ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 8 август 2018

**Председатель редакционного совета и главный редактор**
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

**Зам. председателя редакционного совета:**
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

**Зам. главного редактора**
СЕРИКОВА Е.А.

**Редакционный совет:**
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

**Ответственные за подготовку и выпуск номера:**
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" **39205**) или непосредственно в издательстве.

**Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96**
**Http: //www.mashin.ru**
**E-mail: zpm@mashin.ru**

# СОДЕРЖАНИЕ

## Литейное и сварочное производства

**Гавариев Р.В., Панкратов Д.Л.** Исследование поверхности отливок из сплавов цветных металлов при литье в металлические формы . . . . . 339
**Кочергин В.С., Куц В.В., Привалов Э.Н., Разумов М.С.** Повышение качества и производительности операции сварки вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок . . . . . 344

## Кузнечно-штамповочное производство

**Грязев М.В., Ларин С.Н., Пасынков А.А.** Оценка влияния технологических факторов на предельный коэффициент отбортовки листовых анизотропных заготовок . . . . . 349
**Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Ризаханов Р.Р.** Сопротивление деформации пористого силумина при повышенных температурах . . . . . 354

## Прокатно-волочильное производство

**Делюсто Л.Г.** Технология вибрационной очистки и волочения проволоки . . . . . 358
**Железняк Л.М., Савиных В.В., Василевский П.А.** Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения . . . . . 366

## Материаловедение и новые материалы

**Байжуманов М.К., Утепов Е.Б., Карибаев С.Ж., Карменов К.К.** Создание демпфирующих металлических материалов для деталей авиационной техники . . . . . 370
**Кочешков И.В.** Структура волокнистых металлокомпозитов, полученных из различных листовых заготовок . . . . . 376

***Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 – машиностроение и машиноведение; 05.04.00 – энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05.16.00 – металлургия и материаловедение и в базу данных Chemical Abstracts***

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.*

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2018

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

# BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 16 № 8 August 2018

**Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief**
LAVRINENKO V.Yu.

**Chairman Assistants**
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

**Editorial Assistant**
SERIKOVA E.A.

**Editorial Committee**
BLANTER M.S.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LARIN S.N.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

**This issue prepared with assistance of specialists:**
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

Journal is registered by Roskomnadzor.
The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the united catalogue "Pressa Rossi" **39205**) or immediately in the edition of the journal.

**Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96**
**Http: //www.mashin.ru**
**E-mail: zpm@mashin.ru**

## CONTENTS

### Foundry and Welding Productions

**Gavariev R.V., Pankratov D.L.** Research of surface of castings from alloys of non-ferrous metals at metal moulds casting . . . . . 339
**Kochergin V.S., Kuts V.V., Privalov E.N., Razumov M.S.** Improving of quality and productivity of welding operation of pipe shaft and helical screws spiral for drilling rigs . . . . . 344

### Forging and Stamping Production

**Gryazev M.V., Larin S.N., Pasynkov A.A.** Evaluation of influence of technological factors on limit coefficient of flanging of sheet anisotropic billets . . . . . 349
**Loginov Yu.N., Zagirov N.N., Ivanov E.V., Rizakhanov R.R.** Deformation resistance of porous silumin at higher temperatures . . . . . 354

### Rolling and Drawing Production

**Delyusto L.G.** Vibration cleaning and drawing of wire . . . . . 358
**Zheleznyak L.M., Savinykh V.V., Vasilevsky P.A.** Wire-drawing machines for production of electrical engineering . . . . . 366

### Physical Metallurgy and New Materials

**Bayzhumanov M.K., Utepov E.B., Karipbaev S.Zh., Karmenov K.K.** Creation of damping metallic materials for aircraft components . . . . . 370
**Kocheshkov I.V.** Fibrous metal composite structure produced from different sheet blanks . . . 376

***Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.00 – mechanical engineering and machine science; 05.04.00 – power, metallurgical and chemical mechanical engineering; 05.16.00 – metallurgy and material science and in Chemical Abstracts database***

*Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"*

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2018

УДК 621.74

**Р.В. Гавариев**
*(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ),*
**Д.Л. Панкратов**
*(Казанский (Приволжский) федеральный университет)*

# Исследование поверхности отливок из сплавов цветных металлов при литье в металлические формы

*Рассмотрено состояние поверхности отливок, полученных литьем цинковых и алюминиевых сплавов. Указаны факторы, влияющие на образование основных дефектов поверхности, а также на параметр шероховатости. Выявлена связь между состоянием формообразующей поверхности форм и шероховатостью получаемых отливок. Приведены зависимости эксплуатационного ресурса форм и шероховатости отливок. Предложено решение, позволяющее повысить эксплуатационные показатели формообразующей поверхности и качество поверхности получаемых отливок.*

**Ключевые слова:** отливка; цинковые сплавы; алюминиевые сплавы; пресс-форма; литье под давлением; покрытие; эксплуатационный ресурс.

*The surface condition of the castings received by casting of zinc and aluminum alloys is considered. The factors influencing on emergence of the main defects of surface and also roughness indicator are specified. Communication between condition of form-building surface of moulds and roughness of the received castings is revealed. Dependences of operational resource of moulds and roughness of castings are given. The solution allowing to raise operational indicators of form-building surface and quality of surface of received castings is proposed.*

**Keywords:** casting; zinc alloys; aluminum alloys; compression mould; die casting; covering; operational resource.

## Введение

Литье под давлением является одним из наиболее эффективных методов получения заготовок с максимально высоким коэффициентом использования материалов до 95 % [1]. Отливки, получаемые методом литья под давлением, чаще всего не требуют последующей механической обработки, поэтому поверхность отливки должна соответствовать указанным в чертеже требованиям.

Метод литья под давлением позволяет получить отливки с параметром шероховатости поверхности не более $Ra$ = 1,6 мкм. Однако по мере износа литейной оснастки показатели шероховатости отливок повышаются, что приводит к негодности литых изделий.

Таким образом, для достижения указанных значений параметра шероховатости и других требований к поверхности необходимо рассмотрение различных дефектов отливок литья под давлением, а также причин их возникновения.

Одними из наиболее распространенных дефектов поверхности являются: следы течения потока, узорчатость, утяжины, расслаивание металла.

Следы течения потока выглядят как волнистые линии, глубина которых составля-

ет 0,05...0,1 мм. Указанные линии значительно затрудняют полировку и нанесение покрытий отливок. Основная причина их образования — быстрая кристаллизация заливаемого расплава возле формообразующей поверхности пресс-формы. Поэтому в качестве мер предупреждения указанного дефекта можно предложить следующее: повысить температуру подогрева пресс-формы, увеличить скорость впрыска и прессования, провести полировку формообразующей поверхности, уменьшить дозу смазочного материала [2, 3].

Узорчатость — это различные неровности высотой не более 0,05 мм, которые значительно затрудняют полировку и нанесение покрытий. Появление указанного дефекта обусловлено распылением металла при впуске, а также наличием воздуха и газов на формообразующей поверхности пресс-формы. Предупреждающими мероприятиями являются: увеличение сечения питателя, улучшение системы вентиляции, понижение газотворной способности смазочного материала [4].

Утяжины образуются в результате перегрева сплава или пресс-формы и представляют собой впадины, расположенные в утолщенных областях отливки или вблизи них. Основные способы устранения утяжин: снижение температуры заливки, ускорение охлаждения пресс-формы в дефектных областях, увеличение силы подпрессовки.

Расслаивание металла проявляется в виде отслаивающихся тонких пленок (до 0,2 мм) от поверхности полученных отливок. Указанный дефект является результатом недостаточной скорости поступления расплава в пресс-форму, вызывающей несплавление объемов металла. Рекомендации по профилактике указанного дефекта: увеличение сечения питателя, скорости прессования, объема промывника, повышение температуры пресс-формы.

Высота неровностей поверхности должна быть не более 0,2...0,3 мм, что дает возможность простановки требований к конкретным поверхностям получаемых отливок. При этом хорошее качество поверхности не всегда означает качество внутреннего объема отливки. Сокращение продолжительности заполнения, увеличение скорости потока, температуры пресс-формы и темпа работы машины приводят к повышению пористости отливки. Это делает необходимым проведение точного расчета технологических режимов в зависимости от чертежа отливки и конкретных условий процесса литья.

Помимо технологических режимов литья под давлением важным является состояние формообразующей поверхности. Эксплуатация формообразующих деталей в условиях процесса литья под давлением приводит к появлению сетки трещин, следов выкрашивания металла, сколов и других дефектов. Указанные дефекты вызывают появление на отливках трещин, задиров и облоя. Также по мере износа формообразующей поверхности происходит ухудшение показателей шероховатости [5].

Учитывая относительно малый диапазон значений для регулирования технологических параметров процесса литья под давлением, ввиду противоположности требований к получению качественной поверхности, с одной стороны, и уменьшению пористости внутри отливки — с другой, одним из важнейших параметров является надежность формообразующей поверхности пресс-формы [6].

Надежность формообразующих поверхностей пресс-форм литья под давлением определяется следующими основными параметрами: безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость. При этом повышение качества поверхности получаемых отливок в наибольшей степени зависит от параметра долговечности формообразующих поверхностей, выраженного в виде показателя эксплуатационного ресурса [7].

Так как конечным звеном процесса литья является получаемая отливка, то именно ее состояние определяет возможность дальнейшей эксплуатации пресс-формы, т.е. конкретная пресс-форма негодна в случае, когда дефекты формообразующей поверхности приводят к получению отливок, негодных по качеству получаемых поверхностей. Таким образом, с увеличением показателя эксплуатационного ресурса будет повышаться качество получаемых отливок.

**Параметр шероховатости цинковых отливок**

| Обработка пресс-формы | Номер точки | Параметр шероховатости поверхности отливок *Ra*, мкм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Число запрессовок (циклов) | | | | | | |
| | | 1 | 1000 | 10 000 | 20 000 | 80 000 | 150 000 | 200 000 |
| Покрытие TiCN—TiN—MoN | 1 | 0,547 | 1,140 | 1,999 | 2,109 | 2,270 | 3,468 | 5,867 |
| | 2 | 0,890 | 1,574 | 2,224 | 2,458 | 2,664 | 3,736 | 6,089 |
| | 3 | 0,457 | 1,325 | 1,879 | 1,889 | 2,005 | 3,404 | 5,796 |
| Азотирование | 1 | 1,049 | 1,726 | 2,778 | 3,503 | 4,798 | 6,368 | — |
| | 2 | 1,816 | 2,324 | 2,861 | 3,568 | 4,969 | 6,758 | — |
| | 3 | 1,593 | 2,193 | 2,708 | 3,373 | 4,566 | 6,397 | — |

Эксплуатационный ресурс зависит от множества факторов, действующих одновременно в процессе получения необходимой отливки. Среди данных факторов есть такие, которые закладываются при проектировании пресс-формы, например материал пресс-формы, сложность конструктивных элементов формообразующей полости, технологические режимы процесса, покрытия и смазки, однако есть и такие, которые возникают в зависимости от состояния формообразующих деталей: термические и силовые напряжения, деформации, трещины и прочие дефекты.

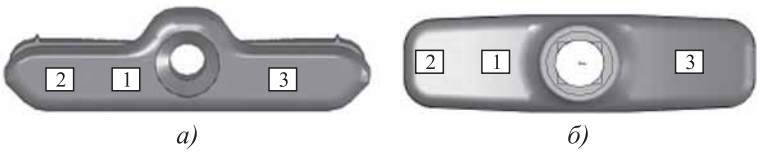
Для получения наиболее эффективной технологии изготовления качественных отливок методом литья под давлением необходимо уменьшить влияние негативных факторов на формообразующую поверхность. Один из возможных вариантов решения — нанесение покрытий на формообразующую поверхность методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) [8]. Наиболее подходящим вариантом для условий литья под давлением является покрытие TiCN—TiN—MoN, позволяющее снизить влияние температурных воздействий при литье алюминиевых и цинковых сплавов, а также уменьшить скорость развития поверхностных трещин [9].

Для проверки эффективности работы защитного покрытия исследовали шероховатость по параметру *Ra* в трех различных точках на внешней плоской поверхности отливок из цинкового сплава ЦАМ 4-1 (рис. 1, *а*) и алюминиевого сплава АК12 (рис. 1, *б*), полученных в формообразующих вставках из материала 4Х5МФС с покрытием TiCN—TiN—MoN в различные периоды эксплуатации. Для сравнения определяли аналогичный параметр для отливок, полученных в формообразующих вставках из стали 4Х5МФС с азотированием (см. таблицу). При этом для устранения возможных неточностей при изготовлении конкретной пресс-формы исследовали отливки, полученные с различных гнезд одной пресс-формы.

Значения параметра шероховатости определяли в результате не менее трех измерений в каждой точке. Указанные точки выбирали на одной поверхности — плоскости таким образом, чтобы их расположение относительно литника отличалось друг от друга.

Выявлено, что точки, лежащие на одной плоскости, для алюминиевых и цинковых сплавов имеют различные значения параметра шероховатости, что можно объяснить двумя факторами: расположение относительно литника, а также расположение относительно конструктивных элементов формообразующей поверхности (галтельные переходы, отверстия, впадины, выступы и др.).

Точка № 2 обладает наихудшими значениями *Ra*, что вызвано удаленностью от литника, в результате этого скорость заливаемого




*а)* *б)*

**Рис. 1. Области определения шероховатости на получаемых отливках из сплавов ЦАМ 4-1 (*а*) и АК12 (*б*)**

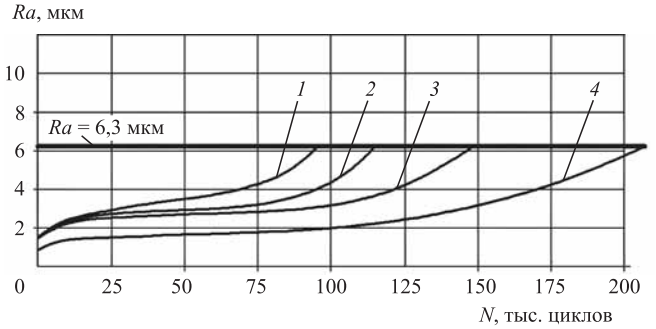



**Рис. 2. Зависимости параметра шероховатости поверхности отливок от периода эксплуатации формообразующих вставок из стали 4Х5МФС:**

*1*, *3* — при литье соответственно сплавов АК12 и ЦАМ 4-1 с азотированием; *2*, *4* — при литье соответственно сплавов АК12 и ЦАМ 4-1 с покрытием TiCN—TiN—MoN

*а)* *б)*

**Рис. 3. Цинковые отливки детали "запорная планка", полученные со вставок с азотированием (*а*) и с покрытием TiCN—TiN—MoN (*б*)**

расплава в данной точке в сравнении с другими является наименьшей. Другой причиной может быть близость множества сопрягаемых друг с другом поверхностей, что приводит к постоянному изменению направления потока в области рассматриваемой точки. Также сопряжение множества поверхностей в небольшой области приводит к тому, что покрытие в указанной области нанесено не столь качественно, как на открытой плоской поверхности, то же самое относится и к азотированию.

Также установлено, что отливки, полученные с формообразующих вставок с покрытием TiCN—TiN—MoN, обладают меньшей шероховатостью в рассматриваемых точках, чем отливки с азотированных вставок. Это утверждение справедливо для всех рассматриваемых точек. Подобные исследования шероховатости цинковых отливок проведены в работе [5], при этом значения в [5] значительно отличаются от полученных (рис. 2).

На рис. 2 видно, что в начальный период эксплуатации (до 5000 циклов) все кривые имеют эквивалентные результаты, но далее происходит их резкое расхождение.

Сравнение показателей отливок, полученных из формообразующих поверхностей с покрытием TiCN—TiN—MoN (кривая *2* для АК12, кривая *4* для ЦАМ4-1) и азотированием (кривая *1* для АК12, кривая *3* для ЦАМ4-1) показало, что изменение шероховатости имеет схожий характер для обоих случаев. Однако на любом этапе эксплуатации параметр шероховатости отливок, полученных из вставок с покрытием TiCN—TiN—MoN, почти в 2 раза меньше значений для отливок, полученных из вставок с азотированием.

Таким образом, нанесение покрытия TiCN—TiN—MoN обеспечивает снижение параметра шероховатости получаемых отливок в сравнении с азотированием. Так, после 150 000 запрессовок цинковые отливки, полученные из азотированных вставок, имеют $Ra$ = = 6,3 мкм, а отливки, полученные из вставок с покрытием TiCN—TiN—MoN, — $Ra$ = 3,2 мкм.

Изменение графиков параметра шероховатости отливок в начальный период эксплуатации схоже для всех вставок с КИБ-покрытиями. Отличаются они только периодом резкого повышения параметра шероховатости отливок, что и определяет их преимущество относительно друг друга.

Помимо экспериментальных исследований отливок по параметру шероховатости проводили сравнение отливок по наличию поверхностных дефектов на протяжении всего эксплуатационного ресурса (рис. 3).

Для отливок, полученных со вставок с азотированием, характерны узорчатость и задиры, при этом на отливках, полученных со вставок с покрытием TiCN—TiN—MoN, указанные

дефекты заметны в значительно меньшей степени. Это является подтверждением правильности исследований шероховатости отливок.

**Заключение.** Использование комплексного покрытия TiCN—TiN—MoN, полученного методом КИБ, на пресс-формы при литье под давлением цинковых и алюминиевых сплавов позволяет снизить рост шероховатости готовых изделий. При этом наблюдается увеличение эксплуатационного ресурса пресс-форм с нанесенными износостойкими покрытиями по сравнению с традиционно используемым методом азотирования формообразующих поверхностей пресс-форм.

При литье цинковых сплавов в пресс-формы с покрытием TiCN—TiN—MoN параметр шероховатости *Ra* составлял до 6,3 мкм на протяжении (205...210) тыс. циклов, при литье в пресс-формы с азотированием аналогичный уровень *Ra* обеспечивался только в течение (145...150) тыс. циклов.

При литье алюминиевых сплавов параметр шероховатости *Ra* = 6,3 мкм при использовании покрытия TiCN—TiN—MoN и азотирования составил 112 и 88 тыс. циклов соответственно.

В результате работы доказано, что комплексное износостойкое покрытие TiCN—TiN—MoN, нанесенное на формообразующие поверхности пресс-форм для литья под давлением цветных металлов и сплавов на их основе, позволяет повысить срок эксплуатации пресс-форм при гарантированном соблюдении требований к качеству отливок, получаемых методом литья под давлением, что снижает себестоимость отливок в производстве.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Белопухов А.К.** Технологические режимы литья под давлением. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.
2. **Гавариев Р.В., Леушин И.О., Савин И.А.** Влияние функциональных покрытий на эксплуатационную стойкость пресс-форм для литья под давлением цинковых сплавов // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 66—70.
3. **Гавариев Р.В., Леушин И.О., Савин И.А.** Проблема прогнозирования эксплуатационного ресурса пресс-форм литья под давлением цинковых сплавов и некоторые пути ее разрешения // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2013. № 6. С. 26—29.
4. **Гавариев Р.В., Савин И.А., Леушин И.О.** Исследование механизма разрушения пресс-форм с защитным покрытием для литья под давлением цинковых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 8. С. 3—6.
5. **Гавариев Р.В., Савин И.А., Леушин И.О.** Повышение качества поверхности цинковых отливок нанесением многослойных защитных покрытий // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 84—88.
6. **Гавариев Р.В., Савин И.А.** Повышение качества поверхности отливок цветных металлов получаемых литьем под давлением. Курск: Университетская книга, 2017. 236 с.
7. **Гавариев Р.В., Савин И.А.** Моделирование процесса литья под давлением в пресс-форму с защитным покрытием // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 47—50.
8. **Методика** теоретического расчета поверхностного натяжения металлических расплавов на основе физической модели энергетического состояния жидкости / И.А. Савин, В.В. Марков, А.В. Нищенков, С.В. Плохов // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2014. № 5. С. 48—52.
9. **Гавариев Р.В., Савин И.А.** Особенности проектирования технологической оснастки для получения отливок сплавов цветных металлов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2012. № 4. Вып. 2. С. 41—43.



*Ренат Вильсорович Гавариев, канд. техн. наук,*
gavarievr@mail.ru;
*Дмитрий Леонидович Панкратов, д-р техн. наук*

УДК 622.23.05

**В.С. Кочергин[1, 2], В.В. Куц[2], Э.Н. Привалов[1], М.С. Разумов[2]**
*([1]АО "Геомаш", г. Щигры,*
*[2] Юго-Западный государственный университет, г. Курск)*

# Повышение качества и производительности операции сварки вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок*

*Описаны конструкция и состав роботизированного технологического комплекса приварки к трубе шнековой полосы сваркой в среде защитных газов (MAG), ход экспериментальных работ по повышению качества сварного шва, увеличению скорости сварки и снижению расходов на защитный газ путем замены углекислого газа сварочной смесью "Коргон".*

**Ключевые слова:** сварка; качество; робот; газ; снижение расходов; шнек.

*The design and composition of the robotized welding-to-screw welding technology in the shielding gas (MAG), the progress of experimental work to improve of quality of the weld, increase welding speed and reduce of cost on shielding gas by replacing of carbon dioxide on "Korgon" welding mixture are presented.*

**Keywords:** welding; quality; robot; gas; cost reduction; auger.

Шнек является немаловажной частью бурильного оборудования. Основное назначение шнека — элевация разработанного грунта из скважины на поверхность. Применение шнеков при бурении значительно ускоряет процесс производства скважины, так как он становится непрерывным.

Процесс эксплуатации шнеков также предъявляет различные требования к этому инструменту. Сопротивление грунта, воспринимаемое буром, полностью передается на шнек и в этом случае корпус шнека должен выдерживать динамические нагрузки на кручение различной амплитуды и частоты в течение длительного срока эксплуатации без образования дефектов. В изготовлении шнеков используют усиленный корпус, рассчитанный на максимальный крутящий момент бурильной машины. Лопасти в процессе эксплуатации тоже подвергаются интенсивному износу в результате трения о стенки скважины [1].

До недавнего времени сварку вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок осуществляли ручным способом, что негативно сказывалось на качестве изготовляемых деталей и производительности (рис. 1).

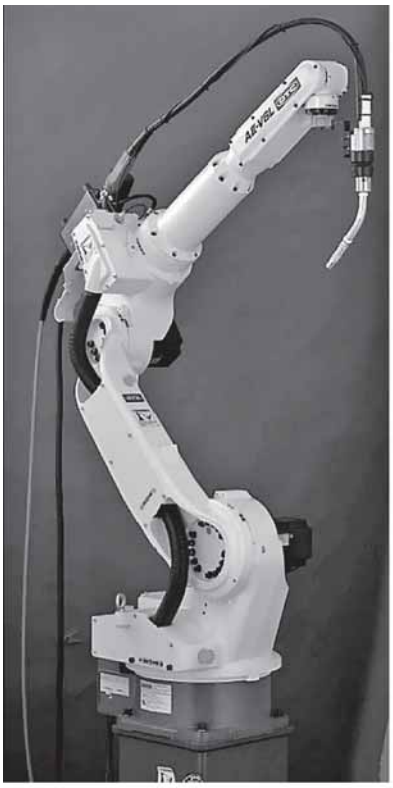
Для решения данной проблемы в АО "Геомаш" (г. Щигры) был внедрен роботизированный технологический комплекс (рис. 2), состоящий из:

- сварочного манипулятора шарнирного типа OTC-Daihen AII-V6L (Япония) с контроллером AX21;
- двух позиционеров AII-1PB250 той же фирмы;
- инверторного сварочного источника OTC-Daihen DP-500;
- станции очистки горелки;
- дополнительной оснастки.

Данный комплекс позволяет проводить сварку в автоматическом режиме способом

**Рис. 1. Шов после ручной сварки**

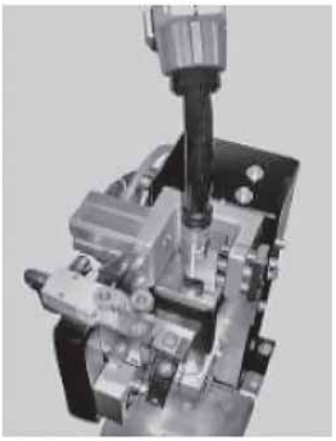
* Работа выполнена в рамках финансирования Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2018—2020 годы СП-591.2018.1.



*а)*

*б)*

*в)*



*г)*

**Рис. 2. Элементы роботизированного технологического комплекса для сварки элементов шнеков:**
*а* — манипулятор AII-V6L; *б* — позиционер; *в* — сварочный источник; *г* — станция очистки головки и пульт управления

MIG-MAG в среде газа $CO_2$ или смеси Ar + $CO_2$ сплошной проволокой диаметром 1...1,6 мм.

Роботизированный сварочный комплекс (рис. 3) имеет две рабочие зоны, обслуживаемые одним роботом-манипулятором.

Данный комплекс позволяет осуществлять одновременную сборку и сварку изделий. В то время как рабочий устанавливает и фиксирует детали в кондукторе в первой рабочей зоне, робот-манипулятор сваривает собранный узел во второй рабочей зоне. По окончании сварки подается сигнал, рабочий, закончив установку детали, нажимает кнопку "пуск" на панели управления, робот переходит в первую рабочую зону, а рабочий — во вторую. Затем цикл повторяется.

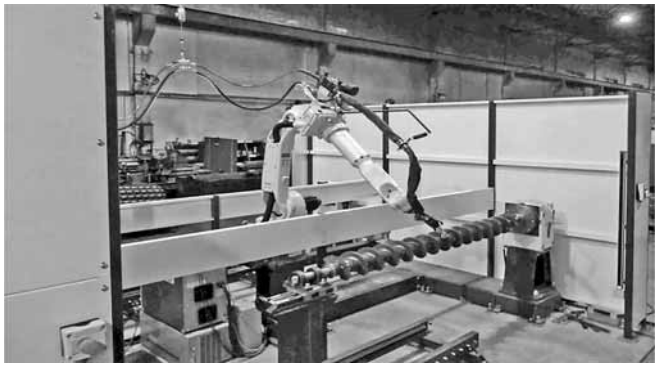


**Рис. 3. Общий вид роботизированного комплекса**

Автоматизация процесса сварки вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок осложнена следующими факторами:

— расхождение фактического шага спирали шнека с чертежным достигает 20 мм;

— зазор между трубой и спиралью, предварительно натянутой на нее, варьируется от полного его отсутствия до 3 мм.

Данные недостатки не влияют на функциональное предназначение шнека и их устранение нецелесообразно в связи со значительным удорожанием технологического процесса, тем не менее они являлись серьезным препятствием для автоматизации операции приварки шнековой полосы.

**Рис 4. Шаблоны челночных перемещений**

Для обеспечения приемлемого качества сварки в данных условиях была применена челночная траектория сварного шва (осуществляется встроенными алгоритмами поперечных колебаний горелки, рис. 4) и осуществлено программирование (обучение) системы поиска стыка деталей по шву с помощью датчика слежения сварочной дуги (ArcSensor), позволяющего фиксировать отклонения, связанные с неточностью сборки и коробления деталей во время сварки.

Применение челночных перемещений горелки (характеризуемых геометрией, направлением, скоростью, частотой, амплитудой) позволило качественно заплавлять присадочным материалом зазоры любого размера и геометрии между свариваемыми деталями, а также применить систему отслеживания положения шва, представляющее собой электронную плату, интегрируемую в УЧПУ робота.

С помощью датчика дуги данная система осуществляет контроль основных параметров дуги — силы тока $I$ и напряжения $U$ — которые изменяются при смещении фактического расположения стыка относительно запрограммированной траектории. Оценивая изменения параметров в точках поперечного перемещения, соответствующим максимальным значениям амплитуды, программное обеспечение отдает исполнительным органам робота команды на корректирующее смещение траектории.

Для использования этой системы при сварке была написана программа сварки на определенной длине шнека по точкам соединения полосы и трубы шнека. Во время обучения выполнялась автоматическая настройка и сохранение параметров слежения. Минимальная длина шва для обучения определяется скоростью и частотой колебаний, и определяется согласно стандартной диаграмме (рис. 5).

Обучение продолжалось до тех пор, пока не был достигнут приемлемый результат надежности слежения.

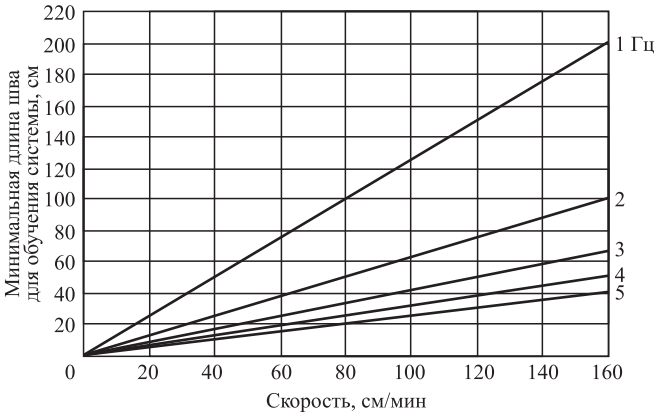



**Рис. 5. Диаграмма определения минимальной длины шва для обучения системы**

Для снижения себестоимости процесса сварки исследовали качество сварного шва при замене применяемого ранее защитного газа $CO_2$ (см. кн.: Патон Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М.: Машиностроение, 1974. 480 с) сварочной смесью "Коргон". Качество шва оценивали визуально и измерением катета шва с помощью катетомера.

Для выполнения данного исследования была разработана управляющая программа для сварки с применением смеси (отличающаяся углом наклона сварочной горелки, геометрией колебательных движений). В табл. 1 приведены результаты сварки, полученные при различных скоростях без предварительного подогрева детали.

Таким образом, обеспечить необходимое качество сварного шва возможно при скорости сварки без предварительного подогрева детали не более 0,9 м/мин [2].

Количество брызг металла по сравнению со сваркой в среде $CO_2$ значительно снизилось, размер брызг в 2—3 раза меньше, задымленность также уменьшилась. В результате снижения брызгообразования снизилось загрязнение мундштука горелки, что позволило уменьшить число циклов очистки во время сварки одного шнека с 5 до 2 раз.

**1. Качество сварного шва при различных скоростях сварки с использованием защитной сварочной смеси "Коргон"**

| Номер опыта | Скорость сварки, м/мин | Качество сварного шва |
|---|---|---|
| 1 | 0,7 | Хорошее |
| 2 | 0,8 | Хорошее. Наблюдаются подрезы в области трубы и полосы, обусловленные недостаточным прогревом материала перед дугой. Подрезы устранены заменой поперечных колебательных движений круговыми с переобучением сенсора слежения |
| 3 | 0,9 | Удовлетворительное |
| 4 | 0,95 | Наблюдаются подрезы в области трубы и полосы, обусловленные недостаточным прогревом материала перед дугой. Изменением параметров подрезы устранить не удалось |
| 5 | 1,0 | |

**2. Анализ расхода защитного газа**

| Характеристика | $CO_2$ | $Ar + CO_2$ |
|---|---|---|
| Объем сжатого газа, содержащийся в одном 40-литровом баллоне, л | 12 500 | 6050 |
| Расход в процессе сварки (согласно показаниям расходомера), л/мин | 25 | 10 |
| Средняя стоимость заправки одного баллона, руб. | 400 | 700 |
| Время сварки одного шнека, мин | 14,1 | 8,5 |
| Расход газа на один сваренный шнек, л | 352,5 | 85 |
| Цена 1 л газа (из средней цены заправки), руб. | 0,032 | 0,115 |
| Затраты на защитный газ для сварки одного шнека, руб. | 11,28 | 9,78 |

При скорости сварки 0,9 м/мин была изготовлена партия шнеков в количестве 33 шт. и проведены замеры машинного времени, которое составило 8,5 мин на один шнек. Поскольку замена заготовки происходит без прерывания цикла сварки, число шнеков, изготовляемых за одну смену, может быть рассчитано, как 480/8,5 ≈ 56 шт. (112 шт. при двухсменной работе). Принимая среднее число рабочих дней в месяц 20, получаем, что возможное число изготовляемых шнеков при двухсменной работе составляет: 20·112 = 2240 шт.

Расчетное потребное количество защитной смеси на 1 день работы (112 шнеков) при расходе 10 л/мин: (112·8,5)·10 = 9520 л, на месяц работы: 20·9520 = 190 400 л.

Один баллон объемом 40 л содержит 6050 л смеси. Таким образом, ежедневный расход составляет ≈1,6 баллона, ежемесячный — ≈32 баллона объемом 40 л (при двухсменной работе).

Данные по расходу защитного газа с применением углекислого газа и смеси "Коргон" сведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены данные по расходу защитного газа, сварочной проволоки и энергопотреблению на один шнек.

Таким образом, замена ручной сварки сваркой роботом с заменой защитного газа $CO_2$

**3. Расход защитного газа, проволоки и энергопотребление на сварку одного шнека**

| Сварка | Газ | Диаметр проволоки, мм | Скорость сварки, м/мин | Основное время сварки, мин | Масса проволоки, кг | Расход газа, л | *I*, А | *U*, В | Энергозатраты, МДж | Энергозатраты на единицу, кВт/ч |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ручная сварка | $CO_2$ | 2,0 | 1,2 | 10,8 | 0,9 | 12 | 500 | 40 | 10,30 | 2,853 |
| Сварка роботом | $CO_2$ | 1,2 | 0,65 | 14,1 | 1,2 | 22 | 295 | 37,5 | 9,35 | 2,589 |
| | Смесь $Ar + CO_2$ | | 0,8 | 11,25 | | 2,35 | | | 7,47 | 2,07 |

**Рис. 6. Шов после сварки роботом**

смесью "Коргон" требует определенного увеличения расхода проволоки, связанного с повышением качества шва (см. рис. 1 и 6), и дает значительную экономию защитного газа. Также роботизированная сварка позволила обеспечить стабильность качества сварного шва.

На основании проведенных работ принято решение о целесообразности расширения применения роботов для сварки, а также изучения их применяемости в других производственных областях, таких как индукционная термическая обработка, поверхностное упрочнение лазерным излучением [3].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Шнеки** для бурения. Режим доступа: http://www.lancier.ru/html/burilnaya_texnika/shneki.html (дата обращения: 17.03.18).
2. **Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н.** Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 188 с.
3. **Бирюков В.П.** Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения // Вестник машиностроения. 2008. № 3. С. 33.



*Виталий Сергеевич Кочергин,*
koshergin@mail.ru;
*Вадим Васильевич Куц, д-р техн. наук;*
*Эдуард Николаевич Привалов;*
*Михаил Сергеевич Разумов, канд. техн. наук*

***ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал***

**"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"**

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

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

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

УДК 621.983; 539.374

**М.В. Грязев, С.Н. Ларин, А.А. Пасынков**
*(Тульский государственный университет)*

# Оценка влияния технологических факторов на предельный коэффициент отбортовки листовых анизотропных заготовок*

*Рассмотрена операция отбортовки листового полуфабриката с отверстием на промежуточном этапе деформирования на радиальной матрице. В процессе расчета данной операции исследованы предельные возможности деформирования, определенные по допустимой степени использования ресурса пластичности и по условию локальной потери устойчивости анизотропной заготовки. Полученные результаты теоретических исследований можно использовать при проектировании технологических операций отбортовки плоских заготовок с отверстием из трансверсально-изотропного материала.*

**Ключевые слова:** вытяжка; деформирование; напряжения; деформации; сила; разрушение.

*The flanging of sheet semi-finished product with hole in the intermediate stage of deformation on radial matrix is considered. In the process of calculating of this operation the limiting possibilities of deformation, which are determined by the permissible degree of utilization of the plasticity resource and by the local stability loss condition of the anisotropic billet, are studied. The received results of theoretical researches can be used at designing of technological operations of flanging of flat preparations with hole from the transversal-isotropic material.*

**Keywords:** drawing; deformation; stress; deformation; force; destruction.

Для изготовления изделий с горлом широко применяют метод листовой штамповки, основанный на втягивании пуансоном внутреннего контура отверстия листовой заготовки в рабочую поверхность матрицы, называемый отбортовкой. Данной операции посвящено большое число отечественных и иностранных работ [1—7], однако эти исследования не учитывают влияние механических свойств заготовки, в частности, анизотропию. Таким образом, исследование процесса отбортовки с учетом развивающейся и начальной анизотропии является актуальной задачей.

При проектировании технологического процесса штамповки заданной детали, включающего операцию отбортовки, необходимо определить силовые режимы, предельные возможности деформирования, а также геометрические размеры изготовляемой детали.

На рис. 1 приведена схема отбортовки листовой заготовки с круглым отверстием на радиальной матрице с коэффициентом отбортовки $m_{отб} = r_0/R_1$ на том этапе деформирования, при котором силы и напряжения максимальны. В исследуемом процессе в одно и то же время реализуются увеличение периметра отверстия и изгиб формоизменяемой части заготовки по рабочему контуру матрицы. В дальнейшем происходит выравнивание формоизменяемой части по форме цилиндрической части матрицы и пуансона.

Материал формоизменяемой заготовки считаем несжимаемым, имеющим начальную анизотропию. В процессе отбортовки он изотропно упрочняется. Для исследуемого процесса справедливы условие текучести Мизеса—Хилла и ассоциированный закон течения. Моделирование осуществляли с предположением, что

* Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

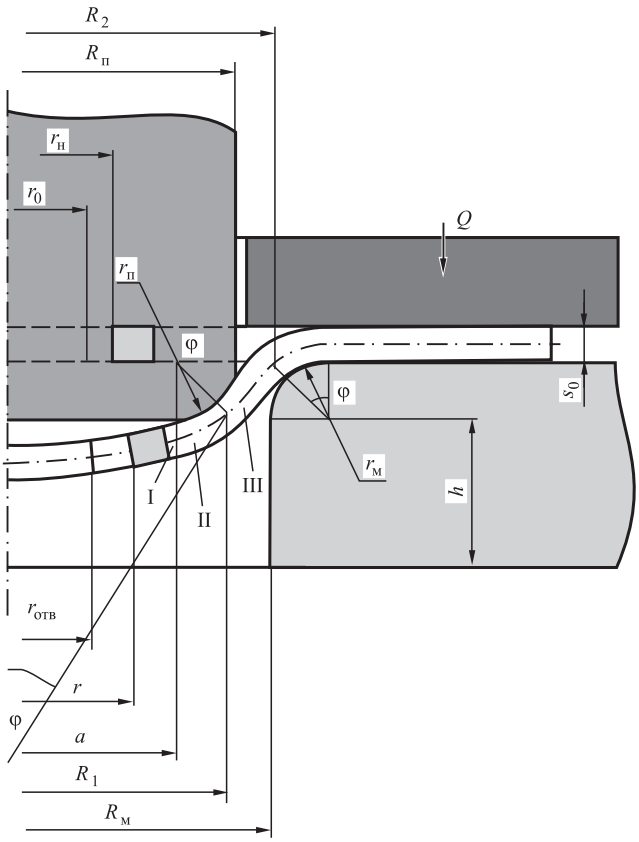



**Рис. 1. Схема заготовки на промежуточном этапе деформирования:**

$R_1$, $R_2$ — радиусы границ исследуемых участков; $R_м$ — радиус матрицы; $R_п$ — радиус пуансона; $s_0$ — толщина заготовки; $r_м$ — радиус кромки матрицы; $r_п$ — радиус кромки пуансона; $h$ — высота рабочего участка матрицы; $Q$ — давление прижима; $r_0$, $r_{отв}$ — начальный и текущий радиусы отверстия; $r_н$, $r$ — начальный и текущий радиусы исследуемого элемента

напряженное состояние — плоское. Трение на границах инструмента и заготовки учитываем и считаем, что реализуется закон трения Кулона.

В качестве метода расчета исследуемого процесса применяли метод оценки энергосиловых параметров, в основе которого лежит одновременное решение приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности.

Зона I заготовки (напротив нижней части торца пуансона) всегда образует заметный с ним зазор, поэтому изгибающий момент в зоне между первым и вторым участками зоны II незначителен. В заготовке на первом участке зоны I отсутствуют внешние напряжения, и поэтому напряженное состояние заготовки на этом участке может быть установлено решением дифференциального уравнения равновесия совместно с условием текучести при $r = r_0$, меридиональное напряжение $\sigma_r = 0$ (см. кн.: Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.).

Определим состояние заготовки на первом участке зоны I. Скорости деформации в различных направлениях на поверхности по толщине заготовки находятся по зависимостям, приведенным в работе [1].

С учетом уравнения $\xi_r + \xi_\theta + \xi_z = 0$ (где $\xi_r$, $\xi_\theta$, $\xi_z$ — интенсивности деформаций в меридиональном, окружном и осевом направлениях) и уравнения, устанавливающего связь скоростей деформаций и напряжений [1, 2], получим

$$\frac{dV_r}{dr} = -\frac{V_r}{r}(1+f); \quad f = -\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_\theta(1+R) - R\sigma_r}, \quad (1)$$

где $R$ — коэффициент анизотропии.

Уравнение для определения изменения толщины заготовки:

$$\frac{ds}{s} = \frac{dr}{r} f. \quad (2)$$

С учетом уравнения (1), представим дифференциальное уравнение равновесия в виде:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r(1+f) - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (3)$$

Проинтегрировав это уравнение, получим

$$\sigma_{r_п} = \sigma_{r_{п-1}} - \frac{r_п - r_{п-1}}{r_{п-1}}\left[\sigma_{r_{п-1}}(1+f) - \sigma_{\theta_{п-1}}\right], \quad (4)$$

где $\sigma_{r_{п-1}}$, $\sigma_{\theta_{п-1}}$ — напряжения в меридиональном и окружном направлениях на промежуточном этапе; $r_{n-1}$ — радиус исследуемого элемента на промежуточном этапе.

После определения $\sigma_{r_п}$ находим $\sigma_{\theta_п}$ из условия пластичности с учетом $r = r_0$, $\sigma_r = 0$.

Второй участок зоны II взаимодействует с деформирующим инструментом. На внутреннюю поверхность заготовки в этом участке воздействуют нормальные напряжения и касательные, вызванные силами трения.

Для нахождения меридиональных $\sigma_r$ и окружных $\sigma_\theta$ напряжений на тороидальной поверхности пуансона (участок II) решаем совместно условие равновесия и условие пластичности при $\varphi = \varphi_0$

$$\sigma_r = \sigma_{r_1}\big|_{r=a} + \sigma_s\big|_{r=a}\frac{s}{4r_{п.с}},$$

где φ — угол, определяющий положения исследуемого участка заготовки; $r_{\text{п.с}} = r_{\text{п}} + 0,5s_0$ — радиус исследуемого элемента на текущем этапе по нейтральному слою; $\sigma_{r_1}$ — меридиональное напряжение, действующее на противостоящей плоской части торца пуансона (участок I) и вычисленное при $r = a$; $\sigma_s$ — сопротивление материала пластическому деформированию с учетом его упрочнения при $r = a$.

Интегрирование уравнения выполняем численно методом конечных разностей от границы между вторым и первым участками очага деформации следующим образом:

$$\sigma_{r_{\text{п}}} = \sigma_{r_{\text{п}-1}} - \left(\varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{п}-1}\right) \times$$
$$\times \left[\sigma_{r_{\text{п}-1}}\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi - b} - \mu\right) - \sigma_{\theta_{\text{п}-1}}\frac{\sin\varphi + \mu\cos\varphi}{\cos\varphi - b}\right],$$

где $b = a/r_{\text{п.с}}$; μ — коэффициент трения.

Меридиональное напряжение $\sigma_{\theta_{\text{п}}}$ находим из условия пластичности.

Третий участок очага деформации III деформируется без воздействия на поверхность заготовки внешних сил. Распределение меридиональных $\sigma_r$ и окружных $\sigma_\sigma$ напряжений на конусообразном участке бесконтактной деформации определим путем численного интегрирования уравнения равновесия с условием пластичности при граничном условии $r = R_1$

$$\sigma_r = \sigma_{r_2}\Big|_{r=R_1} + \sigma_s\Big|_{r=R_1}\frac{s}{4r_{\text{п.с}}}, \qquad (5)$$

где $r = R_1$ — радиус, определяющий границу тороидального и конусообразного участков; $\sigma_{r2}$ — меридиональное напряжение на тороидальной поверхности матрицы, вычисленное при $r = R_1$; $\sigma_s\big|_{r=R_1}$ — сопротивление материала пластическому деформированию при $r = R_1$.

Максимальное напряжение $\sigma_{r\,\max}$, действующее на границе очага деформации, можно найти с учетом того, что элементы заготовки при $r = R_2$ получают изгиб на кромке матрицы, влияние которого на величину $\sigma_r$ может быть оценено следующим образом:

$$\sigma_r = \sigma_{r_3}\Big|_{r=R_2} + \sigma_s\Big|_{r=R_2}\frac{s}{4r_{\text{м.с}}}, \qquad (6)$$

где $r_{\text{м}}$ — радиус закругления матрицы; $r_{\text{м.с}} = r_{\text{м}} + 0,5s_0$.

В уравнении (6) величина после знака равенства позволяет выполнить учет приращения напряжений в меридиональном направлении, возникающем при выпрямлении заготовки. Радиус отбортовываемого отверстия в текущий момент времени $r_{\text{отв}}$ зависит от угла, который оценивается по перемещению пуансона. По мере продвижения пуансона этот угол изменяется от π/2 в начальный момент формоизменения до 0, в конечный момент, когда сила максимальна, т.е. радиусы формоизменяющего инструмента находятся на одном уровне. С уменьшением значения угла наблюдается рост радиуса отверстия.

Как описано в работе [2], если учесть, что длина образующей заготовки в процессе отбортовки не изменяется, то можно получить выражение, устанавливающее связь между радиусом отверстия и углом φ для того момента, при котором зазор между инструментами приблизительно одинаков с толщиной заготовки:

$$r_{\text{отв}} = r_0 + \left(r_{\text{м}} + r_{\text{п}} + s_0\right)\left[0,57 + \text{tg}(\varphi/2) - \varphi\right]. \quad (7)$$

Из анализа формулы (7) следует, что при $\varphi = \pi/2$ (в начале деформирования) $r_{\text{отв}} = r_0$, а по мере уменьшения угла φ радиус $r_{\text{отв}}$ увеличивается, достигая при $\varphi = 0$

$$r_{\text{отв}} = r_0 + 0,57\left(r_{\text{м}} + r_{\text{п}} + s_0\right). \qquad (8)$$

Формула (8) справедлива при $r_{\text{отв}} \leqslant a$.

Силу операции отбортовки определим по соотношению

$$P_{\text{отб}} = 2\pi R_2 s\sigma_{r\,\max}\cos\varphi. \qquad (9)$$

В процессе формоизменения в один и тот же момент реализуются уменьшение толщины детали и упрочнение материала заготовки, что противоположно влияет на напряжения в меридиональном направлении, т.е. изменение толщины заготовки, и в частности утонение, снижает напряжения в меридиональном направлении, а упрочнение, наоборот, — увеличивает.

Таким образом, для того чтобы учесть упрочнение материала, нужна информация о деформированном состоянии заготовки.

Оценим деформированное состояние отбортовываемой детали. Деформация в окружном направлении:

$$d\varepsilon_\theta = \frac{dr}{r},$$

где $r$ — координата рассматриваемого сечения очага деформации.

Величины $d\varepsilon_r$ и $d\varepsilon_z$ найдем по следующим выражениям:

$$d\varepsilon_z = -d\varepsilon_\theta \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_\theta(1+R) - R\sigma_r}; \qquad d\varepsilon_r = -\left(d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z\right). \tag{10}$$

Приращение интенсивности деформации $d\varepsilon_i$ определим по формуле

$$d\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2(2+R)}}{\sqrt{3}(2R+1)}\left\{R\left(d\varepsilon_r - d\varepsilon_\theta\right)^2 + \left[d\varepsilon_\theta(1+R) + Rd\varepsilon_r\right]^2 + \left[d\varepsilon_r(1+R) + Rd\varepsilon_\theta\right]^2\right\}^{1/2}. \tag{11}$$

Упрочнение учтем с помощью выражения

$$\sigma_s = \sigma_{0,2}\left[1 + B\left(\varepsilon_i\right)^n\right], \tag{12}$$

где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; $B$, $n$ — характеристики кривой упрочнения материала.

Изменение толщины при отбортовке:

$$\ln\frac{s}{s_0} = -\int_{r_0}^{r} \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_\theta + R\left(\sigma_\theta - \sigma_r\right)}\frac{dr}{r}. \tag{13}$$

С помощью полученных ранее выражений можно определить напряжения и деформации в заготовке в процессе отбортовки листовых изделий с отверстием с учетом анизотропии.

Критический параметр отбортовки — предельный коэффициент отбортовки — оценивали по предельному значению использования ресурса пластичности и параметру локальной потери устойчивости. Используя полученные ранее неравенства, с помощью программ на ЭВМ были установлены зависимости предельного коэффициента отбортовки. Исследования выполняли для нескольких материалов заготовок, характеристики которых представлены в работе [1].

Зависимости изменения предельного коэффициента отбортовки $m_{\text{отб}}^{\text{пр}}$ от относительного радиуса закругления пуансона $\bar{r}_{\text{п}}$ для плоских заготовок из алюминиевого сплава АМц, стали 08кп и латуни Л63 приведены на рис. 2, где *1*, *2* — результаты расчетов по критерию $\omega_e \leqslant \chi$ при $\chi = 0{,}65$ и 1,0 соответственно; *3* — результаты расчетов по условию локальной потери устойчивости анизотропной заготовки. Расчеты выполнены при следующих технологических параметрах и геометрических размерах заготовки и рабочего инструмента: $\mu = 0{,}1$; $s_0 = 1{,}5$ мм; $r_{\text{заг}} = 31{,}95$ мм; $r_0 = 7{,}45$ мм; $R_{\text{п}} = 14$; $R_{\text{м}} = 16$ мм; $r_{\text{м}} = 3$ мм.

Анализ зависимостей и результатов расчетов показал, что с увеличением относительного радиуса закругления пуансона $\bar{r}_{\text{п}}$ предельный коэффициент отбортовки $m_{\text{отб}}^{\text{пр}}$ возрастает по критерию степени использования ресурса пластичности. Однако рост $\bar{r}_{\text{п}}$ приводит к уменьшению $m_{\text{отб}}^{\text{пр}}$ по критерию локальной потери устойчивости.

Оценено влияние коэффициента нормальной анизотропии на предельные возможности формоизменения при отбортовке.

На рис. 3 представлены зависимости изменения предельного коэффициента отбортовки $m_{\text{отб}}^{\text{пр}}$ от коэффициента анизотропии $R$, где *1*, *2* — результаты расчетов по критерию степени использования ресурса пластичности при $\chi = 0{,}65$ и 1,0; *3* — результаты расчетов по критерию локальной потери устойчивости заготовки. Расчеты выполнены при $\mu = 0{,}1$;

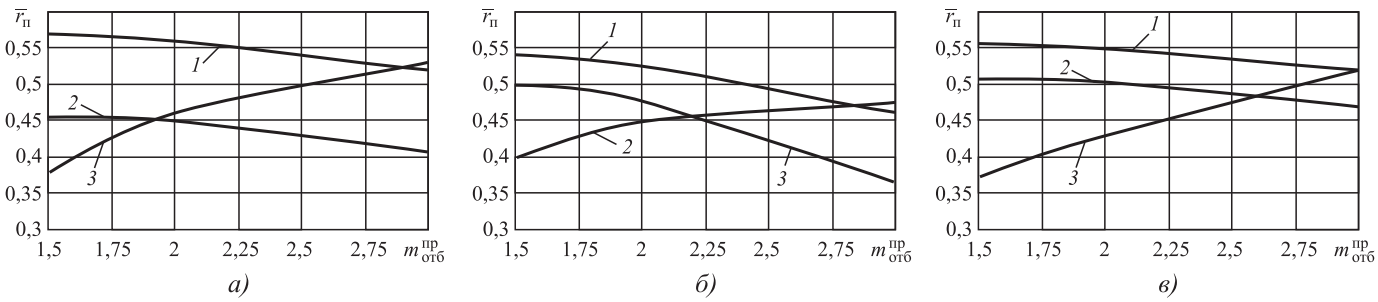



**Рис. 2. Зависимости изменения $m_{\text{отб}}^{\text{пр}}$ от $\bar{r}_{\text{п}}$:**

*а* — алюминиевый сплав АМц; *б* — сталь 08кп; *в* — латунь Л63

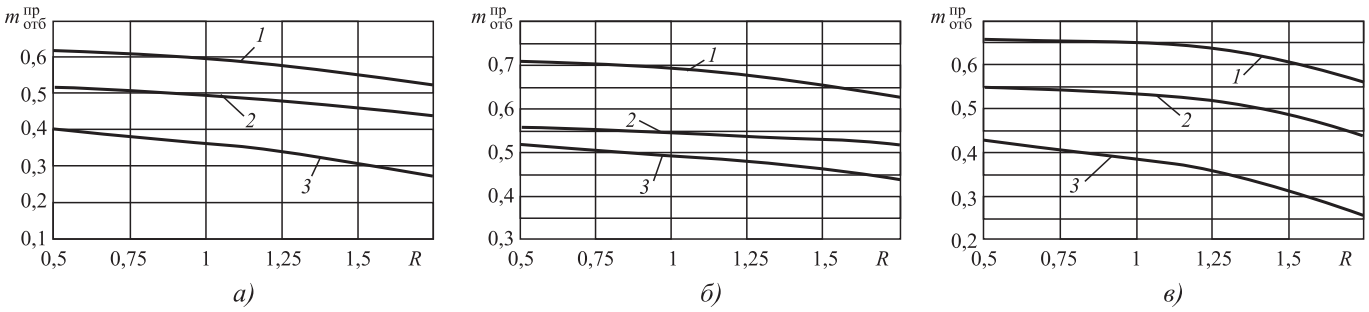



**Рис. 3. Зависимости изменения $m_{отб}^{пр}$ от $R$:**

*а* — материал № 1; *б* — № 2; *в* — № 3

$s_0$ = 1,5 мм; $r_0$ = 20,45 мм; $r_{заг}$ = 81,8 мм; $R_п$ = 38,65; $R_м$ = 40,9 мм; $r_м$ = 3 мм; $r_п$ = 3 мм.

Механические свойства:

*материал № 1*: $\sigma_{0,2}$ = 268,66 МПа; $B$ = 1,226; $n$ = 0,478; $\Omega$ = 1,791; $U$ = −0,946 ($\Omega$, $U$ — коэффициенты из кривой упрочнения);

*материал № 2*: $\sigma_{0,2}$ = 29,20 МПа; $B$ = 2,368; $n$ = 0,440; $\Omega$ = 1,362; $U$ = −1,23;

*материал № 3*: $\sigma_{0,2}$ = 214,94 МПа; $B$ = 5,199; $n$ = 0,575; $\Omega$ = 2,38; $U$ = −0,769.

Анализ расчетов показал, что при увеличении коэффициента нормальной анизотропии $R$ от 0,5 до 1,8 предельные значения коэффициентов отбортовки $m_{отб}^{пр}$ уменьшаются в среднем на 35 %.

Таким образом, неучет анизотропии механических свойств при оценке предельного коэффициента отбортовки $m_{отб}^{пр}$ может привести к погрешности более 35 %.

Полученные результаты теоретических исследований можно использовать при проектировании технологических операций отбортовки плоских заготовок с отверстием из трансверсально-изотропного материала.

**Заключение.** Проведено теоретическое обоснование процесса штамповки осесимметричных изделий, включающего операцию отбортовки. Используя полученные неравенства, с помощью программ на ЭВМ установлены зависимости предельного коэффициента отбортовки. Исследования выполнены для нескольких материалов заготовок. Определены силовые режимы, предельные возможности деформирования, а также геометрические размеры изготовляемой детали.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 331 с.

2. **Евсюков С.А.** Отбортовка горловин на заготовках, имеющих анизотропное упрочнение // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. № 11. С. 17—19.

3. **Investigation** on the forming process and the shape control in electromagnetic flanging of aluminum alloy / Hongliang Su, Liang Huang, Jianjun Li, Guodong Li, Pan Huang // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 335—340.

4. **Bi-directional** dieless incremental flanging of sheet metals using a bar tool with tapered shoulders / Tong Wen, Suo Zhang, Jie Zheng, Qian Huang, Qing Liu // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 2245—2250.

5. **A forging method** for reducing process steps in the forming of automotive fasteners / Senyong Chena, Yi Qina, Chenb J.G., Chee-MunChoy // International Journal of Mechanical Sciences. 29 December 2017.

6. **Studies** on wrinkling and control method in rubber forming using aluminium sheet shrink flanging process / Lei Chen, Huiqin Chen, Qiaoyi Wang, Zhihua Li // Materials & Design (1980—2015). January 2015. Vol. 65. P. 505—510.

7. **Huab P., Lic D.Y., Liab Y.X.** Analytical models of stretch and shrink flanging // International Journal of Machine Tools and Manufacture. October 2003. Vol. 43. Iss. 13. P. 1367—1373.

*Михаил Васильевич Грязев, д-р техн. наук;*
*Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук,*
mpf-tula@rambler.ru;
*Андрей Александрович Пасынков, канд. техн. наук*

УДК 620.17

**Ю.Н. Логинов** (*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*),
**Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов, Р.Р. Ризаханов**
(*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*)

# Сопротивление деформации пористого силумина при повышенных температурах

*Проведены испытания на сжатие брикетов различной плотности из стружковых отходов силумина (10...13 % Si) с измерением силы деформирования. Построены кривые упрочнения в виде зависимости напряжений пластического течения от степени деформации сдвига. Выявлен экстремальный характер этих зависимостей. Расположение максимума сопротивления деформации относительно координаты степени деформации сдвига зависит от относительной плотности. При уменьшении плотности максимум сдвигается в область более высоких значений степени деформации. Это явление связано с зависимостью температуры начала рекристаллизации от степени деформации. Предложено применять построенные функциональные зависимости для расчета технологических параметров процессов деформации стружковых отходов силумина.*

**Ключевые слова:** силумин; стружка; горячая деформация; уплотнение; сопротивление деформации; степень деформации; напряжение пластического течения.

*Compression tests of briquettes of various densities from the shaving waste of silumin (10... 13 % Si) with measurement of deformation force are performed. The hardening curves in the form of the dependence of the plastic flow stresses on the degree of shear deformation are constructed. The extreme nature of these dependencies is revealed. The location of the strain resistance maximum relative to the coordinate of the degree of shear strain depends on the relative density. As the density decreases, the maximum shifts to the region of higher values of the degree of deformation. This phenomenon is associated with the dependence of the temperature of the onset of recrystallization on the degree of deformation. It is proposed to apply the constructed functional dependences for calculating of technological parameters of the deformation processes of shale silumin waste.*

**Keywords:** silumin; chip; hot deformation; compaction; deformation resistance; strain; plastic flow stress.

В машиностроении сплавы алюминия с кремнием (силумины) востребованы как легкие материалы, из которых можно изготовлять детали наиболее дешевым способом — методом литья.

В соответствии с нормативными документами технически чистый алюминий имеет временное сопротивление в отожженном состоянии на уровне 60 МПа, нагартованный — на уровне 145 МПа [1]. В сравнении с этими значениями литейный силумин марки АК12 (10...13 % Si, остальное — Al и примеси) должен обладать временным сопротивлением на уровне 150 МПа, при этом возможности для деформационного упрочнения в известных технологиях отсутствуют, поскольку пластические свойства литейных алюминиевых сплавов низкие (нормативное относительное удлинение до разрыва составляет 1...4 %).

Таким образом, прочностные свойства силумина АК12 соответствуют технически чистому алюминию в нагартованном состоянии, т.е. эти свойства невелики.

Сплав АК12 отличает высокая жидкотекучесть, низкая линейная усадка, отличная свариваемость [2]. Некоторое улучшение свойств этого сплава достигнуто применением микролегирования и оптимизацией тепловых режимов [3].

Вследствие низких пластических свойств силуминов их упрочнение с помощью пластической деформации невозможно. Применительно к термически неупрочняемым силуминам повышение прочностных свойств достигают добавкой более прочных элементов (оксидов, силицидов) в состав шихты с получением композиционного материала [4, 5].

В практике металлобработки известен прием повышения пластических свойств в том случае, если исходная заготовка для обработки получена не литьем, а методом порошковой металлургии. Так, например, анизотропные постоянные магниты из сплава системы Mn—Al—C, обладающего малой пластичностью, не удавалось получать без трещинообразования горячим прессованием из слитка, но удавалось — формованием порошковой заготовки в оболочке с последующим горячим прессованием [6, 7].

В публикации [8] рассмотрен вариант получения товарной проволоки из литейного силумина из сортных стружковых отходов. При этом решается проблема утилизации техногенных отходов без применения высокотемпературных процессов перевода металла в расплав. Более подробно процессы обработки стружки рассмотрены в работе [9].

*Цель исследования* — установление технологических характеристик пористого силумина, полученного из стружковых отходов.

**Методика исследования.** На первой стадии были подготовлены цилиндрические образцы путем брикетирования стружки сплава АК12 в закрытой пресс-форме при разных температурах брикетирования. Масса навески стружки 100 г. Диаметр контейнера 42 мм. Максимальное прикладываемое давление брикетирования приняли равным 180 МПа, выдержка при этом давлении составляла 5 мин.

В процессе брикетирования и в конце его определяли текущую и конечную интегральные плотности брикетов, значения которых в зависимости от температуры и давления брикетирования приведены на рис. 1. Видно, что указанные зависимости, построенные в диапазоне температур от 20 до 400 °С, имеют практически линейный характер с тенденцией к снижению интенсивности уплотнения с увеличением температуры брикетирования.

На второй стадии механические испытания осуществляли на универсальной испытательной машине LFM 400. Применяли схему испытаний образцов на сжатие двумя бойками с полированными рабочими поверхностями и с использованием смазки. В ходе опытов изменяли тепловые и скоростные условия сжатия.

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, верхняя плита *1* воздействует

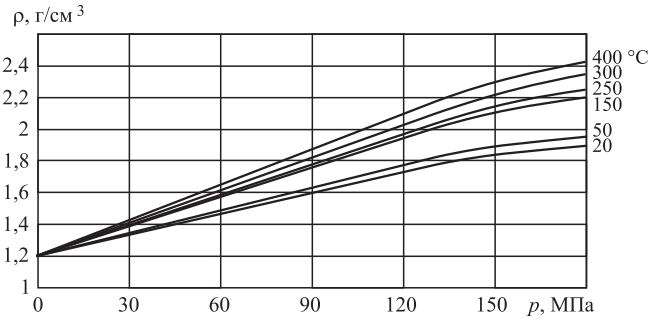



**Рис. 1. Зависимость плотности брикетов ρ от давления брикетирования *p* при разных температурах брикетирования**

на боек *2*, который проходит через отверстие в крышке *3* и воздействует на образец *4*. Нагрев образцов и поддержание температуры выполняли с помощью нагревательного устройства *5*, размещенного непосредственно в рабочем пространстве испытательной машины. Это позволяло поддерживать условия изотермического процесса. Нагрузка воспринимается нижним неподвижным бойком *6*, а удержание нагревательного устройства *5* на нужной высоте осуществляется опорой *7*, установленной на нижней неподвижной траверсе машины *8*, на ней же установлена нижняя плита *9*.

Таким образом, в этой схеме исключалась теплопередача от нагретой заготовки к инструменту и достигалось равномерное поле температур. Контроль и управление уровнем температуры осуществляли с помощью термопары и потенциометрической установки.

**Обработка результатов и их анализ.** В ходе испытаний определяли перемещение под-

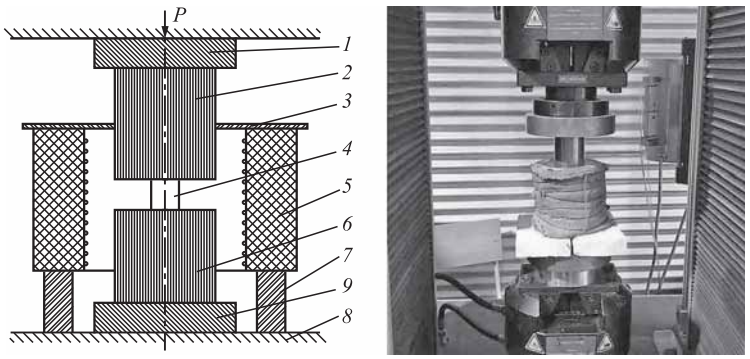



**Рис. 2. Схема и общий вид установки для проведения испытаний на сжатие цилиндрических брикетов при повышенных температурах:**

*1*, *9* — верхняя и нижняя промежуточные плиты; *2* — перемещаемый в ходе сжатия боек; *3* — крышка из теплоизоляционного материала; *4* — брикет; *5* — стационарная печь для нагрева; *6* — неподвижный боек; *7* — подставная опора для печи; *8* — нижняя траверса машины

вижной траверсы $\Delta h$ и соответствующее ему значение силы деформации $P$. По известной методике [10] рассчитывали сопротивление деформации $\sigma_s$ и степень деформации сдвига $\Lambda$, связанную со степенью деформации $\varepsilon$ зависимостью $\Lambda = \sqrt{3}\varepsilon$.

Соответствующие кривые текучести представлены на рис. 3. В качестве второго аргумента здесь представлена относительная плотность материала как отношение исходной плотности к плотности компактного материала. Графики представляют собой немонотонные зависимости, имеющие возрастающие и убывающие участки при наличии максимума. Наличие максимума обычно объясняют началом процесса динамической рекристаллизации, который начинает развиваться после накопления некоторого критического уровня деформации.

При увеличении начальной относительной плотности образцов графики перемещаются в область более высоких значений сопротивления деформации, а максимум смещается из области высоких значений степени деформации сдвига в область низких значений. Так, при относительной плотности 0,77 максимум наблюдается при $\Lambda = 1{,}0$, а при относительной плотности 0,97 — при $\Lambda = 0{,}2$.

Наличие максимума не является обязательным фактором такого вида кривых для пористых сред. В исследовании [11] показано, что для пористого титана кривые сопротивления деформации являются возрастающими функциями для температур испытаний до 750 °С включительно в интервале относительных плотностей 0,35...0,96. Отсутствие ниспадающей ветви кривой упрочнения можно объяснить относительно небольшой температурой испытаний, не позволяющей развиться процессам динамической рекристаллизации.

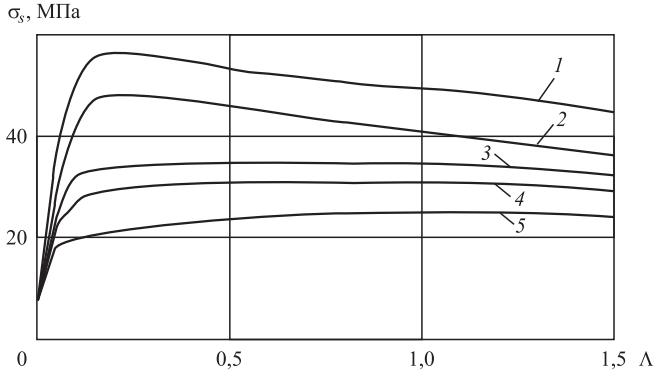



**Рис. 3. Кривые текучести брикетов при сжатии (при температуре испытания θ = 400 °С и скорости деформации $\xi = 0{,}05\ c^{-1}$) в зависимости от их начальной относительной плотности $\bar{\rho}_0$:**

*1* — 0,97; *2* — 0,92; *3* — 0,90; *4* — 0,88; *5* — 0,77

В то же время при испытании беспористых образцов из силумина авторами статьи [12] были получены кривые с максимумами в области значений $\varepsilon = 0{,}10...0{,}15$, что соответствует $\Lambda = 0{,}2...0{,}3$, т.е. он приближен к полученному в настоящем исследовании значению при относительной плотности 0,97.

Таким образом, сдвиг максимумов кривых упрочнений в сторону больших значений показателей деформации связан с повышенной пористостью материала.

Для оценки влияния пористости на прочностные свойства рассмотрим модель среды, где поры вытянуты в направлении осадки (рис. 4, *а*). Если осадка будет осуществлена со степенью деформации сдвига $\Lambda$, то все стенки такой конструкции получат одинаковую степень деформации, и она будет равна степени деформации всего объекта. При смене направления пор на ортогональное (рис. 4, *б*) пластической деформации отдельных слоев металла происходить не будет, пока слои не соприкоснутся. При этом, если рассчитывать степень деформации сдвига через перемещение внешнего контура, она будет не равной нулю, тем самым результат окажется заведомо завышен.

В случае формования порошкового или стружкового материала имеют место оба эффекта (рис. 4, *в*), поскольку поры чередуются со слоями металла в различных направлениях.

Учитывая приведенное выше, можно сделать вывод, что расчет степени деформации сдвига для самого металла, а не для объема всей заготовки, также будет завышен. Поэтому

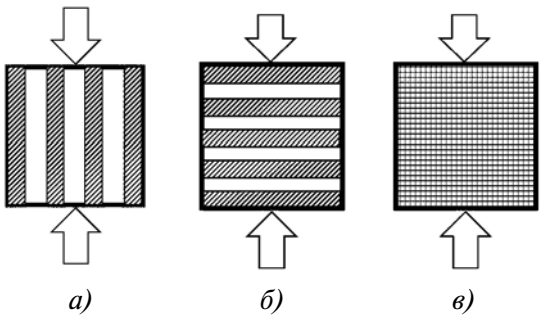



**Рис. 4. Варианты расположения пор:**

*а* — в направлении осадки; *б* — поперек направления осадки; *в* — смешанное направление

степень деформации сдвига, отложенная по оси абсцисс на рис. 3, оказывается завышена тем больше, чем больше пористость материала. Частицы стружки получают меньший уровень деформации, чем это следует из расчета. Температура начала рекристаллизации зависит от степени деформации по обратной зависимости, например, для высоконагартованного чистого золота эта температура может снизиться до комнатной [13]. Поэтому температура начала рекристаллизации окажется тем меньше, чем больше степень деформации и относительная плотность.

При малой относительной плотности температура рекристаллизации высокая, и максимум кривых на рис. 3 будет смещаться в область больших деформаций, что и было установлено в исследовании.

Практическая ценность результатов заключается в возможности применения построенных функциональных зависимостей для расчета технологических параметров процессов деформации стружковых отходов силумина.

**Заключение.** Испытания на сжатие цилиндрических образцов из пористого силумина показали, что характер полученных кривых упрочнения зависит от относительной плотности образцов. При этом выявлено, что с повышением относительной плотности сопротивление деформации увеличивается. Кривые упрочнения имеют экстремальный характер. Расположение максимума сопротивления деформации относительно координаты степени деформации сдвига зависит от относительной плотности. При уменьшении плотности максимум сдвигается в область более высоких значений степени деформации. Это явление связано с зависимостью температуры начала рекристаллизации от степени деформации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Промышленные** алюминиевые сплавы: справ. изд. / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 528 с.

2. **Aktarer S.M., Sekban D.M., Saray O.** Effect of two-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of as-cast binary Al—12Si alloy // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 636. P. 311—319.

3. **The effects** of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al—Si casting alloys / O. El Sebaie, A.M. Samuel, F.H. Samuel, H.W. Doty // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 486. Iss. 1—2. P. 241—252.

4. **Dolata-Grosz A., Śleziona J., Formanek B.** Structure and properties of aluminium cast composites strengthened by dispersion phases // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 175. Iss. 1—3. P. 192—197.

5. **Hot** deformation regimes, their influence on structure and mechanical properties of silumin based composite materials and specific features of this influence / V.G. Trifonov, I.V. Kamalova, V.S. Romanova, V.N. Platonov // Materials Science and Engineering: A. 30 August 1997. Vol. 234—236. P. 242—244.

6. **Solovei V.D., Loginov Yu.N.** Calculating extrusion textures of the alloy Mn—Al—C // Overseas Publisher Associasion. Textures and Microstructures. 1996. Vol. 28. P. 121—128.

7. **Изготовление** анизотропных магнитов с осевой текстурой из гранул сплава системы Mn—Al—C / Ю.Н. Логинов, А.Е. Ермаков, А.В. Шангуров, М.А. Уймин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 1997. № 8. С. 24—26.

8. **Сравнительный** анализ технологий изготовления сварочной проволоки из эвтектического силумина с применением совмещенных методов обработки / Н.Н. Загиров, С.Б. Сидельников, Р.Е. Соколов, Ю.Н. Логинов // Цветные металлы. 2017. № 4. С. 86—92.

9. **Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н.** Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 171 с.

10. **Полухин П.И., Гунн Г.Я., Галкин А.М.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

11. **Логинов Ю.Н., Потапов А.И., Шалаев Н.А.** Влияние температуры и скорости деформации на упрочнение титановой губки // Титан. 2012. № 3 (37). С. 36—42.

12. **Hu H.E., Wang Xin-yun, Deng Lei.** High temperature deformation behavior and optimal hot processing parameters of Al—Si eutectic alloy // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 576. P. 74—81.

13. **Логинов Ю.Н., Первухин А.Е.** Роль дополнительных сдвиговых деформаций при волочении золота в формировании свойств конечного продукта // Трубы-2014: тр. междунар. науч.-практ. конф. / ОАО "РосНИТИ", НО "ФРТП". 2014. С. 314—316.



*Юрий Николаевич Логинов, д-р техн. наук,*
j.n.loginov@urfu.ru;
*Николай Наильич Загиров, канд. техн. наук;*
*Евгений Владимирович Иванов;*
*Ринат Рафикович Ризаханов*

УДК 621.771.24.09

**Л.Г. Делюсто**
(*ООО "Компания Нординкрафт", г. Череповец*)

# Технология вибрационной очистки и волочения проволоки

*Разработана новая технология абразивно-порошковой очистки (АПО) проволоки (катанки) от печной окалины. Созданы экспериментальные установки АПО, испытанные на производствах, созданы мыльницы с вибрирующими волоками. Показано, что при определенных условиях работа на установках АПО может стать альтернативой травлению.*

**Ключевые слова:** катанка; окалина; абразивно-порошковая очистка; вибрационная очистка; вибрационное волочение.

*New technology of abrasive-powder cleaning (APC) of wire (rolled wire) from furnace scale is developed. Experimental APC machines tested in production facilities, soap-boxes with vibrating dies are created. It is demonstrated that under certain conditions work on APC machines can become alternative to etching.*

**Keywords:** rolled wire; scale; abrasive-powder cleaning; vibration cleaning; vibration drawing.

**Введение.** В настоящее время на металлургических и сталепрокатных заводах при удалении окалины с поверхности горячекатаных полос и катанки широко применяют технологию серно-кислотного травления металлов перед холодной прокаткой или волочением проволоки. На металлургических предприятиях травление проката осуществляют в травильных агрегатах, а на сталепрокатных заводах — в травильных отделениях.

Несмотря на значительные экономические затраты, связанные с травлением, негативным влиянием кислотных паров на безопасность и здоровье обслуживающего персонала, травление металлов по-прежнему является доминирующей технологией в цепочке непрерывного производства готовой продукции. К экономическим затратам, связанным с технологией травления металлов, следует отнести высокую стоимость кислоты, ремонта корродирующего оборудования, содержания станций нейтрализации, штрафы за сброс отходов в канализацию, наличие брака после травления из-за недотрава или перетрава металла.

Автор статьи на протяжении многих лет занимался разработкой технологии бескислотной очистки металла от окалины с помощью ферромагнитных абразивных порошков, помещенных в постоянное магнитное поле. Известны также исследования других ученых, предлагающих применять в качестве альтернативы травлению фрезы, щетки, дробеметную, плазменную обработку. Однако эти способы оказались недостаточно эффективными при использовании в процессе дальнейшего производства проката, особенно при производстве проволоки на станах грубосреднего волочения, так как не учитывали особенности технологии волочения и прежде всего состояния поверхности металла перед волочением. Автором статьи проделана многолетняя работа по совершенствованию технологии очистки катанки от окалины перед волочением с учетом приведенных выше недостатков.

*Цель работы* — показать на конкретных примерах внедрения экспериментальных установок, совмещенных с волочением на многократных волочильных станах, возможности новой технологии очистки проволоки от окалины с применением вибрации инструмента (порошка, волоки), которых невозможно достичь при травлении.

**I. Результаты исследования технологии удаления окалины с поверхности катанки с помощью абразивных порошков (процесс АПО).** Несмотря на то что со времени получения автором статьи первого патента на устройство для очистки проволоки от окалины перед волочением прошло уже 40 лет (от первого испытания в 1972 г. на Череповецком сталепрокатном заводе (ЧСПЗ) и до последнего в 2012 г.), вопрос о замене серно-кислотного травления катанки на любой другой способ очистки, претендующем на экологию и защиту здоровья персонала травильных отделений, в том числе и АПО, до сих пор не решен.

Основным тормозом является так называемый "психологический барьер", о котором писал еще в 1960-х гг. японский изобретатель Д. Кумабэ. Ему понадобилось 20 лет, чтобы убедить скептиков применить новую механическую обработку — вибрационное резание металлов.

Результаты исследований АПО, ее возможности и недостатки в первом периоде от 1978 по 2006 г. подробно изложены в работах [1—7]. Этот период исследований и экспериментов АПО, проведенных на ЧСПЗ и ЧерМК (Череповецкий металлургический комбинат), относился ко времени поиска ответа на вопрос: возможна ли замена серно-кислотного травления на бескислотный способ очистки катанки от окалины способом АПО, в основе которого лежало использование постоянного магнитного поля для уплотнения ферромагнитного абразивного порошка вокруг поверхности катанки и ее очистки?

Результаты многолетних испытаний экспериментальных установок АПО и металлографических исследований выявили следующее:

1. Магнитного давления на катанку, покрытую слоем гематита $F_2O_3$, недостаточно для удаления окалины. Оно достаточно только для удаления слоя вьюстита FO, который находится под слоем гематита. Без применения окалиноломателей очистка оказалась невозможной.

2. Без нанесения на поверхность проволоки искусственной шероховатости волочение невозможно, так как смазка плохо захватывается продольными рисками при входе металла в волоку, образованных частицами абразивного порошка. Волочильный инструмент быстро выходит из допуска, на поверхности проволоки, начиная с первого барабана волочильного стана, появляются риски, которые не исчезают даже после шестикратного волочения.

3. Резиновые и пластиковые уплотнения, установленные на выходе из рабочей камеры, быстро истираются и не устраняют вынос порошка из камеры.

4. Вынос порошка из камеры неизбежен при намагничивании порошка и катанки из магнитного металла.

5. Вращение рабочей камеры с порошком в одну сторону не обеспечивает эффективность очистки.

6. Применение сдува сжатым воздухом с поверхности катанки магнитной пыли, оставшейся после очистки, неэффективно.

7. Усложнение основного узла установки — камеры очистки, состоящее в создании поршневого механизма, оснащенного штырями для лучшего уплотнения порошка вокруг проволоки с одновременным вращением камеры вокруг ее оси и перемещением штырей, к улучшению очистки не привело.

8. Предварительная обработка катанки после очистки смесью сухих опилок и порошком канифоли не приводила к интенсивному захвату сухой технологической смазки и не обеспечивала стабильное волочение.

С учетом указанных недостатков, являющихся следствием недоработок, естественных на этапе первых шагов в направлении создания принципиально новой технологии АПО катанки, были внесены значительные изменения в конструкцию установки и технологию АПО.

**II. Вибрационная очистка катанки абразивным порошком.** Эти исследования были осуществлены в период с 2010 по 2013 г. Проектная документация была разработана одной из проектных организаций ООО "Северсталь" (проект 1120-00-00-000СБ), электрооборудование спроектировано и изготовлено фирмой "Промэлтех" (г. Череповец), вибрационное оборудование заказано в г. Санкт-Петербург через фирму "Инлаб". Установка АПО изготовлена на предприятии "Ротор" (г. Вологда).

На рис. 1 показана установка АПО, встроенная в волочильный стан ВСМ-6/2500, а на рис. 2 — модернизированная установка АПО. Модернизация была осуществлена ООО "Компания Нординкрафт" (г. Череповец). В модернизированную установку вошли новый роликовый окалиноломатель, устройство для ультразвуковой

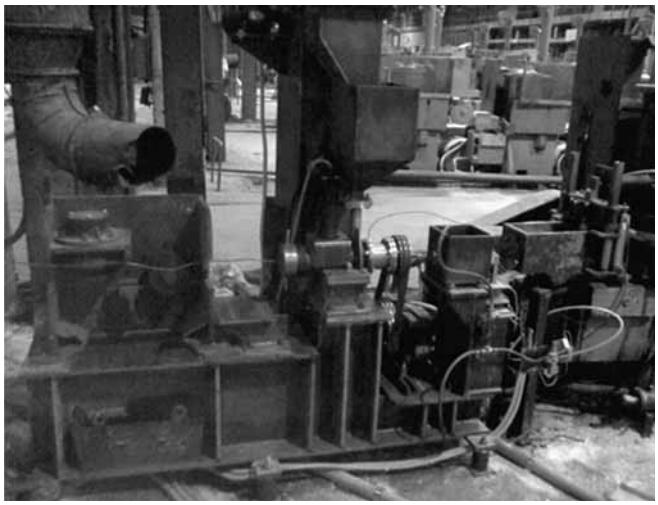


**Рис. 1. Установка АПО проволоки (катанки) от окалины, совмещенная с шестикратным волочильным станом, роликовым окалиноломателем и мыльницей с вибрирующей волокой на первом блоке волочильного стана ВСМ-6/2500 (ООО "Северсталь-метиз" (г. Череповец). СПЦ- 1, отделение грубосреднего волочения, 2010 г., проект 1120-00-00-000СБ)**

вибрации волочильного инструмента (волоки), содержащее ультразвуковой магнитострикционный преобразователь, ковшовый элеватор, устройство для сдува остатков окалины с поверхности катанки, электромагнит для обработки катанки.

Линия очистки и волочения катанки (рис. 3) содержит установку *1*, многократный волочильный стан *2*, содержащий размоточное устройство *3* (не показано), петлеуловитель *4* (не показан). Между петлеуловителем *4* и первым блоком *5* волочильного стана *2* смонтирована установка *1*, которая содержит раму *6*, окалиноломатель *7*, содержащий, например, два ролика *8*, расположенных по отношению друг к другу под углом 90°. За окалиноломателем *7* расположено устройство *9* для механической (тонкой) очистки катанки *10* от остаточного слоя окалины, в основном вьюстита.

**Рис. 2. Волочильный стан № 34, установка АПО проволоки от окалины (2011—2012 г.), совмещенная с роликовым окалиноломателем, после доработки по результатам испытаний на ЧСПЗ в СПЦ-1 в 2010 г. (ООО "Северсталь-метиз", СПЦ-1, отделение грубосреднего волочения)**

Устройство *9* для механической очистки поверхности катанки от окалины содержит рабочую камеру *11*, в которой смонтирован шнек *12*, прокачивающий через рабочую камеру *11* абразивный порошок *13* в сторону, противоположную движению катанки *10*. Внутри камеры *11* установлена втулка *14*, соединенная с концентратором магнитострикционного преобразователя *15*, через которую движется катанка *10*. Подпор абразивного порошка *13* во втулке *14* создает клапан *16*, который может иметь сферическую или коническую форму для регулирования объема рабочей камеры и скорости истечения абразивного порошка *13* из втулки *14*.

Часть абразивного порошка *13* выносится поверхностью катанки *10* через внутренний канал "К", выполненный по оси шнека *12*. Таким образом, катанка *10* движется навстречу массе абразивного порошка *13*, прокачиваемого под давлением через втулку *14*, а абразивный порошок *13* — в двух противоположных направлениях: в направлении I вдоль втулки *14* и в направлении II по каналу "К". Очистка от окалины происходит в обоих направлениях, так как скорость движения катанки *10* значительно превышает скорость перемещения абразивного порошка *13* в обоих направлениях.

Рабочая камера *11* установлена на опору качения *17* и снабжена приводом *18*. За рабочей камерой *11* установлена камера *19*, внутри которой установлен кольцевой сдув, охватывающий по окружности катанку *10*, представляющий собой, например, спиральную перфорированную трубку *20*, соединенную с трубопроводом *21* сжатого воздуха.

Основная масса абразивного порошка *13* из рабочей камеры *11* удаляется через трубопровод *22*. Часть абразивного порошка *13* выносится из рабочей камеры по каналу "К" вместе с катанкой *10* и попадает в камеру *19*, где основная масса абразивного порошка *13* удаля-

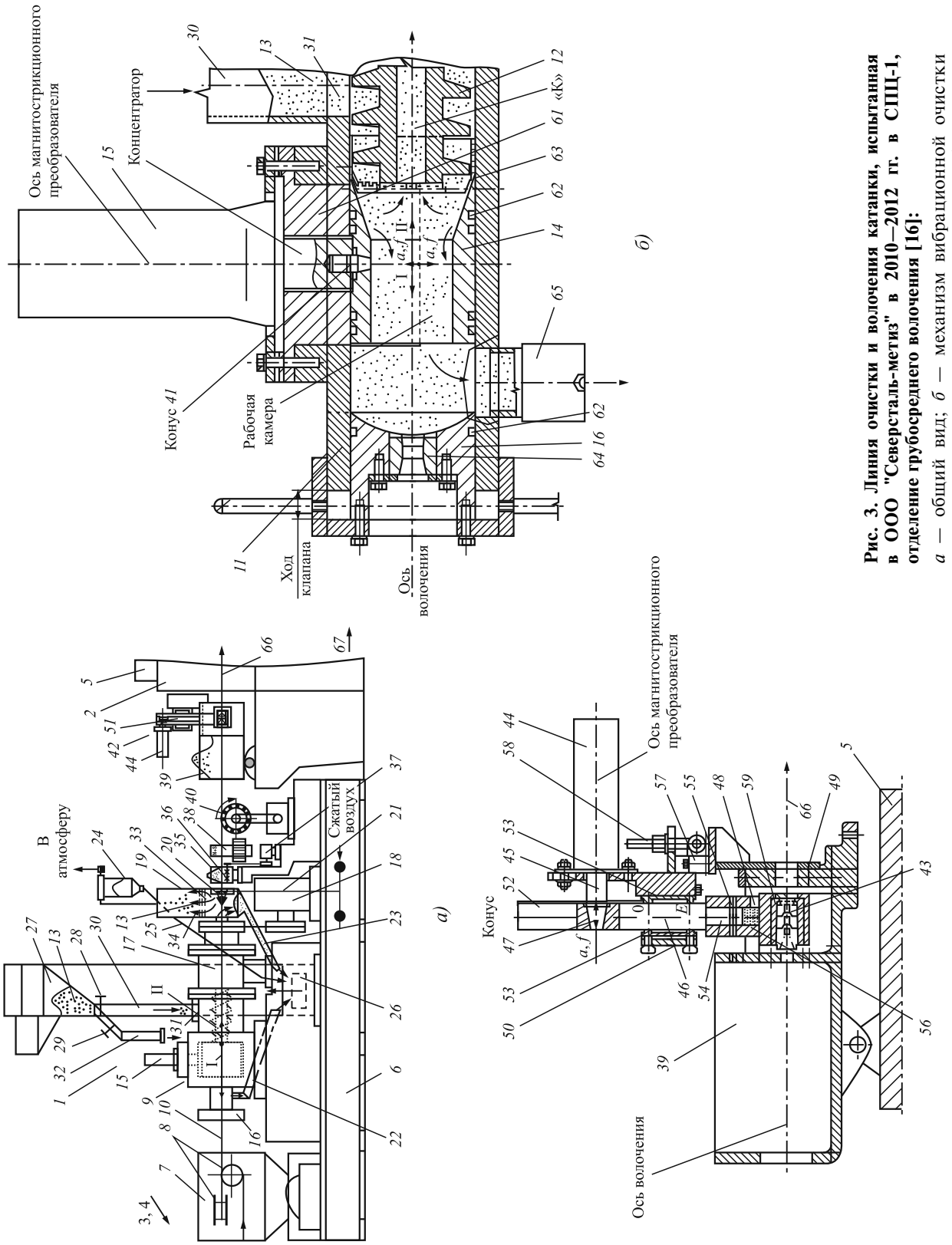



**Рис. 3. Линия очистки и волочения катанки, испытанная в ООО "Северсталь-метиз" в 2010—2012 гг. в СПЦ-1, отделение грубосреднего волочения [16]:**

*а* — общий вид; *б* — механизм вибрационной очистки катанки от окалины; *в* — мыльница с вибрирующим волочильным инструментом

ется через трубопровод *23*. Мелкая фракция абразивного порошка *13* выносится вместе с воздухом в циклон *24*, где оседает и перемещается по трубопроводу *25* к приемному отверстию элеватора *26*. Абразивный порошок *13* по трубопроводам *22* и *23* также перемещается к приемному отверстию элеватора *26*. Элеватор *26* снабжен приемным бункером *27*, который имеет две заслонки *28* и *29*. При закрытой заслонке *28* и открытой заслонке *29* абразивный порошок *13* движется по трубопроводу *30* к приемному отверстию *31* рабочей камеры *11*. При закрытой заслонке *29* и открытой заслонке *28* абразивный порошок *13* движется по трубопроводу *32* в случае замены абразивного порошка *13* на новую порцию.

Внутри камеры *19* установлены сетчатые фильтры *33* с ячейками переменных размеров с уменьшением по ходу движения струи *34* сжатого воздуха. Постоянная вибрация волочильного стана *2* способствует отделению накопившейся на сетках *33* массы абразивного порошка *13* и ее периодическому падению на дно камеры *19* и перемещению самотеком по трубопроводу *21* к приемному отверстию элеватора *26*. По ходу движения катанки *10* далее установлена емкость *35* для нанесения на поверхность катанки *10* подсмазочного слоя, в которой установлен рыхлитель *36*, снабженный приводом *37*. За емкостью *35* установлен П-образный электромагнит *38*, питаемый от источника постоянного тока (условно не показан). За П-образным электромагнитом *38* перед мыльницей *39* первого блока *5* волочильного стана *2* установлен вибрационный механизм *40* для вибрации катанки *10*.

Устройство *9* для механической очистки поверхности катанки от окалины снабжено ультразвуковым магнитострикционным преобразователем *15*, ось которого перпендикулярна оси волочения. Концентратор ультразвукового магнитострикционного преобразователя *15* непосредственно соединен с помощью, например, конуса *41* с инструментом — втулкой *14*, через которую в рабочую камеру *11* нагнетается абразивный порошок *13*. Мыльница *39* первого блока *5* волочильного стана *2* снабжена устройством для ультразвуковой вибрации *42* волочильного инструмента (волоки) *43*, содержащим ультразвуковой магнитострикционный преобразователь *44*, ось которого параллельна оси волочения. Концентратор *45* ультразвукового магнитострикционного преобразователя *44* соединен с волноводом *46* посредством конусного соединения *47*.

Волновод *46* на другом конце имеет держатель *48*, в котором установлен волочильный инструмент *43* или непосредственно закреплен в теле волновода, например, по плотной или скользящей посадке или серебряным припоем. Устройство для ультразвуковой вибрации *42* волочильного инструмента *43* жестко закреплено на корпусе *49* мыльницы *39*. Волновод *46* с волочильным инструментом *43* и ультразвуковой магнитострикционный преобразователь *44* установлены на платформу *50* с возможностью подъема из мыльницы *39* и опускания в мыльницу *39* с помощью, например, пневмоцилиндров *51* и направляющих *52*. Волновод *46* крепится к платформе *50* в местах узловых ультразвуковых колебаний магнитострикционного преобразователя *44* посредством, например, коробчатого приспособления *53*. Держатель *48* закреплен на волноводе *46* с помощью, например, конуса *54* и конусного пальца *55*. Пространство между конусом *54* и внутренней поверхностью держателя *48* заполнена машинным маслом *56*. В нижнем положении волновод *46* опирается на опору *57* и фиксируется откидным рымом *58*.

Корпус *59* волочильного инструмента *43* может быть выполнен из инструментальной стали. Детали *14*, *45*, *46*, *48*, *59* должны быть изготовлены из материала с одинаковыми физическими и механическими свойствами для получения максимальных ультразвуковых колебаний *a* и частоты *f* втулки *14* и волочильного инструмента *43*. Магнитострикционный преобразователь *15* закреплен на опоре *61*, втулка *14* имеет мягкие уплотнительные кольца *62* и защищена от попадания в зазор между втулкой *14* и внутренней стенкой рабочей камеры защитным колпачком *63*. Для защиты от износа клапана *16* предусмотрена втулка *64*. Для дополнительного регулирования скорости потока и давления абразивного порошка *13* на поверхности катанки *10* предусмотрен регулятор потока *65*.

Руководством ООО "Северсталь-метиз" и технологами СПЦ-1 была оказана помощь при испытании установки: выделен волочильный стан, закреплен волочильщик, поданы на стан электроэнергия, вода и сжатый воз-

дух, выделен мыльный порошок, необходимое количество бунтов катанки, составлен план испытаний. Были измерены диаметры проволоки по маршруту волочения, проведены металлографические исследования, совещания по результатам волочения проволоки, составлены маршруты волочения, при поломках стана принимались меры по их устранению, осуществлены перевозки готовой продукции на другие переделы. Проволока, принятая ОТК, направлена в гвоздильный цех, в термическое отделение, на оцинкование. За 1 месяц было обработано более 300 т катанки, достаточное количество катанки порублено на гвозди без нарушения ГОСТ, а также оцинковано с хорошими показателями по скручиванию, гибам и сцеплению цинка с поверхностью проволоки (рис. 4).

**Рис. 4. Отделение оцинкования проволоки после удаления окалины с поверхности проволоки в установке АПО проволоки от окалины, готовая продукция, принятая ОТК (ООО "Северсталь-метиз", СПЦ-1, 2010 г.)**

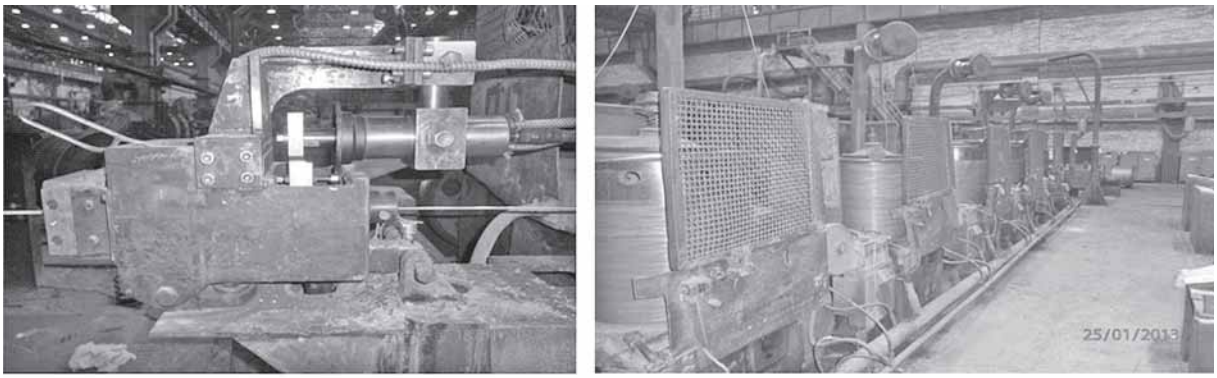
Были и трудности. Часто ломалось оборудование волочильного стана, не работал петлеуловитель, технологическая смазка не подходила для механической очистки. Психологический барьер, связанный с убеждением, что травление не имеет альтернативы, влиял на характер работы волочильщиков и даже на ИТР. Не все получалось с живучестью испытуемой установки. Часто выходили из строя волоки, плохо рубились гвозди, требовалась переделка ножей, не работали нормально элеватор, сдув, ошибки в расчетах определения размеров волноводов обоих вибраторов, малая мощность преобразователей и установки привели к малой ее эффективности. Наблюдался значительный вынос порошка из камеры очистки.

**III. Вибрационное волочение катанки.** В 2012 г. экспериментальная установка была испытана в ЗАО "Промстройинвест" (г. Орел) на одном из двух имевшихся волочильных станов (рис. 5).

Катанка диаметром 6,5 мм очищалась от окалины в окалиноломателе. Остаточный слой окалины удалялся в рабочей камере, в которой абразивный порошок подвергался ультразвуковой вибрации. Установка содержала камеру для сдува пыли, устройство для нанесения подсмазочного слоя, электромагнит и механический вибрирующий ролик, применяемый для лучшего захвата смазки. Волочение

*а)* *б)* *в)*

**Рис. 5. Экспериментальная установка для очистки катанки от окалины (*а*) в составе шестикратного волочильного стана (*б*) и готовая продукция (*в*) (ЗАО "Промстройинвест", 2012 г.)**




*а)* *б)*

**Рис. 6. Устройство для волочения проволоки с применением вибрирующей волоки (*а*) и шестикратный волочильный стан. Испытания волочения проволоки через вибрирующую волоку с ультразвуковой частотой (*б*) (ООО "Северсталь-метиз", СПЦ-2, 2013 г.)**

проходило без разрывов проволоки, готовая продукция по качеству устраивала заказчика.

На рис. 6 показано устройство для вибрационного волочения проволоки, которое было изготовлено и прошло испытания в ООО "Северсталь-метиз" в СПЦ-2 в 2013 г. при волочении проволоки через вибрирующую волоку. Основные элементы устройства: мыльница, кронштейн, вибратор, волновод и волока. При волочении обрывов не наблюдалось, замечаний по качеству волочения не было.

В процессе промышленных испытаний на ЧСПЗ экспериментальной установки для очистки катанки от окалины с помощью абразивных порошков, совмещенной с многократным волочильным станом, было установлено, что очистка возможна без уплотнения порошка в магнитном поле, но требует при очистке с применением вибрации катанки и волочильного инструмента нанесения на поверхность катанки искусственного микрорельефа определенной конфигурации. Данная цель была реализована в полезной модели [17].

Предложенное устройство (рис. 7) для тонкой очистки катанки *8* от окалины посредством абразивного порошка *9* содержит станину *1*, рабочую камеру *2*, в которой установлена втулка *3*, шнек *4*, привод шнека *6* и вибратор *7* ультразвуковых колебаний. Втулка *3*, в которой осуществляется очистка поверхности катанки *8* абразивным порошком *9*, оборудована собственным приводом *10*, установлена на подшипники *11* с возможностью вращения относительно оси волочения и имеет выточку В по окружности, позволяющая втулке *3* с находящимся в ней абразивным порошком *9*,

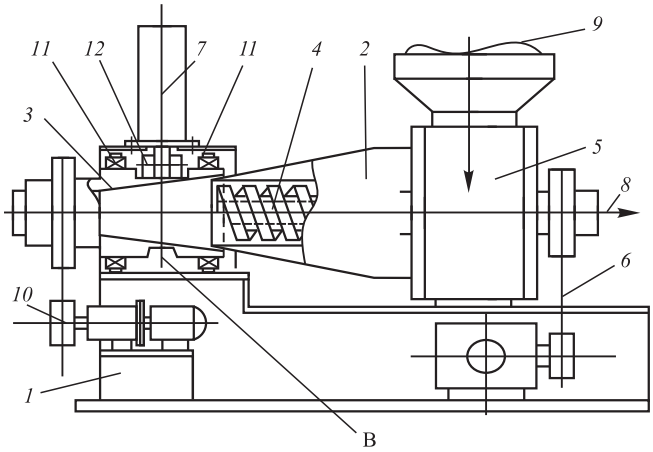



**Рис. 7. Устройство для тонкой очистки катанки от окалины**

непрерывно вращаясь вокруг катанки *8*, контактировать с концентратором вибратора *7*, установленного на подшипники *12*, вплотную прилегающим к поверхности выточки В втулки *3*. Втулка *3* также может быть снабжена несколькими ультразвуковыми вибраторами *7*, установленными эквидистантно поверхности втулки *3*.

Предлагаемое устройство для тонкой очистки катанки от окалины позволяет получать на поверхности проволоки искусственный микрорельеф, способствующий надежному захвату технологической смазки перед волочением. Наибольший эффект можно получить при использовании в одной линии двух установок, в которых вращение втулок *3* осуществляется в противоположные стороны.

В большинстве случаев при проектировании установок АПО и АПО роторного типа были использованы патенты [8—18]. Многолетние

испытания экспериментальных установок АПО в ООО "Северсталь-метиз" показали реальную возможность замены травления на способ вибрационной очистки катанки от окалины и на способ вибрационного волочения как в автономном варианте, так и в составе современных волочильных станов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Делюсто Л.Г.** Разработка, исследование и внедрение процесса удаления окалины с поверхности проката с помощью ферромагнитных абразивных порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 21 с.
2. **Делюсто Л.Г.** Исследование возможности удаления окалины с поверхности горячекатаных полос в агрегатах абразивно-порошковой очистки роторного типа // Вестник машиностроения. 2002. № 7. С. 56—59.
3. **Делюсто Л.Г.** Абразивно-порошковая очистка проката от окалины // Вестник машиностроения. 1999. № 10. С. 47—50.
4. **Делюсто Л.Г.** Определение деформирующих усилий при абразивно-порошковой очистке листового проката // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 5. С. 37—38.
5. **Делюсто Л.Г.** Исследования качества поверхности катанки и полосы после очистки ферромагнитным абразивным порошком // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 2. С. 26—31.
6. **Делюсто Л.Г.** Исследование возможности повышения пластичности металлов воздействием магнитного поля и охлаждением жидким азотом в ходе обработки давлением // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 4. С. 31—39.
7. **Делюсто Л.Г.** Абразивно-порошковая очистка проката от окалины. М.: Машиностроение, 2002. 460 с.
8. **Способ** волочения катанки: пат. 23117869 РФ, МПК В 21С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.
9. **Устройство** для очистки катанки от окалины: пат. 23117868 РФ, МПК В 21 С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.
10. **Мыльница** волочильного стана: пат. 2324558 РФ, МПК В 21 С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 20.06.20087, Бюл. № 14.
11. **Устройство** для тонкой очистки катанки от окалины: пат 2301126 РФ, МПК В 21 В 45/04. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 20.05.2008, Бюл. № 17.
12. **Устройство** для очистки проволоки от окалины и окисных пленок: пат. 2275979 РФ, МПК В 21 С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.
13. **Устройство** для очистки сортового проката от окалины: пат. 2320437 РФ, МПК В 21 В 45/04. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.
14. **Линия** очистки и волочения проволоки: пат. 2205080 РФ, МПК В 21 С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опуб. 27.05.2003, Бюл. № 15.
15. **Устройство** для очистки катанки от окалины: пат. 2205079 РФ, МПК В 21 В 45/04. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 27.05.2003, Бюл. № 15.
16. **Линия** очистки и волочения катанки: пат. 2438812 РФ, МПК В 21 С 9/00. Заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
17. **Устройство** для тонкой очистки катанки от окалины: пат. 179565 РФ, МПК В 21 С 43/04, заявитель и патентообладатель Л.Г. Делюсто. Опубл. 17.05.2018. Бюл. № 14.
18. **Делюсто Л.Г.** Абразивно-порошковая очистка проката от окалины. М.: Машиностроение, 2002. 460 с.


*Лев Георгиевич Делюсто, канд. техн. наук,*
delusto.lg@nordinkraft.com

УДК 669.056

**Л.М. Железняк, В.В. Савиных**
*(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург),*
**П.А. Василевский**
*(ООО "Камкор", г. Каменск- Уральский)*

# Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения

*Совмещением в одном агрегате — прокатно-волочильном стане — двух холодных процессов обработки металлов давлением — прокатки в клети дуо 350 катанки и непрерывно-литой заготовки и волочения со скольжением плющеной полосы в пятибарабанном волочильном блоке с диаметром барабанов 800 мм организовано производство промышленных партий изделий электротехнического назначения: шин прямоугольного сечения, коллекторных полос клиновидного профиля, контактного провода для городского электротранспорта. Стан отвечает основным требованиям, предъявляемым к гибким переналаживаемым системам, в условиях частой сменяемости сортамента, выпускаемого малообъемными партиями.*

**Ключевые слова:** марочный и профилеразмерный сортамент; изделия для электромашиностроения; прокатно-волочильный стан; технологическая гибкость; режимы деформации.

*Combination in one unit — wire-drawing mill — two cold processes of metal forming — rolling stand duo 350 rod and continuous casting and drawing with slip flattened bands in the five-drum wire drawing unit with 800 mm drum diameter orderly production of commercial batches of electrotechnical products: tire rectangular, wedge-shaped profile of the collector strips, the contact wire for municipal electric. The mill meets the basic requirements for flexible reconfigurable systems in the conditions of frequent turnover mix produced by low-capacity parties.*

**Keywords:** range of alloy grades and profiles; products for electrical engineering; rolling-drawing mill; technological flexibility; deformation regimes.

Известно [1–3], что характер производства продукции в подотрасли цветметобработка отличается рядом особенностей:

— широкий марочный и типоразмерный сортамент изделий, в том числе для электромашиностроения; в частности, в [3] приведены 40 разновидностей сечений медных профилей электротехнического назначения;

— небольшие объемы заказываемых партий изделий в связи со спецификой их потребления;

— высокий уровень требований нормативных документов к качественным и количественным характеристикам выпускаемых полуфабрикатов, обусловленный непростыми условиями эксплуатации деталей и узлов, изготовляемых из них;

— усложнение технологических схем производства изделий, вызываемое разнообразием форм их поперечного сечения и, как следствие, — многооперационностью технологических схем.

В [3] были также выделены три тенденции решения указанных проблем: 1) наделение универсального оборудования функциями гибких переналаживаемых систем; 2) расширение и углубление технологических возможностей оборудования и инструмента; 3) ввод эксплуатационного оборудования и агрегатов, обладающих технологичной гибкостью[1].

В качестве примера реализации третьей тенденции рассмотрены особенности эксплуатации прокатно-волочильного стана ВСП-5 производства Алма-Атинского завода тяжелого машиностроения; его техническая характеристика и план расположения агрегатов, механизмов и устройств приведены в [3].

Соединение в одном агрегате двух холодных процессов обработки металлов давлением — прокатки в клети дуо 350 (плющения на гладкой бочке валков) и волочения со скольжением промежуточной заготовки в пятибарабанном волочильном блоке с диаметром барабанов 800 мм явилось оправданным и на примере использования прокатно-волочильного стана

[1] Принято считать, что технологической гибкостью наделено оборудование, способное несложно и экономически эффективно адаптироваться к частой сменяемости сортамента.

ВСП-5 подтвердило эффективное решение задачи сочетания широкого профилеразмерного сортамента и выпуска партий изделий небольшими объемами.

В ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" на стане ВСП-5 плющением в гладких валках прокатной клети круглых заготовок диаметром 7...20 мм на промежуточные полосы и последующим их волочением выпускают широкий сортамент профилей из меди электротехнических марок и низколегированных бронз для электромашиностроительных предприятий (рис. 1): прямоугольного поперечного сечения (шины, ленты, проволока по ГОСТ 434—78)[2], клиновидного сечения (коллекторных полос для электрических машин постоянного тока по ГОСТ 4134—75) и контактных проводов для воздушной сети городского электротранспорта по ТУ 48-0809-40—91. Для магистрального железнодорожного электротранспорта контактный провод должен удовлетворять требованиям ГОСТ Р 55647—2013.

При производстве прямоугольных профилей прокатную клеть, синхронно работающую с волочильным блоком, настраивают на такое обжатие исходной круглой заготовки, при котором ширина бочкообразной плющеной из круга заготовки $b_б$ (рис. 2) превышает ширину готового холоднотянутого профиля не более чем на 2,0...2,5 мм во избежание повышенного износа деформационной и калибрующей зон по малым граням сечения волочильного канала и появления трещин на ребрах готового изделия.

Для предотвращения отрицательного влияния утяжки металла по ширине вследствие неравномерности деформации при волочении клиновидных профилей на точность размеров чистового коллекторного профиля суммарное абсолютное обжатие по ширине (2,0...2,5 мм) повысили, так как его отсчет вели не от $b_б$, а от среднего значения ширины сечения $b_с = (b_б + b_к)/2$, где $b_к$ — ширина плющеной полосы на контакте с валком (см. рис. 2). Для всех спроектированных и практически используемых маршрутов волочения обжатие по ширине предотделочной заготовки в чистовом проходе не превышало 0,5 мм.

Расчет коэффициента вытяжки λ, ширины по бочке $b_б$ и ширины по контакту $b_к$ при плю-

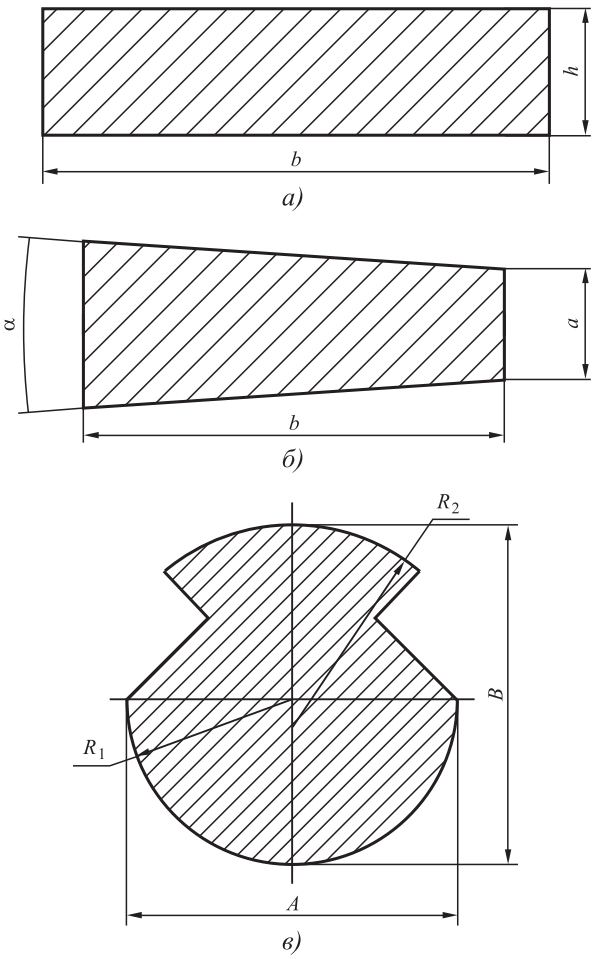



**Рис. 1. Сечения прямоугольного (*а*) и клиновидного (*б*) профилей и контактного провода (*в*), полученных на прокатно-волочильном стане ВСП- 5**

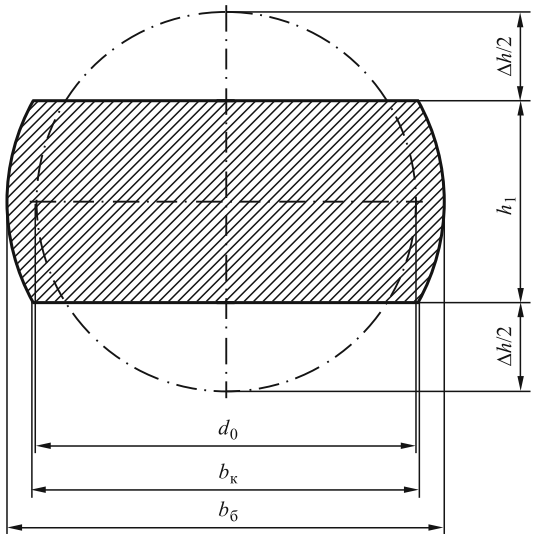



**Рис. 2. Схема плющения круглой заготовки в прокатной клети**

[2] Наиболее ответственным назначением медных шин является их использование в качестве обмоток в лобовых частях турбогенераторов, где они подвержены высоким механическим и электрическим нагрузкам.

щении круглой заготовки в гладких валках проводили по эмпирическим формулам [4]:

$$\lambda = 1 + 0,25\frac{D/d_0 + 3}{D/d_0 + 1}\left(\frac{d_0}{h_1} - 1\right);$$

$$b_б = 3F_0/h_1(2+m);\ \ b_к = mb_б,$$

где $D$ — диаметр валков прокатной клети; $d_0$ — диаметр исходной заготовки; $h_1$ — высота плющеного профиля; $\eta = h_1/d_0$ — коэффициент утонения; $F_0$ — площадь поперечного сечения исходной заготовки; $m = \sqrt{1-\eta}$.

При расчете технологических параметров волочения со скольжением плющеной заготовки в волочильном блоке использовали следующие рекомендации [5]:

— относительное скольжение на каждом из барабанов, за исключением чистового, должно быть больше нуля, его значения назначали в зависимости от порядкового номера барабана в интервале от 4 до 35 %;

— для приложения к полосе силы волочения окружная скорость барабана должна обязательно превышать скорость набегающей на него полосы;

— барабаны должны быть только тяговыми, недопустимо чтобы какой-либо из них работал в режиме торможения.

Технологические параметры прокатки и волочения рассчитали для более 70 маршрутов обработки прямоугольных и клиновидных профилей, по которым в соответствии с заказами выпущены промышленные партии продукции.

Более 50 маршрутов содержат не пять, а четыре, три или даже два прохода волочения, и в этих маршрутах первым деформирующим, т.е. тяговым барабаном, становится второй, третий или четвертый барабан волочильного блока.

Для снижения износа поверхности барабанов и исключения обрывности полос при волочении значения скольжения в зависимости от рассчитанных частных вытяжек $\lambda_l$, плавно снижали от первого работающего барабана к предчистовому в интервалах от 10...35 до 4...10 % соответственно; на чистовом барабане соблюдали нулевое скольжение.

В [3] отмечено, что для улучшения качества поверхности готовой продукции и повышения потребительского уровня полуфабрикатов в волочильном блоке заменили смазочно-охлаждающую жидкость: вместо заполнения эмульсионного бака водно-мыльной эмульсией с присадками, требовавшей длительного разогрева перед началом работы и быстро загрязнявшейся, использовали эмульсию на основе пасты ОЛОН (ТУ 38.107115—80), не нуждающуюся в разогреве и более стабильную по жирности и мыльности; в итоге улучшено состояние поверхности полуфабрикатов.

При освоении выпуска контактного провода марки МФ-85 (медный фасонный площадью сечения 85 мм$^2$) прокатно-волочильный стан применяли как четырехкратную волочильную машину, подвергая круглую заготовку минимальному плющению (обработке в режиме защемления). Оно обязательно предусматривается из-за особенности системы синхронизации прокатной клети с волочильным блоком, поскольку при остановке клети прекращает работу весь агрегат.

Одним из важных требований ГОСТ Р 55647—2013, наряду с установленными качеством поверхности, точностью размеров сечения, уровнем механических свойств и электросопротивлением контактного провода, является получение его строительной длины (длины одного отрезка). Например, для провода МФ-85 она составляет 1400...2000 м, соответственно масса провода этой строительной длины равна 1057...1510 кг. Однако максимальная масса медного круглого слитка для прессования на самом крупном на заводе горизонтальном гидравлическом прессе составляет 650...660 кг, т.е. возможностей пресса недостаточно для получения строительной длины провода без применения сварки или пайки исходной прессованной заготовки. Вместе с тем в ГОСТ Р 55647—2013 [6] приведено, что по согласованию с потребителем допускается сдача проводов любой длины.

Предприятия городского электротранспорта удовлетворены поставками провода по ТУ 48−0809−40—91, полученного из сварной заготовки и имеющего не более 10 сварных стыков на строительной длине провода.

При освоении выпуска провода с учетом возможностей действующего производства и наличия соответствующего оборудования и агрегатов исходили из следующих соображений.

1. Планируя использование исходной сварной заготовки и учитывая, что сварные стыки имеют пониженную прочность[3], число про-

[3] Уменьшение прочности сварного стыка при электроконтактной сварке связано со снижением прочности зоны термического влияния сварного шва вследствие роста зерен; протяженность этой зоны в осевом направлении — до половины диаметра заготовки.

**Технологические параметры маршрута волочения контактного провода МФ-85**

| Номер | | Вытяжка | | Отношение $\lambda/\mu$ | Отношение скорости барабана к скорости полосы | Относительное скольжение на барабане, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| прохода волочения | волоки и барабана | кинематическая $\mu$ | технологическая $\lambda$ | | | |
| 4 | 5 | 1,1 | 1,25 | 1,136 | 1,000 | 0 |
| 3 | 4 | 1,20 | 1,25 | 1,042 | 1,136 | 12,0 |
| 2 | 3 | 1,20 | 1,25 | 1,042 | 1,184 | 15,5 |
| 1 | 2 | 1,18 | 1,25 | 1,059 | 1,233 | 18,9 |

ходов волочения выбирали с таким расчетом, чтобы средняя вытяжка за проход составляла не более 1,25.

2. Учитывая, что чем меньше диаметр заготовки, тем надежнее стыковая сварка, и что для обеспечения минимального временного сопротивления провода МФ-85 согласно ГОСТ Р 55647—2013 $\sigma_{в\,min}$ = 367,5 МПа необходима общая вытяжка $\lambda_\Sigma \geqslant 2$, ориентировались на заготовку диаметром 16,2 мм. Тогда общая вытяжка при минимальном допускаемом сечении провода составила $\lambda_\Sigma$ = 206/83,3 = 2,47; это обеспечило достижение требуемого уровня $\sigma_в$.

3. Во избежание завышенных и заниженных коэффициентов запаса прочности переднего конца заготовки $K_1$ и $K_2$[4] предусмотрели равенство вытяжек про проходам: при использовании четырехкратного маршрута волочения $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1{,}25$. Тогда общая вытяжка в волочильном блоке составит $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4 = 2{,}44$, следовательно, вытяжка в плющильной клети $\lambda_{пл} = 2{,}47/2{,}44 = 1{,}012$, т.е. прокатная клеть слегка защемляет круглую заготовку.

Другие особенности маршрута видны из таблицы. Отношение технологической вытяжки к кинематической вытяжке выдерживали на уровне $\lambda/\mu > 1{,}04$ во всех проходах. Это способствовало существенному облегчению заправки стана; снижению опасности трещинообразования и ликвидации обрывности при изменении условий трения на барабанах по мере их износа; возможности повышения диаметра заготовки (например, до 17 мм) при соответствующем повышении обжатия в плющильной клети.

Наиболее перспективной альтернативой изготовления и поставки медного и низколегированного медного контактного провода для предприятий ОАО "РЖД" по ГОСТ Р 55647—2013 является производство непрерывно-литой заготовки посредством эксплуатируемой на заводе установки горизонтального непрерывного литья, на которой получают промышленные партии круглых заготовок с массой бунта до 1,5...1,7 т для последующего их волочения на проволоку из бронз БрОЦ4-3 и БрОФ6,5-0,4, латуни Л80, нейзильбера МНЦ15-20 и др. [6].

**Заключение.** Прокатно-волочильный стан ВСП-5 успешно введен в эксплуатацию в качестве оборудования, обладающего технологической гибкостью, т.е. способностью достаточно просто и экономически целесообразно адаптироваться к частой сменяемости выпускаемого сортамента изделий из меди и низколегированных бронз, потребляемых предприятиями электромашиностроения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Изготовление** нестандартных полос из электротехнической меди в ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"/ Н.С. Арсентьева, Л.М. Железняк, Н.Ф. Боков и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 10. С. 36—39.
2. **Коллекторные** профили для электромашиностроения / Н.С. Арсентьева, Е.А. Казанцев, Л.М. Железняк и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 2. С. 51—54.
3. **Совершенствование** технологии и оборудования в производстве полуфабрикатов для электромашиностроения в ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"/ Н.С. Арсентьева, Л.М. Железняк, В.Е. Мокеев и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 11. С. 50—55.
4. **Широкосортаментная** прокатка профилей из медных сплавов на полунепрерывном стане / Л.М. Железняк, В.И. Свинин, В.С. Токарь, Б.Е. Хайкин. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 154 с.
5. **Ерманок М.З., Ватрушин Л.С.** Волочение цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1988. 288 с.
6. **Токарь В.С.** Технология производства бухтовой заготовки сплава МНЦ 15-50 методом горизонтального литья. Свердловск: СЦНТИ, 1990.



*Лев Моисеевич Железняк, канд. техн. наук,*
e.a.anderiukova@urfu.ru;
*Владимир Всеволодович Савиных;*
*Павел Алексеевич Василевский*


[4] Коэффициенты $K_1$ и $K_2$ рассчитывали следующим образом: $K_1 = \sigma_{в1}/p$; $K_2 = \sigma_{s1}/p$, где $\sigma_{в1}$, $\sigma_{s1}$ — соответственно временное сопротивление разрыву и сопротивление деформации металла после данного прохода волочения; $p$ — напряжения волочения в этом проходе; нормативные значения: $K_1 \geqslant 2...2{,}5$; $K_2 \geqslant 1{,}5...2$.

УДК 628.517:669

**М.К. Байжуманов, Е.Б. Утепов, С.Ж. Карипбаев**
*(Академия гражданской авиации, г. Алматы),*
**К.К. Карменов**
*(Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям Министерства внутренних дел Республики Казахстан)*

# Создание демпфирующих металлических материалов для деталей авиационной техники

*Оценены вибрационные и демпфирующие характеристики легированных и литейных сталей, используемых для деталей авиационной техники (диски, звездочки, вилки, зубчатые колеса, отливки небольших размеров и др.). Использована оригинальная установка для исследования вибрации образцов при соударении. Проведено сравнение новых сталей, легированных лантаном, кальцием, никелем, хромом, ванадием, с известными: 35ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ, 08ГДНФЛ. Новая сталь СМА-1 после закалки и низкого отпуска со структурой мартенсита имеет максимальные диссипативные свойства и рекомендована для стальных деталей воздушных судов.*

**Ключевые слова:** сталь; легирование; звукоизлучение; термическая обработка; демпфирование; химический состав; соударение; механические свойства; сплав; шум; вибрация.

*The vibration and damping characteristics of alloyed and foundry steels used for aircraft components (disks, sprockets, forks, cogwheels, small-size castings, etc.) are estimated. The original installation to study the vibration of samples at impact is used. New steels alloyed with lanthanum, calcium, nickel, chromium, vanadium are compared with the known ones: 35GL, 30GSL, 40KhL, 08GDNFL. New steel SMA-1 after hardening and low tempering with martensitic structure showed maximum dissipative properties and for steel aircraft parts is recommended.*

**Keywords:** steel; alloying; acoustic effects; heat treatment; damping; chemical content; collision; mechanical properties; alloy; noise; vibration.

При работе машин и механизмов, работающих в режиме трения и соударений (детали авиационной техники, работающие в режиме циклических нагрузок и др.) генерируется вибрация повышенного уровня. Несмотря на уменьшение доли стальных деталей в летательных аппаратах, заменить их цветными металлами и неметаллическими материалами пока не удается.

Детали с высокой прочностью изготовляют из известных сталей 30ХГСА, 35ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ, 08ГДНФЛ. Для исследования вибрационных свойств (уровни виброускорения) этих сталей использовали методику моделирования ударных процессов посредством шара (ударник) и пластины (образец из известных сталей и новых сплавов).

К настоящему времени накоплен достаточно обширный эмпирический материал о вибрационных характеристиках оборудования, эксплуатирующегося в различных отраслях промышленности [1—4], однако вибрационные свойства наиболее распространенных конструкционных материалов, из которых изготовлены детали авиационной техники, исследованы недостаточно. Мало изучен вопрос распространения вибрационных волн по реальной конструкции. Отдельные исследования вибрационных свойств металлических материалов приведены, как правило, для определенных марок сталей и сплавов. В то же время отсутствуют характеристики вибрации по группам наиболее распространенных сталей.

В последнее время при создании летательных аппаратов широко применяют материалы с пониженной плотностью (композиционные материалы, алюминиевые, магниевые, бериллиевые, титановые сплавы), однако для обеспечения высоких прочностных характеристик деталей используют легированные стали.

Из стали изготовляют такие детали шасси самолета, как передняя стойка шасси, подкос, цапфа, рычаг, замок подвески, силовые стойки, амортостойка, траверса, механизм распора, оси колес, рама амортостойки, шток амортостойки, раскосы, проушины, болты, гайки, крепежные детали и др., детали двигателя (диски, лопатки, валы, насос регулятора, крепежные элементы, опоры и др.).

*Цель работы* — оценка вибрационных характеристик стандартных марок легированных сталей для отливок и разработка новых демпфирующих сталей.

Задачи исследования:

- оценка вибрационных и физико-механических свойств известных литейных сталей (35ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ, 08ГДНФЛ), используемых для деталей авиационной техники, подвергаемых ударным нагрузкам;
- разработка новых сплавов для деталей, подвергаемых ударным нагрузкам, отличающихся химическим составом, но не уступающим по механическим и технологическим характеристикам известным стандартным легированным сталям для отливок.

В качестве объекта исследования рассматривали стандартные сплавы (стали для отливок 35ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ, 08ГДНФЛ) и новые сплавы СМА-1, СМА-2 и СМА-3, легированные хромом, никелем, ванадием, лантаном, марганцем, кальцием.

**1. Назначение стандартных литейных сталей [5]**

| Сталь | Назначение |
|---|---|
| 35ГЛ | Диски, звездочки, зубчатые венцы, шкивы, крестовины, траверсы, ступицы, вилки, зубчатые колеса, валы, кулачковые муфты, крышки подшипников и другие детали авиационной техники |
| 30ГСЛ | Рычаги, фланцы, сектора, венцы зубчатые и др. |
| 40ХЛ | Фасонные отливки, отливаемые методом точного литья, зубчатые колеса, бандажи, отливки небольших сечений и другие детали общего машиностроения, к которым предъявляются требования повышенной твердости |
| 08ГДНФЛ | Различные детали для авиационной техники, литые детали, работающие при температуре до 60 °С |

Назначение стандартных сталей приведено в табл. 1. В табл. 2 представлен химический состав, а в табл. 3 — механические свойства исследуемых сплавов. Изучали физико-механические и вибрационные (уровень виброускорения, общий уровень виброускорения (ОУВУ)) характеристики сплавов.

Демпфирующая способность металлических материалов характеризуется совокупностью вибрационных и физико-механических характеристик, таких как уровень виброускорения, внутреннее трение, удельное электрическое сопротивление, плотность, модуль сдвига, модуль Юнга и рядом металлографических признаков.

Цель экспериментов — установление закономерностей, обусловливающих взаимосвязь

**2. Химический состав исследуемых сталей, % мас.**

| Сталь | C | Si | Mn | Cr | La | Ca | Cu | S | P | Ni | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Не более | | | |
| 35ГЛ | 0,30...0,40 | 0,2...0,4 | 1,2...1,6 | ⩽0,3 | — | — | ⩽0,3 | 0,04 | 0,04 | ⩽0,3 | — |
| 30ГСЛ | 0,25...0,35 | 0,6...0,8 | 1,1...1,4 | ⩽0,3 | — | — | ⩽0,3 | 0,04 | 0,04 | ⩽0,3 | — |
| 40ХЛ | 0,35...0,45 | 0,2...0,4 | 0,4...0,9 | 0,8...1,0 | — | — | ⩽0,3 | 0,04 | 0,04 | ⩽0,3 | — |
| 08ГДНФЛ | 0,10 | 0,15...0,4 | 0,6...1,0 | ⩽0,3 | — | — | 0,8...1,2 | 0,035 | 0,035 | 1,15...1,55 | 0,06...0,15 |
| СМА-1 | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 0,12 | 0,15 | ⩽0,3 | 0,045 | 0,04 | 1,2 | 0,25 |
| СМА-2 | 0,4 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 0,15 | 0,18 | ⩽0,3 | 0,045 | 0,04 | 0,3 | — |
| СМА-3 | 0,5 | 0,45 | 1,0 | 1,0 | 0,21 | 0,20 | ⩽0,3 | 0,045 | 0,04 | 0,3 | — |

**3. Механические свойства исследуемых сталей**

| Сталь | $\sigma_в$, МПа | Ударная вязкость *KC*U, Дж/см$^2$ | $\delta_5$ | $\psi$ | $\sigma_т$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | % | | |
| | | | Не менее | | |
| 35ГЛ | 550 | 30 | 12 | 20 | 300 |
| 30ГСЛ | 600 | 30 | 14 | 25 | 350 |
| 40ХЛ | 650 | 40 | 12 | 25 | 500 |
| 08ГДНФЛ | 450 | 50 | 18 | 30 | 350 |
| СМА-1 | 500 | 30 | 13 | 25 | 300 |
| СМА-2 | 450 | 35 | 14 | 30 | 350 |
| СМА-3 | 600 | 40 | 12 | 35 | 320 |

структурно-чувствительных факторов и микроструктуры с параметром оптимизации — уровнем виброускорения конструкционных низколегированных сталей, состав которых был задан матрицей планирования эксперимента.

Опытные сплавы выплавляли в тигельной индукционной печи вместимостью 12 кг с основной футеровкой. Исходный материал — листовой металл из стали 10. Легирование проводили 97,6%-ным металлическим марганцем, 77,5%-ным FeSi и 99,98%-ным металлическим никелем. Углеродосодержащей добавкой служил синтетический чугун с содержанием углерода 3,9 %. Стали отливали в металлическую изложницу размерами 210×115×115 мм.

Образцы для исследования акустических и физико-механических свойств вырезали из литых заготовок.

Новые демпфирующие металлические материалы на основе железа получали добавлением легирующих элементов в состав стандартных сталей. Принципы легирования сплавов основаны на изучении диаграмм состояния Fe—C, Fe—Si, Fe—Mn, Fe—Cr, Fe—La, Fe—Ca, Fe—V, Fe—Ni.

Легирующие элементы подбирали исходя из их влияния на механические свойства. Хром повышает твердость, прочность и пластичность, сохраняет вязкость, увеличивает сопротивляемость стали коррозии, повышает прокаливаемость, позволяет проводить закалку в масле, что значительно снижает возможность деформации детали. Поэтому хром добавляли до 1 % во все опытные сплавы.

Содержание углерода, кремния, марганца и меди не изменяли.

Вводили лантан 0,12...0,21 % и кальций 0,15...0,20 %. Лантан уменьшает пористость, способствует уменьшению содержания серы в стали, улучшает качество поверхности, измельчает зерно. Кальций обеспечивает высокую степень раскисления и десульфурации металла и низкое содержание серы. Влияние лантана и кальция на демпфирующие свойства в выбранном количестве и сочетании легирующих элементов неизвестно.

В качестве объекта исследования выбраны стали для отливок, так как литые стали составляют почти 70 % из всего объема металлопродукции.

Литье осуществляли в кокиль.

На основе анализа установок для исследования вибрационных свойств сплавов было выбрано устройство "КазНТУ-2" для комплексного исследования вибрационных свойств пластинчатых образцов стали (рис. 1).

Установка работает следующим образом. Шар-ударник *6*, установленный на наклонной

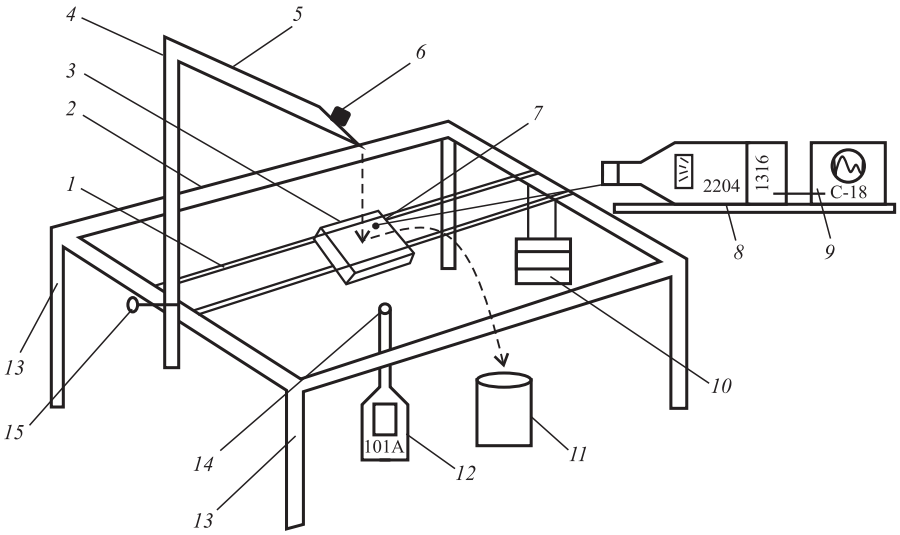



**Рис. 1. Устройство "КазНТУ-2" для исследования вибрационных свойств твердых пластинчатых образцов [4]:**

*1* — капроновые нити; *2* — рама; *3* — пластинчатый образец (50×50×5 мм); *4* — стойка рамы; *5* — наклонная плоскость; *6* — шар-ударник; *7* — вибродатчик виброметра "Bruel&Kjer" мод. 2204; *8* — виброметр "Bruel&Kjer" мод. 2204; *9* — осциллограф С-18; *10* — груз; *11* — приемник шаров; *12* — шумомер "ОКТАВА-101А"; *13* — стойки рамы; *14* — микрофон шумомера "ОКТАВА-101А"; *15* — винт крепления стойки ударника

плоскости *5*, скатывается с нее и совершает свободное падение в геометрический центр пластинчатого образца *3*. Шар-ударник *6* отскакивает от него и попадает в приемник шаров *11*. Шум от соударения шара-ударника *6* и образца *3* фиксируется шумомером "ОКТАВА-101А" *12*. Образец *3*, колеблющийся в переплетении капроновых нитей *1*, создает вибрацию, которая оценивается прибором "Bruel&Kjer" мод. 2204 *8*. Натяжение образца капроновыми нитями *1* всегда постоянно, так как груз *10* контролирует это натяжение. Высота падения шара может изменяться с помощью винта крепления стойки ударника *15*. Вся система крепления образца *3* и шара-ударника *6* установлена на раме *2*, которая с помощью стоек *13* находится на определенной высоте над полом.

При измерениях были использованы стальные (ШХ15) шары-ударники следующих диаметров: 9,5; 12,7; 15,2; 15,8 и 18,3 мм (масса шаров-ударников соответственно: 2,5; 5; 9 и 25 г).

На установке исследовали стальные пластинчатые образцы (50×50×5 мм).

Уровни виброускорения измеряли в диапазоне 31,5...31 500 Гц, общий уровень виброускорения — по характеристике "Lin".

Масса шара $m$, плотность образца $\rho$, расстояние от точки соударения до образца $l$ и толщина образца $h$ взаимосвязаны:

$$m < 4{,}6\rho l h^2.$$

Поправку на изменение вибрационного сигнала от атмосферного давления осуществляли с помощью пистонфона PF-101. Температуру воздуха и влажность в лаборатории поддерживали постоянными. Вибрационные характеристики находили как среднее значение пяти измерений.

Проводили также математическую обработку результатов эксперимента и определение доверительных интервалов в соответствии с методикой, приведенной в работе авторов В.В. Керженцева, Л.Г. Деденко "Математическая обработка и оформление результатов эксперимента" (М.: МГУ, 1971. 10 с.). Перед началом работы настройку измерительного тракта осуществляли проверкой уровней звукового давления эталонного образца.

В табл. 4 приведены вибрационные характеристики образцов из стандартных сталей,

**4. Вибрационные характеристики стандартных сталей (пластины 50×50×5 мм) после литья**

| Сталь | Диаметр шара-ударника $d$, мм | Уровни виброускорения, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | | | | | ОУВУ, дБ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16 000 | 31 500 | |
| 35ГЛ | 9,5 | 85 | 104 | 86 | 65 | 64 | 63 | 65 | 64 | 65 | 70 | 68 | 105 |
| | 12,7 | 90 | 106 | 88 | 68 | 69 | 65 | 65 | 63 | 68 | 69 | 70 | 107 |
| | 15,2 | 88 | 106 | 90 | 67 | 75 | 68 | 67 | 64 | 67 | 68 | 71 | 108 |
| | 18,3 | 91 | 109 | 88 | 68 | 77 | 69 | 68 | 63 | 68 | 69 | 72 | 110 |
| 30ГСЛ | 9,5 | 91 | 108 | 85 | 71 | 75 | 68 | 65 | 64 | 61 | 62 | 72 | 110 |
| | 12,7 | 91 | 114 | 82 | 73 | 76 | 69 | 69 | 65 | 62 | 64 | 77 | 115 |
| | 15,2 | 93 | 116 | 88 | 75 | 77 | 70 | 70 | 66 | 64 | 68 | 78 | 118 |
| | 18,3 | 94 | 122 | 85 | 78 | 75 | 72 | 72 | 67 | 68 | 70 | 80 | 124 |
| 40ХЛ | 9,5 | 88 | 104 | 78 | 62 | 69 | 70 | 62 | 67 | 66 | 65 | 64 | 106 |
| | 12,7 | 85 | 109 | 89 | 72 | 71 | 69 | 66 | 68 | 67 | 64 | 66 | 110 |
| | 15,2 | 86 | 117 | 91 | 66 | 74 | 65 | 68 | 68 | 69 | 66 | 68 | 118 |
| | 18,3 | 90 | 120 | 96 | 67 | 73 | 64 | 69 | 70 | 70 | 66 | 71 | 122 |
| 08ГДНФЛ | 9,5 | 91 | 117 | 92 | 70 | 66 | 71 | 60 | 62 | 66 | 71 | 72 | 118 |
| | 12,7 | 97 | 122 | 96 | 71 | 72 | 68 | 64 | 69 | 67 | 72 | 73 | 125 |
| | 15,2 | 98 | 126 | 98 | 72 | 77 | 66 | 65 | 70 | 67 | 73 | 74 | 128 |
| | 18,3 | 98 | 128 | 100 | 74 | 78 | 65 | 69 | 72 | 68 | 74 | 77 | 129 |

**5. Вибрационные характеристики демпфирующих материалов СМА-1, СМА-2 и СМА-3 после литья**

| Сталь | Диаметр шара-ударника *d*, мм | Уровни виброускорения, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | | | | | ОУВУ, дБ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16 000 | 31 500 | |
| СМА-1 | 9,5 | 80 | 99 | 81 | 65 | 65 | 62 | 62 | 65 | 66 | 68 | 64 | 100 |
| | 12,7 | 82 | 100 | 79 | 66 | 68 | 64 | 65 | 68 | 69 | 70 | 65 | 102 |
| | 15,2 | 83 | 104 | 82 | 68 | 70 | 66 | 67 | 69 | 71 | 71 | 66 | 105 |
| | 18,3 | 85 | 107 | 83 | 70 | 72 | 67 | 68 | 71 | 72 | 73 | 68 | 108 |
| СМА-2 | 9,5 | 81 | 100 | 80 | 66 | 66 | 64 | 65 | 64 | 68 | 70 | 67 | 102 |
| | 12,7 | 83 | 102 | 82 | 68 | 69 | 65 | 67 | 66 | 70 | 71 | 68 | 103 |
| | 15,2 | 85 | 106 | 83 | 69 | 71 | 66 | 67 | 66 | 70 | 71 | 69 | 108 |
| | 18,3 | 86 | 108 | 85 | 70 | 73 | 68 | 69 | 67 | 71 | 78 | 70 | 110 |
| СМА-3 | 9,5 | 80 | 109 | 79 | 67 | 65 | 63 | 66 | 66 | 69 | 71 | 68 | 110 |
| | 12,7 | 79 | 111 | 79 | 69 | 66 | 65 | 67 | 68 | 70 | 73 | 69 | 112 |
| | 15,2 | 82 | 113 | 80 | 70 | 67 | 68 | 69 | 70 | 72 | 74 | 70 | 115 |
| | 18,3 | 85 | 117 | 82 | 72 | 69 | 70 | 71 | 71 | 73 | 75 | 72 | 119 |

а в табл. 5 — вибрационные характеристики образцов из выплавленных сталей СМА-1, СМА-2, СМА-3 после соударения с шарами-ударниками диаметрами 9,5; 12,7; 15,2 и 18,3 мм.

Характер уровней виброускорения выплавленных сталей СМА-1, СМА-2, СМА-3 имеет следующие особенности:

— уровни виброускорения исследованных образцов изменяются в диапазоне 62...117 дБ;

— максимумы наблюдаются на частотах 31,5...125 Гц (79...117 дБ);

— минимумы уровней виброускорения образцов характерны для частот 500...1000 Гц (62...65 дБ);

— максимальные значения уровней виброускорения сравниваемых образцов характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром 18,3 мм;

— минимальные значения уровней виброускорения сравниваемых образцов характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром 9,5 мм;

— максимумы уровней виброускорения по характеристике "Lin" образцов СМА-1, СМА-2 и СМА-3 наблюдаются при соударении с шарами-ударниками диаметрами 15,2 и 18,3 мм (115...119 дБ).

Амплитудно-зависимое демпфирование вибрации в разработанных сплавах СМА-1, СМА-2 и СМА-3 наблюдается в следующих случаях:

— для сплава СМА-1 — на частоте 125 Гц при соударении с шарами-ударниками $d$ = 9,5 и 12,7 мм;

— для сплава СМА-2 — на частотах: 2000 Гц ($d$ = 12,7 и 15,2 мм); 4000 Гц ($d$ = 12,7 и 15,2 мм); 8000 Гц ($d$ = 12,7 и 15,2 мм); 16 000 Гц ($d$ = 12,7 и 15,2 мм);

— для сплава СМА-3 — на частотах: 31,5 Гц ($d$ = 9,5 и 12,7 мм); 125 Гц ($d$ = 9,5 и 12,7 мм).

На рис. 2 представлены характеристики виброускорений разработанного сплава образца СМА-1 при соударении.

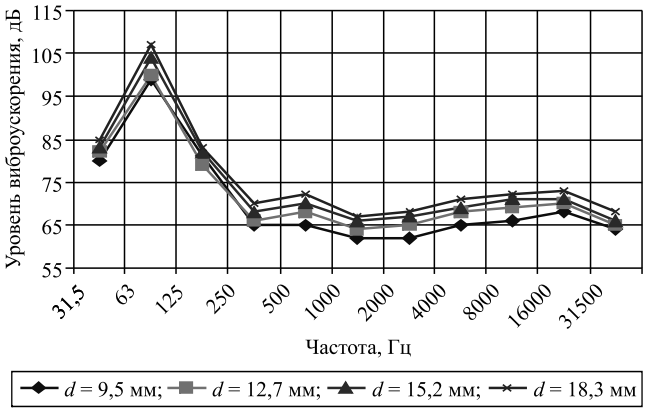



**Рис. 2. Характеристики виброускорений образца СМА-1 при соударении**

**Заключение.** Выбор химического состава сплава СМА-1 позволил получить демпфирующий антивибрационный сплав, имеющий структуру мартенсита закалки, обладающий повышенными диссипативными свойствами. Этот сплав рекомендован для деталей воздушных судов, работающих в режиме циклических нагрузок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Лагунов Л.Ф., Осипов Г.Л.** Борьба с шумом в машиностроении. М.: Машиностроение, 1980. 150 с.
2. **Куттыбаев С.К., Утепов Т.Е., Заликанова И.П. и др.** Разработка демпфирующих сплавов с пониженным звукоизлучением // Труды девятой междунар. науч.-техн. конференции "Новое в безопасности жизнедеятельности" (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология, экономические, правовые и психологические аспекты БЖД, логистика). Алматы: КазНТУ, 2007. Ч. 1. С. 37—39.
3. **Утепов Е.Б., Түкібай А.А., Абдрасилова Ж.Х. и др.** Темір көміртектес болаттарды акустикалы асиетін зерттеуге арналан құрал. // Труды девятой междунар. науч.-техн. конф. "Новое в безопасности жизнедеятельности" (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология, экономические, правовые и психологические аспекты БЖД, логистика). Алматы: КазНТУ, 2007. Ч. 1. С. 242—245.
4. **Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Мукашулы А. и др.** Малошумная направляющая труба // Труды восьмой междунар. науч.-техн. конф. "Новое в безопасности жизнедеятельности" (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология, экономические, правовые и психологические аспекты БЖД, логистика). Алматы: КазНТУ, 2006. Ч. 1. С. 28—29.
5. **Журавлев В.Н., Николаева О.И.** Машиностроительные стали. Справочник. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.



*Мухтар Казбекович Байжуманов, доктор pHD;*
*Еркасын Балапанович Утепов, д-р техн. наук,*
utepov_51@mail.ru;
*Салиакын Жумадилович Карипбаев, канд. техн. наук;*
*Куанышбек Казезтаевич Карменов, канд. техн. наук*



ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

**СПРАВОЧНИК**
**Технолога-Машиностроителя**
**в 2-х томах**
**Под ред.** ***А.С. Васильева, А.А. Кутина***
Издание 6-е, переработанное и дополненное. 2018 г. 1574 с.
*В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.*

**Цена 15 000 руб.**

**Том 1.** Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

**Том 2.** Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизико-химическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

***ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ***
**по e-mail: realiz@mashin.ru**
**Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU**

УДК 669-419.8:539.378.2:669.715-416:669.781-426

**И.В. Кочешков**
*(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

# Структура волокнистых металлокомпозитов, полученных из различных листовых заготовок

*Приведено количественное описание характера расположения волокон в композитных материалах, полученных при использовании листовых заготовок с фольговой и плазменно-напыленной матрицами.*

**Ключевые слова:** волокнистые композитные материалы; листовые заготовки; имитационное моделирование; строение; структура композита.

*Quantitative description of fibers configuration in composite materials getting from the use of sheet blanks with the metal paper and plasma-evaporated matrixes is presented.*

**Keywords:** fibrous composite material; sheet blanks; simulation modeling; structure; compound structure.

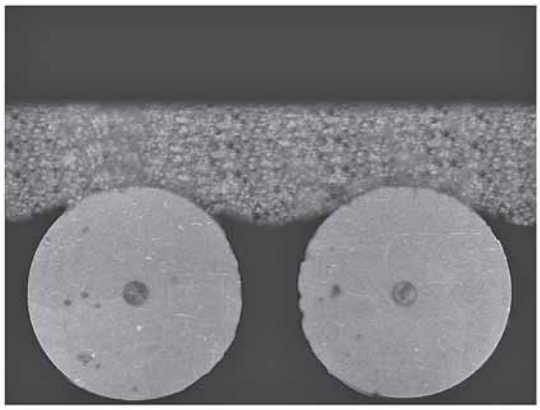
Использование высокопрочных и высокомодульных волокон в сочетании с металлическими матричными материалами позволяет получать композитные материалы с высокой удельной прочностью и жесткостью. Благодаря этому при применении волокнистых металлокомпозитов в конструкциях летательных аппаратов достигается снижение массы изделия. Замена традиционных материалов на волокнистые металлокомпозиты в основных деталях и узлах самолетов, вертолетов и космических аппаратов уменьшает их массу на 20...60 %. Важным структурным параметром, влияющим на прочностные характеристики получаемого композита, является характер расположения в нем волокон [1]. Однако изучению и математическому описанию этого структурного параметра уделяется недостаточное внимание.

*Цель работы* — исследование характера расположения волокон в композитных материалах, получаемых из разных видов листовых заготовок, и математического описания укладки волокон в подобных композитах. Исследования проводили на примере получения *волокнистого композитного материала* (ВКМ), состоящего из алюминиевой матрицы и волокон бора диаметром 140 мкм.

**Описание видов и особенностей листовых заготовок, используемых для получения ВКМ алюминиевая матрица—волокна бора.** Листовые заготовки изготовляли двумя разными способами. Заготовки, получаемые с помощью этих способов, отличаются по особенностям строения матричного материала и характеру его соединения с волокнами. Подготовительной операцией для обоих способов является намотка волокна на барабан с нарезанной на нем винтовой канавкой для укладки волокна. Это позволяет расположить волокна относительно друг друга с требуемым шагом в направлении оси барабана. Затем применяли два разных метода введения требуемого количества матричного материала, который соединяет и фиксирует между собой намотанные на барабан волокна.

В первом способе использовали плазменное напыление алюминиевой матрицы на поверхность барабана с намотанным на него волокном. Напыляемые алюминиевые частицы образуют очаги схватывания с соседними частицами и поверхностью волокон бора. При этом алюминиевая матрица проникает глубоко в межволоконное пространство и охватывает волокна бора по большей части их поверхности (рис. 1, *а*). Это приводит к фиксации положения волокон относительно друг друга и обеспечивает такую прочность плазменно-напыленного слоя матрицы, которая позволяет выполнять дальнейшие необходимые технологические операции с полученными таким образом листовыми заготовками. После разрезания волокон бора по образующей барабана волокна и нанесенный на них слой матрицы распрямляются. В результате получается листовая заготовка, в которой волокна расположены с заданным шагом.

*а)*



*б)*

**Рис. 1. Фрагмент листового полуфабриката Al—B с плазменно-напыленной (*а*) и фольговой (*б*) матрицами**

Отличительная особенность второго способа получения листовых заготовок — использование вместо плазменно-напыленного слоя матричного материала алюминиевой фольги. Барабан с намотанным на него волокном оборачивается фольгой. Затем под действием равномерного давления при повышенной температуре осуществляется частичное впрессовывание волокон (примерно на 1/3 их радиуса) в алюминиевую фольгу (рис. 1, *б*). Каждое волокно играет роль рабочего инструмента, клина с переменным углом заточки, и при впрессовывании их в алюминиевую матрицу достигается прочность соединения волокон с матричным материалом, достаточная для того, чтобы надежно удерживать волокна на поверхности фольги [2]. Как и в первом случае, после разрезания волокон по образующей барабана получается листовая фольговая заготовка, волокна которой расположены с заданным шагом и достаточно прочно соединены с матричным материалом.

Характеристики плазменно-напыленного и фольгового слоев матричного материала в листовых заготовках существенно отличаются. Плазменно-напыленный матричный материал имеет исходную пористость ≈15 % и на порядок более низкую прочность по сравнению с прочностью алюминиевого сплава, применяемого при плазменном напылении [3]. На поверхности плазменно-напыленного слоя матричного материала наблюдаются неровности и неравномерность его распределения по площади заготовки (см. рис. 1, *а*). Все это приводит к тому, что в процессе уплотнения пакета листовых заготовок, полученных плазменным напылением матрицы, может происходить существенное смещение волокон относительно друг друга.

В отличие от плазменно-напыленного матричного материала в фольге отсутствует пористость и, несмотря на воздействие повышенных температур, прочностные свойства не опускаются ниже свойств отожженного материала. Толщина фольги достаточно стабильна по всей ее площади. В соответствии с ГОСТ на алюминиевую техническую фольгу колебания ее толщины не могут превышать 10 %. Поэтому в процессе уплотнения пакета листовых фольговых заготовок смещение волокон относительно друг друга должно быть существенно меньше, чем в случае использования плазменно-напыленной матрицы. Данное утверждение проверяли в ходе эксперимента по получению волокнистого композита прессованием пакетов листовых заготовок с плазменно-напыленной и фольговой матрицами.

**Выбор параметров листовых заготовок с фольговой и плазменно-напыленной матрицами, а также условий изготовления из них волокнистых композитов.** Высокие прочностные свойства волокнистых композитных материалов достигаются при достаточно большой объемной доле упрочняющих волокон. Поэтому практическое значение имеют листовые заготовки с объемной долей волокон не менее 50 %. В связи с этим применяли заготовки, параметры которых позволяют обеспечивать указанную выше объемную долю содержания волокон.

При оценке объемной доли волокон в волокнистом композитном материале, получаемого при использовании листовых заготовок, целесообразно использовать формулу, содержащую значение шага расположения волокон внутри слоя (внутрислоевой шаг $S_{вс}$), опреде-

ляемого параметрами применяемой заготовки, и шага между близлежащими слоями волокон, образованных заготовками (межслоевой шаг $S_{мс}$), (рис. 2):

$$V_f = \frac{\pi d_f^2}{4\bar{S}_{вс}\bar{S}_{мс}}, \quad (1)$$

где $d_f$ — диаметр волокон; $\bar{S}_{вс}$, $\bar{S}_{мс}$ — среднее значение внутрислоевого и межслоевого шага расположения волокон соответственно.

При этом необходимо учитывать, что величины $S_{вс}$ и $S_{мс}$ могут колебаться по объему материала за счет неравномерности распределения матричного материала и смещения волокон от их исходного расположения в заготовке. Для обеспечения объемной доли волокна в волокнистом композитном материале, превышающей 50 %, применяли листовые заготовки со следующими параметрами:

- заготовки с использованием фольги толщиной 50 мкм из алюминиевого сплава АМг2 и волокон бора диаметром 140 мкм с шагом их расположения в заготовке $S_{вс}$ = 170 мкм, что обеспечивает получение волокнистого композита со средним значением расстояния между слоями волокон $S_{мс} \approx 138$ мкм;
- заготовки с использованием плазменно-напыленной матрицы из алюминиевого сплава АМг6 и волокон бора диаметром 140 мкм с шагом их расположения в заготовке $S_{вс}$ = 180 мкм, что позволяет обеспечить получение волокнистого композита со средним значением расстояния между слоями волокон $S_{мс} \approx 146$ мкм.

Несмотря на существующую разницу усредненных значений объемной доли волокон в волокнистых композитах, полученных из этих разных видов заготовок (65,6 % при фольговой и 58,6 % при плазменно-напыленной матрице), максимально достигаемые значения доли волокна в отдельных объемах этих материалов близки. Это получается из-за бóльших колебаний внутри слоевого и межслоевого шага расположения волокон в композите при использовании плазменно-напыленной матрицы.

Далее из заготовок с указанными выше параметрами нарезались карточки, которые собирались в пакеты по 15 слоев и прессовались в пресс-форме, препятствующей растеканию прессуемого пакета в направлении, перпендикулярном направлению оси волокон.

Температуру и давление прессования плазменно-напыленных заготовок выбирали исходя из условия полного уплотнения плазменно-напыленной матрицы (т.е. практически до полного исчезновения исходной пористости в плазменно-напыленном алюминиевом слое и заполнения зазоров между слоями заготовок), а режимы прессования пакета листовых фольговых заготовок назначали из условия полного заполнения алюминиевой матрицей межволоконного пространства. В соответствии с исследованиями [3] давление прессования пакетов из плазменно-напыленных и фольговых заготовок составляло 50 МПа при температуре 520 °С в течение 15 мин.

Затем от изготовленных по указанным режимам пластин ВКМ методом электроискровой резки в плоскости, перпендикулярной оси расположенных в композите волокон, отрезали образцы длиной 15 мм. Из этих образцов по поверхности реза изготовляли металлографические шлифы, на которых исследовали особенности характера взаимного расположения волокон в волокнистых композитах, полученных из плазменно-напыленных и фольговых заготовок. Фрагменты поперечного сечения волокнистого композита Al—B с плазменно-напыленной и фольговой матрицами показаны на рис. 2.

**Качественный анализ характера расположения волокон в композитах, полученных из разных типов листовых заготовок.** Изучение шлифов ВКМ Al—B позволяет сделать следующие выводы:

1. Фиксированный шаг расположения волокон, заданный в листовых заготовках, при изготовлении ВКМ нарушается в результате произвольного смещения каждого волокна вдоль и поперек образованного заготовкой слоя.

2. Расстояния между отдельными слоями волокон, характеризующие межслоевой шаг расположения волокон в композите, различны. Это можно рассматривать как "согласованное" смещение отдельных слоев волокон в направлении, перпендикулярном слоям, образованным листовыми заготовками.

3. На всех исследованных шлифах преобладает расположение волокон, близкое к гексагональному (см. рис. 2). На шлифах ВКМ, полученного с использованием заготовок с плазменно-напыленной матрицей (где наблюдаются значения $S_{мс}$ меньше и больше

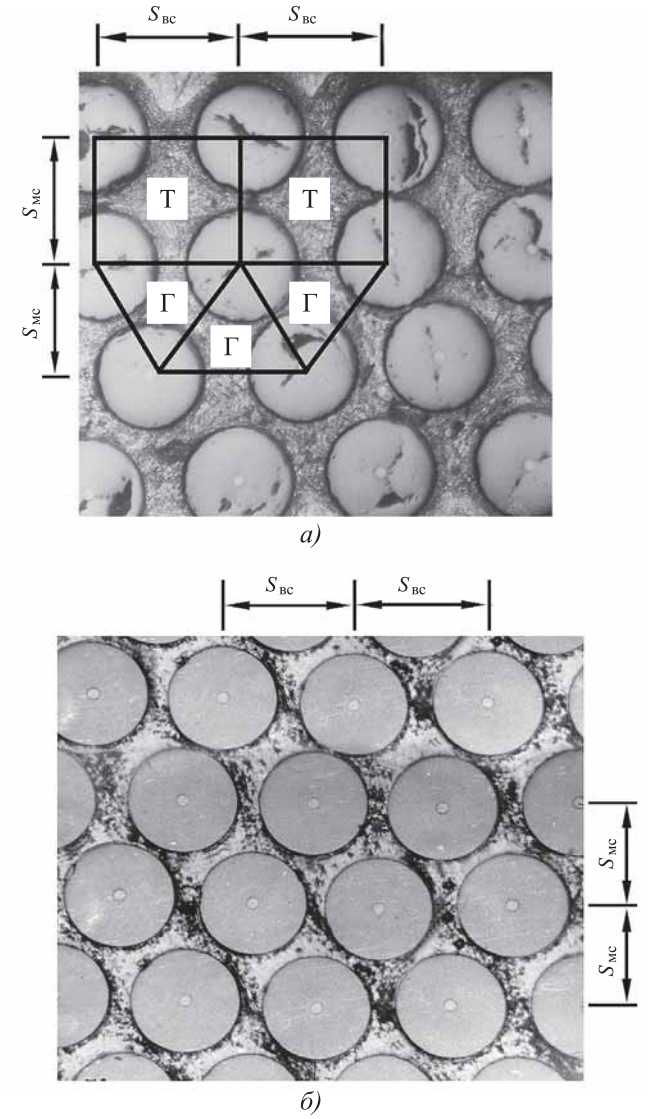



**Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения ВКМ Al—B с плазменно-напыленной (*а*) и фольговой (*б*) матрицами:**

Т, Г — элемент тетрагонального и гексагонального характера расположения волокон соответственно; $S_{вс}$, $S_{мс}$ — внутрислоевой и межслоевой шаг расположения волокон соответственно

диаметра волокна), помимо гексагонального встречается и тетрагональный характер расположения волокон (см. рис. 2, *а*). Это свидетельствует о том, что в композите присутствует "согласованное" (близкое по направлению и величине) смещение одного слоя волокон относительно другого близлежащего слоя волокон.

Таким образом, в процессе изготовления композита происходят четыре вида "случайного" смещения волокон от упорядоченного расположения в листовых заготовках:

1. Внутрислоевое смещение отдельных волокон $См_{вс}$ относительно их среднего шага расположения $\bar{S}_{вс}$. При этом текущий шаг расположения волокон в композите колеблется от минимального $S_{вс}^{min}$ до максимального $S_{вс}^{max}$ значения, подчиняющегося нормальному закону распределения с определенным значением среднеквадратичного отклонения $\sigma_{S_{вс}}$.

2. Смещение отдельных волокон перпендикулярно слою, образованному листовыми заготовками $См^f \perp сл$. Эти смещения также характеризуются определенным значением среднеквадратичного отклонения $\sigma_{См^f \perp сл}$ при нормальном законе их распределения.

3. "Согласованное" смещение волокон, находящихся в близлежащих слоях, относительно друг друга $ССм_{сл}$ в направлении, параллельном слоям, образованным листовыми заготовками. Этот вид смещения волокон подчиняется равномерному закону распределения.

4. Колебание межслоевого шага расположения волокон в композите $S_{мс}$ относительно его среднего значения $\bar{S}_{мс}$ от минимума $S_{мс}^{min}$ до максимума $S_{мс}^{max}$ при нормальном законе распределения и определенном значении среднеквадратичного отклонения $\sigma_{S_{мс}}$. Это смещение можно рассматривать как "согласованное" смещение слоев относительно друг друга в поперечном (перпендикулярном) направлении $ССм \perp сл$.

**Количественный анализ характера расположения волокон в композитах, полученных из разных типов заготовок.** Для математического описания характера расположения волокон в композитах необходимо определить координаты каждого волокна в поперечном сечении композита и провести их соответствующую обработку. С этой целью предложена следующая методика исследований изготовленных шлифов и обработки полученных результатов:

1. Каждому волокну на исследуемой поверхности шлифа присваивают индивидуальный индекс (*i*; *j*), исходя из слоя, в котором волокно находится (слои нумеровали от 0 до *i*-го значения), и порядкового номера данного волокна в *i*-м слое (волокна в слое нумеровали от 0 до *j*-го значения).

2. Измеряют *i*-е координаты каждого волокна относительно базовой линии (*X*), параллельной слоям волокон и расположенной ниже нулевого (нижнего) слоя волокон, и *j*-х координат относительно базовой линии (*Y*), расположенной левее центра самого левого волокна на исследуемой поверхности шлифа.

В результате формируется единый массив данных с координатами всех волокон.

3. Координаты волокон относительно линии "$X$" используют для расчета средних расстояний от базовой линии до каждого слоя волокон, усредненных расстояний между соседними слоями, а также величин и характера смещений каждого волокна от срединной линии каждого слоя, к которому это волокно принадлежит.

4. Координаты волокон относительно линии "$Y$" используют для определения расстояния между соседними волокнами, находящимися в каждом отдельном слое, образованном листовыми заготовками, для оценки среднего расстояния между волокнами в слоях, а также величины и характера смещений каждого волокна внутри слоя от усредненного расстояния между волокнами. При этом не учитывается возможное согласованное смещение близлежащих слоев волокон в композите относительно друг друга.

5. Согласованное смещение близлежащих слоев волокон в композите относительно друг друга оценивают по значениям внутрислоевого $S_{\text{вс}}$ и межслоевого $S_{\text{мс}}$ шагов расположения волокон в композите, а также минимального расстояния между поверхностями волокон $b_{\min}$.

Замеры, проведенные на исследуемых шлифах, показали, что минимальное расстояние между поверхностями волокон составляет 3 мкм для композита с плазменно-напыленной матрицей и 7 мкм для композита с фольговой матрицей.

Из геометрических соображений следует, что при $S_{\text{мс}} > (d_f + b_{\min}/2)$ максимально возможные смещения слоев волокон, образованных заготовками $\text{ССм}_{\text{сл}}^{\max}$ равны среднему шагу расположения волокон в слое $\bar{S}_{\text{вс}}$, а при $S_{\text{мс}} < (d_f + b_{\min}/2)$:

$$\text{ССм}_{\text{сл}}^{\max} = S_{\text{вс}} - 2\sqrt{\left(d_f + b_{\min}/2\right)^2 - S_{\text{мс}}^2}. \quad (2)$$

6. В качестве интегральной характеристики взаимного расположения волокон в композите используют значения: минимального $R_{\text{э}}^{\min}$, максимального $R_{\text{э}}^{\max}$ и среднего $R_{\text{э}}$ расстояний между их центрами близлежащих волокон, а также среднеквадратичного отклонения $\sigma_{R_{\text{э}}}$ расстояний между центрами этих волокон от его среднего значения. Близлежащими считаются 6 волокон — при характере их расположения, близком к гексагональному; 8 волокон — при характере расположения, близком к тетрагональному, и 7 волокон — при смешанном характере их расположения (см. рис. 2, *а*).

Экспериментальные данные, полученные на основании описанной выше методики, представлены в таблице.

**Сравнение характера расположения волокон в композитах, изготовленных из разных видов листовых заготовок.** Из экспериментальных данных, приведенных в таблице, следует, что композиты, изготовленные из листовых заготовок с плазменно-напыленной матрицей, по сравнению с композитами, изготовленными из листовых заготовок с фольговой матрицей, имеют:

- в 1,7 раза большее значение среднеквадратичного отклонения шага расположения волокон в слое $\sigma_{S_{\text{вс}}}$ от его среднего значения $\bar{S}_{\text{вс}}$;

**Параметры смещений отдельных волокон и их слоев в композитах, полученных из разных видов листовых заготовок, а также расстояний до близлежащих волокон**

| Вид матрицы листовой заготовки | Смещение отдельных волокон | | | | "Согласованное" смещение слоев | | | Параметры, характеризующие расположение близлежащих волокон | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | вдоль (внутри) слоя $\text{См}_{\text{вс}}^{f}$ | | перпендикулярно слою $\text{См}^{f} \perp \text{сл}$ | | вдоль слоя $\text{ССм}_{\text{сл}}$ | между слоями $\text{ССм} \perp \text{сл}$ | | | |
| | $\frac{S_{\text{вс}}^{\min} \ldots S_{\text{вс}}^{\max}}{\bar{S}_{\text{вс}}}$ | $\sigma_{S_{\text{вс}}}$ | $\text{См}^{f} \perp \text{сл}$ | $\sigma_{\text{См}^{f} \perp \text{сл}}$ | $\text{ССм}_{\text{сл}}$ | $\frac{S_{\text{мс}}^{\min} \ldots S_{\text{мс}}^{\max}}{\bar{S}_{\text{мс}}}$ | $\sigma_{S_{\text{мс}}}$ | $\frac{R_{\text{э}}^{\min} \ldots R_{\text{э}}^{\max}}{\bar{R}_{\text{э}}}$ | $\sigma_{R_{\text{э}}}$ |
| | мкм | — | мкм | — | мкм | мкм | — | мкм | — |
| Фольговая | $\frac{160\ldots184}{177}$ | 5,3 | ±2,5 | 1,2 | 40...62 | $\frac{135\ldots140}{138}$ | 1,7 | $\frac{146,7\ldots185,3}{165,9}$ | 8,8 |
| Напыленная | $\frac{167\ldots202}{182}$ | 8,8 | ±6,5 | 6,3 | 52...180 | $\frac{138,5\ldots152}{145,9}$ | 5,9 | $\frac{142,7\ldots253,8}{182}$ | 26,4 |

- в 3,5 раза большее значение среднеквадратичного отклонения межслоевого шага расположения волокон $\sigma_{S_{мс}}$ от его среднего значения $\bar{S}_{мс}$;
- в 5,3 раза большее значение среднеквадратичного отклонения отдельных волокон в перпендикулярном направлении относительно срединной линии слоя $\sigma_{См^f \perp сл}$;
- в 2,9 раза большее значение максимально возможного согласованного смещения близлежащих слоев волокон относительно друг друга;
- в 3 раза большее значение среднеквадратичного отклонения расстояния до близлежащих волокон $\sigma_{R_э}$ относительно его среднего значения $\bar{R}_э$.

Следовательно, в волокнистых композитах, изготовленных из листовых заготовок с фольговой матрицей, наблюдается существенно более равномерное расположение волокон. В работе [1] показано, что это способствует достижению больших значений прочности при более узком интервале их разброса. Однако в настоящее время основным видом листовых заготовок для изготовления волокнистых композитов являются заготовки с плазменно-напыленной матрицей, так как применение плазменного напыления упрощает технологию получения листовых заготовок. Замена листовых заготовок с плазменно-напыленной матрицей на заготовки с фольговой матрицей должна способствовать достижению у получаемых композитов более высоких и стабильных прочностных характеристик.

**Заключение.** Волокнистые композиты, изготовленные из листовых заготовок с фольговой матрицей, имеют структуру с более равномерным расположением волокон, чем композитные материалы из заготовок с плазменно-напыленной матрицей. Так как более равномерная структура обеспечивает достижение более высоких и стабильных прочностных характеристик, то для получения ответственных изделий из волокнистых композитов целесообразно использовать этот вид листовых заготовок.

Предложенная методика математического описания характера расположения волокон в композитах, полученных из разных видов листовых заготовок, является важным элементом при создании цифровых технологий получения изделий из волокнистых композитов с требуемыми свойствами [1, 4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Овчинский А.С.** Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро- и макромеханизмов на ЭВМ. М.: Наука, 1988. 278 с.

2. **Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П.** Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов. М.: Металлургия, 1982. 112 с.

3. **Кочешков И.В.** Влияние режимов прессования и отжига на механические свойства плазменно-напыленного алюминиевого сплава АМг6 // Производство проката. 2012. № 9. С. 32—37.

4. **Кочешков И.В.** Структурный подход в понимании сущности композиционных материалов и разработке процессов получения композитов с требуемыми свойствами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 10. С. 3—9.

*Игорь Владимирович Кочешков, канд. техн. наук,*
kiv5104@yandex.ru

# Памяти
# Анатолия Сергеевича Матвеева
## (27.05.1948—13.06.2018)

**13 июня 2018 г. скончался д-р техн. наук, профессор кафедры "Мехатронные системы и процессы формообразования" Рыбинского авиационного технического университета имени П.А. Соловьева Анатолий Сергеевич Матвеев.**

Матвеев А.С. родился 27 мая 1948 г. в с. Княжево Угличского района Ярославской области. В 1967 г. окончил Рыбинский авиационный техникум, а в 1973 г. — Рыбинский авиационный институт по той же специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструмент".

С 1967 по 2008 г. А.С. Матвеев работал в ПАО "НПО "САТУРН" (г. Рыбинск) в должностях бригадира-наладчика (1967—1968 гг.), конструктора отдела главного технолога (1968—1972 гг.), инженера-исследователя экспериментально-технологического цеха (1972—1985 гг.), начальника бюро вальцевания лопаток газотурбинных двигателей (1985—1991 гг.), начальника бюро обработки металлов давлением опытно-технологической лаборатории (с 1991 по 2008 г.).

В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Разработка теории, процессов и оборудования для изготовления крутоизогнутых деталей из трубных заготовок" в Московском автомеханическом институте МАМИ. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Разработка метода проектирования технологических процессов и оборудования для гидроштамповки крутоизогнутых и Т-образных деталей из трубных заготовок" в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

При работе в ПАО "НПО "Сатурн" под техническим руководством и при непосредственном участии А.С. Матвеева разработаны и внедрены в производство ряд прогрессивных технологических процессов: оригинальный способ получения высокоточных заготовок лопаток для холодной вальцовки лопаток газотурбинных двигателей, холодной вальцовки пера лопаток ротора компрессора серийно изготовляемых авиадвигателей, что позволило снизить себестоимость и сократить трудоемкость изготовления деталей авиадвигателей.

Технические разработки А.С. Матвеева защищены 70 авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ, 7 патентами иностранных государств (США, Великобритания, Италия, Япония, Германия, Швеция, Франция).

За разработку и внедрение в промышленность новых технологических процессов и оборудования Анатолий Сергеевич был награжден серебряной медалью и знаком "Изобретатель СССР".

А.С. Матвеев — автор более 80 научных трудов, монографий, учебных пособий и справочников, в числе которых "Справочник кузнеца" (2011 г.), "Гидроштамповка труб, наноструктурирование материалов" (2012 г.), учебное пособие "Технологическое обеспечение процессов гидроштамповки трубных заготовок" (2017 г.). Анатолий Сергеевич был автором журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

С 2008 г. Анатолий Сергеевич являлся профессором кафедры "Мехатронные системы и процессы формообразования" Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева, членом двух диссертационных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций.

В 2002 г. решением жюри Международного Союза научных и инженерных общественных объединений Всероссийского конкурса "Инженер года — 2002" Анатолию Сергеевичу присвоено звание лауреата конкурса по номинации "Машиностроение" с вручением сертификата "Профессиональный инженер России", диплома лауреата конкурса "Инженер года" и памятной медали. В 2008 г. он награжден почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики РФ.

В 2011 г. разработка А.С. Матвеева "Способ получения нанокристаллической структуры материала в трубных заготовках", представленная на международном салоне изобретений "CONCOURS LEPINE" (Франция), отмечена дипломом и серебряной медалью.

В 2010 г. А.С. Матвееву присвоено почетное звание "Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации" за заслуги в научно-педагогической деятельности и вклад в подготовку квалифицированных специалистов.

Анатолия Сергеевича Матвеева отличали высочайший профессионализм, трудолюбие, порядочность и высокие человеческие качества.

Светлая память об Анатолии Сергеевиче навсегда останется в сердцах друзей, коллег и учеников!

*Коллектив редакции и редакционный совет журнала выражают глубокие соболезнования родным и близким Анатолия Сергеевича.*

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

**В редакцию представляются:**

1. **Статья в электронном виде** – файл (с расширением .doc) с набором текста (шрифт Times New Roman) Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц, набранных 12-м кеглем через полтора интервала.
   Все страницы в статье должны быть пронумерованы.
2. **Сведения об авторах:**
   - фамилии, имена и отчества авторов;
   - ученая степень (если есть);
   - место работы;
   - контактный телефон, e-mail, почтовый адрес;
   - страна (*для иностранных авторов).*

*Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.*

3. **Обязательно представлять на русском и английском языках:**
   - фамилии и инициалы авторов;
   - название статьи;
   - аннотацию к статье;
   - ключевые слова

**Требования к оформлению статьи**

**1. На первой странице указывать УДК** (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации http://teacode.com/online/udc/).

**2. Сведения о грантах необходимо давать ссылкой, обозначенной звездочкой (*), на первой странице.**

**3. Статья должна быть структурирована:**
   - *Введение*, содержащее реферативное изложение постановки задачи и возможного применения полученных результатов, актуальность рассматриваемой проблемы.
   - *Основная часть* должна иметь несколько внутренних разделов и содержать формализованную постановку задачи и предлагаемый метод ее решения; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими; содержать пример, подтверждающий работоспособность и эффективность предложенного решения.
   - *Заключение*, содержащее обсуждение полученных результатов, рекомендации.

**4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.**

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

**5. После текста должен быть приведен библиографический список,** составленный по порядку ссылок в тексте и оформленный по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать 10 наименований.

**6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg и разрешением 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.**

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуночную подпись. Подрисуночные подписи следует представлять отдельным списком в виде файла Microsoft Word.

**Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.**

*В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редакционного совета без представления рецензии.*

# 65 лет

## Владимиру Ивановичу Котенку,

**заместителю генерального директора**
**АО АХК "ВНИИМЕТМАШ",**
**доктору технических наук**

Владимир Иванович Котенок родился 30 августа 1953 г. в Минске.

В 1970 г. В.И. Котенок поступил в Гомельский филиал Белорусского политехнического института, а в 1975 г. с отличием окончил Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения (сейчас Донской государственный технический университет) по специальности "Технология машиностроения. Металлорежущие станки и инструменты".

В 1975 г. после окончания института работал инженером в институте "НИИТАВТОПРОМ" (г. Москва).

С 1978 г. Владимир Иванович работает во Всероссийском научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте металлургического машиностроения имени академика Целикова (ВНИИМЕТМАШ).

В 1987 г. после обучения в аспирантуре ВНИИМЕТМАШ В.И. Котенок защитил кандидатскую диссертацию, а в 2006 г. — докторскую диссертацию.

Во ВНИИМЕТМАШ В.И. Котенок занимал должности конструктора, заведующего лабораторией, начальника отдела. В настоящее время Владимир Иванович — заместитель генерального директора ВНИИМЕТМАШ по научно-исследовательским и проектно-конструкторским работам.

В.И. Котенок — один из ведущих мировых специалистов в области прокатки деталей. Наибольшую известность он получил как создатель и разработчик современной высокоэффективной технологии винтовой прокатки шаров и анкерной резьбы на трубах и прокатных станов-автоматов, реализующих эти технологии. Созданное им деталепрокатное оборудование работает на десятках предприятий в России, Украине, Казахстане, Узбекистане, США, Германии, Индии, Турции, Монголии и Мексике. Им опубликовано более 45 научных статей и получено 14 авторских свидетельств и патентов. Свыше десяти его работ отмечены дипломами и медалями ВДНХ и выставки ЭКСПО.

Владимир Иванович награжден медалью "В память 850-летия Москвы, в 2004 г. ему присвоено звание "Почетный машиностроитель".

В.И. Котенок является членом редакционного совета журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

**Коллектив редакции и редакционный совет журнала поздравляют**
**Владимира Ивановича с юбилеем! Желаем здоровья, благополучия**
**и дальнейшей плодотворной деятельности на благо России!**

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 13.06.2018. Подписано в печать 30.07.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.