещины.

Наибольшая несущая способность и стабильные рабочие характеристики свойственны пружинам после упрочнения в напряженном состоянии [7]. Поэтому дробеметная обработка пружин сжатия должна производиться в сжатом (напряженном) состоянии. Однако при дробеметной обработке сжатой пружины поток дроби достигнет только наружной стороны витков, а внутренняя сторона витков останется неупрочненной.

Для упрочнения пружин, работающих в условиях значительных, но малоцикловых контактных нагрузок между витками, а также в условиях высоких скоростей нагружения и с соударениями витков, рекомендуется применять контактное заневоливание [8, 9].

Эффективность изготовления и восстановления пружин во многом зависит от стадии упрочнения. Это является узким местом, особенно для восстановления пружин конической формы.

**Цель работы** — совершенствование способа и устройства для упрочнения пружин конической формы или формы параболоида вращения.

### Технология упрочнения пружин сжатия

После сжатия пружины до соприкосновения витков к пружине прикладывается дополнительная осевая нагрузка, приводящая к сжатию витков по линии контакта. Благодаря этому в месте контакта витков образуются ленточки упрочненного металла, а на поверхности витков и в витках пружины возникают сложные остаточные напряжения, обуславливающие осевую осадку пружины [10].

В работе [3] рассмотрен метод упрочнения пружин контактным заневоливанием в направлении действия рабочей нагрузки на пружину. При приложении к пружине нагрузки  $F_3$  (рис. 1) и выдержке в сжатом состоянии в течение 24...48 ч напряжения на наружных волокнах достигают предела текучести и частично релаксируют [9]. После разгрузки пружина уменьшается по высоте, ее относительная остаточная деформация  $A$ , %, равна  $A_1$ . Аналогичный эффект можно наблюдать при термоосадке пружины.

Заневоливание пружины в течение 24...48 ч ( $A_1$ ) рекомендуется заменять [9] контактным заневоливанием нагрузкой  $10F_3$ . При дальнейшем увеличении нагрузки интенсивность возрастания значения  $A$  уменьшается за счет появления контактных напряжений. Размер упругого ядра пружин при упрочнении  $d_{упр}$  не должен выходить за пределы рекомендованного значения  $d_{упр} \geq 0,5d$  ( $d$  — диаметр проволоки пружины) [11], в противном случае пружина окажется неработоспособной. Максимально допустимая нагрузка контактного заневоливания пружин  $F_{max}$  ( $A_3$ ), удовлетворяющая условию  $d_{упр} \geq 0,5d$  зависит от физико-механических свойств материала и от геометрических параметров пружин.

Контактное заневоливание значительно сокращает производственный цикл; обеспечивает стабилизацию параметров пружин, работающих

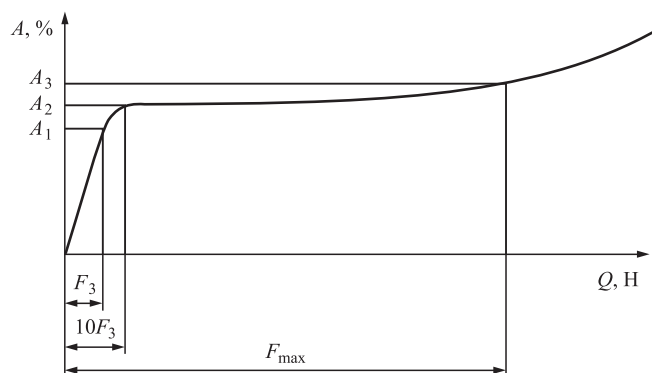


Рис. 1. Зависимости относительной остаточной деформации пружины от нагрузки контактного заневоливания

при высоких температурах; ускоряет длительно протекающие процессы остаточных деформаций как при нормальных, так и при повышенных температурах; повышает ресурс пружин, работающих при высоких скоростях нагружения.

В работе [10] изучено напряженно-деформированное состояние витка (НДС) винтовой цилиндрической пружины сжатия из круглой проволоки при упрочнении контактным заневоливанием под действием двух силовых факторов в сечении — крутящего момента и контактной нагрузки сжатия между витками, обоснована расчетным путем и подтверждена практическими результатами возможность увеличения ресурса винтовых цилиндрических пружин в 1,4 раза после контактного заневоливания относительно обычного заневоливания.

Нагрузка контактного заневоливания  $Q$ , Н, пружины [10]

$$Q = F\pi D_{0сж} = \frac{0,863Eb^2\pi D_{0сж}}{r \cos \alpha_{сж}}, \quad (1)$$

где  $F$  — нагрузка контактного заневоливания, приходящаяся на единицу длины витка пружины, Н/мм;

$D_{0сж}$  — средний диаметр пружины, сжатой до соприкосновения витков, мм;

$E$  — модуль упругости первого рода, МПа;

$b$  — полуширина полоски контакта витков, мм;

$r$  — радиус витка пружины, мм;

$\alpha_{сж}$  — угол наклона витков сжатой пружины.

Уравнение для определения границы, отделяющей упругую зону от пластической в поперечном сечении витка при контактном заневоливании [10]

$$3\left(\frac{\Delta k G x_0}{\sigma_T}\right)^2 + 3\left(\frac{\Delta k G}{\sigma_T}\right)^2 (r - y_{0к})^2 + \frac{C y_{0к}^6}{(\lambda^2 + b^2 y_{0к}^2)^2 \sigma_T^2} = 1, \quad (2)$$

где  $\Delta k$  — приращение кручения витка пружины, мм<sup>-1</sup>;

$G$  — модуль упругости второго рода, МПа;

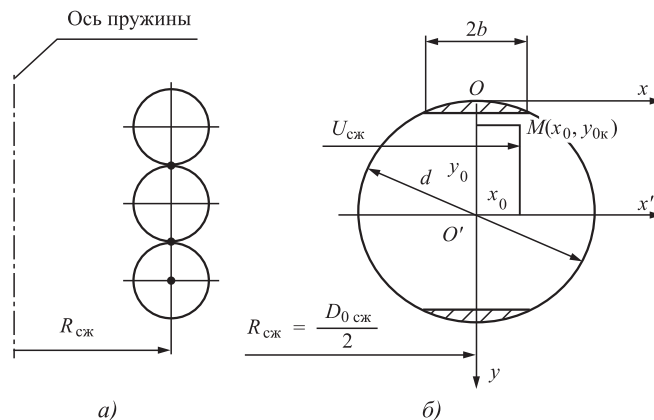
$\sigma_T$  — предел текучести материала пружины, МПа;

$x_0, y_{0к}$  — координаты точек (рис. 2), принадлежащих границе упругой зоны, мм;

$\lambda$  — эллиптическая координата, мм<sup>2</sup>, [12], которая находится в виде положительного корня из уравнения

$$\frac{x^2}{b^2 + \lambda} + \frac{y_{0к}^2}{\lambda} = 1, \quad (3)$$

$$C = \frac{T^2 b^4 (b^2 + \lambda)}{\lambda}, \text{ постоянная } T = \frac{1,727E}{\pi r}. \quad (4)$$



**Рис. 2. Сечение витков цилиндрической пружины при контактном заневоливании:**

$a$  — витки сжатой пружины;  $b$  — сечение витка пружины;  $R_{сж}$  — радиус пружины, сжатой до соприкосновения витков, мм;  $U_{сж}$  — расстояние от оси пружины до абсциссы границы упругой зоны, мм;  $x_0, y_0, y_{0к}$  — координаты точек, принадлежащих границе упругой зоны при контактном заневоливании, мм

Сжимающие напряжения  $\sigma_y$ , МПа, в пластической зоне поперечного сечения витка [10]

$$\sigma_y = X \frac{E y_{0к}^3}{(\lambda^2 + b^2 y_{0к}^2)} + E_1 \left( X_1 \frac{y^3}{(\lambda_1^2 + b^2 y^2)} - X \frac{y_{0к}^3}{(\lambda^2 + b^2 y_{0к}^2)} \right), \quad (5)$$

где

$$X = \frac{1,727b^2}{\pi r} \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}},$$

$$X_1 = \frac{1,727b^2}{\pi r} \sqrt{\frac{b^2 + \lambda_1}{\lambda_1}}, \quad \frac{x^2}{b^2 + \lambda_1} + \frac{y^2}{\lambda_1} = 1,$$

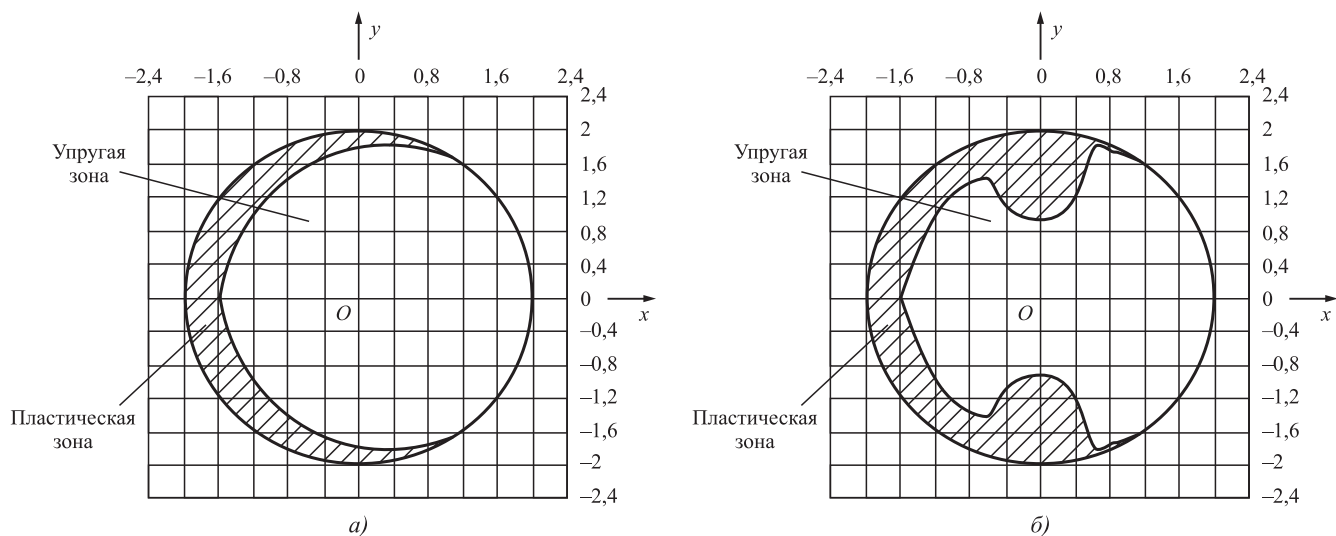
где  $x, y$  — координаты точки пластической зоны, в которой определяются значения напряжений, мм.

Тангенциальные напряжения кручения в пластической зоне  $\tau$ , МПа, [10]

$$\tau = \frac{\Delta k G \sqrt{x^2 + \left(\frac{d}{2} - y\right)^2}}{Z}, \quad (6)$$

где  $Z$  — величина, характеризующая глубину пластического упрочнения по сечению витка пружины.

Результаты [10] теоретического исследования формы и размера упругой части сечения витка пружины при заневоливании и при контактном заневоливании представлены на рис. 3. Контактная нагрузка оказывает влияние на форму и размер упругой части сечения витка.



**Рис. 3. Форма и размер упругого ядра в сечении витка исследуемой пружины:**  
 а — при обычном заневоливании; б — при контактном заневоливании

### Совершенствование способа упрочнения пружин формы конуса и параболоида вращения

Известен способ упрочнения винтовых цилиндрических пружин [13], который включает в себя навивку пружины с шагом, превышающим шаг готовой пружины, термообработку, люмоконтроль, шлифовку торцов, дробеметную обработку, заневоливание пружины и наклеп. Заневоливание пружины осуществляют сжатием до соприкосновения витков на 20...30 ч. Наклеп пружины проводят штамповкой наружной и внутренней поверхностей сжатой пружины путем распираания входящим в пружину пуансоном и прижатия витков пружины к поверхности отверстия матрицы. Зазор между отверстием матрицы и поверхностью пуансона меньше диаметра витка пружины на 0,2...2,0 мм. Наклеп проводят по линии контакта витков между собой сжатием пружины с силой  $(5...300)F_3$ .

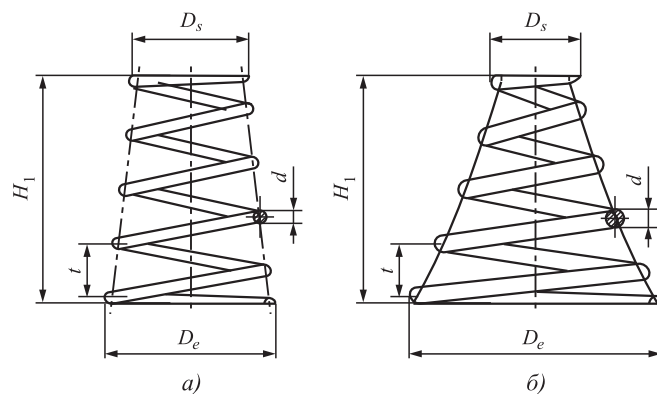
Недостатком описанного способа, является то, что он не пригоден для пружин конической формы (рис. 4, а) или формы параболоида вращения (рис. 4, б).

В целях увеличения ресурса пружин конической формы или формы параболоида вращения авторы предложили способ [14] упрочнения пружин, включающий навивку пружины с шагом, превышающим шаг готовой пружины, термообработку, люмоконтроль, шлифовку торцов, дробеметную обработку, заневоливание и наклеп с использованием пуансона и матрицы.

Навивку пружины следует осуществлять из предварительно упрочненной или закаливаемой проволоки с шагом, превышающим шаг гото-

вой пружины на величину припуска в пределах 6...14 % от высоты готовой пружины. Заневоливание пружины следует осуществлять сжатием пружины до соприкосновения витков на 6...30 ч.

Нагрузки упрочнения рекомендуется назначать на 5 % больше рабочей нагрузки, действующей на деталь [15]. По аналогии с этим рекомендуем производить наклеп штамповкой наружной и внутренней поверхностей сжатой пружины и упрочнение по линии контакта витков путем сжатия пружины силой, на 5 % превышающей нагрузку на пружину в изделии. Пружину следует устанавливать в отверстие матрицы более узкой стороной вниз, а величину кольцевого зазора между отверстием матрицы и пуансоном выбирать меньше диаметра



**Рис. 4. Пружина сжатия конической формы (а) и формы параболоида вращения (б):**

$D_s$  — наименьший внешний диаметр, мм;  $D_e$  — наибольший внешний диаметр, мм;  $H_1$  — свободная высота, мм;  $t$  — шаг пружины в свободном состоянии, мм

витка  $d$  сжатой пружины на 0,2...2,0 мм. Штамповку наружной и внутренней поверхностей сжатой пружины следует осуществлять путем распираания пружины входящим в нее пуансоном. Контактующие с пружиной поверхности матрицы и пуансона должны иметь формы, соответствующие форме установленной пружины (конической или параболоида вращения). Наклеп наружной и внутренней поверхностей сжатой пружины и наклеп поверхностей по линии контакта витков можно осуществлять за одну операцию или раздельно.

При наклепе витков пружину следует нагружать силой, вызывающей сжатие соприкасающихся витков как между собой, так и с поверхностями пуансона и матрицы. Прикладываемая сила должна обеспечивать появление остаточных деформаций, определяемых техническими требованиями к параметрам пружин.

### Совершенствование устройства для упрочнения конических пружин

Устройство для контактного заневоливания конических или параболоидных пружин [16] содержит верхний и нижний вкладыши, стакан для установки вкладышей и испытываемой пружины и пуансон с шаровой поверхностью, контактирующей с шаровой ответной частью верхнего вкладыша. Нижний вкладыш установлен с возможностью вращения относительно оси стакана, а верхний — с возможностью вращения и перемещения вдоль оси стакана и отклонения от оси пуансона. Верхний вкладыш контактирует с внутренней поверхностью пружины и имеет коническую форму или форму параболоида вращения соответственно. Нижний вкладыш связан с нижним цилиндром пресса посредством штока для вытеснения пружины из стакана и удаления ее с нижнего вкладыша.

Недостатком такого устройства является невозможность упрочнять внутреннюю поверхность пружин сжатия конической формы (рис. 4, *a*) или формы параболоида вращения (рис. 4, *б*) в сжатом состоянии.

В целях повышения ресурса пружин конической формы или формы параболоида вращения методами пластической обработки металла предложено новое устройство [17] для упрочнения внутренней поверхности конических пружин, лишенное этого недостатка.

Устройство [17] (рис. 5) содержит верхний 10 и нижний 13 вкладыши, прикрепленный к нижней плите 1 стакан 2 для установки в нем вкладышей и между ними испытываемой пружины 3, прикрепленный к верхней плите 4 пуансонодержателем 5 пуан-

сон 11 с шаровой поверхностью, контактирующей с шаровой поверхностью верхнего вкладыша 10. Контактующие с пружиной 3 поверхности вкладышей имеют коническую форму (рис. 5, *a*) или форму параболоида вращения (рис. 5, *б*). Нижний вкладыш 13 установлен в стакане 2 с возможностью перемещения относительно оси стакана, а верх-

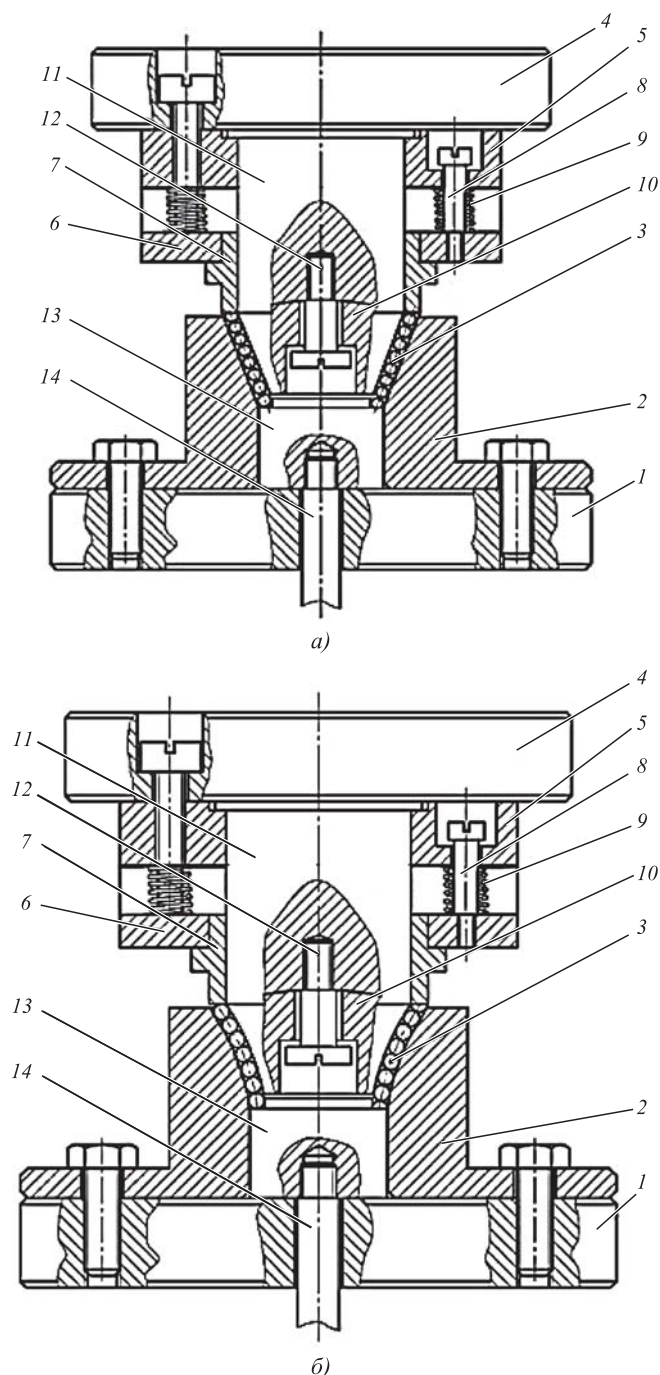


Рис. 5. Устройство для упрочнения пружин: *a* — конической формы; *б* — формы параболоида вращения

ний 10 — с возможностью перемещения вдоль оси стакана и отклонения оси от оси пуансона 11.

Верхний вкладыш 10 связан с пуансоном 11 посредством ступенчатого винта 12, обеспечивающего зазоры между наружной поверхностью цилиндрической части винта 12 и поверхностью отверстия во вкладыше 10 и между головкой винта 12 и ответной поверхностью вкладыша 10. Этим достигается свобода отклонения оси вкладыша 10 от оси пуансона 11 для равномерного распределения нагрузки упрочнения по диаметру витков заневоливаемой пружины 3. Внутренняя поверхность стакана 2 в верхней части выполнена диаметром, равным наружному большему диаметру пружины 3. Внутренняя поверхность стакана 2 в нижней части выполнена диаметром, равным наружному меньшему диаметру пружины 3 и имеет форму, охватывающую наружную поверхность сжатой пружины 3 — коническую форму или параболоида вращения соответственно. Поверхность нижнего вкладыша 13 выполнена диаметром, равным наименьшему наружному диаметру  $D_s$  пружины 3. На торце нижнего вкладыша 13 выполнена кольцевая проточка диаметром, равным внутреннему диаметру меньшей стороны пружины 3 и глубиной не менее высоты ее витка. Верхний вкладыш 10 выполнен по наибольшему внутреннему диаметру ( $D_e - 2d$ ) большей стороны пружины 3. Его форма должна соответствовать форме внутренней поверхности сжатой пружины 3.

К пуансонодержателю 5 прикреплены ступенчатыми винтами 8 подвижная подпружиненная плита 6 с запрессованной в ней нажимной втулкой 7. Торец втулки 7 выступает относительно торца пуансона 11 для предварительного сжатия пружины 3. На ступенчатых винтах 8 между пуансонодержателем 5 и подвижной плитой 6 размещены поджатые ступенчатыми винтами 8 пружинящие детали 9 (пружины сжатия, резиновый буфер). Нижний вкладыш 13 установлен на нижней плите 1 и связан с нижним цилиндром пресса посредством штока 14 для вытеснения пружины 3 из стакана 2 и удаления ее с нижнего вкладыша 13 известными способами и устройствами.

Устройство устанавливают на пресс и закрепляют. В стакан вставляют пружину меньшим диаметром вниз таким образом, чтобы торцы пружины контактировали с кольцевой проточкой на торце нижнего вкладыша, а торец запрессованной в подвижную плиту нажимной втулки выступал относительно торца пуансона. Это обеспечивается поджатием ступенчатыми винтами и пружинящими деталями подвижной плиты. Затем пуансон с помощью пресса опускают, пружина сжи-

мается под действием торца нажимной втулки 7. Витки пружины должны прийти в непрерывный контакт с внутренней поверхностью стакана 2 и с наружной поверхностью верхнего вкладыша 10. Внутренняя рабочая поверхность стакана охватывает наружную поверхность сжатой пружины, а верхний вкладыш действует на внутреннюю поверхность пружины; в результате сжатая пружина принимает правильную геометрическую форму. После этого продолжающий движение пуансон воздействием шаровой поверхности на прилегающую шаровую поверхность верхнего вкладыша распределяет усилие пресса равномерно по внутреннему диаметру сжатой пружины. После требуемой выдержки под нагрузкой пуансон поднимают, освобождая пружину. Движением нижнего цилиндра пресса посредством штока и нижнего вкладыша пружину вытесняют из стакана, затем снимают с нижнего вкладыша применяемыми при штамповке известными способами и устройствами, и направляют на дальнейшую обработку.

Достоинство предложенного устройства [17] заключается в возможности упрочнять внутреннюю поверхность пружин сжатия, имеющих коническую форму или форму параболоида вращения в сжатом состоянии, поскольку наибольший эффект повышения ресурса пружин достигается упрочнением внутренней поверхности витков.

### Направления дальнейшего исследования

Для разработки новой технологии изготовления конических и параболоидных пружин с применением предложенных способов и устройств необходимо провести исследование НДС и определить геометрические параметры пружин при контактном заневоливании. Ось образующей конических пружин расположена наклонно к оси пружин под углом  $\gamma$  (рис. 6, а). Система координат для определения напряжений сжатия  $x_{сж} O y_{сж}$  также развернута относительно оси пружины под углом  $\gamma$  (рис. 6, б). Переменной величиной для каждого витка является радиус сжатой пружины  $R_{сж}$ . Это оказывает значительное влияние на осадку пружины при заневоливании. Поэтому зависимости (1), (2), (5) и (6) следует доработать с учетом этих факторов, затем сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований каждого витка и осадки пружины. Внимание следует уделить величине упругого ядра витков. В параболоидных пружинах следует учитывать и изменение угла  $\gamma$  для разных витков. Алгоритм исследований показан на рис. 7.

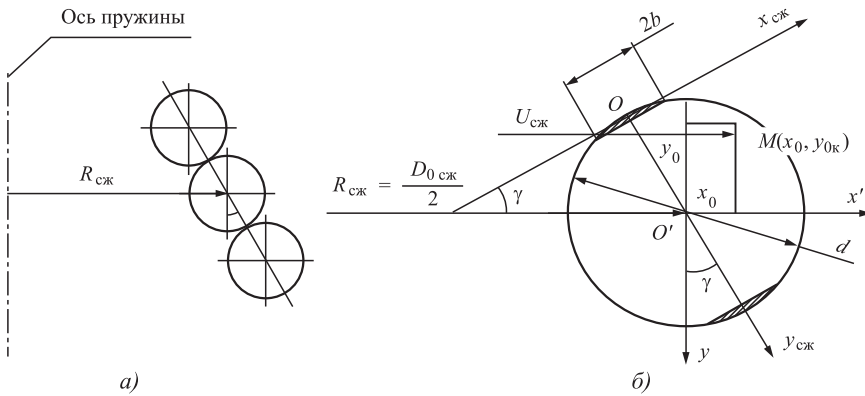


Рис. 6. Сечение витков конической пружины при контактном заневолении:

*a* — витки сжатой пружины; *b* — сечение витка пружины



Рис. 7. Блок-схема общей методики экспериментальных исследований упрочнения конических пружин сжатия

Релаксация пружин по времени

<i>N</i> , сут.	2	4	8	...	2048	4096	8192
<i>R</i> (1-я партия), %	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	<i>R</i> <sub>3</sub>	...	<i>R</i> <sub>11</sub>	<i>R</i> <sub>12</sub>	<i>R</i> <sub>13</sub>
<i>R</i> (2-я партия), %	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	<i>R</i> <sub>3</sub>	...	<i>R</i> <sub>11</sub>	<i>R</i> <sub>12</sub>	<i>R</i> <sub>13</sub>

В целях исследования релаксационной стойкости предлагается зафиксировать партии конических пружин в сжатом состоянии: по традиционному (1-я партия) [13] и по предлагаемому (2-я партия) [14] способам заневоления. Пружины хранить сжатыми при температуре ≈ 20 °С, разгрузку пружин для контроля геометрических и силовых параметров производить согласно геометрической прогрессии [18]

$$N = q^n, \tag{7}$$

где *N* — сутки замера параметров;  
*q* = 2;  
*n* — показатель прогрессии, *n* = 1, 2, 3, ...

Релаксацию напряжений следует определять по формуле [17]

$$R = \frac{F_k - F_n}{F_k} \cdot 100 \%, \tag{8}$$

где *R* — релаксация напряжений, %;  
*F<sub>к</sub>* — сила пружины, контролируемая после испытаний, Н;  
*F<sub>н</sub>* — сила пружины, контролируемая до испытаний, Н.

Полученные данные следует заносить в таблицу.

Далее необходимо выполнить анализ результатов исследования релаксационной стойкости конических пружин, упрочненных различными способами.

**Заключение**

Перспективным направлением повышения качества конических и параболоидных пружин сжатия является совершенствование способов и устройств для их упрочнения. Предложенный способ и устройство могут служить основой для создания технологических процессов изготовления конических и параболоидных пружин и может быть рекомендован к применению на предприятиях военно-промышленного комплекса, машиностроения, авиастроения, автомобильной промышленности, сельхозмашиностроения, ремонтных предприятиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лавриненко Ю.А.** Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 12. С. 547—554.
2. **Шаврин О.И.** Производство высокопрочных винтовых пружин. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. 196 с.
3. **Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю.** К теоретическому обоснованию восстановления автомобильных пружин из упрочненной проволоки // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2018. № 5. С. 68—79.
4. **Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В.** Упрочнение пружин. Уфа: Изд. Дом "Бизнес-Партнер", 2002. 124 с.
5. **Шаврин О.И.** К вопросу об эффективности обработки дробью винтовых пружин сжатия // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 27—29.
6. **Пономарев С.Д., Андреева Л.Е.** Расчет упругих элементов и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
7. **Остроумов В.П.** Производство винтовых цилиндрических пружин. М.: Машиностроение, 1970. 135 с.
8. **Крюков Б.Н.** О влиянии контактных напряжений от соударения витков пружин на их живучесть // Производственно-технический бюллетень. 1977. № 4. 66 с.
9. **Тебенко Ю.М.** Проблемы производства высокоскоростных пружин и пути их решения. Ставрополь: ООО "Мир данных", 2007. 152 с.
10. **Землянушнова Н.Ю.** Расчет винтовых цилиндрических пружин сжатия при контактном заневоливании. Ставрополь: АГРУС, 2008. 136 с.
11. **Пономарев С.Д.** К обоснованию размеров упругого ядра в заневоленных пружинах // Известия высших учебных заведений. М.: Машиностроение. 1974. № 10. С. 24—27.
12. **Расчеты** на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев и др. М.: Машгиз, 1958. 974 с.
13. **Пат. 2605541 С1** Российская Федерация, МПК В21F 35/00. Способ упрочнения винтовых цилиндрических пружин / Тебенко Ю.М.; заявитель и патентообладатель: Тебенко Юрий Михайлович, № 2015126831/02; заявл. 03.07.2015; опубл. 20.12.2016, Бюл. № 35. 8 с.
14. **Пат. 2728332 С1** Российская Федерация, МПК В21F 35/00, F16F 1/08. Способ упрочнения конических и параболоида вращения пружин / Тебенко Ю.М., Землянушнова Н.Ю., Землянушнов Н.А.; заявитель и патентообладатель: Тебенко Юрий Михайлович, № 2019134592; заявл. 28.10.2019; опубл. 29.07.2020. Бюл. № 22. 9 с.
15. **Блинник С.И.** Расчет пружин в связи с их заневоливанием // Новые методы расчета пружин / под общей редакцией С.Д. Пономарева. М.: Машгиз. 1946. С. 26—46.
16. **Пат. 2686435 С1** Российская Федерация, МПК В 21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания конических пружин / Землянушнова Н.Ю., Землянушнов Н.А.; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", № 2018107169; заявл. 26.02.2018; опубл. 25.04.2019. Бюл. № 12. 8 с.
17. **Пат. 2749011 С1** Российская Федерация, МПК В 21F 35/00. Устройство для упрочнения внутренней поверхности конических пружин / Тебенко Ю.М., Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю.; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", № 2020120654; заявл. 22.06.2020; опубл. 02.06.2021. Бюл. № 16. 9 с.
18. **Исследование** релаксационной стойкости винтовых цилиндрических пружин при длительной выдержке под нагрузкой / В.П. Белогур и др. // Обработка металлов давлением. 2014. № 3 (81) С. 30—35.



П.А. Саблин, канд. техн. наук, В.С. Щетинин, д-р техн. наук  
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)  
E-mail: ikpmt@knastu.ru

## Влияние микропрофиля обработанной поверхности на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей машин

*Рассмотрено влияние пространственных колебаний режущего инструмента на шероховатость обработанной поверхности. Показано влияние параметров шероховатости и высоты микронеровностей на прочностные и эксплуатационные свойства исполнительных поверхностей деталей. Выявлены параметры процесса резания, влияющие на интенсивность и частоту колебаний вершины режущего инструмента.*

**Ключевые слова:** параметры шероховатости, прочность, качество поверхности, динамика процесса резания.

*The influence of spatial vibrations of the cutting tool on the roughness of the machined surface is considered. The influence of the parameters of roughness and the height of micro-roughness on the strength and performance properties of the executive surfaces of parts is also considered. The parameters of the cutting process that affect the intensity and frequency of vibrations of the cutting tool tip are considered.*

**Keywords:** roughness parameters, endurance, surface quality, dynamics of the cutting process.

Современное развитие техники и технологий предъявляют повышенные требования к качеству изготовления деталей для различных узлов и агрегатов. Так, например, при изготовлении ряда деталей летательных аппаратов [1; 10], возникает необходимость снятия очень большого объема материала (до 90 %); при этом очень остро стоит вопрос применения высокопроизводительной обработки с получением заданных конструкторами точности, качества обработки и эксплуатационных характеристик.

На эксплуатационные и прочностные характеристики деталей непосредственно влияет степень однородности микрорельефа, полученного после механической обработки. В работе [7] отмечено, что для учета факторов, влияющих на однородность микрорельефа поверхности, отсутствует справочная литература и расчетные методики, позволяющие обоснованно назначить стратегию и режимы обработки. В этой связи необходим комплексный подход к обеспечению качества поверхностного слоя.

Если точность обработки в большей степени зависит от точности технологической системы [2], то на качество обработки резанием влияет целый комплекс параметров. Такими параметрами можно считать режимы резания, износ режущей кромки инструмента, неоднородность обрабатываемого материала и многие другие. Все эти параметры влияют на качество обработанной поверхности через изменение сил резания, динами-

ческую устойчивость технологической системы, распределение теплоты в зоне резания и т.д. [3].

Данной проблеме в последнее время уделяется достаточно пристальное внимание со стороны исследователей; изучаются вопросы устойчивости и самоорганизующиеся процессы [4, 5], динамические свойства и характер колебаний инструмента и заготовки [6]. В работе [7] изучен вопрос о влиянии различных технологических режимов и способов фрезерования на качество обработки по различным параметрам шероховатости ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$ ,  $Rp$ ,  $Rc$ ,  $Rt$ ,  $Rv$ ,  $Rsm$ ,  $Rku$ ,  $Rsk$ ) для пространственных поверхностей.

Оценка параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287—2014 осуществляется в конкретной плоскости — в координатах  $ZOX$  (рис. 1) [8]. В плоскости  $ZOY$  профиль поверхности имеет совершенно иной характер и требует другой методики изучения. Для оценки качества поверхности в плоскостях  $ZOX$  и  $ZOY$  необходимо применять различные параметры шероховатости. Например, при продольном точении параметры шероховатости, измеренные в радиальном направлении, в большей степени зависят от динамических характеристик технологической системы, тогда как параметры шероховатости, измеренные в осевом направлении, больше зависят от скорости подачи, степени заострения вершины режущего инструмента и в меньшей степени — от динамических характеристик.



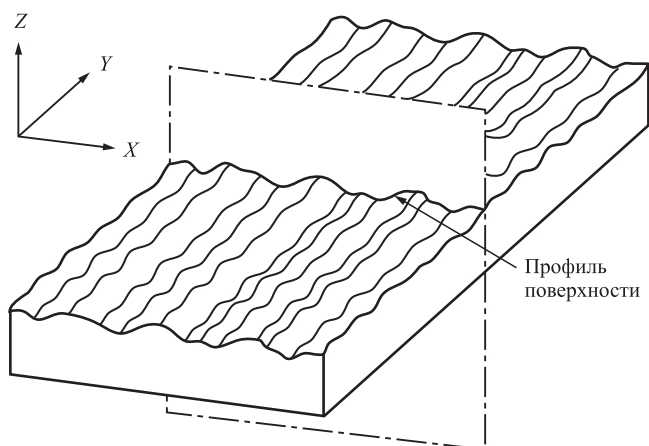


Рис. 1. Профиль поверхности по ГОСТ Р ИСО 4287—2014

Авторами рассмотрено влияние режимов резания на качество обработанной поверхности, а также влияние динамических процессов в плоскости  $ZOY$ . При этом следует иметь в виду, что режущая кромка инструмента относительно обрабатываемой поверхности совершает пространственные колебательные движения вне данной плоскости.

На примере цилиндрического точения (рис. 2) видно, что динамика процесса в плоскости  $YOX$  проявляется как колебания вершины инструмента относительно заготовки между условными точками  $C$  и  $C_1$ , а в плоскости  $ZOX$  — с между точками  $B$  и  $B_1$  (здесь, вопреки некоторым правилам строгости построений, для простоты понимания рис. 1 и 2 мы интегрировали систему координат из ГОСТ Р ИСО 4287—2014 в схему точения). Смещение вершины резца по вектору  $CC_1$  происходит вдоль оси заготовки и зависит от скорости подачи. Смещение  $BB_1$  складывается из двух векторов: один направлен вдоль оси режущего инструмента, а второй — вдоль направления главного движения. Длина  $BB_1$  зависит от силы резания и от геометрии режущего инструмента, т.е. вершина

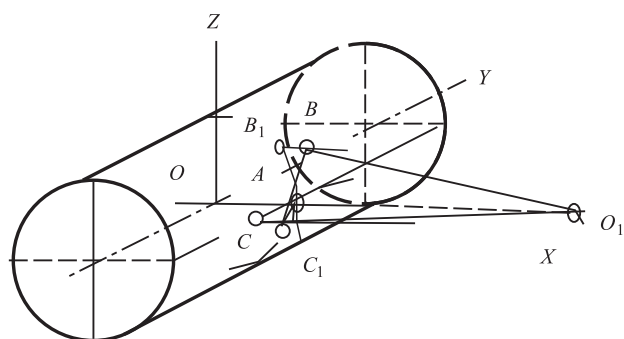


Рис. 2. Отклонение вершины режущего инструмента от теоретической точки ( $A$ ) контакта с заготовкой:  $CC_1$  — в плоскости  $YOX$ ;  $BB_1$  — в плоскости  $ZOX$

инструмента может смещаться вдоль оси  $Z$  под действием силы резания. Кроме того, в процессе обработки инструмент может быть "отжат" от заготовки либо "затянут" в материал (смещение происходит вдоль оси  $Y$ ). Таким образом, отрезок  $BB_1$  характеризует воздействие главного движения заготовки на колебания режущего инструмента.

Общее отклонение от теоретической точки (линии) резания (точка  $A$  на рис. 2) составит:

$$\Delta = \sqrt{BB_1^2 + CC_1^2},$$

где  $\Delta$  — результирующее пространственное отклонение вершины режущего инструмента;

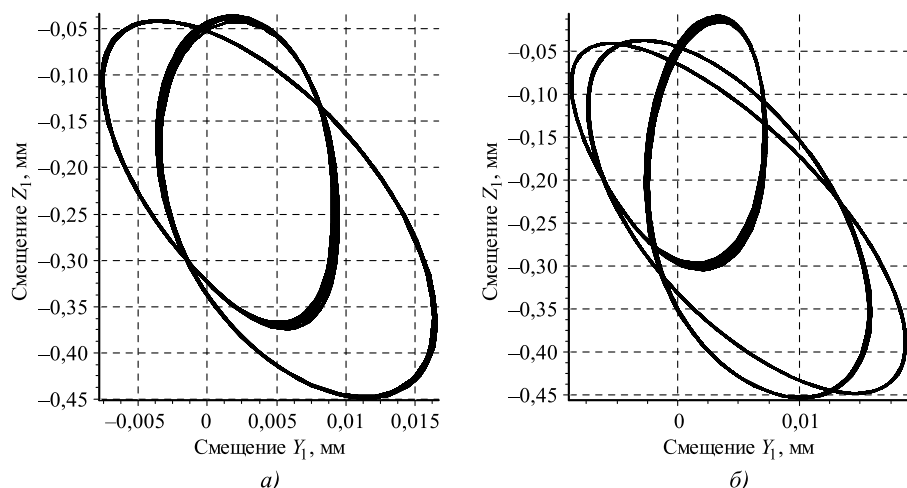
$BB_1$  и  $CC_1$  — отклонения вершины режущего инструмента в плоскостях  $ZOX$  и  $YOX$  соответственно.

Чем больше амплитуда пространственных колебаний, тем больше высота неровностей обрабатываемой поверхности (шероховатости). Кроме амплитуды, на параметры шероховатости влияет также частота колебаний вершины режущего инструмента. Сложный характер этих колебаний, а также различная жесткость технологической системы в разных плоскостях, приводят к тому, что и параметры шероховатости в этих плоскостях будут различны.

Для получения требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности наряду с установлением параметров обработки необходимо выполнить оценку динамики пространственных колебаний инструмента относительно заготовки.

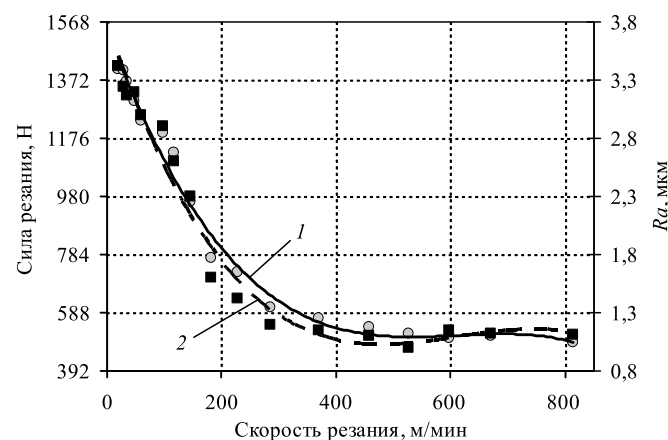
В работе [9] выполнены исследования перемещения вершины инструмента относительно детали в зависимости от частоты стружкообразования (рис. 3, *a*). На графиках видно, что перемещение вершины инструмента в данном случае уже не представляет собой правильный эллипс (цикл) перемещений. Предельный цикл рассогласовывается, происходит удвоение его частоты. При увеличении частоты стружкообразования до 88,5 Гц (рис. 3, *b*) разрушение предельного цикла продолжается — происходит утроение его частоты. Такие колебания приводят к тому, что получаемая шероховатость обработанной поверхности в разных плоскостях не одинаковая. Чем больше амплитуда пространственных колебаний, тем больше высота выступов шероховатости.

Как отмечено выше, значения параметров шероховатости связаны с частотой стружкообразования, которая, в свою очередь, зависит от колебаний инструмента относительно заготовки. В работе [8] представлены исследования взаимосвязи скорости резания с силой резания и шероховатостью поверхности.



**Рис. 3. Предельные циклы динамической системы резания (по перемещению вершины инструмента) в зависимости от частоты отделения элементной стружки:**

*a* — удвоение частоты предельного цикла (частота 58,5 Гц); *б* — утроение частоты предельного цикла (частота 88,5 Гц)



**Рис. 4. Зависимость силы резания и параметра шероховатости обработанной поверхности от скорости резания при фрезеровании закаленной стали 40Х:**

*1* — сила резания; *2* — скорость резания

Из графиков видно, что при обработке стали (рис. 4) с увеличением скорости резания уменьшается амплитуда колебаний вершины в рабочем пространстве за счет уменьшения силы резания и, как следствие, высоты микронеровностей (шероховатости) обработанной поверхности.

### Заключение

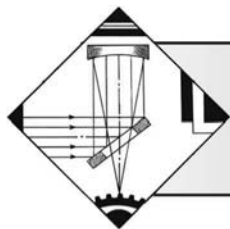
Эксплуатационные и прочностные характеристики деталей машин могут зависеть от пространственной геометрии поверхностного слоя, а шероховатость поверхности необходимо в данном случае рассматривать как многофакторную модель зависимости от относительных колебаний

режущей кромки инструмента в рабочем пространстве системы станок—приспособление—инструмент—деталь.

В настоящее время в КНАГУ проводятся научные исследования, направленные на изучение влияния колебаний инструмента относительно заготовки на качество обработанной поверхности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Муравьев В.И., Григорьев В.В., Бахматов П.В.** Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 17–27.
2. **Кудинов В.А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
3. **Биленко С.В., Саблин П.А., Леонтьевская Н.К.** Использование цветовой пирометрии при изменении температуры стружки при высокоскоростной обработке // Контроль. Диагностика. 2013. № 8. С. 37–43.
4. **Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.** Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Серия: Технические науки. 2017. № 2 (194). С. 52–61.
5. **Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М.** Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика, управление. Владивосток: Дальнаука, 1998. 296 с.
6. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Саблин П.А.** Математическое моделирование динамической устойчивости процесса резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками // Вестник машиностроения. 2006. № 10. С. 35–43.
7. **Гимадеев М.Р.** Повышение качества механообработки сложнопрофильных деталей на пятикоординатных обрабатывающих центрах: дис... канд. техн. наук. Тихоокеанский гос. ун-т. Хабаровск, 2018. 142 с.
8. **ГОСТ Р ИСО 4287—2014.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.
9. **Саблин П.А.** Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки: дис. ... канд. техн. наук. Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 141 с.
10. **Исследование** деформационно-технологических характеристик стали 12Х18Н10Т / О.В. Башков и др. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2019. № I-1(37). С. 77–83.



**А.Е. Балановский**, канд. техн. наук, **Н.А. Астафьева**, канд. техн. наук,  
**А.Г. Тихонов**, Нгуен Ван Чьеу  
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)  
E-mail: fuco.64@mail.ru

## Исследование износостойкости плазменных покрытий из смеси сплавов $\text{CuSn}/\text{Cr}_x\text{C}_y$

Исследована износостойкость покрытий, полученных при плазменном нагреве обмазки смеси на основе  $\text{Cu-Sn}$  и карбида хрома. Измерение микротвердости поперечного сечения покрытий показало, что толщина слоя обмазки, нанесенной на поверхность металла, влияет на формирование легированного поверхностного слоя сложного состава  $\text{Cu-Sn-Fe-C-Cr}$  в процессе плазменного поверхностного оплавления. Добавление карбида хрома в состав порошка покрытия  $\text{Cu-Sn}$  приводит к повышению твердости поверхностного слоя металла. Испытания на изнашивание упрочненных образцов с различными легированными слоями показали, что легирование бронзой поверхностного слоя обеспечивает возможность улучшения показателей шероховатости поверхности стали, а покрытие типа  $\text{CuSn} + \text{Cr}_x\text{C}_y$  обладает наиболее высокой износостойкостью.

**Ключевые слова:**  $\text{CuSn}$ ,  $\text{Cr}_x\text{C}_y$ , микротвердость, износостойкость, изнашивание, шероховатость, топография поверхности, плазменный нагрев.

*There is studied the wear resistance of coatings obtained by plasma heating of the mixture based on tin-bronze and chromium carbide. Measurement of the microhardness of the cross-section of the coatings showed that the thickness of the coating layer strongly affects the formation of the alloyed surface layer, and the addition of chromium carbide strongly leads to stronger hardening. Wear tests have shown that alloying with bronze provides the ability to improve the surface of the steel, and the  $\text{CuSn} + \text{Cr}_x\text{C}_y$  type coating has the highest wear resistance.*

**Keywords:**  $\text{CuSn}$ ,  $\text{Cr}_x\text{C}_y$ , microhardness, wear resistance, wear, plasma heating.

### Введение

Снижение воздействия факторов, отрицательно влияющих на свойства металла деталей машин и механизмов, является сложно решаемой задачей в машиностроении и судостроении из-за увеличивающихся технико-экономических требований глобального производства (растут скорости, нагрузки, массы). Однако для большинства материалов отрицательными факторами, которые часто влияют на качество поверхности деталей машин, остаются механические воздействия (удары, истирание, эрозия и т.д.) [1–3]. Нанесение защитных поверхностных слоев с особыми свойствами (высокие износо- и теплостойкость, коррозионная стойкость и т.д.) — важное направление в повышении работоспособности и долговечности металлических материалов.

Выбор металла и метода для нанесения покрытия играет важную роль в успехе получения качественного поверхностного слоя [1, 2]. Медь и ее сплавы часто применяют для получения защитных покрытий методом распыления высококонцентрированными источниками [4–7]. Известно, что сплавы  $\text{Cu-Fe}$  принадлежат к системе несмешивающихся компонентов, т.е. имеют ограниченную растворимость в жидком состоянии [3–7]. Сплавы системы  $\text{Fe-Cu-Cr}$  применяются в качестве покрытий для антибактериальной защиты [3], повышения износостойкости [4, 5], улучшения электропроводности и повышения температуры размягчения [6, 7]. В общем случае, после высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), покрытия на основе бронзы обладают невысокой твердостью, около 300 HV, что не позволяет их использовать в условиях кавита-

ционного и абразивного износа, а также имеют повышенную пористость и трещины по толщине покрытия [4–7].

В работе [8] представлены результаты сравнительных исследований распределения твердости в поверхностном слое сплава системы Cu—Sn—Fe—C—Cr после плазменного и лазерного упрочнения. Показано, что увеличение содержания карбида хрома в составе комплексной обмазки CuSn—Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub>, наносимой на поверхность металла, приводит к увеличению микротвердости сформированного покрытия после плазменной обработки. В независимости от режима охлаждения, плазменные покрытия с составами, содержащими до 20 % карбида хрома, обладают значительно более высокой твердостью, находящейся в диапазоне 600...700 НВ. Композитные покрытия системы Cu—Fe исследованы с помощью установки для лазерной индукционной гибридной наплавки (ЛИНС) [9, 10]. Несмешивающийся нанокompозит Cu—Fe—Cr—Si—C был получен в результате фазового превращения "жидкость—жидкость". По мнению авторов, полученный нанокompозит демонстрирует повышенную "двухслойную микротвердость" и сравнительную высокую коррозионную стойкость по сравнению с чистой медью, наплавленной ЛИНС. Покрытие системы Cu—Fe—Ni—Cr—Si имеет два подслоя: верхний, богатый медью твердостью 248 НВ, и нижний, богатый Fe<sub>3</sub>Si твердостью 758 НВ, содержащий мелкие частицы меди.

Обработка поверхности оловянной бронзы с использованием газовой вольфрамовой дуги (GTA) показало, что при высоких температурах твердость и износостойкость сплава системы Cu—Sn значительно улучшаются [11, 12].

**Цель работы** — исследование износостойкости покрытий в условиях абразивного изнашивания, полученных при плазменном нагреве смеси состава Cu—Sn—Fe—C—Cr на поверхности металла.

### Материалы и методы исследования

В качестве поверхностной обмазки использовали смеси порошковых сплавов ПРВ-БрО4 (производитель АО "Полема", Россия) и покрытие сварочного электрода ОК 84.78 (производитель ESAB, Швеция). Сварочные наплавочные электроды ОК 84.78 (ESAB) содержат, %: 4,5 С, 1,2 Мп, 1,20 Si, 33,4 Cr. Известно (по данным производителя), что в наплавленном металле формируются карбиды: Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub> C, Cr<sub>2</sub> C, Cr<sub>7</sub> C<sub>3</sub>, Fe<sub>7</sub> C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub> C<sub>6</sub>, FeC и Fe<sub>2</sub> C.

*Подготовка порошкового покрытия из обмазки электрода ОК 84.78.* Снятое покрытие прокатали между двумя валками для измельчения — это пер-

вая фракция. Далее часть первой фракции дополнительно измельчили в фарфоровой чашке при помощи пестика — получили вторую фракцию. Полученные порошки смешали со связующим (с помощью канцелярского клея) для образования пасты, которую затем вручную наносили на образцы и сушили при температуре 373 К. На всех образцах обмазку наносили фиксированной толщиной 0,25 мм. Стальные образцы (сталь Ст3) — прямоугольные пластины размерами 70 × 25 × 10 мм шлифовали до получения параметра шероховатости Ra = 0,2 мкм. В качестве источника плазменного нагрева использовали установку, описанную в работе [8]. Режим плазменного нагрева: сила тока 140 А; скорость движения образцов 2,7 мм/с; скорость подачи газа (аргона) 10 л/мин, зазор между слоем обмазки и электродом 4...5 мм. После вырезки, полирования и травления полученных образцов их микроструктуры были изучены на металлографическом микроскопе MET-2, а микротвердость покрытий измерена с помощью микротвердомера НМV-G21. Состав, размер исследуемой смеси сплавов и режим плазменной обработки приведены ниже.

Размер частиц сплава, мкм:

CuSn . . . . .	10...150
ОК 84.78 . . . . .	1...300

Толщина обмазки, мм:

CuSn . . . . .	0,25; 0,50
CuSn + 20 % ОК 84.78 . . . . .	0,25

Сила тока, А . . . . . 140

Зазор между электродом и поверхностью образца, мм . . . . . 4...5

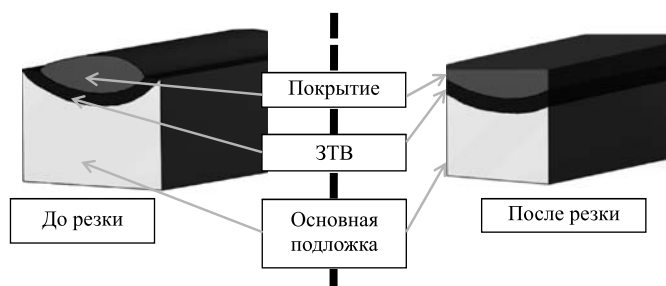
Скорость сканирования горелки, мм/с . . . . . 2,7

Скорость подачи газа аргона, мл/мин . . . . . 10

Охлаждение образцов . . . . . Водой

Испытания на абразивное изнашивание проводили по закрепленному абразиву. Для этого после плазменного нагрева и охлаждения образцы разрезали (рис. 1), чтобы получить их параллелепипед размерами 12 × 5 × 10 мм.

Рабочая поверхность покрытия, соприкасающаяся с абразивом, составляла 100 %, другую поверхность заливали акриловой смолой для крепления к держателю шлифовально-полировального станка, показанного на рис. 2. Износостойкость образцов покрытий после плазменного упрочнения определяли путем вращательных движений по поверхности шлифовальной бумаги на основе



**Рис. 1. Подготовка образца для испытания изнашивания по закреплённому абразиву**



а)



б)

в)

**Рис. 2. Шлифовально-полировальный станок Struers Tegramin-25:**

а — станок; б — экран управления; в — алюминиевая плита с держателем для исследуемых образцов и краном для подачи воды

карбида кремния. Скорость вращения алюминиевой плиты составляла  $500 \text{ мин}^{-1}$ , скорость держателя —  $150 \text{ мин}^{-1}$  с обратным вращением, водяное охлаждение. Нормальная нагрузка на образец — 5...50 Н. Показатель износостойкости покрытий, равный отношению изменения массы эталона и образца, определяли по результатам трех испытаний. В качестве эталона принимали образцы стали Ст3 без плазменного упрочнения.

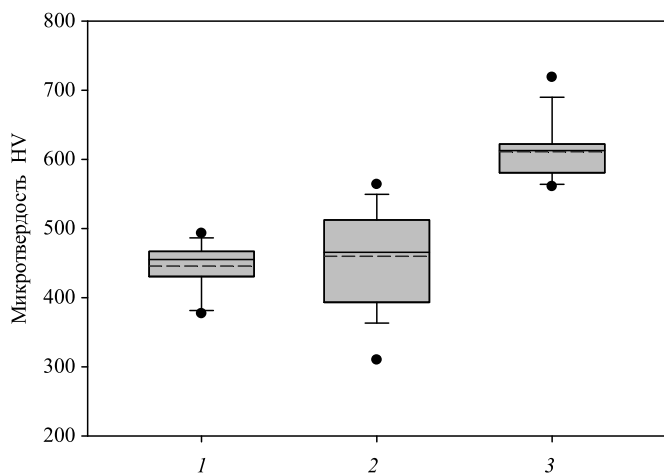
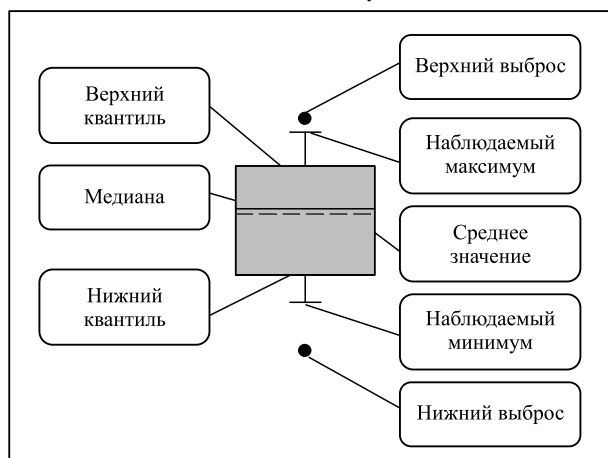
## Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследований была изучена микроструктура и микротвердость поверхностного слоя образцов, которые в дальнейшем испытывали на абразивный износ. Распределение микротвердости в поперечном сечении по глубине поверхностного слоя представлено на рис. 3 (см. обложку). В режиме плазменной обработки поверхностный слой из тонкого слоя обмазки, нанесенный на бронзовую основу, имеет трещины, но при этом перемешивание бронзы и железа хорошее. Твердость в поверхностном слое имеет высокие значения. В режиме плазменной обработки толстого слоя покрытия (0,5 мм) в поверхностном слое наблюдаются богатые бронзой и железом зоны с переменной твердостью. В случае добавления в состав бронзы 20 % ОК 84.78 (порошкового покрытия из обмазки электрода) поверхностный слой обладает наиболее высокой твердостью со структурой мартенсита.

На рис. 4 приведена дисперсия значений микротвердости на полученных образцах покрытий. За исключением измеренных точек, попадающих в области трещин, высокое концентрирование значений твердости покрытия № 1 показывает, что толщина покрытия чистой бронзы (0,5 мм) ограничивает растворимость ее в стали. Из-за этого еще остаются большие зоны, богатые бронзой, вследствие чего значения твердости имеют большой разброс. В случае добавления карбида хрома легированный слой обладает наиболее высокой твердостью с высокой плотностью распределения ее значений. Видно, что 75 % значений микротвердости покрытий с добавкой 20 % ОК 84.78 выше значений покрытий только на основе бронзы. Известно, что в расплавленном состоянии железо и хром неограниченно растворяются друг в друге, однако в твердом растворе существует область метастабильного состояния — двухфазности (miscibility gap), в котором одновременно сосуществуют богатые железом ( $\alpha$ ) и хромом ( $\alpha'$ ) фазы.

После проведения металлографических исследований и определения распределения микротвердости был проведен второй этап исследований на устойчивость к изнашиванию по закреплённому абразиву. Очевидно, что сопротивляемость износу будет зависеть от структуры основного легированного слоя и зоны термического влияния (ЗТВ). Анализ литературных источников показал, что для достижения полного процесса износа (до зоны основного металла) будет наблюдаться несколько областей износа с разной интенсивно-

Типичный ящик с усами



**Рис. 4. Распределение микротвердости плазменных покрытий:**

1 — CuSn (0,25 мм); 2 — CuSn (0,50 мм); 3 — CuSn + Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub> (0,25 мм)

стью. Состояние поверхности образца, а следовательно и сопротивляемость абразивному износу, будет изменяться по глубине упрочненного слоя в следующем порядке: легированный слой → легированный слой + ЗТВ → ЗТВ + зона основного металла → зона основного металла.

Микроструктура поверхности легированной зоны каждого образца, ЗТВ и основного металла стали приведена на рис. 3 и 5 (см. обложку). Типичная дендритная структура присутствует в двух покрытиях Cu — Sn и Cu — Sn с добавлением хрома. Судя по рис. 3, микроструктура блочного или стержневого типа распределена между дендритами. Анализируя фазовые диаграммы Cu—Sn и Fe—Cr—C, можно сделать вывод, что покрытия на основе Cu—Sn и Fe(Fe—Cr—C) состоят из твердого раствора и соединений. Покрытие Cu—Sn состоит из дендритного твердого

раствора, богатого Cu, и блочного соединения, а покрытие на основе Fe (Fe—Cr—C) содержит дендритный твердый раствор, богатый Fe, хром растворен в матрице железа. Фазовая диаграмма Fe—Cr показывает, что предельная растворимость хрома в железе в области 12...13 % мас. для температур до 850 °С, выше которой α-фаза железа превращается в γ-фазу.

На рис. 5, а (см. обложку) наблюдаются зоны мягких фаз (Cu—Sn), богатых бронзой, а на рис. 5, б появляются структуры мартенсита с более высокой твердостью. На рис. 5, в—д приведены микроструктуры зоны термического влияния по глубине. Видно, что структур в виде перлитных колоний с большими зернами в ЗТВ наблюдается больше на рис. 5, в. Перлитные колонии в зоне уменьшения размера зерна показаны на рис. 5, г, д. На рис. 5, е приведена структура основного металла Ст3 в виде феррита + перлита.

В ходе проведения испытаний на износостойкость применяли два варианта вращения абразива — сонаправленное движение и противоположно направленное. Рассмотрим результаты в случае сонаправленного движения держателя образца относительно алюминиевой плиты (рис. 6). Из анализа графиков следует, что все исследуемые покрытия более износостойкие, чем эталонный образец сталь Ст3 (без покрытия). Для покрытия Cu—Sn появление трещин у поверхности может быть причиной снижения износостойкости. Напротив, покрытие Cu—Sn с добавлением карбида хрома с более высокой твердостью обладает высокой износостойкостью независимо от дефектов. По мере увеличения времени испытаний кривизна кривой "время—потеря массы" увеличивается, т.е. указывается на то, что внутренние подслои поверхностного слоя значительно насыщены упрочняющим компонентом с высокой однородностью, и в них меньшее количество дефектов. Это также согласуется со многими исследованиями, связанными с проницаемостью и растворимостью меди в железе, а также диффузией хрома в стали.

Для ускорения процесса изнашивания нагрузка была увеличена до 20 Н. Видно, что все покрытия и даже сталь Ст3 демонстрируют большую потерю массы, чем в случае нагрузки 5 Н. В то же время покрытие CuSn—Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub> не только продолжает демонстрировать высокую износостойкость, но и сохраняет этот уровень с течением времени. Для испытания этих же образцов была увеличена нагрузка до 50 Н, а время между двумя измерениями составляло 10 мин (см. рис. 6, в). Плазменные покрытия продолжают демонстрировать хорошую износостойкость, причем лучшим из них являет-

ся покрытие  $\text{CuSn}-\text{Cr}_x\text{C}_y$ . После проведения испытаний были исследованы поверхности износа с помощью оптического микроскопа и измерена шероховатость поверхности. Установлено, что на поверхности изношенных упрочненных зон наблюдаются следы микрорезания в виде четких рисок различной протяженности и глубины, что связано с воздействием частиц абразива на поверхность (следы микрорезания в виде борозд и отвалов с острыми краями, ориентированы в направлении движения абразивных зерен). Взаимодействие частиц абразива с поверхностью заключается в снятии микростружки металла и оттеснении материала на край образующейся риски под действием пластической деформации. Помимо глубоких царапин на покрытии  $\text{Cu}-\text{Sn}$  наблюдается отслоение фрагментов покрытия, что говорит о низкой когезионной прочности, связанной с образованием оксидных прослоек на межламелярных границах. Развитие механизма микрорезания свидетельствует о том, что твердость использованного абразива более чем в 1,3 раза

превышает твердость структурных составляющих оплавленного покрытия  $\text{Cu}-\text{Sn}$ .

Микрорельефы и профилограммы шероховатости поверхности стали Ст3, упрочненной поверхности слоев ( $\text{CuSn}$  и  $\text{CuSn} + \text{Cr}_x\text{C}_y$ ) представлены на рис. 7 (см. обложку) после 25 мин, режим испытания: шкурка 6-Н, нагрузка 20 Н, частота вращения алюминиевой плиты —  $100 \text{ мин}^{-1}$ , держателя —  $100 \text{ мин}^{-1}$ . Анализ профилограмм показал, что среднее арифметическое значение и наибольшая высота профиля и уменьшаются по ряду: сталь Ст3 (0,183 и 1,274 мкм) > покрытие  $\text{CuSn}$  (0,117 и 0,961 мкм) > покрытие  $\text{CuSn} + \text{Cr}_x\text{C}_y$  (0,099 и 0,742 мкм). Поверхность образцов после 1 ч испытаний под максимальной нагрузкой 50 Н показана на рис. 8 (см. обложку). Видно, что на поверхности стали Ст3 без покрытия появляются более широкие и глубокие следы микрорезания, чем на других поверхностях. На поверхности легированного слоя из бронзы следы микрорезания более широкие и глубокие, чем для легированного слоя ( $\text{CuSn} + 20 \% \text{Cr}_x\text{C}_y$ ).

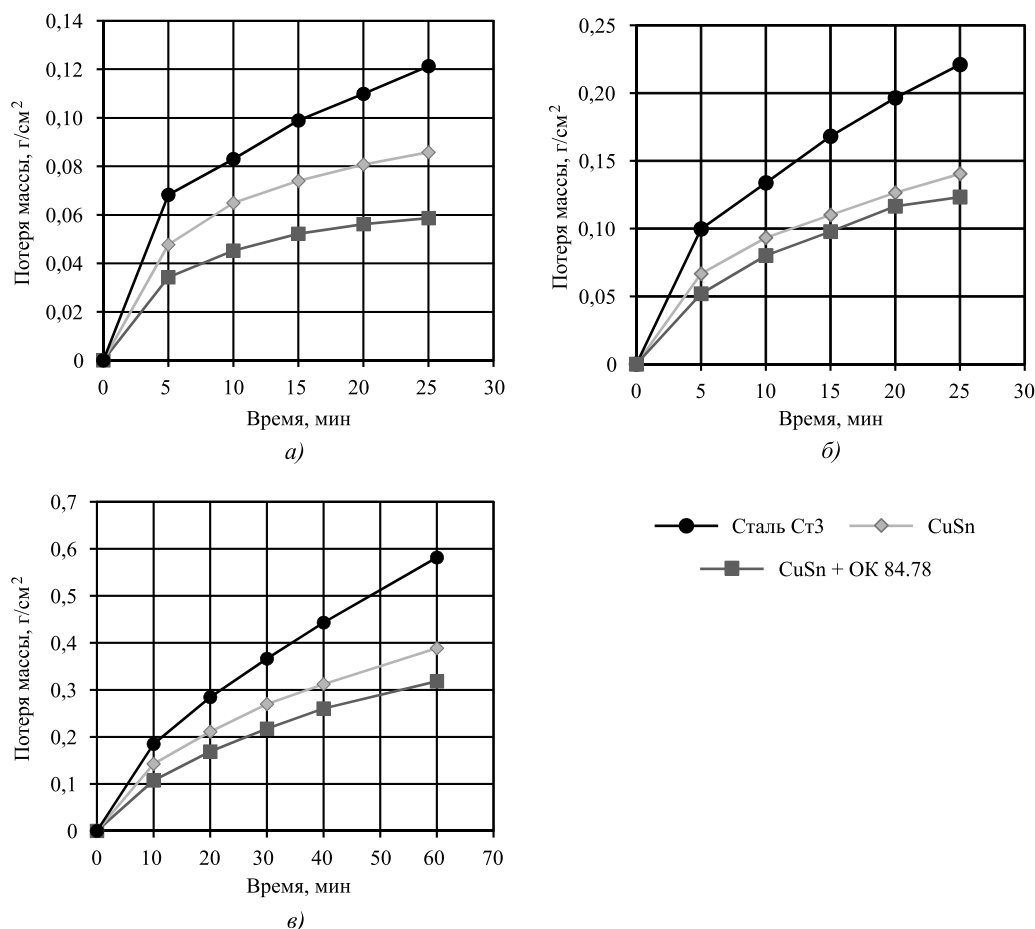


Рис. 6. Потеря массы образца при обработке на шкурке 6-Н, охлаждение водой. Частота вращения плиты  $100 \text{ мин}^{-1}$ , держателя  $100 \text{ мин}^{-1}$ ; нагрузка: а — 5 Н; б — 20 Н; в — 50 Н

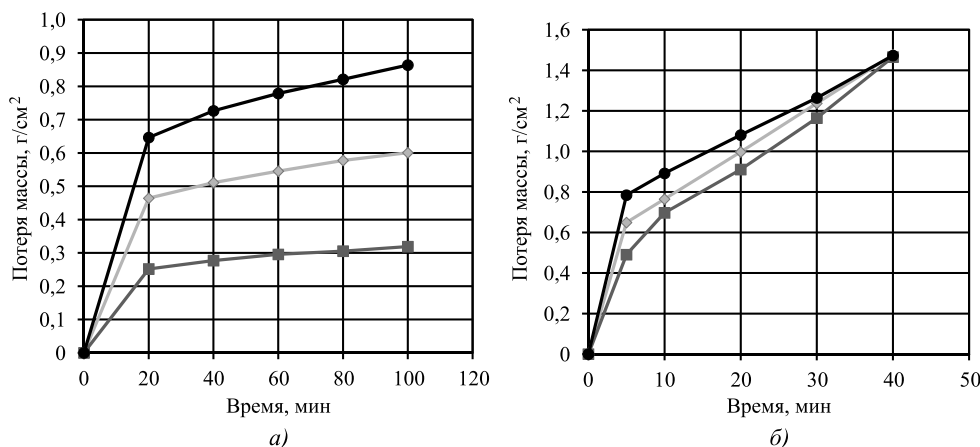


Рис. 9. Потеря массы образцов после испытания под нагрузкой 50 Н на шкурке 6-Н (а) и 20-Н (б) при охлаждении водой

Результаты, приведенные на рис. 7, 8, показывают, что легирование поверхности низкоуглеродистой стали бронзой при плазменном оплавлении повышает ее износостойкость, а добавление карбида хрома приводит к формированию твердых фаз (мартенсит и сложные карбиды  $(Fe, Cr)_{23}C_6$ ,  $(Fe, Cr)_7C_3$ ). Вследствие этого улучшается износостойкость поверхности образцов.

В случае обратного движения держателя образца относительно алюминиевой плиты результаты испытания изнашивания представлены потерями массы, приведенными в рис. 9. Сначала настроен режим испытания с наждачной бумагой SiC 220, нагрузкой 50 Н, частота вращения алюминиевой плиты  $500 \text{ мин}^{-1}$ , держателя —  $150 \text{ мин}^{-1}$  с обратным вращением, водяное охлаждение. Потеря массы увеличивается по ряду:  $CuSn + 20 \% \text{ ОК } 84.78 < CuSn < \text{сталь Ст3}$ . Это соответствует разнице в твердости испытываемых покрытий. Видно, что в ходе испытаний с мелкими частицами абразива шкурки в течение 1,5 ч скорость потери массы покрытий замедлилась. В работе [13] показано, что коэффициент трения минимизируется для оптимального размера абразивных частиц 35 мкм. Упоминается, что такая минимизация связана с переходом между механизмами адгезионного и абразивного износа. С другой стороны, скорость износа минимальна при наименьшем размере абразивных частиц.

Действительно, по мере увеличения размера абразивных частиц повреждение, пластическая деформация и, следовательно, скорость износа увеличиваются. Для ускорения процесса истирания использована шкурка типа 20-Н. Большой размер частиц абразива сильно влияет на потерю массы, вследствие этого процесс изнашивания быстрее достигает основного металла. За 0,5 ч скорость

потери массы в несколько раз больше, чем в случае мелкой шкурки (см. рис. 9, а). Это увеличение износа вызвано низкой твердостью зоны термического влияния упрочненного слоя, которую процесс изнашивания достигает. В случае применения шкурки 20-Н (см. рис. 9, б), потеря массы покрытия незначительно отличается, возможно из-за того, что глубина легирования покрытия  $CuSn$  больше, чем покрытия  $CuSn + 20 \% \text{ ОК } 84.78$ . В течение 40 мин потеря массы покрытий фактически равна потере массы стали Ст3.

### Выводы

Установлено, что покрытие, состоящее из смеси сложного состава  $Cu-Sn-Fe-C-Cr$ , значительно повышает твердость по сравнению с чистым сплавом  $CuSn$ . В случаях оплавления покрытий на основе  $CuSn$  наблюдаются трещины (обмазка толщиной 0,25 мм) и неполное насыщение между фазами, богатыми медью и железом (обмазка толщиной 0,5 мм). В случае покрытия на основе  $CuSn$  с добавлением карбида хрома в структуре формируется мартенсит. Испытания на изнашивание по закрепленному абразиву показали, что потеря массы образцов увеличивается в ряду:  $CuSn + 20 \% \text{ ОК } 84.78 < CuSn < \text{сталь Ст3}$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудина О.В. и др. Формирование диффузионного покрытия на поверхности стали путем лазерного и термодиффузионного легирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 4. С. 37–40.
2. Балановский А.Е., Ву Ван Гюи. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 9 (153). С. 82–91.



3. **Doubenskaia M., Gilmutdinov A.Kh., Nagulin K.Yu.** Laser cladding of metal matrix composites reinforced by cermet inclusions for dry friction applications at ambient and elevated temperatures // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 276. P. 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.05.044>.

4. **Deformation-induced** dissolution of copper precipitation in 1.5wt%Cu-bearing antibacterial Fe-17wt%Cr alloy during plastic deformation process / Shaoheng Sun, Fei Yin, Yifei Liu et al. // *Materials & Design*. 2018. Vol. 157. P. 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.014>.

5. **Effect** of normal load on two-body abrasive wear of an Fe–B–Cr–C based alloy with minor Cu and Ni additions / Yanliang Yi, Jiandong Xing, Yafang Lu et al. // *Wear*. 2018. Vol. 408–409. P. 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.014>.

6. **Investigations** on microstructure, mechanical properties and abrasion resistance of 4wt%Cr-2wt%Mn-2wt%Cu-Fe-B alloy / Yanliang Yi, Jiandong Xing, Yafang Lu et al. // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 137. P. 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.038>.

7. **Study** of rare earth elements on the physical and mechanical properties of a Cu–Fe–P–Cr alloy / F.A. Guo, C.J. Xiang, C.X. Yang et al. // *Materials Science and Engineering B*. 2008. Vol. 147 (1). P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.10.011>.

8. **Нгуен Ван Чьеу, Астафьева Н.А., Тихонов А.Г., Баллановский А.Е.** Сравнительная оценка твердости леги-

рованных покрытий из обмазки смеси CuSn–Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub> при упрочнении плазмой и лазером // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021. Т. 17. № 4 (196). С. 166–172

9. **Phase separation and properties of Cu–Fe–Cr–Si–C immiscible nanocomposite by laser induction hybrid cladding** / Shengfeng Zhou, Xiaoqin Dai, Min Xie et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 741. P. 482–488. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.184>.

10. **Formation and properties of a self-assembled Cu–Fe–Ni–Cr–Si immiscible composite by laser induction hybrid cladding** / Xiaoqin Dai, Min Xie, Shengfeng Zhou et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 742. P. 910–917. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.387>.

11. **Microstructure and properties of mixed Cu–Sn and Fe-based alloys without or with molybdenum addition processed by plasma transferred arc** / Qing Yu Hou, Ting Ting Ding, Zhen Yi Huang et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 283. P. 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.043>.

12. **Qingyu Hou, Yizhu He, Jiasheng Gao.** Microstructure and properties of Fe–C–Cr–Cu coating deposited by plasma transferred arc process // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201(6). P. 3685–3690. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.147>.

13. **Jourani A., Bouvier S.** Friction and Wear Mechanisms of 316L Stainless Steel in Dry Sliding Contact: Effect of Abrasive Particle Size // *Tribology Transactions*, 2015, 58:1, 131–139. DOI: 10.1080/10402004.2014.955229.

УДК 621.9.047;621.9.048

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-8-377-381

**Н.Н. Ненахов, В.П. Смоленцев, д-р техн. наук, В.Л. Мозгалин, А.И. Портных, канд. техн. наук**  
(Воронежский государственный технический университет)  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

## Подготовка поверхности заготовок под теплозащитное покрытие

*Рассмотрены вопросы подготовки поверхностей металлических изделий к нанесению высокотемпературных защитных покрытий из минералокерамических гранул с токопроводящей связкой. Описано влияние загрязнения в зоне контакта препарата с покрытием на качество продукта и показаны методы устранения факторов, влияющих на снижение стойкости нанесенного слоя под воздействием факела горячих продуктов сгорания топлива.*

**Ключевые слова:** покрытие, качество, горение, эксплуатация, адгезия.

*The issues of preparation the surfaces of metal products for the application of high-temperature protective coatings from mineral-ceramic granules with a conductive binder are considered. The influence of contamination in the contact zone of the preparation with the coating on the quality of the product is described and methods for eliminating the factors affecting the decrease in the resistance of the applied layer under the influence of the torch of hot products of fuel combustion are show.*

**Keywords:** coating, quality, combustion, operation, adhesion.

### Введение

Перед нанесением теплостойких покрытий, работающих в химически активных средах, необ-

ходимо обеспечить высокую адгезию слоя к основе, что в большинстве случаев требует подготовки поверхности заготовки с получением стабильной шероховатости в заданном диапазоне размеров

неровностей. Для этих целей наибольшее распространение получил процесс пескоструйной обработки твердыми гранулами, часть которых может закрепляться в поверхностном слое участков детали, предназначенных под покрытие (например, термозащитной эрозионноустойчивой минералокерамикой), и влиять на эксплуатационные характеристики изделий с покрытиями.

### Влияние пескоструйной обработки на эксплуатационные свойства поверхностного слоя материала детали

В работах [1, 2] установлено, что любые включения на поверхности заготовки и в наносимом материале способны влиять на адгезионные свойства покрытий, определяющих ресурс изделий при их эксплуатации. В [1] показано, что вкрапление частиц песка в поверхностный слой участков деталей перед покрытием оказывает большое влияние на адгезионные свойства многослойных покрытий, особенно при эксплуатации в условиях высокотемпературного горения химически активных компонентов жидкого топлива ракетных двигателей.

Для достижения требуемых адгезионных свойств поверхности при пескоструйной обработке заготовок требуется делать обоснованный и точный выбор режимов и материалов для выполнения этой операции. Из работ [3, 4] известно, что материал и размеры гранул, наряду с режимами обработки, существенно влияют на качество подготовки поверхности под покрытие для металлических деталей горячей зоны ракетных двигателей. Авторы исследовали образцы различных составов, с различными параметрами гранул рабочего вещества и связующих материалов, содержащих заранее введенные вкрапления частиц в процессе пескоструйной подготовительной обработки.

Исследования проводили в диапазоне рабочих режимов, используемых при подготовке к нанесению жаростойких покрытий горячей зоны ракетных двигателей. Многократные испытания позволили определить технологический режим пескоструйной обработки для обеспечения требуемых характеристик исходной поверхности под покрытие. Основные параметры режима: давление струи песка — около 0,6 МПа, угол атаки относительно обрабатываемой поверхности — 55...60°.

Исследовали материалы из бронзы и нержавеющей стали, которые обрабатывали электрокорундом белым зернистостью F22, F30 и F46. Выбранные режимы и рабочие материалы позволили стабильно достигать требуемого качества поверхностного слоя деталей.

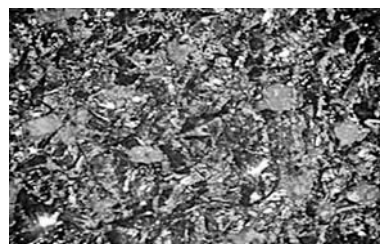


Рис. 1. Поверхность образца размером 60 × 40 мм, обработанного электрокорундом белым зернистостью F30 (×25)

На рис. 1 приведен микрошлиф образца после обработки гранулами зернистостью F30. Число включений (частиц адсорбирующего материала) на участке образца площадью 100 мм<sup>2</sup> — 60 шт. Диаметры частиц находились в диапазоне 0,1...0,3 мм. Среднее число включений в образце подсчитывали визуально под микроскопом и вычисляли как среднюю величину из 8—10 результатов подсчета, что давало достаточную достоверность показателей (выше 0,98).

После обдувки электрокорундом белым зернистостью F30 партии образцов на площади 100 мм<sup>2</sup> среднее число включений составило 75...85 шт. Размеры (диаметры) включений 0,15...0,2 мм. Доля площади, занятая включениями на поверхности такого образца, — 16 %.

На аналогичном образце, но после обдувки электрокорундом белым зернистостью F22, площадь, занятая включениями, составила 18 % при максимальном размере гранулы 0,3 мм.

Изучено использование гранул из карбида кремния более мелкой фракции F46 (рис. 2, а). Такой материал обеспечивает увеличение адгезионной прочности покрытия за счет получения опти-

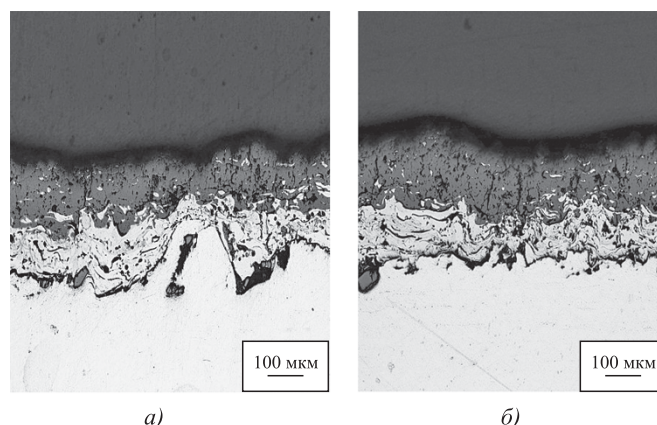


Рис. 2. Микрошлифы образцов из нержавеющей стали (×100) после пескоструйной обработки порошком SiC: а — фракция F46; б — фракция F20

мальной шероховатости поверхности и уменьшения количества включений в основном материале.

Исследования показали, что при уменьшении фракции зернистости рабочего материала (например, от F22 до F30) площадь, занятая включениями, возрастает, что непосредственно влияет на параметры шероховатости поверхности, подготовленной под покрытие, и, как следствие, на адгезионную прочность жаропрочных покрытий.

### Шероховатость поверхности заготовки под покрытие

Численные значения параметров шероховатости для различных фракций зернистости порошка, рекомендованные в [3, 4], приведены в табл. 1.

На рис. 3 показано влияние местных неровностей на сплошность материала с покрытием. В местах включений гранул после опескоструивания появляются значительные расслоения, которые в процессе испытаний вызвали образование трещин вблизи пустотных участков (см. рис. 3, а), и разрушение поверхностного слоя.

Наличие включений (рис. 3, б) устраняет пустоты на границе покрытия, но при этом наблюдается сниженная адгезия на границе оставшихся включений, что стимулирует уменьшение адгезионной прочности покрытия и требует изменения

Таблица 1

Значения параметров шероховатости поверхности, мкм, после обработки электрокорундом белым с зернистостью F22 и F30

Параметр шероховатости	F22	F30
<i>Ra</i>	13,6...16,8	14,6...17,0
<i>Rz</i>	97...10	89...99
<i>Sm</i>	223...283	222...282

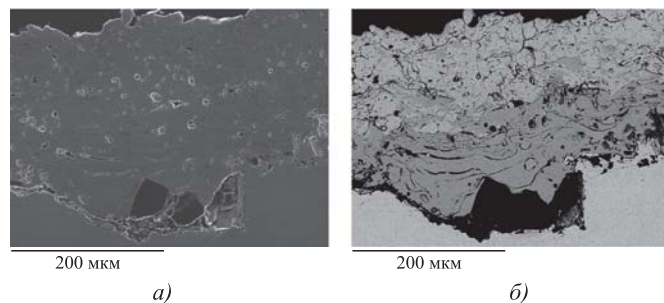


Рис. 3. Микронеровности в местах сопряжения покрытия с материалом заготовки образованные после пескоструйной обработки порошком SiC фракции F20 (×300): а — съемка в режиме отраженных электронов; б — съемка в режиме вторичных электронов

режимов подготовки поверхности с удалением местных неровностей, а в ряде случаев необходимо использование более мелких гранул. При этом необходимо учитывать, что с ростом фракции порошка (в сторону более мелкого зерна) толщина и ресурс теплозащитного покрытия снижаются.

Для определения влияния шероховатости поверхности на адгезионную прочность покрытия на образцы, обработанные карбидом кремния марки 54С фракций F46 и F20, был нанесен никромовый подслоя и основной защитный минералокерамический слой. Анализ полученных результатов показал, что при обработке заготовки карбидом кремния фракции F20 средняя адгезионная прочность составляет 10,3 МПа, а при использовании фракции песка F46 — 12,5 МПа. Оба показателя отвечают требованиям к изучаемым покрытиям, но для F46 требуется поиск новых материалов наносимых покрытий, повышающих их ресурс и надежность при эксплуатации.

### Выбор порошков и разработка технологического процесса нанесения поверхностных защитных слоев для обеспечения адгезионной прочности покрытий

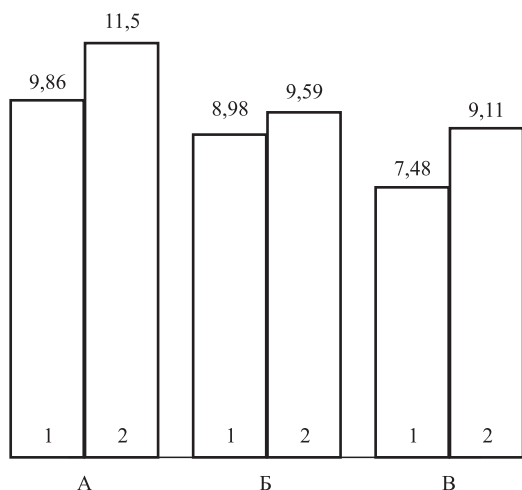
Сравнительные испытания адгезионных свойств покрытий выполнялись на образцах, предварительно обработанных электрокорундом белым зернистостью F22 и F30 (см. табл. 1), на которые был нанесен никромовый подслоя и теплозащитный слой. Далее на испытательной установке по стандартной методике была изучена адгезионная прочность нанесенного покрытия. Результаты исследований по трем партиям испытанных покрытий представлены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что адгезионная прочность крупного порошка F22 превышает этот показатель более мелкого порошка F30.

Таблица 2

Адгезионная прочность покрытия, МПа, для двух фракций обрабатываемого материала

Толщина покрытия, мкм	F22	F30
200	9,18	8,77
180	11,84	9,59
150	11,84	10,00
110	12,65	10,20
Среднее значение адгезии:	11,38	9,64



**Рис. 4. Адгезионная прочность, МПа, между слоями покрытия:**

А — между подложкой и подслоем из ПТЮ10Н; Б — между подслоем и покрытием состава: 75...80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 10...12 % оксида иттрия, и 20 % порошка ПТЮ10Н; В — между подслоем и покрытием состава: 78...80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 7...8 % оксида иттрия, и 20 % порошка ПТЮ10Н

Проведенные испытания выявили закономерности между подготовкой поверхности и применяемыми промежуточными слоями и их влияние на адгезионную прочность покрытия (рис. 4). Это позволяет обосновать выбор состава покрытий и режимов их нанесения по критериям износостойкости и термической стойкости получаемых покрытий на основе тугоплавких оксидов.

Для составов, приведенных на рис. 4, были обоснованы следующие режимы плазменного нанесения покрытия:

- А-1 — сила тока 360 А, напряжение 40 В;
- А-2 — сила тока 380 А, напряжение 45 В;
- Б-1, В-1 — сила тока 380 А, напряжение 70 В;
- Б-2, В-2 — сила тока 400 А, напряжение 75 В.

Показано, что применение в качестве промежуточного слоя материала из терморегулирующего сплава типа ПТЮ10Н обеспечивает заданное для перспективных изделий повышение уровня отрывной прочности перспективного керметного покрытия.

Для реализации предложенных этапов подготовки поверхности и нанесения покрытий разработаны методы расчета и выбора технологических режимов [2, 4, 5], назначаемых с учетом эксплуатационных требований, где во внимание принимаются условия работы деталей с термозащитным покрытием в горячей зоне двигателей летательных аппаратов и количество слоев термозащитных покрытий, сочетание которых обеспечивает

высокую адгезионную прочность и эрозионную стойкость изделия.

Разработанные технологические режимы и рекомендации по их использованию подтверждены экспериментальной проверкой на образцах деталей и в процессе огневых испытаний на макетах камер сгорания ракетных двигателей, что дает основания рекомендовать их к использованию при проектировании технологических процессов плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий (табл. 3).

Таблица 3

**Показатели термостойкости при различных режимах напыления нихрома**

Группа образцов	Порошок NiCr	Режимы напыления	$\sigma^{cp}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Термостойкость, циклов
1	ПХ20Н80 56-26 ГОСТ 13084—88	340 А, 50 В	8,49	8; 9; 11
2		380...400 А, 30...35 В	10,32	12; 12; 12

В работе [2] приведено обоснование разработанной технологии подготовки поверхности под покрытия на базе тугоплавких оксидов ZrO<sub>2</sub> с учетом их износо- и термической стойкости.

Основными критериями, определяющими свойства обрабатываемой поверхности под покрытие, являются: снижение шаржирования, вид, размер и форма твердых частиц, их скорость соударения с поверхностью заготовки, расход порошка на единицу площади поверхности и угол атаки.

Очистку образцов выполняли пескоструйной обработкой на различных режимах с давлением воздуха 0,4; 0,5 и 0,6 МПа при расстоянии от сопла до обрабатываемой поверхности 90...95 мм и проводили в два прохода гранулами из карбида кремния черного марки 54С зернистостью F20 (режим 1) и F46 (режим 2). Результаты приведены в табл. 4.

Видно, что использование порошка с гранулами крупной фракции значительно увеличивает шероховатость поверхности материала детали, дает увеличение среднего шага между неровностями. Для оценки влияния включений на адгезию покрытия визуально с помощью микроскопа "Альтами" определяли число гранул карбида кремния, закрепившихся на очищенной поверхности. Площадь, занятая включениями на образце, обработанном карбидом кремния зернистостью F20, составляет 12,5...19,2 % от площади поверхности, зернистостью F46 — 2,5...3,6 %. При этом следует учесть влияние размеров гранул включений и об-

Таблица 4

**Влияние фракции гранул и режимов очистки поверхности на параметры шероховатости поверхности образцов**

Режим	Давление воздуха, МПа	Параметры шероховатости, мкм		
		<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Sm</i>
1	0,4	16...21	101...120	240...330
	0,5	16,8...18,8	99...111	220...290
	0,6	19,2...21,1	105...123	250...350
2	0,4	9,8...10,8	68...74	150...170
	0,5	10...11,2	67...73	170...190
	0,6	9,8...10,6	64...75	170...190

разованных ими неровностей на эксплуатационные свойства деталей с покрытиями.

**Пути повышения эксплуатационных свойств гранул для пескоструйной обработки**

Анализ рис. 3 и результатов испытаний показывает, что использование для получения шероховатой поверхности под покрытие порошком карбида кремния крупной фракции (зернистостью F20) в большинстве случаев нецелесообразно из-за возможности разрушения покрытий в местах отслоения из-за вибраций изделия при эксплуатации, хотя при их использовании толщина и эрозионная стойкость защитного поверхностного слоя могут заметно возрастать. Это следует учитывать при создании изделий многоразового использования новых поколений ракетных двигателей.

Полученные результаты согласуются со справочными данными [5], подтверждающими, что оптимальная адгезия покрытия к подложке достигается, когда шероховатость поверхности сопоставима с толщиной расплавленных металлических слоев материала в структуре покрытия.

В результате проведенных исследований была обоснована целесообразность применения подслоя покрытия из нового материала ПТЮ10Н, который обеспечивает среднюю адгезионную прочность 14,42 МПа, против 10,95 МПа для ранее применяемого подслоя ПХ20Н80. Кроме того, применение в качестве промежуточного слоя

композиционного порошка системы Ni—Al (сплав ПТЮ10Н) способствует существенному повышению эксплуатационных характеристик теплозащитных покрытий в связи с дополнительным выделением тепла в пятне напыления и выравнивания их защитных характеристик.

**Выводы**

1. Установлены диапазоны применения фракций гранул для подготовки поверхности детали под нанесение многослойных тепло- и эрозионно-стойких покрытий.

2. Проведенные металлографические исследования и испытания адгезионных свойств покрытий позволили рекомендовать к использованию новые марки материалов для новых видов многослойных покрытий с повышенными прочностными характеристиками.

Материал статьи будет полезен разработчикам и изготовителям при отработке производственной технологичности создаваемых ракетных двигателей многоразового использования.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Портных А.И., Люлина М.А., Паничев Е.В.** Влияние инородных включений на эксплуатационные характеристики теплозащитного покрытия // Конструктивные особенности и технология изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения. Воронеж: ВМЗ, 2014. С. 119—131.
2. **Портных А.И., Кобзев В.Г.** Влияние подготовки поверхности и материала промежуточного слоя на свойства эрозионно-стойких теплозащитных покрытий // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 22—24 июня 2016 г. Самарский университет, 2016. С. 111—112.
3. **Смоленцев В.П., Портных А.И., Паничев Е.В.** Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 96—99.
4. **Портных А.И., Смоленцев В.П., Скрыгин О.В.** Отработка технологичности изделий под электрические методы обработки // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 11. С. 31—33.
5. **Справочник технолога** / под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.



**Владиславу Павловичу СМОЛЕНЦЕВУ 85 лет**

Владислав Павлович Смоленцев родился 5 августа 1936 г. В 1960 г. закончил Казанский авиационный институт по специальности "Авиационные двигатели". С 1959 по 1969 г. работал в Казанском филиале научно-исследовательского института авиационной техники в должностях от инженера до заместителя начальника института по науке. С 1969 по 1979 г. был профессором, заведующим кафедрой Казанского химико-технологического института им. С.М. Кирова. С 1979 г. по настоящее время работает в Воронежском государственном техническом университете. По совместительству руководит научными исследованиями на Воронежском механическом заводе.

В 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию по изготовлению высокоскоростного прецизионного инструмента в авиастроении. В 1973 г. при консультации академика Ю.Н. Петрова защитил докторскую диссертацию по научным основам электрохимической размерной обработки. Доцентом Казанского авиационного института стал в 1966 г., в 1980 г. получил звание профессора Воронежского политехнического института. Активно участвовал в работе Центрального Совета ВОИР СССР и РФ, головного Совета по машиностроению, Комиссии при Минвузе СССР, являлся членом президиума областного совета ВОИР, ассоциации технологов России, редакционных советов журналов издательства "Машиностроение", в вузах г. Орла, Воронежа, Москвы, Брянска, Санкт-Петербурга.

Владислав Павлович Смоленцев — Заслуженный изобретатель РСФСР, заслуженный работник высшей школы РФ, заслуженный испытатель космической техники РФ, заслуженный создатель космической техники РФ. Почетный профессор Орловского и Брянского государственных технических университетов. Член ряда научных академий РФ, академии наук США, международного экологического общества (Польша), Польской академии наук.

Область научных интересов: технологические методы повышения качества и надежности изделий авиационно-космической отрасли машиностроения.

В этом направлении имеет более 1000 научных работ, в том числе 22 монографии, изданные в России и за рубежом, 11 учебников по обеспечению качества изделий. Он соавтор 4 справочников, 3 энциклопедий, более 200 изобретений.

Под его руководством защищено 24 докторских и более 70 кандидатских диссертаций.

Владислав Павлович Смоленцев — создатель и руководитель научной школы "Электрические методы обработки в авиакосмической отрасли".

Впервые в 1970 г. в Казани исследовал и реализовал механизм формообразования при электрохимической размерной обработке, учитывающий гидродинамическую модель и модель массовыноса, что послужило базой для создания 18 новых способов обработки. Созданные В.П. Смоленцевым способы обработки нежестким электродом-инструментом использованы при изготовлении каналов. Предложенный механизм регулирования подачи при постоянной продольной расчетной силе позволил создать в 1969 г. в Ленинграде на заводе "Красный Октябрь" отраслевое производство по изготовлению валов трансмиссий вертолетов всех классов. Для этого были изготовлены принципиально новое оборудование и оснастка для электрохимического изготовления каналов с получением технологических показателей, не достижимых в базовом варианте обработки.

Совместно с профессором Я. Чехом в Высшей технической школе (Брно, Чехословакия) в 1980—1982 гг. был смоделирован и изучен механизм процесса электроабразивной обработки, применение которого на моторостроительных заводах России и Чехословакии позволило освоить выпуск совре-

менной техники с минимальными затратами на оснащение.

В.П. Смоленцевым теоретически обоснован механизм повышения надежности высоконагруженных деталей авиационных изделий за счет формирования свойств поверхностного слоя новым способом электрохимикомеханической обработки. Способ внедрен в 1968 г. на Ростовском вертолетном заводе при изготовлении крупносерийной продукции – стяжных лент лопастей вертолетов тяжелого класса.

По тематике школы В.П. Смоленцевым получено более 200 авторских свидетельств и патентов, под его научной редакцией в 1983 г. выпущено через издательство "Высшая школа" в 2 томах учебное пособие "Электрофизические и электрохимические методы обработки", включен раздел "Основы нанотехнологии" в учебное пособие "Высокие технологии размерной обработки в машиностроении" (М.: МГОУ, 2000. — 405 с.), изданное при его соавторстве.

Имя В.П. Смоленцева широко известно в научном мире. Он был в составе оргкомитетов симпозиумов и конференций в Японии, Китае, Польше, Болгарии, США и в других странах, выступал с докладами в Японии, Италии, Польше, Китае, Венгрии, Австралии и в других странах. В.П. Смоленцев избран членом АН США, международного Экологического общества (Польша), Польской академии наук, академии технологических наук РФ, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, международной академии информатизации, научным советником инженерной академии.

Сведения о его работах приведены в энциклопедиях: "Воронежская энциклопедия". Т. 2, "Татарская энциклопедия". Т. 5, "Энциклопедия поверхностного пластического деформирования", "Энциклопедия. Технологи России". Т. 1.

В.П. Смоленцев принимал непосредственное участие в создании и освоении новых образцов авиационной и космической техники: вертолетов, самолетов, ракетных двигателей, за что отмечен премией Правительства РФ.

Более половины защищенных патентами научных разработок по тематике научной школы внедрено в производство, что позволило получить многомиллионный эффект и способствовало приоритету России в области авиации и космонавтики.

Под руководством В.П. Смоленцева в научной работе ежегодно принимает участие до 18 студен-

тов, до 12 аспирантов и соискателей. Результатом такой работы стало создание пяти типов оборудования, выпускаемого малыми сериями для авиакосмической отрасли. Совместно со студентами и аспирантами получено более 40 авторских свидетельств и патентов, ежегодно публикуется до 12 научных статей. Материалы научных исследований используются при подготовке специалистов по технологии машиностроения в Воронежском, Казанском, Донском, Липецком, Московском и других технических университетах. Учебники "Управление качеством" (выдержало 6 изданий), "Управление системами и процессами", "Управление качеством для технических направлений (ФГОС 3+)" используются в учреждениях среднего специального и высшего технического образования России с 2005 г.

Владислав Павлович опубликовал 1206 научных работ, в их числе разделы в энциклопедиях "Машиностроение" (т. III-3) и "Технологи России", в справочниках "Справочник технолога-машиностроителя" (т. II) и "Справочник проектировщика", "Наукоёмкие технологии в машиностроении", в международной коллективной монографии "Теоретические основы проектирования технологических комплексов" (Минск: Белорусская наука, 2012), в 22 монографиях, изданных в основном издательством "Машиностроение", учебниках и учебных пособиях центральных издательств. Он является соавтором международного стандарта по чистовой обработке и стандартов СССР, входит в редакционные советы семи журналов в Москве, Брянске, Воронеже, Санкт-Петербурге, Орле. Входил в состав комиссии Минвуза СССР, в течение нескольких сроков избирался членом Центрального Совета ВОИР.

С 1970 г. работал в качестве председателя и члена диссертационных советов Казанского химико-технологического института им. С.М. Кирова, Казанского авиационного института, Ленинградского политехнического института, ЭНИКмаш (г. Воронеж), Воронежского государственного университета, Воронежской государственной технологической академии, Воронежского государственного лесотехнического университета.

С 1991 г. является председателем диссертационного совета в Воронежском государственном техническом университете (специальности технологического профиля), а с 2015 г. — председателем объединенного диссертационного совета (ВГТУ, Курский ГУ, Брянский ГТУ с участием членов

совета из Тульского ГУ, Орловского научно-учебного комплекса, Владимирского ГТУ), членом главного совета по машиностроению, членом Президиума Воронежского областного совета ВОИР, ассоциации технологов России.

В.П. Смоленцев являлся организатором и руководителем научного отдела и лаборатории "Нетрадиционные методы обработки в авиадвигателестроении" Казанского филиала НИАТ (1964—1970 гг.), кафедры "Технология машиностроения и детали машин" (КХТИ им. С.М. Кирова, г. Казань, 1970—1979 гг.), "Технология машиностроения, станки и инструмент" и "Технология машиностроения" (ВПИ, г. Воронеж, 1979—1986 гг.), научным руководителем Воронежского механического завода, научным консультантом Воронежского станкостроительного завода, АКБ "Якорь" (г. Москва) и др.

Работы В.П. Смоленцева отмечены правительственными наградами (медалями, благодарностью Президента РФ и др.), государственными и

отраслевыми почетными званиями (Заслуженный изобретатель РСФСР, 1982 г.; Заслуженный работник высшей школы РФ, 1998 г.; Заслуженный испытатель космической техники, 2000 г.; Заслуженный создатель космической техники, 2002 г.; Ветеран космической техники, 2003 г.), премией Правительства РФ (2000 г.), почетными грамотами Министерств, ЦК ВЦСПС, ВОИР, ЦП НТО. Награжден 2 золотыми, 2 серебряными и бронзовой медалями ВДНХ СССР, дипломом I степени ВДНХ СССР; медалями им. К.Э. Циолковского, С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, М.В. Келдыша, Г.С. Титова, А.Д. Надирадзе, "60 лет СССР", "За доблестный труд" (1970 г.), "Ветеран труда" (1990 г.); знаками "За освоение целинных земель" (1955 г.), "Отличник изобретательства", "Ударник пятилетки" (1975, 1980, 1985 гг.), "Победитель социалистического соревнования" (1973, 1975, 1980, 1985 гг.); многочисленными благодарностями и грамотами университета.

***Коллектив редакции и редакционный совет журнала  
поздравляют Владислава Павловича с юбилеем!  
Желаем крепкого здоровья, благополучия,  
новых профессиональных успехов и достижений!***

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 30.06.2021 г. Подписано в печать 28.07.2021 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 "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: **www.aov.ru**