

Журнал входит в базы данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

ИЗДАЕТСЯ С ОКТЯБРЯ 1970 ГОДА

**Редакционный совет**

**Председатель редсовета:**

**Рудской А.И.** – член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, проф., ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Санкт-Петербург, Россия.

**Члены редсовета:**

**Найзабеков А.Б.** – академик, д-р техн. наук, проф., ректор Рудненского индустриального института, Казахстан;

**Кнапински М.** – проф., д-р наук, заместитель декана по науке факультета инженерии процессов, материалов и прикладной физики, Ченстоховский Технологический Университет, Польша;

**Каллиари И.** – доцент, Школа Инженерии, Университет г. Падуя, Италия;

**Салганик В.М.** – проф., д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;

**Тулупов О.Н.** – проф., д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

**Гун И.Г.** – генеральный директор ЗАО НПО «Белмаг», руководитель НУК «Технологии и конструкции автокомпонентов» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

**Главный редактор:**

**Чукин М.В.** – первый проректор-проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия,

**Зам. главного редактора:**

**Полякова М.А.** – доц., канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; Магнитогорск, Россия.

**Пивоварова К.Г.** – доц., канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Технический редактор:**

**Джерыкина Л.В.**

© ФГБОУ ВО «МГТУ ИМ. Г.И. НОСОВА», 2016

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38)  
16+, в соответствии с Федеральным Законом №436-ФЗ от 29.12.10.

**Адрес редакции:**

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38

Тел.: (3519) 29-85-26. Факс (3519) 29-85-26

E-mail: [m.polyakova-64@mail.ru](mailto:m.polyakova-64@mail.ru); [m.chukin@mail.ru](mailto:m.chukin@mail.ru)

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова,

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова.

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38

Выход в свет 25.05.16. Заказ \_ . Тираж 500 экз.

Цена свободная

The magazine is included in databases of the Russian Science Citation Index (RSCI). Internet versions take place on a network resource of Scientific Electronic Library on the Internet.

PUBLISHED SINCE OCTOBER, 1970

**Editorial Board Memberscommittee**

**Chairman:**

**Rudskoy A.I.** - corresponding member of Russian Academy of Science, D.Sc., Prof., rector of the Saint-Petersburg state polytechnical university.

**Honorary Board Members:**

**Nayzabekov A.B.** – Academician, D.Sc. in engineering, prof, Rector of Rudny Industrial Institute, Kazakhstan/

**Knapinski M.** – Prof., Dr. of sciences, vice dean on science of faculty of processes engineering, materials and applied physics, Chentokhovskiy Technological University, Poland.

**Calliari I.** - associate Prof., Engineering School, University Padua, Italy.

**Salganik V.M.** - D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Tulupov O.N.** – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University

**Gun I.G.** - D.Sc., Prof., director general of CJSC «Belmag», chief of SEC «Technologies and constructions of autoparts», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Editor-in-chief:**

**Chukin M.V.** – D.Sc., Prof., First Vice-Rector-Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Deputy chief editor:**

**Polyakova M.A.** – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Pivovarova K.G.** – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Technical Editor:**

**Dgeryjkina L.V.**

© Federal Budgetary Institution of Higher Education  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016

Founder - Nosov Magnitogorsk State Technical University  
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, 455000, Chelyabinsk Region)  
16+, in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10.

**Editorship address:**

455000, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38  
Phone number: (3519) 29-85-26. Fax (3519) 29-85-26  
E-mail: [m.polyakova-64@mail.ru](mailto:m.polyakova-64@mail.ru); [m.chukin@mail.ru](mailto:m.chukin@mail.ru)

Prepared for publication by the NMSTU publishing center,  
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.  
Printed by the NMSTU printing section, 38, pr. Lenina, city  
of Magnitogorsk 455000, Russia.  
Publication date 25.05.16. Order \_\_\_\_\_. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Паршиков Р.А., Золотов А.М., Рудской А.И.</b> Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния металла в процессах интенсивной пластической деформации.....	5
<b>Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Арбуз А.С.</b> Моделирование совмещенного процесса «винтовая прокатка-прессование» в программном комплексе Simufact.Forming.....	14
<b>Харитонов В.А., Столяров А.Ю., Лысенин А.В.</b> Упрочняющая термическая обработка проволоки для армирования бортовых колец шин.....	22
<b>Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А.</b> Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости.....	28
<b>Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Лецев И.В.</b> Разработка инновационных процессов обработки металлов давлением на основе интенсивной знакопеременной деформации.....	35
<b>Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.</b> Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения.....	43
<b>Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И., Irene Calliari</b> Влияние лантана на анодное поведение сплава Al +6 % Li.....	49
<b>Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Лаптева Т.А.</b> Формирование геометрии контактной поверхности проволок при пластическом обжатии пряди.....	53
<b>Гарстка Т., Дья Х., Кавалек А., Кочуркевич Б.</b> Экспериментальный анализ влияния изменения температуры деформируемой полосы на момент в процессе прокатки катанки.....	59
<b>Файзулина Р.В.</b> Тенденции рынка потребительской жестяной тары и упаковки в России.....	65
<b>Иващенко Е.В., Лимарев А.С.</b> Повышение качества высокопрочных болтов путем совершенствования межоперационного транспортера изделий, изготавливаемых в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».....	67
<b>Гарбер Э.А.</b> Развитие методов моделирования энергосиловых и деформационных параметров широкополосных станков (научный обзор).....	72
<b>Зайдес С.А.</b> Становление Магнитогорской школы обработки металлов давлением в восточной Сибири (научный обзор)	78
<b>Кухарь В.Д., Ларин С.Н., Пасынков А.А.</b> Становление и развитие кафедры «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета (научный обзор).....	84
<b>Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В.</b> Совершенствование и оптимизация технологии производства длинномерных композиционных сверхпроводящих материалов для магнитных систем (научный обзор).....	91
Рефераты.....	98
Reports.....	103
Сведения об авторах.....	107
The information about the authors.....	110

## CONTENTS

<b>Parshikov R.A., Zolotov A.M., Rudskoy A.I.</b> Analysis of stress-strain state inhomogeneity of metal during severe plastic deformation.....	5
<b>Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Arbutov A.S.</b> Simulation of the combined process "helical rolling-pressing" in the software package Simufact. Forming.....	14
<b>Kharitonov V.A., Stolyrov A.U., Lysenin A.V.</b> Wire hardening heat treatment for reinforcement bead rings of tires.....	22
<b>Chukin M.V., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A.</b> The definition of mechanical properties by hardness of high-strength and ultra-high-strength steels.....	28
<b>Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., Leshev I.V.</b> Development of innovative processes metal forming through intensive alternating strain.....	35
<b>Kharitonov V.A., Gallyamov D.E.</b> Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения .....	43
<b>Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Norova M.T., Ganieva N.I., Irene Calliari.</b> Influence lanthanum on the anodic behavior of alloys Al+6%Li.....	49
<b>Haritonov V.A., Ivantsov A.B., Lapteva T.A.</b> The formation of the geometry contact surface wires during plastic compression of the strand.....	53
<b>Garstka T., Dyja H., Kawalek A., Koczurkiewicz B.</b> Experimental analysis of the deformed metal strip temperature influence during its changing on the wire rod moment at rolling.....	59
<b>Faizulina R.V.</b> Market trends of tinplate canning packaging in Russia.....	65
<b>Ivashenko E.V., Limarev A.S.</b> Improving the quality of high-strength bolts by improving inter-operation of conveyor products manufactured in conditions of MMK-METIZ.....	67
<b>Garber E.A.</b> Development of methods of energy-power and deformation parameters of the wide strips rolling mills (scientific review).....	72
<b>Zaydes S.A.</b> Magnitogorsk scientific school formation on Metal processing in the eastern Siberia (scientific review).....	78
<b>Kukhar V.D., Larin S.N., Pasyukov A.A.</b> Formation and development department "Mechanics plastic deformation" Tula State University (scientific review).....	84
<b>Kolmogorov G.L., Chernova T.V.</b> Perfecting and optimization of production technology of long-measuring composite superconducting materials for magnetic systems (scientific review).....	91
Рефераты.....	98
Reports.....	103
Сведения об авторах.....	107
The information about the authors.....	110

## АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Паршиков Р.А., Золотов А.М., Рудской А.И.

ФГБАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

### Введение

В настоящее время теоретический и практический интерес представляет изучение особенностей структурообразования в металлах при больших пластических деформациях, что открывает значительные перспективы для создания субмикроструктурных (СМК) и наноструктурированных (НС) материалов [1]. Появились новые процессы обработки давлением, основной целью которых является накопление деформации в заготовках без значительного изменения их формы, что позволяет при многократном повторении процесса накопить в заготовках значительные пластические деформации [1-5]. При описании таких процессов в литературе используется термин интенсивная пластическая деформация (ИПД).

Цель данного исследования – сравнить методы ИПД, которые, с точки зрения реализации, являются наиболее простыми для получения объемных СМК и НС. К таким методам можно отнести равноканальное угловое прессование (РКУ-прессование) и 2D-ковку. Сравнительный анализ был проведен с использованием методов компьютерного моделирования, а также натурального эксперимента.

На **рис. 1, а** представлена схема процесса РКУ-прессования. Деформация металлической заготовки осуществляется в матрице, которая содержит два канала одинакового поперечного сечения и пересекающихся под углом  $2\Phi$ . В результате такой обработки заготовка подвергается ИПД, при этом форма ее поперечного сечения практически не изменяется, что позволяет повторять процесс многократно. С увеличением количества проходов происходит значительное измельчение структуры обрабатываемого материала.

Процессыковки в настоящее время широко распространены в промышленном производстве. На практике 2D-ковку (**рис. 1, б**) можно осуществить на комплексе для физического моделирования деформационных процессов Gleeble System с помощью модуля многоосевой деформации MAX-Srtain.

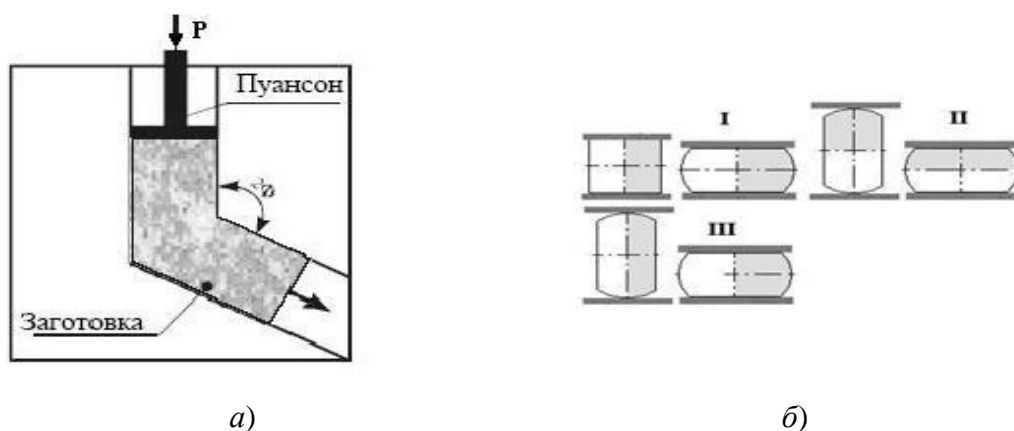


Рис. 1. Схемы анализируемых процессов ИПД:  
а) РКУ-прессование; б) 2D-ковка

Поскольку в основе этих процессов лежит принцип накопления деформации, то одним из критериев, по которому производилось сравнение методов, был выбран параметр равномерности величины накопленной деформации в объеме заготовки.

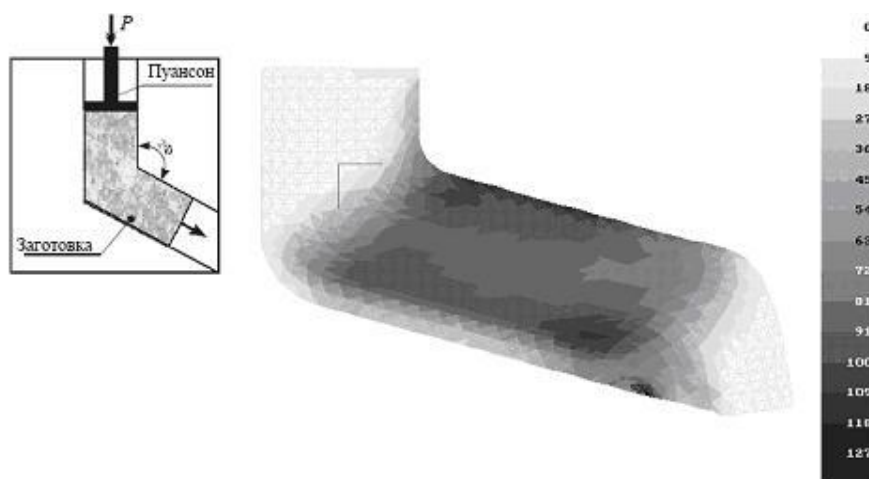
Известно, что пластическая деформация в металле сопровождается снижением ресурса пластичности [6-7]. При этом накопление поврежденности в металле в исследуемых процессах зависит от величины накопленной пластической деформации, вида напряженного состояния в различных частях заготовки, а также от направления формообразования заготовки при многократном повторении процесса. По этой причине еще одним немаловажным для такого рода процессов критерием служит коэффициент жесткости напряженного состояния  $k = \sigma_0 / \sigma_i$ , т.е. отношение величины гидростатического давления к величине интенсивности напряжений.

### Конечно-элементный анализ

Математическое моделирование выбранных процессов проводилось с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Были приняты следующие модельные представления: модель материала – упругопластическое тело, модель деформирования – плоская деформация. Условия трения в местах контакта деформируемого материала с инструментом в обоих случаях описывались путем задания коэффициента трения  $\mu = 0,2$ . Предполагается также, что рассматриваемые процессы проводятся при комнатной температуре. В качестве модельного материала использовался технический алюминий.

Моделирование процесса РКУ-прессования проводилось для канала, имеющего один поворот и следующую геометрию: угол пересечения входной и выходной частей канала –  $2\Phi = 105^\circ$ ; внешний радиус сопряжения –  $R = 10$  мм; внутренний радиус сопряжения –  $r = 5$  мм; ширина прямолинейных участков –  $b = 20$  мм.

На **рис. 2** представлен характер распределения интенсивности накопленной деформации в продольной плоскости канала после одного прохода.

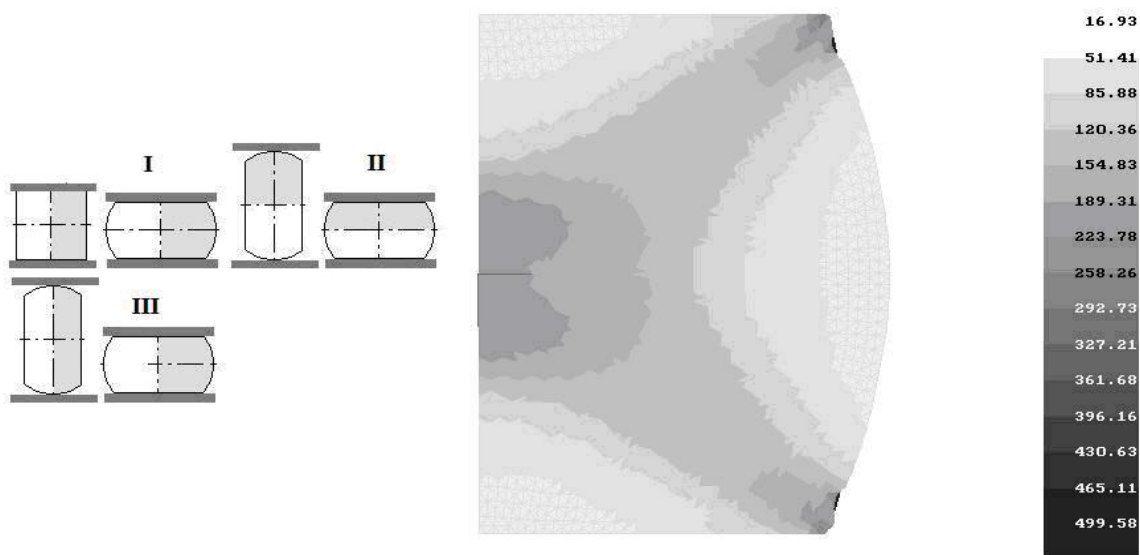


**Рис. 2. Распределение интенсивности накопленных деформаций в продольном сечении заготовки после однократного деформирования при РКУ-прессовании**

Процесс 2D-ковки в силу симметрии заготовки рассматривался для  $1/2$  ее части (см. **рис. 1, б**, показан серым цветом). Численный анализ проводился в три стадии. На первой стадии заготовка деформируется между бойками вдоль одной оси со степенью деформации  $\epsilon = 20$  %. Затем она поворачивается на  $90^\circ$  против часовой стрелки и деформируется вдоль

другой оси:  $\varepsilon = 40\%$ . На третьей стадии заготовка поворачивается на  $90^\circ$  по часовой стрелке и деформируется снова со степенью деформации  $\varepsilon = 40\%$ .

На **рис. 3** показана форма  $\frac{1}{2}$  части заготовки после трех стадий деформирования, а также распределение интенсивности накопленных деформаций в ее поперечном сечении.



**Рис. 3. Распределение интенсивности накопленных деформаций в поперечном сечении заготовки после ее трехкратного деформирования в процессе 2D-ковки**

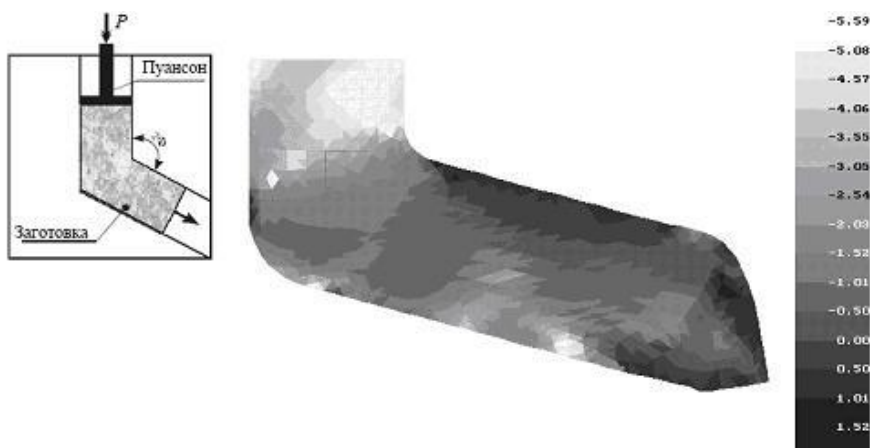
Из рассмотрения полей распределения накопленной деформации в материале следует, что наибольшей равномерностью по этому критерию обладает РКУ-прессование (см. **рис. 2**). Для процесса 2D-ковки зона наиболее ИПД располагается в центре заготовки и распространяется к углам. В результате в заготовке существуют слабо проработанные области (под бойками и на боковых свободных поверхностях). Причем увеличение количества циклов обработки не позволяет полностью избавиться от выявленной неравномерности, что в конечном итоге может существенным образом отразиться на свойствах готового изделия.

Известно, что в области отрицательных значений величины гидростатического давления ( $k < 0$ ), пластичность материала значительно выше, в сравнении с условиями положительных значений этой величины ( $k > 0$ ). Поэтому наиболее опасными, с точки зрения зарождения и роста микротрещин, являются те области обрабатываемого материала, которые характеризуются положительными значениями коэффициента жесткости напряженного состояния  $k$ .

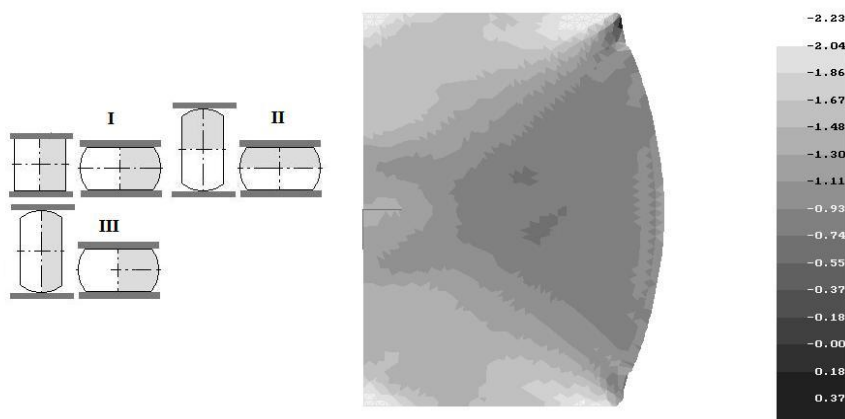
На **рис. 4 и 5** представлены распределения показателя жесткости напряженного состояния  $k$  для анализируемых процессов.

Для процесса РКУ-прессования в деформируемой заготовке характерно появление области, прилегающей к верхней стенке выходного канала, где значения коэффициента  $k$  больше нуля ( $k_{\min} = 1,525$ ). Отмеченная смена знака в данном случае объясняется немонотонностью процесса деформирования вдоль наружной стенки канала: гидростатические напряжения при переходе через очаг деформации меняют знак. Прилегающие к внутренней стенке слои материала, находясь во входном канале, испытывают сжатие, а в выходном канале – растяжение. В случае обработки малопластичного материала возникающие растягивающие напряжения могут стать причиной образования несплошностей на его поверхности.

При 2D-ковке показатель жесткости напряженного состояния  $k$  имеет положительные значения в углах заготовки, что может привести к нарушению сплошности материала в этих зонах.



**Рис. 4. Распределение показателя жесткости напряженного состояния  $k$  в продольном сечении заготовки после однократного деформирования при РКУ-прессовании**



**Рис. 5. Распределение показателя жесткости напряженного состояния  $k$  в поперечном сечении заготовки после ее трехкратного деформирования в процессе 2D-ковки**

## Экспериментальные исследования

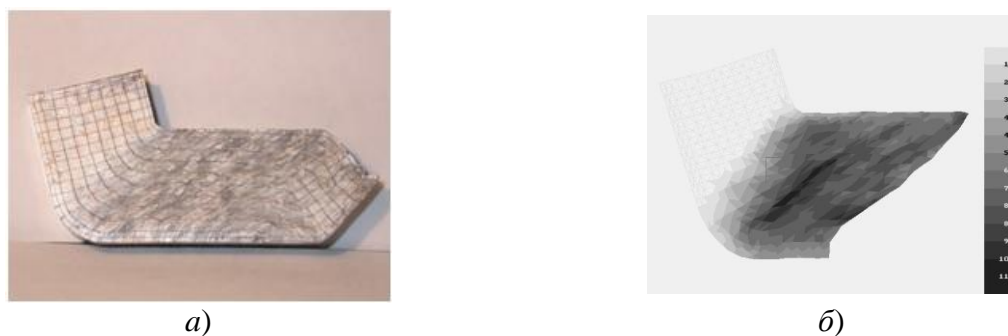
### *РКУ-прессование*

По данным результатов компьютерного моделирования процесса РКУ-прессования была изготовлена опытная оснастка [8]. Для экспериментального исследования характера течения металла в процессе прессования использовался метод координатной сетки. Аллюминиевые образцы состояли из двух половинок с размерами 10×20×65 мм. На внутренней стороне



каждой половинки лазерным маркером была нанесена сетка. В двух крайних слоях размер ячейки составлял 1×2 мм, в остальной части образца - 2×2 мм. Таким образом, экспериментальная сетка полностью соответствовала сетке конечных элементов, используемой при моделировании процесса РКУ-прессования алюминия.

На **рис. 6** показана заготовка с деформированной сеткой после РКУ-прессования. Для определения координат узлов, лежащих на пересечении линий деформированной сетки, она переводилась в электронный вид. По полученным координатам узлов формировалась экспериментальная сетка конечных элементов. Ее дальнейшая обработка производилась по методике, принятой в МКЭ с использованием функций формы.



**Рис. 6. Внешний вид образца с деформированной сеткой, полученного РКУ-прессованием (а) и распределение интенсивности накопленных деформаций для экспериментальной сетки конечных элементов (б)**

На **рис. 6, б** представлено распределение интенсивности накопленных деформаций вокруг очага деформации. Передняя часть заготовки не бралась во внимание, ввиду сложного характера течения металла при неустановившемся процессе деформирования. Сравнивая **рис. 2 и 6**, можно видеть, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом. Небольшое отличие в значениях накопленной деформации может быть объяснено разными условиями трения при моделировании процесса и экспериментальном его проведении.

#### ***Физическое моделирование процесса 2D-ковки на комплексе GLEEBLE SYSTEM 3800***

Для имитации процессов горячей деформации, используемых в металлургических и машиностроительных технологиях фирмой Dynamic Systems, Inc. (США) изготавливаются установки Gleeble System, из которых наиболее совершенной на сегодняшний день является Gleeble 3800. Для реализации различных схем деформирования комплекс Gleeble 3800 предусматривает до четырех сменных модулей. В частности, модуль многоосевой деформации MAXStrain разработан для отработки технологий получения методами пластической деформации НС материалов. Деформация в данном модуле осуществляется между двумя бойками.

Основное отличие данного модуля заключается в возможности чередовать деформацию в двух взаимно перпендикулярных поперечных к оси направлениях путем вращения образца на 90° относительно его продольной оси по часовой стрелке или против. Вращение образца осуществляется вместе с захватами. Скорость поворота позволяет производить деформации с минимальной паузой около 0,5 сек.

Внешний вид камеры с образцом в исходном состоянии и бойками для многократной деформации представлен на **рис. 7**.

Особенность работы модуля MaxStrain заключается в том, что при проведении испытаний по двухосной деформации задается величина перемещения бойков, то есть величина абсолютного обжатия рабочей части образца. Определить величину деформации непосредственно в ходе процесса после каждого удара можно только косвенным методом (расчетным), при условии сохранения плоской схемы деформирования (отсутствие осевой деформации в образце). Длина рабочей части образца вдоль оси, в соответствии с рекомендациями производителя, должна быть больше ширины рабочей части бойка примерно на 2 мм. В связи с этим, при осадке в зазор между бойком и боковой стенкой рабочей части заготовки при каждом ударе вытесняется часть металла из рабочей зоны. В результате на боковых стенках рабочей зоны образуются наплывы металла (**рис. 8**).



**Рис. 7. Внешний вид камеры с образцом и бойками модуля MAXStrain**



**Рис. 8. Наплывы металла на границе рабочей части образца после нескольких циклов осадки**

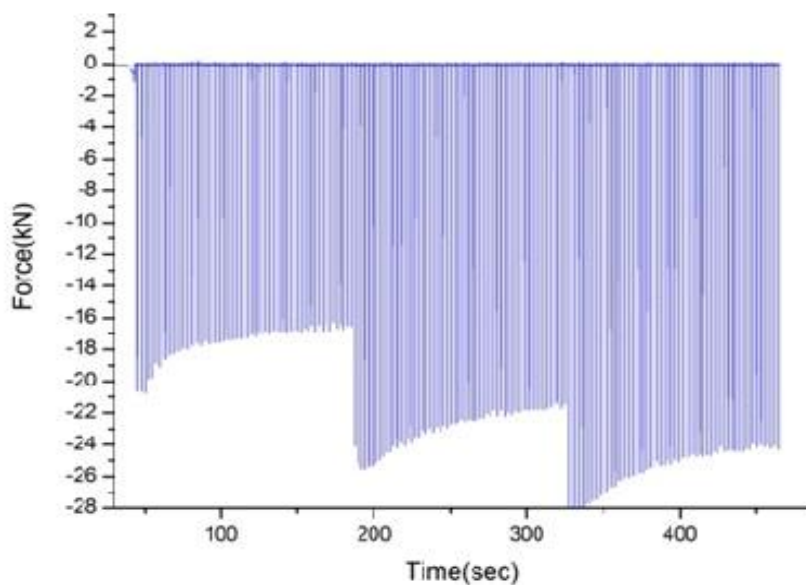
Из-за этого явления размеры поперечного сечения рабочей части образца в процессе испытаний уменьшаются. Если учесть, что абсолютное обжатие - величина постоянная и задается перед этапом, то степень деформации при осадке после каждого удара будет уменьшаться. На первых циклах испытаний этот процесс происходит достаточно интенсивно. По мере заполнения зазора между рабочей частью бойка и боковой стенкой металлом интенсивность его постепенно затухает.

Экспериментальные исследования на модуле MAXStrain проводились с алюминиевыми образцами при комнатной температуре. Деформация образцов проходила в три этапа. Исходная заготовка с размерами поперечного сечения в рабочей части 11x11 мм деформировалась до размеров сечения 9x9 мм. На втором этапе размер сечения уменьшался до 7,4x7,4 мм. Конечный размер поперечного сечения образца после третьего этапа – 6x6 мм. Каждый этап состоял из 60 циклов. Под одним циклом подразумеваются два удара бойками с последующим поворотом образца. На **рис. 9** представлены экспериментальные результаты работы модуля MAXStrain.

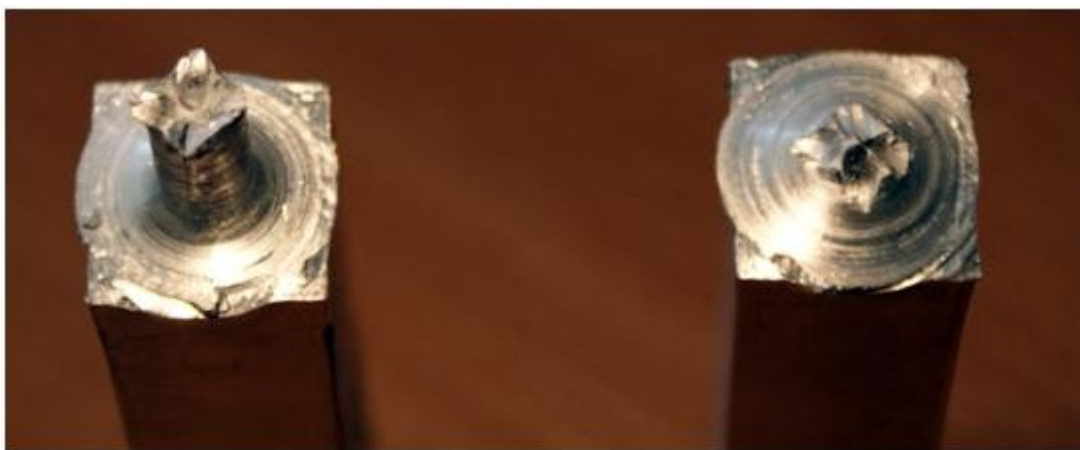
Из **рис. 9** видно, что при переходе от одной стадии к другой происходит упрочнение материала. В то же время на протяжении каждой стадии величина усилия снижается. Данный факт объясняется вытеснением металла из очага деформации (см. **рис. 8**). Исходя из результатов эксперимента, также можно заключить, что наиболее интенсивно процесс вытеснения идет на первых циклах обработки.

Алюминиевые образцы после проведения эксперимента на комплексе Gleeble 3800 и механической обработки были подвергнуты испытаниям на растяжение с последующим ана-

лизом структуры. Испытания на растяжение проводились на испытательной машине фирмы «Zwick/Roell» с максимальным усилием 5 тонн. После ИПД в режиме 2D-ковки предел прочности алюминия увеличился в 5 раз, однако при этом произошло резкое снижение пластичности материала. Неравномерность накопленных больших деформаций в объеме заготовки привела к характерной структуре материала и соответствующему этой структуре разрушению, как показано на **рис. 10 и 11**.



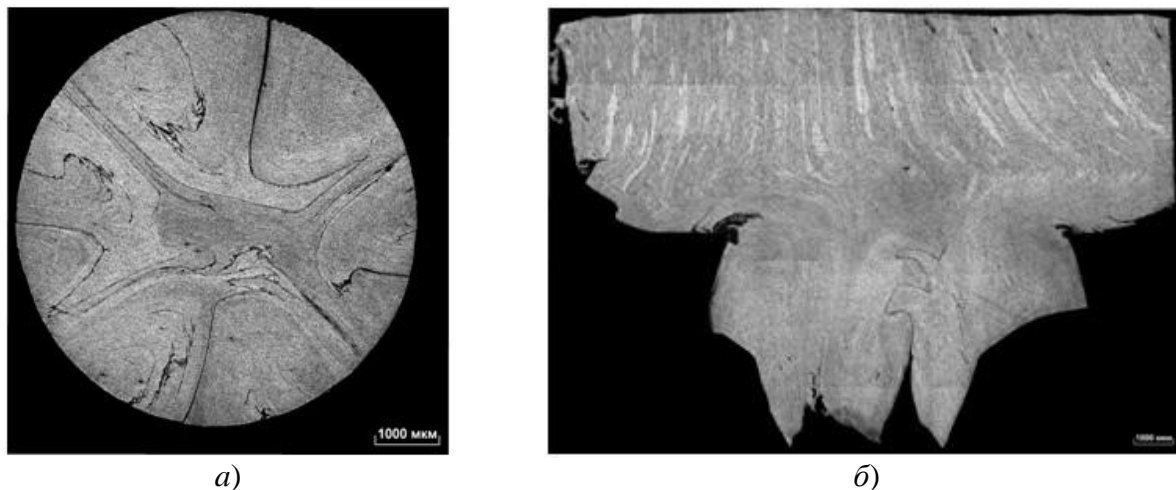
**Рис. 9.** Зависимость усилия деформирования от времени работы модуля MAXStrain



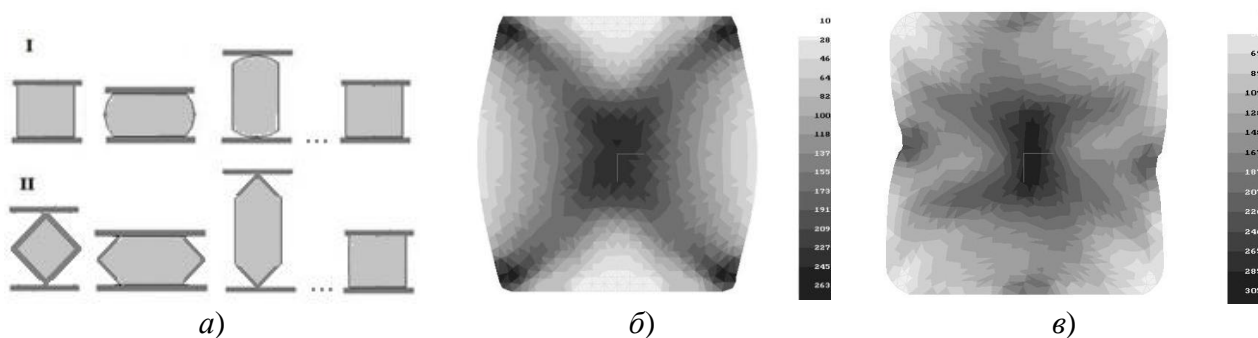
**Рис. 10.** Внешний вид образца после испытания на растяжение

Несмотря на относительную простоту этого метода ИПД, с точки зрения его реализации, он имеет один очень существенный недостаток – это высокая неравномерность распределения накопленных деформаций в поперечном сечении (см. **рис. 3**). Интенсивное течение материала происходит преимущественно по диагоналям и образуется, так называемый ковоочный крест, причем величина накопленной деформации в этих областях может на порядок превышать значение средней деформации по сечению.

Для снижения такой неравномерности можно предложить следующую схему деформирования. После серии ударов по традиционной схеме, используемой при 2D-ковке, производится одноразовая деформация, которая приводит форму поперечного сечения образца к квадратной. Затем образец поворачивается на  $45^\circ$  (как показано на **рис. 12, а**) и процесс продолжается далее. Такой поворот может быть достаточно легко реализован путем изменения формы той части образца, где он крепится в зажимы.



**Рис. 11. Макроструктура материала после 2D ковки:**  
**а) поперечное сечение; б) продольное сечение**



**Рис. 12. Модернизированный процесс 2D-ковки:**  
**схема процесса (а); распределение накопленной интенсивности деформаций**  
**после первой (б) и второй (в) стадий**

Как видно из результатов численного моделирования модернизированного процесса 2D-ковки (**рис. 12, б, в**), после поворота и первых двух обжатий неравномерность деформации по сечению снижается в несколько раз. Можно предположить, что по мере увеличения количества обжатий неравномерность будет и дальше снижаться.

### Выводы

По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований рассмотренных процессов ИПД можно сделать следующие выводы:

1. Проведено сравнение методов ИПД, которые потенциально возможно использовать для получения объемных СМК и НС материалов в условиях промышленного производства.

Сравнение проводилось с использованием двух критериев: равномерности величины накопленной деформации в объеме заготовки и коэффициента жесткости напряженного состояния.

2. Показано, что наибольшей равномерностью величины накопленной деформации в объеме заготовки характеризуется процесс РКУ-прессования.

3. Построены поля распределения коэффициента жесткости напряженного состояния в продольном сечении заготовки. В обрабатываемом материале выявлены области, в которых велика вероятность образования трещин.

4. По совокупности влияния обоих критериев наиболее эффективным является процесс РКУ-прессования. Проблема уменьшения размеров области возможного образования несплошностей в материале может быть успешно решена за счет наложения дополнительного гидростатического давления, то есть бокового подпора.

5. При проведении эксперимента по 2D-ковке на комплексе Gleeble 3800 были выявлены две серьезные проблемы:

- Фиксация образца не обеспечивает необходимой жесткости системы вдоль его продольной оси. В результате в процессе поперечной осадки у образца появляются продольные деформации, которые накапливаются с каждым деформационным циклом, что является причиной вытеснения металла из очага деформации. Причем, своих максимальных значений такие деформации достигают в начале каждой стадии обработки образца, что подтверждается характером распределения усилия деформирования во времени при проведении процесса 2D-ковки.

- При проведении физического моделирования процесса 2D-ковки была отмечена значительная неравномерность деформаций в образце (образование ковочного креста), которая накапливается с каждым деформационным циклом. Как следствие, такая неравномерность отразилась на структуре и свойствах деформированного материала. В качестве одного из возможных путей снижения этой неравномерности предлагается изменение схемы деформирования. После нескольких деформационных циклов, осуществляемых по традиционной для процесса 2D-ковки схеме, заготовке придается исходная форма поперечного сечения, и следует поворот на 45°. Далее процесс обработки продолжается по обычной схеме. Тогда типичное распределение интенсивности деформаций в материале сохранится, но накопленная при этом неравномерность будет снижаться. Такую схему деформирования возможно реализовать с помощью специальной конструкции или использовать восьмигранные образцы.

### Список литературы

1. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications // Wiley-TMS. 2013. P. 456.

2. Шибиков В.Г. и др. Неоднородность напряженно-деформированного состояния при интенсивной пластической деформации многократным выдавливанием // Materials Physics and Mechanics. 2015. Т. 22. С. 170-175.

3. Seung Chae Yoon. Deformation characteristics evaluation of modified equal channel angular pressing processes // Materials transactions. 2010. Vol. 51. No. 1. P. 46-50.

4. Спусканюк В.З. и др. Исследование процесса равноканального т-образного прессования методом конечных элементов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2009. Т. 39. №. 3/7. С. 23-28.

5. Шаркеев Ю.П. и др. Наноструктурный титан биомедицинского назначения // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. 2. С. 107-110.

6. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1984. 150 с.

7. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Выща школа, 1983. 175 с.

8. Parshikov R.A. Technological problems of Equal Channel Angular Pressin // Rev. Adv. Mater. Sci. 2013. Vol. 34. P. 26-36.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА «ВИНТОВАЯ ПРОКАТКА-ПРЕССОВАНИЕ» В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMUFACT.FORMING\*****Найзабеков А.Б.<sup>1</sup>, Лежнев С.Н.<sup>2</sup>, Панин Е.А.<sup>2</sup>, Арбуз А.С.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Рудненский Индустриальный институт, г. Рудный, Республика Казахстан*<sup>2</sup>*Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Республика Казахстан***1. Введение**

В связи с неизбежной долгосрочной перспективой цен на энергию и сырьевые ресурсы, возрастает роль энергосберегающих технологий и при получении металлопродукции с относительно высокими качественными характеристиками, такие как механические и физические свойства металла. И одним из главных направлений в этой области использования энергосберегающих технологий являются технологии интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющие получать материалы с субультра- и ультрамелкозернистой (СУМЗ и УМЗ) структурой.

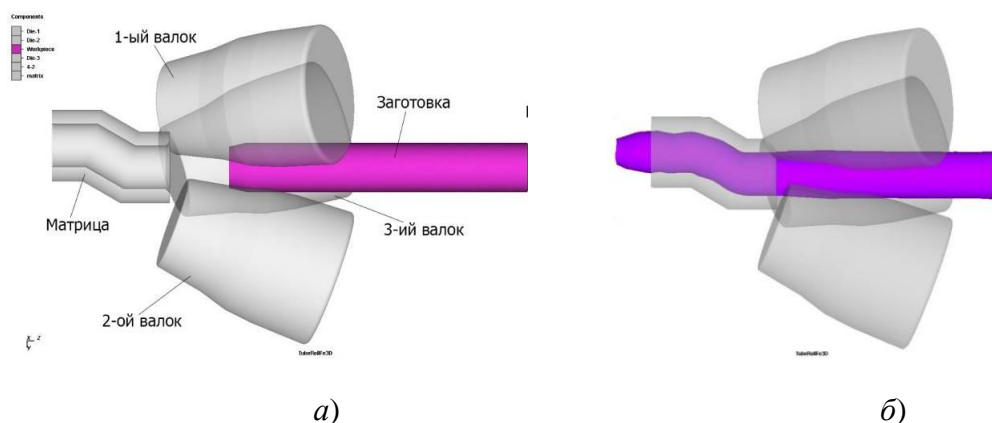
Однако рост спроса на данные материалы существенно ограничивается высокой стоимостью производства изделий из таких материалов, обусловленной все той же высокой энерго- и трудоемкостью их производства. Наиболее распространенный и изученный метод получения СУМЗ и УМЗ – равноканальное угловое прессование (РКУП) [1], однако недостаток этого и многих других известных процессов состоит в их дискретности, т.е. невозможности обработки изделий относительно большой длины и в необходимости проведения большого числа циклов обработки. Винтовая прокатка – другой способ ИПД, позволяющий быстро и непрерывно получать УМЗ структуру, однако здесь имеются проблемы с проработкой центральной зоны прутка, структура которых имеет ориентированный характер с малоугловыми границами зерен, вытянутых в направлении прокатки, при качественной равноосной УМЗ структуре периферийной части прутка.

Обеспечение непрерывности РКУП, путем его совмещения с винтовой прокаткой, позволит решить проблему неравномерной проработки прутка и кардинально увеличить общую производительность и энергоэффективность.

Совмещение процесса поперечно-винтовой прокатки и последующего прессования в угловой равноканальной матрице [2] позволяет реализовать схему напряженно-деформированного состояния с интенсивным сдвигом поверхностных слоев металла при винтовой прокатке в первом очаге деформации и объединением интенсивной сдвиговой деформации углового прессования с кручением во втором очаге деформации. При этом непроработанная в первом очаге деформации центральная часть заготовки, получит интенсивную проработку по другой схеме во втором очаге – в ступенчатой РКУ матрице. Это создает хорошие условия для формирования ультрамелкозернистой структуры по всему объему круглой заготовки. Кроме того, представляет определенный интерес изучение параметров углового прессования с кручением. По сути, получается процесс непрерывного прессования с элементами кручения заготовки внутри матрицы, это повысит уровень накопленной деформации в объеме заготовки и будет способствовать проработке центральной зоны. Как в способе [3] на менее однородную по своей природе деформацию кручением накладывается более однородная и интенсивная деформация сдвигом при РКУ-прессовании, которая сглаживает возникшую неоднородность после кручения.

*\*Работа выполнена в рамках госбюджетной финансируемой темы «Энергосберегающая инновационная технология получения субультрамелкозернистых конструкционных металлов и сплавов новым совмещенным процессом «винтовая прокатка-прессование» по программе «Грантовое финансирование научных исследований на 2015-2017 гг.» (Заказчик - Министерство образования и науки Республики Казахстан).*

В ходе выполнения данной работы было произведено конечно-элементное моделирование нового совмещенного процесса «винтовая прокатка–прессование» в программном комплексе Simufact.Forming (рис. 1) с целью рассмотрения температурных условий протекания данного совмещенного процесса (поскольку изменение температуры деформируемого металла значительно влияет на его энергосиловые параметры) и изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) металла, подвергнутого деформированию по предлагаемой схеме. Так же на основе построенных моделей с помощью специализированной базы данных микроструктуры программы Matilda был проведен анализ микроструктурных изменений протекающих в металле при реализации данного совмещенного процесса.



**Рис. 1. Компьютерная модель совмещенного процесса «винтовая прокатка-прессование»:**  
**а – исходная модель; б – успешно реализованная модель**

## 2. Начальная модель и распределение температуры

В результате компьютерного моделирования совмещенного процесса "винтовая прокатка-прессование" в программном комплексе Simufact.Forming была получена удачная модель этого процесса (см. рис. 1, б) со следующими оптимальными значениями:

- коэффициент трения в валках – 0,8;
- коэффициент трения в матрице - 0,1;
- угол пересечения каналов в матрице – 150°;
- расстояние между матрицей и зоной деформации валков - 15 мм.

Исходная заготовка представляла собой прутки диаметром 25 мм и длиной 150 мм. В качестве материала была выбрана сталь 15. Размеры валков и их расположение выполнено в соответствии с конструкцией лабораторного прокатного стана 10-30. Скорость вращения валков - 100 оборотов в минуту. Равноканальная ступенчатая матрица имела канал диаметром 21 мм. Температура заготовки была принята 1000 °С, все инструменты в модели имели температуру 20 °С.

На рис. 2 показано распределение температуры заготовки. В зоне контакта заготовки с валками температура снижается до 950-970 °С. В зоне пересечения каналов матрицы температура понижается до 850 °С. В дальнейшем разброс температуры по сечению выравнивается вследствие передачи тепла от центральных слоев к поверхности.

При рассмотрении эквивалентных напряжений следует понимать, что этот параметр не показывает, какое напряжение действует в определенной точке – растягивающее или сжимающее. Как подкоренное выражение, его значение всегда положительно. Оно показывает интенсивность действия напряжения, т.е. существует ли в данной точке

напряжение или нет. Его значение характеризует среднее значение всех напряжений, действующих в данной точке.

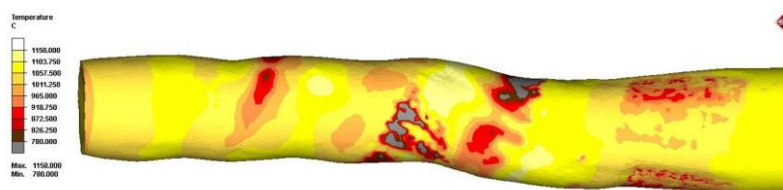
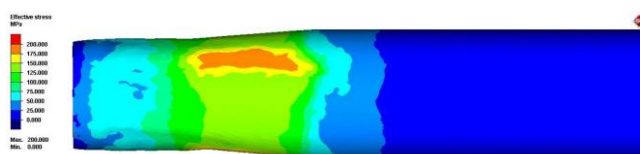


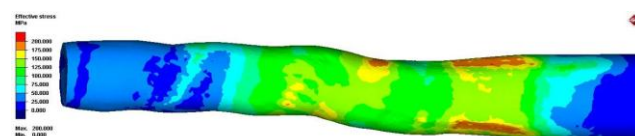
Рис. 2. Распределение температуры

### 3. Напряженное состояние

На первом этапе, в процессе винтовой прокатки (рис. 3, а) напряжение охватывает всю зону деформации валков. В зонах контакта металла с валками ее значение достигает 150 МПа, а в зонах, свободных от контакта, значение этого параметра достигает 120 МПа.



а)



б)

Рис. 3. Эквивалентное напряжение

На втором этапе, в процессе прессования (рис. 3, б) напряжение охватывает обширную территорию, соединяющий две зоны деформации. В продольной прокатке с подпором такого слияния не происходит, потому, что нет скручивания заготовки, что приводит к росту напряжений сдвига. Благодаря действию противодействия, напряжение в очаге деформации валков увеличивается до 190 МПа в зонах контакта металла с валками. В свободных от контакта зонах значение этого параметра находится в пределах 140 МПа. В зоне пересечения каналов матрицы величина эквивалентных напряжений достигает 160 МПа.

Также здесь четко отслеживается влияние сил противодействия. Позади зоны контакта металла с валками возникают протяженности физических очагов деформации, что является следствием двух одновременных факторов – противодействия со стороны матрицы и скручивания заготовки.

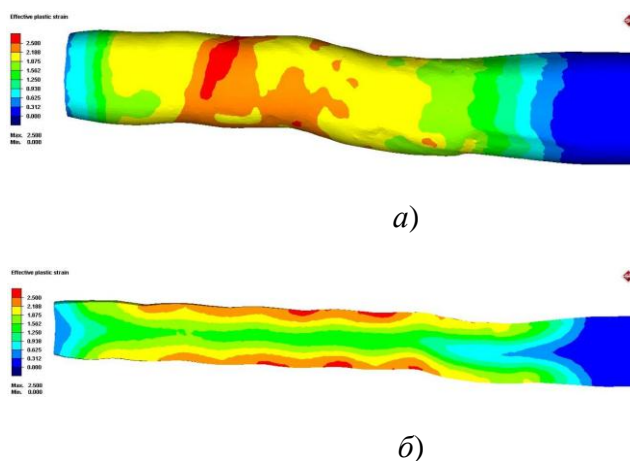
### 4. Эквивалентная деформация

Как отмечалось выше, для исследования деформированного состояния используют показатель интенсивности деформации – эквивалентную деформацию, включающую основные компоненты деформации. Этот параметр позволяет контролировать степень накопленной деформации, который является кумулятивным.



При изучении деформированного состояния необходимо не только обеспечить высокий уровень эквивалентной деформации, необходимой для формирования субультрамелкозернистой структуры, но и равномерное распределение этого параметра по сечению заготовки.

В процессе винтовой прокатки (**рис. 4**) деформация развивается в очаге деформации валков в следующем виде: ее величина достигает 1,2 в поверхностных слоях, в центральных слоях этот параметр находится на уровне 0,7 (см. **рис. 4, б**), т.е. разница значений эквивалентной деформации достигает 72 %.



**Рис. 4. Эквивалентная деформация**

В процессе прессования происходит значительное увеличение этого показателя за счет реализации сдвиговых деформаций при движении заготовки через каналы матрицы. Значение эквивалентной деформации равно 2,3 в поверхностных слоях, в центральных слоях значение этого параметра находится на уровне 1,4, т.е. разница значений эквивалентной деформации достигает 64 %. Таким образом, разность значений этого параметра после прохождения через каналы матрицы уменьшилась на 8 %.

Сравнение значений эквивалентной деформации в поверхностных и центральных слоях заготовки показало, что распределение этого параметра по сечению весьма неравномерно. Поэтому важно добиться более равномерного распределения эквивалентных деформаций по сечению прутка.

Можно сделать вывод, что разница в величине эквивалентной деформации в центральной зоне до входа в матрицы и после матрицы, равна 0,7. Эта разница есть часть деформации, соответствующая простому сдвигу в матрице. Таким образом, центр заготовки при прохождении канала матрицы получает эквивалентную деформацию, равную 0,7 в направлении, перпендикулярном направлению деформации предыдущего этапа и перпендикулярном ориентации структуры центральной части. Несколько циклов такой деформации может способствовать трансформации ориентированных полосчатых структур в более равноосные, снижая, таким образом, анизотропию свойств по сечению прутка.

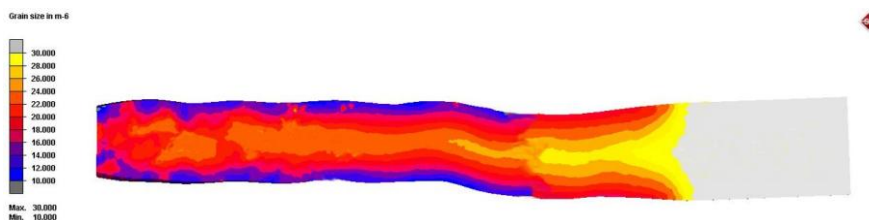
## **5. Моделирование эволюции микроструктуры**

Для исследования эволюции микроструктуры использовалась специализированная база данных микроструктуры программы Matilda, которая использует данные напряженно-деформированного состояния, скорости деформации и температуры готовых разработанных моделей по SIMUFACT.forming, дополняет их данными физико-химических свойств для данного материала и его структуры из базы данных, затем, используя алгоритм Yada [4],

вычисляет параметры процессов статической и динамической рекристаллизации, что может приводить к изменению размера зерна. Размер зерна также рассчитывается для каждого узла конечно-элементной модели и отображается в конце моделирования в удобном для визуализации виде.

Таким образом, в исходную модель были импортированы данные свойств для стали AISI1015, соответствующей стали 15. При моделировании микроструктуры в программе используется допущение о том, что заготовка до деформации имеет однородную структуру с одним и тем же размером зерна в любой точке. В качестве исходного размера принят средний размер зерна 30 мкм, что соответствует 7-ому баллу [5].

После расчета были получены результаты эволюции микроструктуры, которые были рассмотрены по отдельности на поверхности и в продольном сечении заготовки. В процессе винтовой прокатки поверхностные слои заготовки подвергаются интенсивной деформации, что способствует значительному измельчению зерна от 30 до 20 мкм, что соответствует 8-му баллу (**рис. 5**). После прохождения через каналы матрицы посредством осуществления сдвиговой деформации происходит дальнейшее измельчение зерна до 14 мкм, что соответствует 9-ому баллу.



**Рис. 5. Изменение размера зерна**

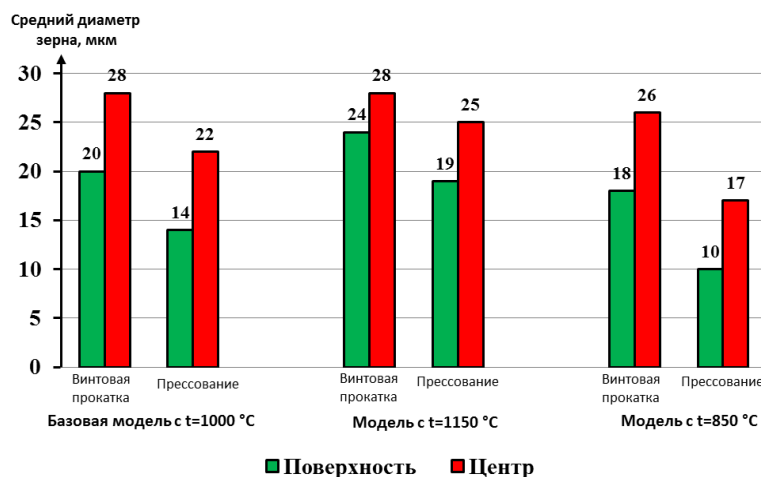
Центральные слои заготовки при винтовой прокатке деформируются менее интенсивно, т.к. здесь размер зерна колеблется от 30 до 28 мкм. Наибольший интерес представляет зона заготовки после прохождения через каналы матрицы. Здесь происходит измельчение зерна по всему поперечному сечению заготовки в центральной зоне. Размер зерна изменяется от 28 до 22 мкм. Таким образом, после одного цикла деформирования разница значений размера зерна составляет 57 %, что еще раз подтверждает тот факт, что при реализации такого совмещенного процесса проработка заготовки в поперечном сечении идет неравномерно и для выравнивания свойств по сечению необходимо проведение нескольких циклов деформации. Следует также отметить, что результаты моделирования микроструктуры достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования эквивалентной деформации, распределение которой в поперечном сечении во многом похоже на картину эволюции микроструктуры.

После изучения базовой модели была поставлена задача определить, как влияют на размер зерна изменения основных технологических параметров, а именно - температура нагрева заготовки и скорость деформирования. Эти параметры были выбраны из соображений, что они являются наиболее гибкими варьируемыми параметрами. Температурой достаточно легко варьировать при нагреве заготовки в печи. Скорость деформации при этом совмещенном процессе определяется скоростью прокатки на винтовом стане, значение которой также легко изменить при помощи частотного преобразователя.

### ***5.1. Эволюция микроструктуры в моделях с варьируемыми значениями температуры нагрева заготовки***

Для изучения влияния температуры на эволюцию микроструктуры были построены модели с температурами нагрева заготовки 1150 и 850 °С. Как показали исследования этих

моделей, влияние температуры на изменение размера зерна является очень существенным. Понижение температуры приводит к интенсификации измельчения исходного зерна, в то время как повышение температуры этот процесс замедляет. Это хорошо видно на гистограмме, представленной на **рис. 6**. Это происходит потому, что с увеличением температуры нагрева металла, в нем значительно ускоряется процесс статической рекристаллизации, что носит нежелательный характер, поскольку она приводит к возникновению и росту новых зерен. При более низких температурах этот тип рекристаллизации значительно замедляется и измельчение зерна происходит под воздействием динамической рекристаллизации, которая возникает непосредственно в процессе деформации.



**Рис. 6. Изменение размера зерна при разной температуре заготовки**

При анализе разброса значений было установлено, что в модели с температурой нагрева заготовки 1150 °C, при винтовой прокатке разность размеров зерен между центральной и поверхностной зонами составляет 17 %; после прессования в матрице эта разница составляет 32 %. Повышенный разброс объясняется тем, что, несмотря на увеличение значения температуры нагрева заготовки при ее контакте с рабочим инструментом, поверхностные слои охлаждаются быстрее, чем центральные слои. Поэтому, когда происходит деформация в матрице, где контакт с инструментом более продолжителен, происходит интенсивное измельчение зерна в поверхностной зоне.

В модели с температурой нагрева заготовки 850 °C при винтовой прокатке разность размеров зерен между центральной и поверхностной зонами составляет 44 %; после прессования в матрице эта разница достигает 70 %. Необходимо отметить не только увеличение разброса между центральной и поверхностной зонами, но и также снижение общего размера зерна по сравнению с базовой моделью. Оба эти фактора являются следствием снижения температуры нагрева заготовки, что приводит к уменьшению статической рекристаллизации.

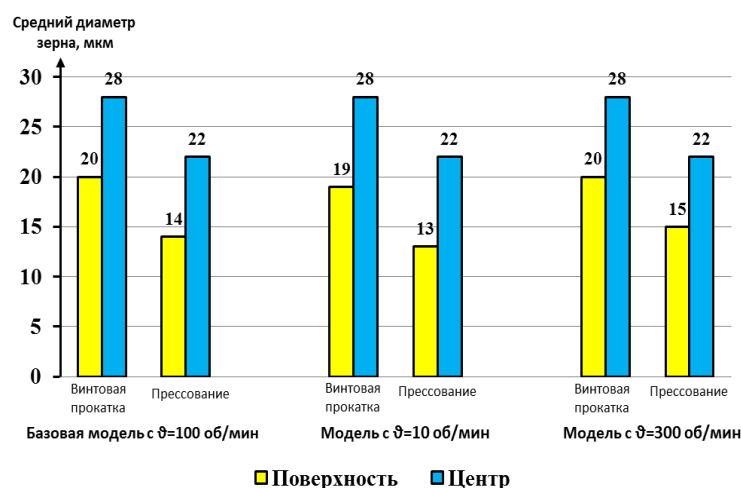
Следует отметить, что, несмотря на возросший уровень разброса, модель с низкой температурой нагрева является оптимальной, с точки зрения более интенсивного измельчения зерна. Это особенно очевидно при сравнении значений размера зерна в центральной части, которая прорабатывается гораздо хуже поверхностных зон. Как было показано в исследованиях деформированного состояния, чтобы выровнять значения накопленной деформации необходимо выполнить несколько проходов деформирования. В этом случае это также уменьшит разброс размера зерна. Поэтому для последующего многопроходного деформирования было решено использовать температуру нагрева заготовки, равную 850 °C.

## 5.2. Эволюция микроструктуры в моделях с варьируемой скоростью деформации

Для изучения влияния скорости деформации на эволюцию микроструктуры необходимо было построить дополнительные модели с разными скоростями прокатки и сравнить их с базовой моделью, где скорость вращения валков равна 100 оборотов в минуту.

Поскольку стан винтовой прокатки оснащен системой регулирования скоростью вращения валков с помощью преобразователя частоты, было решено изучать изменение размера зерна при экстремальных значениях скорости прокатки. В частности, минимальная технологически возможная скорость вращения валков равна 10 об/мин. Максимально возможная скорость вращения равна 300 об/мин. Этот выбор был сделан из-за того, что во многих работах [1, 6-7] при исследовании РКУП, было доказано, что изменение скорости деформации в относительно небольшом диапазоне (3-5 раз) не оказывало никакого влияния на изменение размера зерна.

Результаты моделирования микроструктуры, показанные на **рис. 7**, подтвердили результаты представленных выше исследований. Путем варьирования скорости деформации от 10 до 300 об/мин, микроструктура заготовки практически не изменяется. Небольшое изменение среднего диаметра зерен (1-2 мкм) возникает только в поверхностной зоне на малой скорости прокатки. Это напрямую связано с тем, что при уменьшении скорости деформирования заготовка имеет более длительный контакт с инструментом, в результате чего поверхностные слои сильнее остывают.



**Рис. 7. Изменение размера зерна при варьировании скорости деформации**

Здесь следует отметить, что варьирование скоростью деформации будет непрактичным решением. Увеличение скорости вращения валков приводит к увеличению динамических нагрузок на станину прокатного стана, что является отрицательным фактором. Чрезмерное снижение скорости деформации также нежелательно, так как приводит к существенному охлаждению заготовки и возможному росту зерна в центральных частях крупных заготовок из-за статической рекристаллизации.

При изучении процесса РКУП было установлено, что снижение температуры деформации является благоприятным условием для формирования тонкой структуры. Однако при осуществлении совмещенного процесса может возникнуть ситуация, когда заготовка остынет настолько, что стан не сможет протолкнуть заготовку через каналы матрицы. Поэтому для последующего многопроходного деформирования было решено использовать скорость деформации базовой модели, равную 100 оборотов в минуту.

### 5.3. Эволюция микроструктуры после нескольких циклов деформации

Начальной моделью для многопроходной деформации была модель с низкой температурой нагрева заготовки 850 °С, которая была определена как наиболее оптимальная. Деформация во 2 и 3-ем проходах была осуществлена при следующих условиях:

- второй проход: заготовка с диаметром 20 мм была прокатана до диаметра 17 мм и продавлена через матрицу с каналом диаметром 18 мм;

- третий проход: заготовка диаметром 17 мм была прокатана до диаметра 14 мм и пропущена через матрицу с каналом диаметром 15 мм.

В результате были получены следующие данные (рис. 8). В первом проходе после винтовой прокатки разница в среднем диаметре зерна между центральной и поверхностной зонами была 8 мкм; после прессования в матрице эта разница достигала 7 мкм.

Во время второго прохода измельчение зерна в процессе винтовой прокатки не столь интенсивно, как в первом проходе. Это объясняется тем, что обжатие в этом проходе было 3 мм, что меньше, чем в первом проходе - 5 мм. Здесь средний размер зерна в поверхностной зоне составлял 8 мкм, в центральной зоне был 13 мкм, т.е. разница составила 5 мкм. Во время последующего прессования в матрице средний диаметр зерна был сокращен до 6 мкм в поверхностной зоне и 10 мкм в центральной зоне. В данном случае разница уменьшается до 4 мкм.

Во время третьего прохода после винтовой прокатки средний диаметр зерна в поверхностной зоне составил 5 мкм, в центральной зоне был 9 мкм, т.е. разница составила 4 мкм. После прессования в матрице средний размер зерна уменьшился до 3 мкм в поверхностной зоне и 6 мкм в центральной зоне, т. е. разница значений была всего 3 мкм.

Таким образом, после изучения модели многопроходного деформирования было установлено, что с увеличением числа проходов, происходит не только общее уменьшение среднего диаметра зерна, но и постепенное выравнивание этого параметра между центральной и поверхностной зонами.

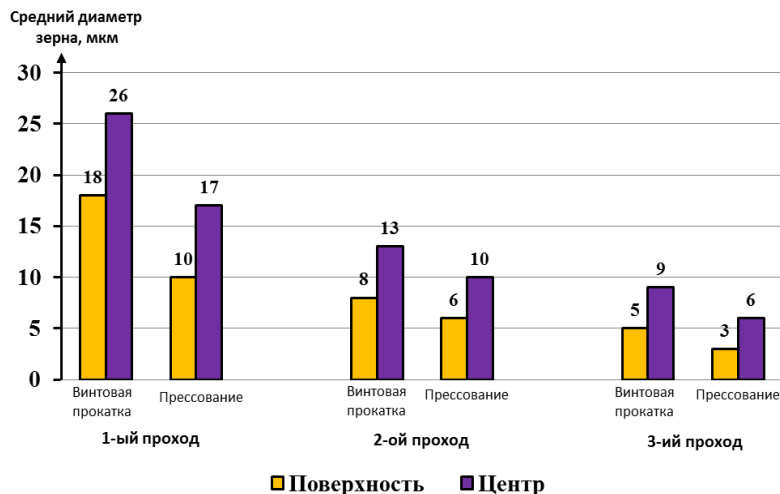


Рис. 8. Изменение размера зерна при многопроходном деформировании

## 6. Заключение

При исследовании эволюции микроструктуры в совмещенном процессе «винтовая прокатка-прессование» было установлено, что этот метод деформирования позволяет существенно измельчать исходный размер зерна. Варьирование основными технологическими параметрами показало, что влияние температуры нагрева заготовки играет значительную роль в степени измельчения зерна. В то время, как скорость деформации в допустимых конструкцией стана пределах не оказывает существенного влияния на микроструктуру.

Благодаря винтовой прокатке, измельчение зерна происходит в основном в поверхностных слоях заготовки. Последующее прессование в матрице приводит к изменению размера зерна по всему поперечному сечению заготовки. Но, несмотря на это, разница значений среднего диаметра зерна между центральной и поверхностной зонами остается. Чтобы уменьшить наблюдаемый разброс значений и выровнять размер зерна в поперечном сечении, заготовку необходимо подвергнуть нескольким циклам деформации. Так, после третьего прохода разница средних значений размера зерна между центральной и поверхностной зонами составляет всего 3 мкм, что значительно меньше, чем после первого прохода - 7 мкм. Это позволяет говорить о достаточно равномерной проработке структуры в поперечном сечении заготовки.

Следует отметить, что для получения таких результатов путем РКУП требуется 4-6 циклов прессования, а представленные результаты были получены после трех проходов, время каждого прохода для прутков длиной 250 мм составило 5-8 секунд. Производительность в данном случае будет до 100 кг/ч высококачественного стального прутка, без ограничения длины с субультрамелкозернистой структурой. Это значительно выше, чем в основных конкурентных процессах, что дает возможность говорить о большей эффективности предложенного процесса.

### Список литературы

1. Р. Валиев, И. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы. Москва: Академкнига, 2007. 398 с.
2. Патент № 27445. Устройство для непрерывного прессования металла. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Арбуз А.С. (уведомление от 25.09.2015 г.).
3. Патент РФ № 2240197. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок. Валиев Р.З., Салимгареев Х.Ш., Рааб Г.И., Красильников Н.А., Амирханов Н.М. 2004.
4. H. Yada, N. Matsuzu, K. Nakajima, K. Watanabe and H. Tokita. Trans. ISIJ. 1983. 23.100–109.
5. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
6. P. Verbon, N. Tsenev, R. Valiev, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. Langdon. Metall Mater Trans A. 1998. 29, 9, 2237-2243.
7. Z. Horita, D.J. Smith, M. Furukawa, M. Nemoto, R. Valiev, T. Langdon. J Mater Res. 1996. 11, 8, 1880-1890.

УДК 621.778.1-426.014:621.785.01

### УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРОВОЛОКИ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ ШИН\*

Харитонов В.А.<sup>1</sup>, Столяров А.Ю.<sup>2</sup>, Лысенин А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова», Россия

<sup>2</sup>ООО «Специальные технологии», г. Магнитогорск, Россия

За последнее, сравнительно небольшое время, сортамент армирующих материалов для автомобильных шин претерпел значительные изменения. Связано это, в первую очередь, с тем, что к автомобильным шинам стали предъявляться более жесткие требования по ходимости, массе, дисбалансу (силовой неоднородности) и т.д.

\* Работа проведена в рамках реализации госзадания по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525.2014К от 18.07.2014); а также при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0178).

Для обеспечения повышенных технических характеристик шин современная бортовая проволока должна выдерживать высокую разрывную нагрузку при минимальной массе погонного метра (линейной плотности), иметь достаточный уровень прочности связи с резиной, обладать повышенным сопротивлением усталостному разрушению при циклических нагрузках. Особое внимание на сегодняшний день уделено следующим показателям: прямолинейность, равновесность, скручиваемость, остаточное кручение, стрела прогиба, непосредственно влияющих на технологичность процесса изготовления резино-кордового полотна (бортовых колец) на современных линиях обрезаживания.

Традиционно для армирования бортовых колец автомобильных шин применялась «классическая» бортовая латунированная проволока. Однако развитие технологии шинной промышленности диктует повышенные требования к армирующим материалам и на сегодняшний день стоит задача получить более высокий уровень прочности и при этом сохранить прежний уровень пластических свойств проволоки для армирования бортовых колец шин. В связи с этим активно начало применяться бронзирование проволоки. В **таблице** приведён сравнительный анализ качественных характеристик бортовой латунированной и бортовой бронзированной проволоки диаметром 1,0 мм из стали марки 70, используемой при изготовлении бортовых колец шин [1].

Таблица

Механические свойства бортовой проволоки диаметром 1,0 мм

Механическая характеристика	Требования НТД	
	Латунированная проволока	Бронзированная проволока
Разрывная нагрузка, Н (ГОСТ 10446-80)	$\geq 1400$	$\geq 1530$
Число скручиваний (ГОСТ 1545-80)	$\geq 29$	$\geq 29$
Число перегибов (ГОСТ 1579-93)	$\geq 10$	$\geq 10$
Относительное удлинение, % (ГОСТ 10446-80)	$\geq 4,5 / 5,5$	$\geq 4,8 / 5,5$
Отношение предела текучести к пределу прочности, %	не регламентируется	$\leq 75-85$

Из данных **таблицы** видно, что бортовая бронзированная проволока обладает более высоким комплексом прочностных и пластических свойств по сравнению с бортовой латунированной проволокой.

Бронзовое покрытие наносится химическим способом путем одновременного осаждения меди и олова из одной ванны. Термообработка в данном случае проводится до нанесения покрытия и только с целью обеспечения заданного комплекса прочностных и пластических свойств проволоки, после которой следуют операции подготовки поверхности проволоки под покрытие.

Именно заключительная операция термообработки холоднодеформированной проволоки позволяет повысить и достигнуть требуемых показателей пластичности, прямолинейности и при этом не сильно снизить прочностные характеристики. Данная термическая обработка также еще называется - низкотемпературным отжигом, отжигом для снятия напряжений. Она осуществляется в протяжной печи, где проволока нагревается до температуры 500-600 °С и остывает на воздухе. Низкотемпературный отжиг является очень важной технологической операцией, с точки зрения получения требуемых показателей качества готовой продукции, и позволяет повысить пластичность бортовой проволоки, не сильно снижая при этом прочность.

Принято считать, что при нагреве холоднодеформированной стали выше 300 °С протекают процессы возврата, отдыха и полигонизации, происходит релаксация микронапряже-

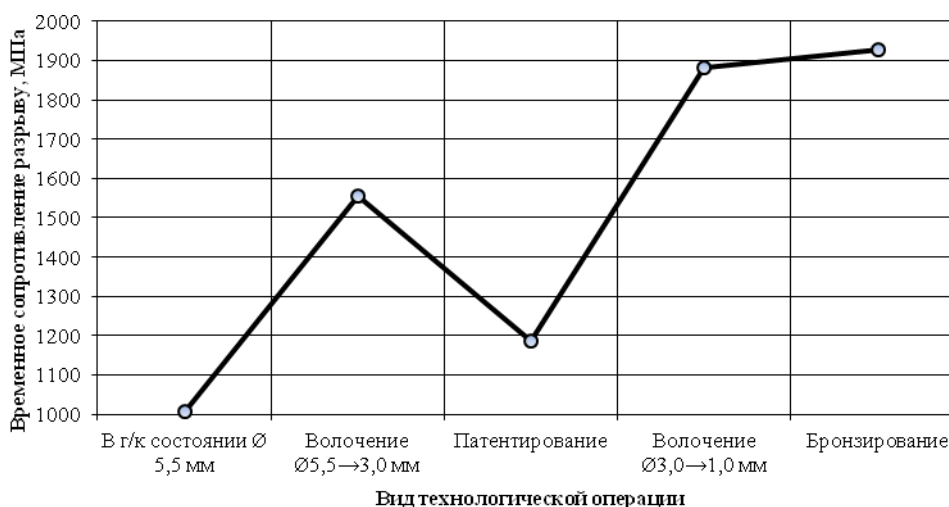
ний, накопленных в структуре заготовки при волочении, а также аннигиляция дислокаций - резкое снижение плотности дефектов кристаллической решетки [2]. После кратковременного отпуска при 500-600 °С полностью заканчивается процесс сфероидизации цементитных частиц. Повышение температуры отпуска приводит к коалесценции цементитных частиц и росту зерен феррита в перлитных зернах. Эти процессы протекают тем интенсивнее, чем выше степень пластической деформации. Следовательно, чем выше степень деформации, тем интенсивнее протекают процессы перераспределения и аннигиляции дислокации и рекристаллизации феррита, приводящие к более резкому снижению в нем плотности дефектов кристаллической решетки [3-5, 6 и др.], а также процессы сфероидизации и коалесценции цементитных частиц. Этими процессами и определяется более резкое снижение прочности при повышении температуры или продолжительностью отпуска в стали, подвергнутой более высокому обжатию.

При нанесении латунного покрытия происходит некоторое снижение временного сопротивления разрыву готовой бортовой проволоки по сравнению с холоднодеформированной заготовкой. Это объясняется тем, что проволока подвергается низкотемпературному отжигу и дополнительно диффузионному нагреву поверхностных слоев цинка и меди для образования латунного покрытия. Проведенные исследования показали, что при переходе на нанесение бронзового покрытия прочностные характеристики после низкотемпературного отжига не снижаются, а наоборот повышаются (временное сопротивление разрыву повышается в среднем на 50-80 МПа).

В условиях предприятия ООО «Специальные технологии» (г. Магнитогорск) налажено производство бортовой бронзированной проволоки диаметром 1,0 мм из стали марки 70. Структура технологического процесса изготовления бортовой проволоки состоит из следующих основных взаимосвязанных подпроцессов:

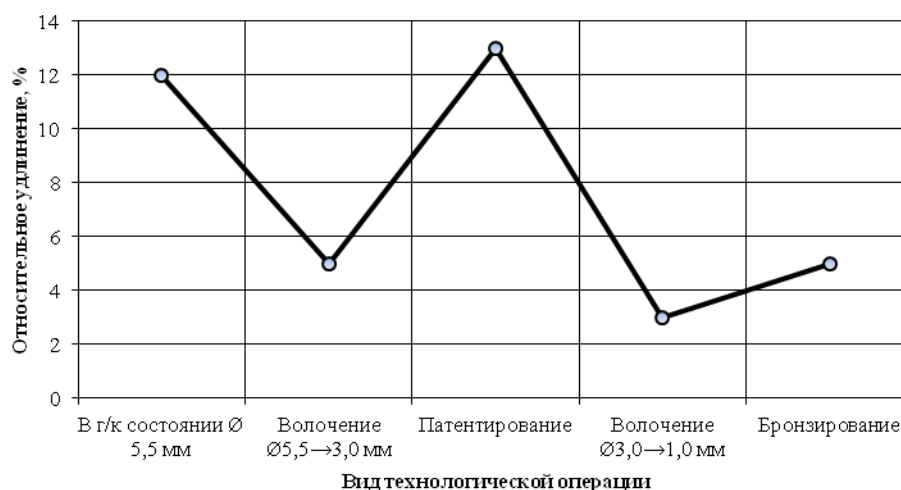
- подготовка поверхности и «грубо-среднее» волочение сорбитизированной катанки;
- патентирование холоднодеформированной заготовки. При этом патентирование может быть промежуточным - только для восстановления пластических свойств и окончательным - для восстановления пластических и формирования окончательных свойств проволоки;
- чистовое волочение с суммарной степенью деформации  $\varepsilon_{\Sigma} = 88\%$ ;
- отжиг при температуре 550-580 °С, нанесение адгезионных покрытий, обработка при необходимости знакопеременной деформацией проволоки для бортовых колец шин [7].

Процесс пооперационного изменения временного сопротивления разрыву и относительного удлинения представлены на **рис. 1, 2**.



**Рис. 1. Пооперационное изменение временного сопротивления разрыву стали марки 70**





**Рис. 2. Пооперационное изменение относительного удлинения стали марки 70**

Из **рис. 1, 2** видно, что после окончательной операции отпуск + бронзирование прирост временного сопротивления составляет 4-5 % МПа, относительное удлинение увеличивается на 2-3 %.

Для объяснения данного эффекта был проведен литературный анализ и даны теоретически обоснованные предположения по поводу протекания механизмов в стали, которые влияют на повышение прочности.

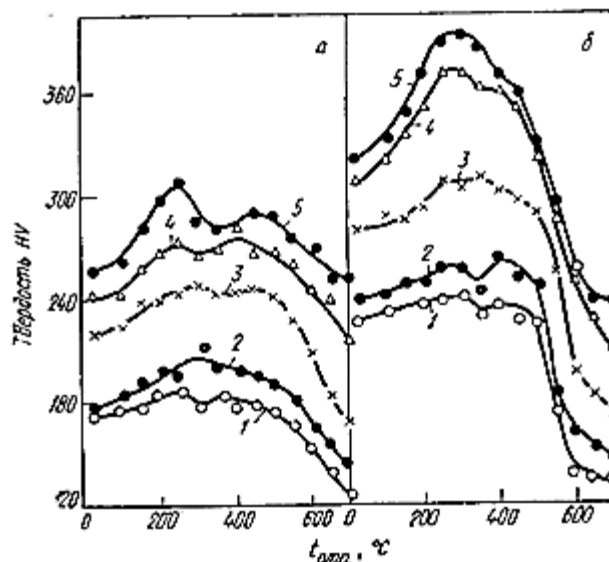
В работе [2] показано, что существенные изменения структуры, которые происходят при нагреве деформированной стали выше 300 °С, должны оказывать влияние на изменение механических и физических свойств.

Обычно процессы сфероидизации и коалесценции цементитных частиц приводят к снижению прочностных и росту пластических свойств. В этом же направлении оказывает влияние и уменьшение плотности дефектов кристаллической решетки, связанное с процессами полигонизации и рекристаллизации феррита. Однако изменение механических свойств при отпуске деформированных сталей в интервале температур 300—600 °С не носит монотонного характера. В работах [11, с. 119, 251; с. 106 и 116; 254-256; 267; 295] показано, что отпуск при указанных температурах приводит к некоторому повышению или задержке в снижении прочностных свойств и падению пластических свойств (**рис. 3**, показанный в работе [2, с. 141]). Величина аномального эффекта в среднем интервале температур отпуска определяется содержанием углерода в стали, формой и размерами цементитных частиц и степенью деформации.

Из **рис. 3** видно, что при температуре нагрева до 300 °С, идет так называемое деформационное старение стали. При деформационном старении средне- и высокоуглеродистых сталей заметно увеличивается сопротивление пластическим деформациям (предел пропорциональности, предел текучести) и твердость. Указанные характеристики растут независимо от вида предварительной деформации и тем интенсивнее, чем выше степень деформации и выше содержание углерода в стали. Изменение же свойств в интервале температур 300-600 °С, называемый некоторыми авторами высокотемпературным эффектом деформационного старения, нельзя относить к деформационному старению, хотя характер изменения механических свойств в некоторых случаях аналогичен их изменению при деформационном старении. При этих температурах существенно меняется структура деформированной стали.

В данных работах в основном были исследованы среднеуглеродистые 0,5-0,7 % С и заэвтектоидные инструментальные стали с содержанием углерода 0,8-1,3 % С и диаметром проволоки 3-5 мм. Отжиг происходил в течение от 20 мин до 2 часов. В нашем случае бортовая проволока находится в проходной печи в среднем 10-15 с в зависимости от скорости

прохождения проволоки по агрегату, при температуре 550-580 °С. Заготовкой для бронзирования является холоднодеформированная проволока диаметром 1,0 мм, которая подверглась холодному волочению с суммарной степенью деформации 88 %. Поэтому для этого вида проволоки с большой степенью деформации механизмы упрочнения после высокотемпературного отпуска не изучены и представляют большой интерес для исследования.



**Рис. 3. Изменение твердости при отпуске деформированных сжатием на 20 % (а) и 70 % (б) отожжённых сталей с содержанием углерода (%):**  
**1- сталь марки 20, C = 0,2 %; 2 – сталь марки 35, C = 0,35 %;**  
**3 - сталь марки 45, C = 0,45 %; 4 - сталь марки У8А, C = 0,79 %**  
**5 - сталь марки У13А, C = 1,27 %**

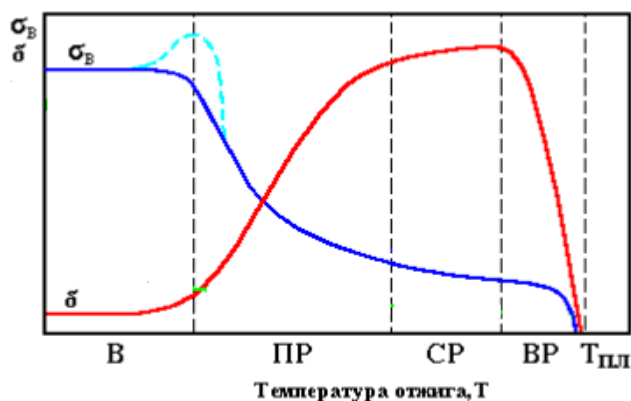
Из литературных данных [2, 8, 9] известно, что чем выше содержание углерода в стали, тем интенсивнее протекает процесс уменьшения плотности дефектов кристаллической решетки феррита. Так как процессы разупрочнения протекают тем интенсивнее, чем выше степень деформации и больше содержание углерода в стали, то внешнее проявление эффекта упрочнения (отклонение от монотонного хода кривых изменения прочности и твердости) после больших деформаций будет тем меньше, чем больше перлита (углерода) в стали и выше степень деформации.

Но фактически оказалось, что при суммарной степени холодно пластической деформации 88 % предшествующей отпуску, упрочнение стали происходит.

Факт упрочнения высокоуглеродистой проволоки при высокотемпературном отпуске 550-580 °С можно объяснить тем, что, *во-первых*, холодная пластическая деформация резко ускоряет процессы сфероидизации и коалесценции цементитных пластин при отпуске. Указанные процессы должны снижать прочность и повышать пластичность. Однако развитие этих процессов сопровождается значительным переносом атомов углерода к границам зерен, что повышает твердость стали [11]. *Во-вторых*, при применении более точных методов определения температуры начала рекристаллизации (дифференциально-твердостной, рентгенографический метод микропучка) оказывается, что с увеличением степени деформации средне и высокоуглеродистой стали от 40 до 80 % температура рекристаллизации снижается с 800-900 до 500-650 °С (дифференциально-твердостной метод) [12]. Это связано с изменением при высокой степени деформации не только в матрице, но и в карбидной фазе (дробление карбидов подтверждено металлографически). Дробление приводит к увеличению числа частиц и уменьшению их размеров при постоянной объемной доле, что способствует замедлению роста зародышей при рекристаллизации и уменьшению размера рекристаллизова-

ных зерен. Поэтому при температуре отпуска 550-580 °С высокоуглеродистой бортовой проволоки скорее всего начинают развиваться механизмы первичной рекристаллизации. *В-третьих*, полигонизация в деформированных металлах может и не происходить. Как уже указывалось, для ее развития необходимо, чтобы предварительная пластическая деформация была проведена с небольшими степенями, при которых перераспределение дислокаций происходит только в непересекающихся системах скольжения. Если пластическая деформация была выполнена с большими степенями, то вслед за процессами отдыха начнутся сразу процессы первичной рекристаллизации [13-15]. Образование большеугловых границ на начальных стадиях рекристаллизации при незначительном уменьшении плотности дислокаций может также упрочнять металл. Влияние процесса полигонизации и начальных стадий процесса рекристаллизации на изменение свойств должно усиливаться «загрязнением» границ атомами углерода. Сегрегация углерода на образовавшихся границах увеличивает сопротивление пластической деформации за счет повышения сопротивления движению дислокаций при передаче деформации от зерна к зерну, а также за счет затруднения возникновения новых дислокаций на границах.

Поэтому график изменения механических свойств высокоуглеродистой проволоки для бортовых колец шин (временного сопротивления разрыву и относительного удлинения) можно представить в следующем виде (рис. 4). Из рисунка видно, что по окончании процесса возврата и начала первичной рекристаллизации, кривая прочности имеет всплеск, показывающий некоторое увеличение прочности стали в процессе высокотемпературного отпуска.



**Рис. 4. Изменение механических свойств  $\sigma_B$ ,  $\delta$  в зависимости от температуры отжига: В - интервал температур развития возврата; ПР - первичной рекристаллизации; СР - собирающей; ВР - вторичной рекристаллизации**

### Вывод

Исследования показали, что при проведении заключительной термообработки (высокотемпературного отпуска) высокопрочной бортовой проволоки диаметром 1,0 мм из стали марки 70 происходит повышение прочности проволоки. Этот факт можно объяснить тем, что в результате высокотемпературного отпуска высокоуглеродистой стали полигонизация не происходит из-за большой предшествующей степени деформации, а сразу начинают происходить механизмы первичной рекристаллизации, а именно возникают полигональные границы и новые большеугловые границы с одновременной адсорбцией на них атомов углерода. Это несколько повышает прочность и незначительно повышает пластичность высокоуглеродистой стали. Этот эффект должен усиливаться с повышением степени деформации и содержания углерода в стали. В связи с вышеизложенным, представляет интерес к подробному изучению процессов термической обработки при температуре от 300 до 600 °С высокоуглеродистой проволоки после высоких степеней пластической деформации.

## Список литературы

1. Столяров А.Ю. Разработка технологии термической обработки проволоки для армирования бортовых колец шин способом нагрева в кипящем слое / А.Ю. Столяров, Н.Г. Гофман, В.И. Токарев // *Метиз*. 2008. № 3. С. 21-23.
2. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. Изд-во «Металлургия», 1972. 320 с.
3. Стародубов К.Ф., Бабич В.К. Изменение пластических свойств стали при отпуске. Укр. НТО ЧМ, Днепропетровск, 1957.
4. Стародубов К.Ф., Бабич В.К. // *Изв. вузов, Черная металлургия*. 1958. № 2. С. 133.
5. Стародубов К.Ф., Бабич В.К. // *Вопросы черной металлургии: Научные труды Днепропетровского металлургического института*. Днепропетровск, 1958, вып. 36, С. 43.
6. Бабич В.К., Пирогов В.А., Бережной А.В. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1969. № 2. С. 78.
7. Столяров А.Ю. Разработка конкурентоспособной технологии производства проволоки высокой прочности для армирования автомобильных шин: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2013. 117 с.
8. Завалишин А.Н., Покачалов В.В., Харитонов В.А. Линейные дефекты кристаллического строения металлов: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 200. 71 с.
9. Харитонов В.А., Тулупов О.Н. Современное направления развития технологии производства катанки: учеб. пособие. Магнитогорск: МЦОС, 2005. 137 с.
10. Бабич В.К., Сердюк А.Г. // *Упрочняющая термическая обработка проката: Труды Института черной металлургии*. Изд-во «Металлургия», 1966, вып. 24. С. 105.
11. Коджаспиров Г.Е., Рудской А.И., Рыбин В.В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий деформированием. СПб: Наука, 2006. 350 с.
12. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. Изд-во «Металлургия», 1967.
13. Биронт В.С. Теория термической обработки металлов. Отжиг: Учеб. пособие. СФУ: ИЦМиЗ. Красноярск, 2007. 234 с.
14. Харитонов В.А., Столяров А.Ю. Влияние геометрических параметров очага деформации на разрушение проволоки при волочении // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1 (41). С. 33-39.
15. Харитонов В.А. Повышение эффективности производства стальной проволоки волочением // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2013. № 1 (39). С. 79-85.

УДК 621:771.23–022.532:621.785

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ И СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПО ТВЕРДОСТИ<sup>1</sup>

**Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А.**  
*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия*

### Введение

Традиционным методом определения прочности и пластичности металла является отбор проб и их последующее испытание на растяжение по ГОСТ 1497-84 [1], EN ISO 6892-1:2009 [2]. Главным преимуществом данного метода является то, что полученные в результате прямых испытаний значения прочностных (предел текучести, временное сопротивление

<sup>1</sup> Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 02.G25.31.0105).

разрыву) и пластических характеристик (относительное удлинение и относительное сужение) наиболее близки к истинным. Недостаток заключается в том что, прежде всего это разрушающий вид контроля качества а, следовательно, после испытаний разрушенные образцы выбрасывают или перерабатывают, что вызывает дополнительные материальные и трудовые затраты. Кроме того, для сверхвысокопрочных материалов существенным ограничением выступают характеристики испытательного оборудования – максимальная предельная нагрузка разрывной машины.

В данной работе выполнены экспериментальные исследования взаимосвязи между твердостью и другими показателями качества высокопрочного и сверхвысокопрочного листового проката, обладающего комплексом механических свойств: прочность 700 – 2000 Н/мм<sup>2</sup>, твердость свыше 280 НВ, удлинение не менее 8% [3, 4].

### Связь между прочностью металла и твердостью

В общем виде связь между твердостью по Бринеллю и пределом прочности можно выразить в виде:

$$\sigma_B = c \cdot \text{НВ} . \quad (1)$$

Впервые эта зависимость была установлена Бринеллем [5], который для углеродистых сталей получил значение коэффициента  $c$ , равное 0,346. Для углеродистых и низколегированных сталей коэффициент пропорциональности  $c$  оказался близким к 0,333 [6-8].

Однако те же исследования показали, что коэффициент  $c$  зависит от упрочняемости материала, т.е. от предельной равномерной деформации  $\Psi_r$ . Чем больше равномерная деформация, тем больше значение коэффициента  $c$ .

В настоящее время установлено большое количество зависимостей прочности от твердости. Например, в СТО 22-04-02 [9] приведена формула

$$\sigma_B = 112 + 2,4\text{НВ} . \quad (2)$$

Зависимость рассматриваемых параметров, указанная в справочнике [11], имеет вид

$$\sigma_B = 9,81 \cdot K \cdot \text{НВ} , \quad (3)$$

где  $K = 0,34$  при  $\text{НВ} < 175$  и  $K = 0,36$  при  $\text{НВ} > 175$ .

Значения прочности, полученные по этим зависимостям, имеют существенные отличия и в ряде случаев значительно отличаются от истинной прочности испытываемого материала.

Цель настоящей работы – установление зависимостей между твердостью и другими механическими характеристиками высокопрочного и сверхвысокопрочного листового проката, оценка адекватности и надежности полученных уравнений.

Для достижения поставленной цели в лабораторном комплексе ООО «Термодеформ-МГТУ» (г. Магнитогорск) и НИИ Наносталей (г. Магнитогорск) выполнены экспериментальные исследования на образцах проката из мало- и среднеуглеродистых низколегированных высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей (табл. 1).

Испытания механических свойств изготовленных образцов проката осуществлялись в аккредитованной лаборатории в соответствии с общепринятыми условиями:

- испытания на растяжение проводились на плоских образцах типа II по ГОСТ 1497 на универсальной испытательной машине фирмы ZWICK GmbH&Co.МП, Германия, серии Z2000;

- измерения твердости по Бринеллю НВW проводились по ГОСТ 9012 с применением шарика из твердого сплава диаметром 10,0 мм под действием усилия  $F = 29430$  Н (3000 кгс).

Таблица 1

## Химический состав сталей

Массовая доля элементов, %, не более или в диапазоне										C <sub>э</sub> , % не более
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Прочие	
0,10-0,45	0,60	1,70	0,015	0,010	1,20	0,70	3,50	0,20	V, Nb, Ti, B	0,86
Примечание: углеродный эквивалент $C_s = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$										

Далее проводился статистический анализ данных, полученных по результатам прямых испытаний. С целью определения степени взаимосвязи между твердостью и пределом текучести, временным сопротивлением разрыву провели корреляционный анализ.

Согласно рекомендациям [10] построили матрицу корреляции (табл. 2), где представлены значения коэффициентов корреляции  $r$ , с целью проведения в дальнейшем оценки его значимости для каждого из исследуемых факторов.

Таблица 2

## Матрица корреляции

	HBW	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$
HBW	1,00	0,98	0,97
$\sigma_{0,2}$	0,98	1,00	0,97
$\sigma_B$	0,97	0,97	1,00

Поскольку коэффициент корреляции вычисляется на основании выборочных данных и является случайной величиной, его значение должно быть проверено на значимость. Наиболее часто критерием значимости коэффициента парной корреляции принимают условие:

$$t = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} > t[\alpha; n-2], \quad (4)$$

где  $t$  и  $t[\alpha; n-2]$  - рассчитанное и табличное число Стьюдента.

Возможен также иной подход [11], согласно которому фактическое значение коэффициента парной корреляции  $r$  сравнивается с минимальной статистически значимой величиной  $r_{\min}$ :

$$r > r_{\min} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{n-2}{(t[\alpha; n-2])^2}}}. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) не являются взаимоисключающими, поскольку получены из одной и той же исходной предпосылки. Если (4) и (5) выполняются, то коэффициент парной корреляции можно считать значимым с доверительной вероятностью  $p = 1-\alpha$ .

Уровень доверительной вероятности принимаем равным 99 % с целью повышения точности будущей аппроксимации. Критерии оценки и полученные результаты представлены в табл. 3.

Определили, что с доверительной вероятностью 99 % статистически значимыми являются коэффициенты корреляции между твердостью и условным пределом текучести  $r(\text{HBW}; \sigma_{0,2})=0,98$ , а также между твердостью и временным сопротивлением разрыву  $r(\text{HBW};$

$\sigma_{0,2}=0,97$ . Положительные значения коэффициентов корреляции указывают на возрастание отклика с увеличением фактора, что не противоречит известным данным.

Таблица 3

Проверка коэффициентов корреляции на значимость

Оценка по 1-му критерию (выражение 4)			Оценка по 2-му критерию (выражение 5)		
$n$	25	объем выборки	$n$	25	объем выборки
$m$	2	кол-во факторов	$m$	2	кол-во факторов
$p$	0,99	дов. вероятность	$p$	0,99	дов. вероятность
$t[\alpha; n - 2]$	2,807	Стьюдент табл.	$r_{\min}$	0,505	мин. значимый
$t(\text{HBW}; \sigma_{0,2})$	22,973	значим	$r(\text{HBW}; \sigma_{0,2})$	0,98	значим
$t(\text{HBW}; \sigma_{\text{в}})$	18,780	значим	$r(\text{HBW}; \sigma_{\text{в}})$	0,97	значим

Далее провели парный регрессионный анализ с целью установления математической зависимости между откликом и фактором. Были получены различные виды уравнений парной регрессии (линейная, логарифмическая, степенная, экспоненциальная, полиномиальная). Уравнения регрессии «условный предел текучести – твердость» и «временное сопротивление разрыву – твердость», а также критерии, характеризующие допустимость отображений исследуемых зависимостей выбранными уравнениями регрессии, представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Уравнения регрессии «условный предел текучести – твердость»

Вид аппроксимации	Уравнение регрессии	$R^2$	$k$	$F_p$	$F_T$	Вывод о надежности	$F_p$ - $F_T$
Линейная	$\sigma_{0,2} = 2,2686\text{HBW} + 208,6$	0,958	2	524,6	4,28	Надежная	520
Логарифмическая	$\sigma_{0,2} = 954,2\ln(\text{HBW}) - 4580$	0,946	2	402,9	4,28	Надежная	399
Полиномиальная 2 степени	$\sigma_{0,2} = 0,001\text{HBW}^2 + 0,806\text{HBW} + 512,9$	0,960	3	264,0	3,44	Надежная	261
Полиномиальная 3 степени	$\sigma_{0,2} = 5\text{E-}05\text{HBW}^3 - 0,066\text{HBW}^2 + 30,10\text{HBW} - 3604$	0,971	4	234,4	3,07	Надежная	231
Степенная	$\sigma_{0,2} = 8,616\text{HBW}^{0,812}$	<b>0,964</b>	<b>2</b>	<b>598,6</b>	<b>4,28</b>	<b>Надежная</b>	<b>594</b>
Экспоненциальная	$\sigma_{0,2} = 511,03e^{0,0019\text{HBW}}$	<b>0,964</b>	<b>2</b>	<b>598,6</b>	<b>4,28</b>	<b>Надежная</b>	<b>594</b>

Примечания:  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $k$  – число коэффициентов регрессии в уравнении;  $F_p$  – рассчитанное число Фишера;  $F_T$  – табличное число Фишера

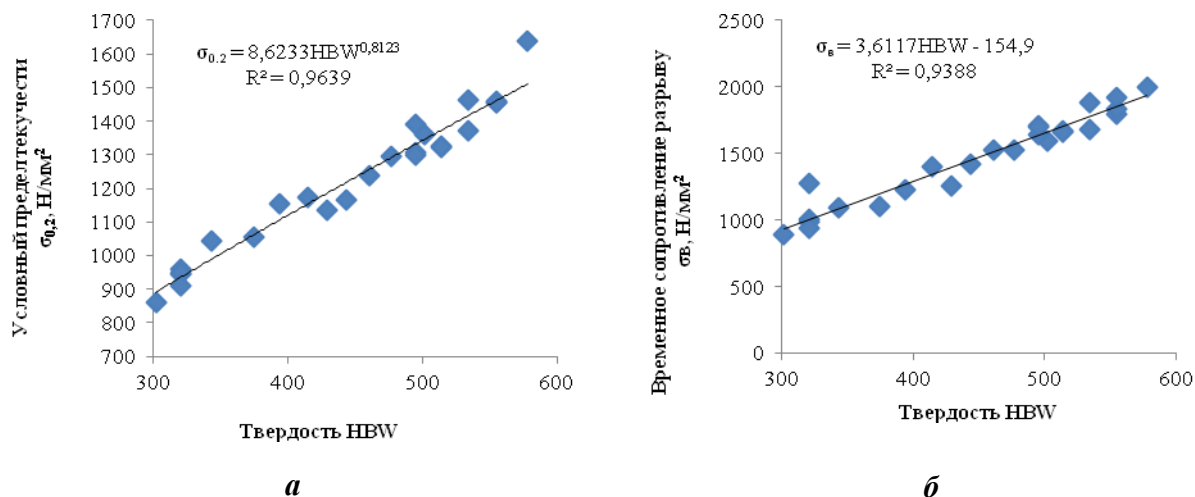
Таблица 5

Уравнения регрессии «временное сопротивление разрыву – твердость»

Вид аппроксимации	Уравнение регрессии	$R^2$	$k$	$F_p$	$F_T$	Вывод о надежности	$F_p$ - $F_T$
<b>Линейная</b>	<b><math>\sigma_{\text{в}} = 3,611\text{HBW} - 154,9</math></b>	<b>0,938</b>	<b>2</b>	<b>348</b>	<b>4,28</b>	<b>Надежная</b>	<b>343,7</b>
Логарифмическая	$\sigma_{\text{в}} = 1517\ln(\text{HBW}) - 7769$	0,925	2	283,7	4,28	Надежная	279,4
Полиномиальная 2 степени	$\sigma_{\text{в}} = 0,003\text{HBW}^2 + 1,040\text{HBW} + 380,1$	0,941	3	175,4	3,44	Надежная	172,0
Полиномиальная 3 степени	$\sigma_{\text{в}} = -5\text{E-}06\text{HBW}^3 + 0,009\text{HBW}^2 - 1,705\text{HBW} + 765,9$	0,941	4	111,6	3,07	Надежная	108,6
Степенная	$\sigma_{\text{в}} = 1,664\text{HBW}^{1,109}$	0,929	2	300,9	4,28	Надежная	296,7
Экспоненциальная	$\sigma_{\text{в}} = 439,6e^{0,002\text{HBW}}$	0,930	2	305,6	4,28	Надежная	301,3

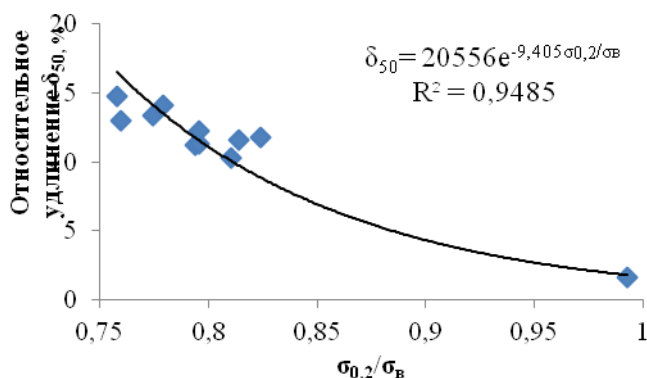
Определили, что с доверительной вероятностью 95 %, статистически значимыми являются все рассмотренные аппроксимации.

Наилучшим отображением связи между условным пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  и твердостью HBW является степенная (рис. 1) и экспоненциальная аппроксимации, так как для них характерно наибольшее различие между расчетным и табличным числами Фишера.



**Рис. 1. Зависимости условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а) и временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  (б) от твердости HBW**

Наилучшим отображением связи между временным сопротивлением разрыву  $\sigma_B$  и твердостью HBW является линейная аппроксимация (рис. 2).



**Рис. 2. Зависимость относительного удлинения от отношения предела текучести к пределу прочности**

Сравним значения прочности, определенные по результатам прямых испытаний на разрыв, с данными, полученными перерасчетом по известным и установленным зависимостям (табл. 6).

Из табл. 6 видно, что при использовании для прогноза прочностных свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей, известные уравнения, отклонения составляют от 0,3 до 25,9 %, а в случае использования нового уравнения, отклонения составляют от 0,1 до 10,7 %, что свидетельствует о более высокой точности разработанной модели.



Таблица 6

**Сравнение результатов прямых испытаний  
с результатами расчетов по уравнениям регрессии**

Твердость, НВW	Временное сопротивление разрыву						
	прямое испытание, Н/мм <sup>2</sup>	расчетное					
		по уравнению $\sigma_B = 112 + 2,4 \cdot \text{НВ} -$ (СТО 22-0402)		по уравнению $\sigma_B = 9,81 \cdot 0,36 \cdot \text{НВ} -$ справочник [11]		по новому уравнению $\sigma_B = 3,611 \cdot \text{НВW} -$ 154,9 (табл. 6)	
		Н/мм <sup>2</sup>	отклонение, %	Н/мм <sup>2</sup>	отклонение, %	Н/мм <sup>2</sup>	отклонение, %
578	1999	1499	25,0	2041	2,1	1932	3,4
343	1094	935	14,5	1211	10,7	1084	0,9
502	1597	1317	17,5	1773	11,0	1658	3,8
394	1228	1058	13,9	1391	13,3	1268	3,2
444	1425	1178	17,4	1568	10,0	1448	1,6
534	890	837	6,0	1067	19,8	936	5,1
514	1685	1394	17,3	1886	12,0	1773	5,3
514	1670	1346	19,4	1815	8,7	1701	1,9
495	1662	1346	19,0	1815	9,2	1701	2,4
321	1639	1300	20,7	1748	6,7	1633	0,4
429	1260	1142	9,4	1515	20,2	1394	10,7
477	1530	1257	17,9	1685	10,1	1568	2,5
555	1795	1444	19,6	1960	9,2	1849	3,0
555	1835	1444	21,3	1960	6,8	1849	0,8
555	1920	1444	24,8	1960	2,1	1849	3,7
495	1710	1300	24,0	1748	2,2	1633	4,5
415	1405	1108	21,1	1466	4,3	1344	4,4
321	1005	882	12,2	1134	12,8	1004	0,1
375	1105	1012	8,4	1324	19,9	1199	8,5
321	985	882	10,4	1134	15,1	1004	2,0
534	1880	1394	25,9	1886	0,3	1773	5,7
321	940	882	6,1	1134	20,6	1004	6,8
461	1525	1218	20,1	1628	6,8	1510	1,0
495	1700	1300	23,5	1748	2,8	1633	4,0
<b>Min ошибка</b>			6,0	0,3	0,1		
<b>Max ошибка</b>			25,9	20,6	10,7		

**Определение относительного удлинения высокопрочного материала**

Аналогично были получены зависимости относительного удлинения  $\delta_{50}$  от отношения предела текучести к пределу прочности  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (табл. 7 и см. рис. 2).

С доверительной вероятностью 95 % статистически значимыми являются все рассмотренные зависимости, наилучшим отображением связи между относительным удлинением  $\delta_{50}$  и  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  является экспоненциальная аппроксимация.

**Уравнения регрессии «относительное удлинение –  
отношение предела текучести к пределу прочности»**

Вид аппроксимации	Уравнение регрессии	$R^2$	$k$	$F_p$	$F_T$	Вывод о надежности	$F_{p-F_T}$
Линейная	$\delta_{50} = -52,748 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} + 54,05$	0,94 2	2	145, 9	5,1 2	Надежная	140, 8
Логарифмическая	$\delta_{50} = -46,04 \ln \left( \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} \right) + 1,497$	0,93 9	2	139, 5	5,1 2	Надежная	134, 4
Полиномиальная 2 степени	$\delta_{50} = -13,303 \left( \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} \right)^2 - 29,349 \sigma_{0,2} / \sigma_B \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} + 43,878$	0,94 2	3	65,0 8	4,4 6	Надежная	60,6
Степенная	$\delta_{50} = 1,7731 \left( \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} \right)^{-8,152}$	0,93 3	2	124, 9	5,1 2	Надежная	119, 8
Экспоненциальная	$\delta_{50} = 20556 e^{-9,405 \sigma_{0,2} / \sigma_B}$	0,94 9	2	165, 8	5,1 2	Надежная	160, 6

**Область применения полученных зависимостей**

Важным условием дальнейшего использования полученных уравнений является область их возможного применения. Она определяется минимальным и максимальным значениями влияющих факторов: прочность - 700-2000 Н/мм<sup>2</sup>, твердость - свыше 280 НВ, удлинение - не менее 8 %.

Применение указанных формул возможно и для более широких диапазонов варьирования указанных факторов, однако в этом случае необходимо помнить о снижении уровня доверительной вероятности производимых расчетов.

**Выводы**

1. По результатам статистического анализа экспериментальных данных были получены зависимости условного предела текучести и временного сопротивления разрыву от твердости для высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей

$$\sigma_{0,2} = 8,62 \text{HBW}^{0,812};$$

$$\sigma_B = 3,61 \text{HBW} - 154,9.$$

2. Определена зависимость относительного удлинения  $\delta_{50}$  от отношения предела текучести к пределу прочности

$$\delta_{50} = 20556 e^{-9,405 \sigma_{0,2} / \sigma_B} \cdot \delta_{50} = 2055$$

3. Сравнение значений прочности, рассчитанных по известным и установленным в ходе анализа зависимостям, свидетельствует о более высокой точности и результативности полученных уравнений, что позволяет оценивать прочностные характеристики проката по измеренному значению твердости.

4. Применение результатов исследований на практике позволит существенно снизить объем отбираемой пробы и избежать использования дорогостоящего лабораторного оборудования (разрывной машины высокой мощности).

*Работа выполнена при участии С.В. Денисова, Е.В. Брайчева, Н.В. Копцевой, М.П. Барышиковой, Ю.Ю. Ефимовой, О.А. Никитенко, Д.М. Чукина, А.С. Ишимова, М.С. Жеребцова*

## Список литературы

1. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1997. 35 с.
2. BS EN ISO 6892-1:2009 Metallic materials. Tensile testing. Method of test at ambient temperature.
3. Основные виды и области применения стратегического высокопрочного листового проката / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, С.В. Денисов, А.С. Кузнецова, Г.А. Бережная, М.С. Гущина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 41-44.
4. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. № 2 (41). С. 19- 28.
5. J.A. Brinell. II Congres Jnt des Methodes d'essai. Paris, 1900. 176 p.
6. Нейль Г.О. Твердость металлов и ее измерение. М.-Л.: Metallurgizdat, 1940. 376 с.
7. Tabor D. The Hardness of Metals.— Oxford: Clarendon press, 1951. 171 p.
8. Марковец М.П. Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе // Журнал технической физики. 1949. Том XIX. Вып. 3. С. 371-382.
9. СТО 22-04-02 Руководство по отбору микропроб, проб и определению механических свойств сталей в металлических конструкциях неразрушающим методом.
10. Румянцев М.И., Ручинская Н.А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством: Учебное пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. 207 с.
11. М.И. Розно, Л.В. Шинко. Пора заняться техпроцессом. Н. Новгород: СМЦ «Приоритет», 2005. 46 с.

УДК 621.771

### РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕНСИВНОЙ<sup>1,2</sup> ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Лещев И.В.**

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет*

*имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия*

#### **1 Влияние механизма деформации на формирование субмикроструктурной структуры сталей и сплавов**

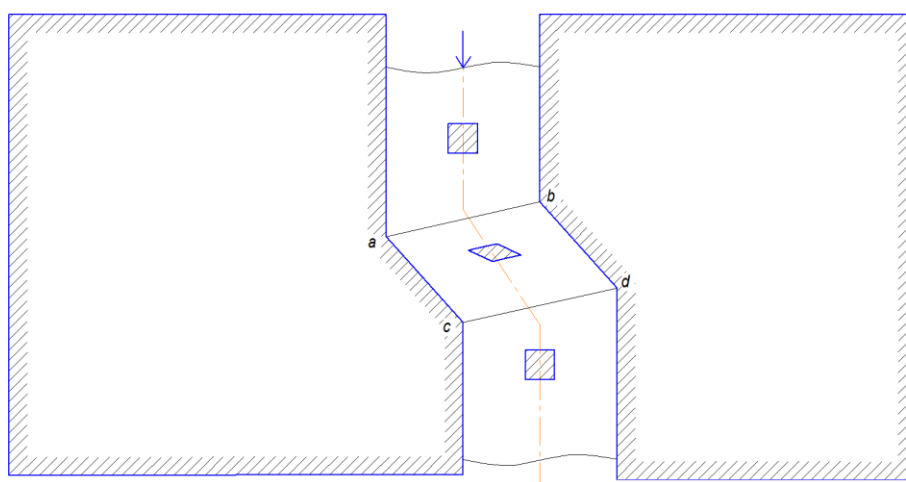
Необходимые эксплуатационные характеристики изделиям металлургического производства можно обеспечить формированием ультрадисперсной зеренной (УДЗ) структуры сталей и сплавов. Материалы с УДЗ структурой подразделяются на нанокристаллические (НК) ( $d < 100$  нм) и субмикроструктурные (СМК) ( $0,1 < d < 1$  мкм). В.М. Сегал и В.Я. Щукин разработали новый способ пластической деформации простым сдвигом [1, 2], названный способом равноканального углового прессования (РКУП) (рис. 1).

Особенностью способа является пластическая проработка структуры металла без изменения формы и размеров заготовки. Было установлено, что предложенный способ интенсивной сдвиговой деформации, локализованной на стыке каналов  $ab$  и  $cd$  способствует благоприятному структурообразованию [3] и уменьшению размера зерна после рекристаллизации.

1. Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (Номер гос. регистрации: 114122470051).

2. Исследование выполнено в рамках Программы повышения конкурентоспособности: «Исследование поддержано программой 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

В работах [4, 5] в результате моделирования термомеханического состояния металла и эволюции зеренной структуры было показано, что при интенсивной деформации происходит образование субзерен с большой угловой разориентировкой на субграницах. Субзеренную структуру с большой угловой разориентировкой и высокой подвижностью границ субзерен называют полигонизованной, а субзерна в дальнейшем выполняют роль центров рекристаллизации и обеспечивают формирование СМК структуры после деформации. Интенсивная знакопеременная деформация этот эффект по-видимому усиливает (см. **рис. 1**). Благодаря этой особенности предложенный В.М. Сегалом способ интенсивной пластической деформации (ИПД) заинтересовал и получил развитие в работах многих ученых в нашей стране и за рубежом.



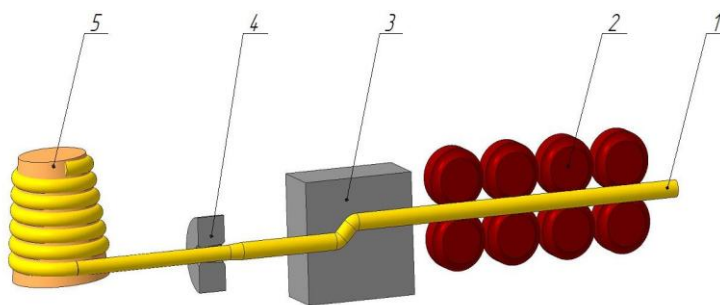
**Рис. 1. Схема РКУП [1]**

В Уфимском академическом центре под руководством О.А. Кайбышева и Р.З. Валиева выполнены фундаментальные исследования использования способа ИПД для разработки технологии производства СМК и НК материалов, обладающих высоким уровнем механических свойств и эксплуатационных характеристик [6-15]. Отметим некоторые работы зарубежных ученых [16-25]. В представленных патентах США и Англии [16-19] сохраняется идея В.М. Сегала осуществлять пластическую деформацию простым сдвигом. Заготовка деформируется в матрице без изменения формы и размеров. Отличительная особенность предложенных технических решений заключается в конструкции подающего заготовку устройства. Приложение силы прессования осуществляется благодаря активным напряжениям трения на контактной поверхности задающего устройства и заготовки перед деформирующей матрицей.

В работах [26, 27] большое внимание уделено вопросам управления размерами локального очага деформации и амплитудой интенсивной знакопеременной деформации путем изменения напряжений трения в деформирующей матрице, а также проблеме разрушения изделия при многократном прессовании без промежуточной термообработки.

Способы и оборудование для ИПД получили развитие и в Карагандинском государственном индустриальном университете при выполнении Национальной программы в области нанотехнологий в Республике Казахстан [28-37]. Эти работы посвящены изучению эффекта влияния интенсивной знакопеременной деформации металла на структуру, свойства и силовые характеристики процесса РКУП, и особое внимание в этих работах уделено созданию непрерывных совмещенных процессов с применением РКУП. Одной из таких технологий является совмещенный процесс РКУП – волочения (**рис. 2**). Работы, направленные на изучение и модернизацию РКУП, выполнялись в Магнитогорском государственном техническом университете имени Г.И. Носова, Национальном исследовательском технологическом

университете «МИСиС», Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, а также Институте физики металлов УрО РАН.



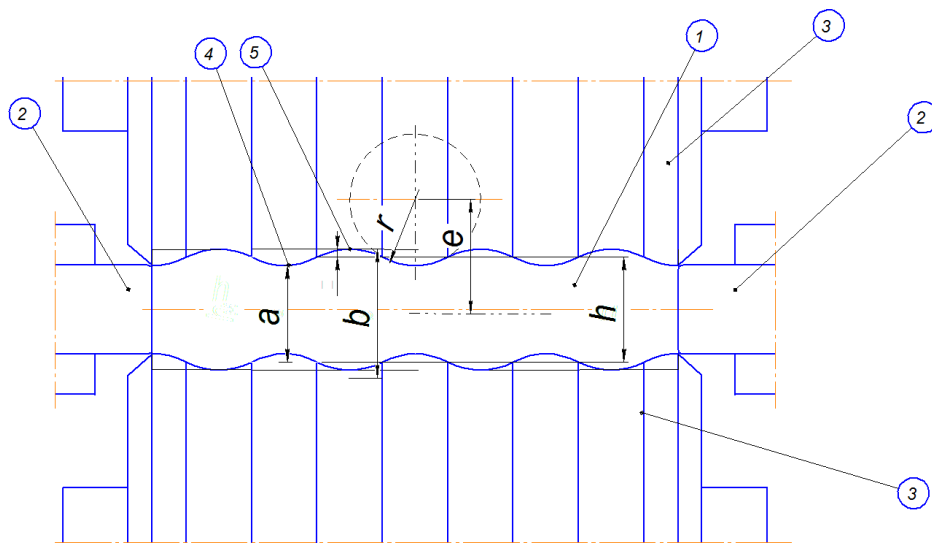
**Рис. 2. Схема совмещенного процесса «прессование-волочение»:**  
**1 – проволока; 2 – задающее устройство;**  
**3 - равноканальная ступенчатая матрица; 4 – волока в волокодержателе;**  
**5 – барабан наматывающий**

Из традиционных способов знакопеременной деформации, позволяющих получать длинномерные изделия со значительными изменениями микроструктуры, следует отметить винтовую прокатку, известную также как радиально-сдвиговая прокатка. Заготовка перед входом в очаг деформации, в процессе прокатки и по выходу из валков совершает винтовое движение и все элементарные объемы металла также перемещаются по винтовым траекториям [38]. Г.И. Эскин и Е.И. Панов в работе [38] указали, что при применении винтовой прокатки удастся в 2-3 раза увеличить пластичность заэвтектических силуминов при удовлетворительных показателях их прочности. При исследовании процесса обжатия непрерывнолитой заготовки из стали 32ХГ на трехвалковом стане в работе [39] авторами было показано, что вследствие знакопеременного характера деформации по сравнению с продольной прокаткой наблюдается уменьшение размера аустенитного зерна в 5-6 раз. На трубопрокатном агрегате ТПА-80 ОАО «Синарский трубный завод» (СинТЗ) была установлена трехвалковая обжимная клеть. После применения операции обжатия непрерывнолитых заготовок с диаметра 150 (156) мм на круг 120 мм производительность трубопрокатного агрегата возросла на 15 %, а себестоимость труб снизилась на 10 %. Было установлено, что применение трехвалкового стана винтовой прокатки способствует повышению однородности деформации, интенсивной проработке грубой литой структуры, уменьшению пористости в осевой зоне литой заготовки и повышению технологических характеристик металла [39]. На основании вышесказанного следует сделать вывод, что применение интенсивной знакопеременной деформации способствует формированию мелкозернистой структуры, повышению уровня механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий металлургических производств. Однако развитие идеи применения механизма интенсивной знакопеременной деформации с целью разработки инновационных процессов обработки металлов давлением требует фундаментальных как теоретических, так и экспериментальных исследований эффекта, обнаруживаемого при РКУП. Необходимо также решение изобретательских задач при создании новых процессов и оборудования. В работе это показано частично на примере модернизации процесса прокатки высоких заготовок [40-45].

## **2. Разработка и теоретическое обоснование нового способа прокатки высоких заготовок**

В работах [44-45] был предложен новый способ прокатки и инструмент деформации, обеспечивающие интенсивную знакопеременную деформацию при малом изменении разме-

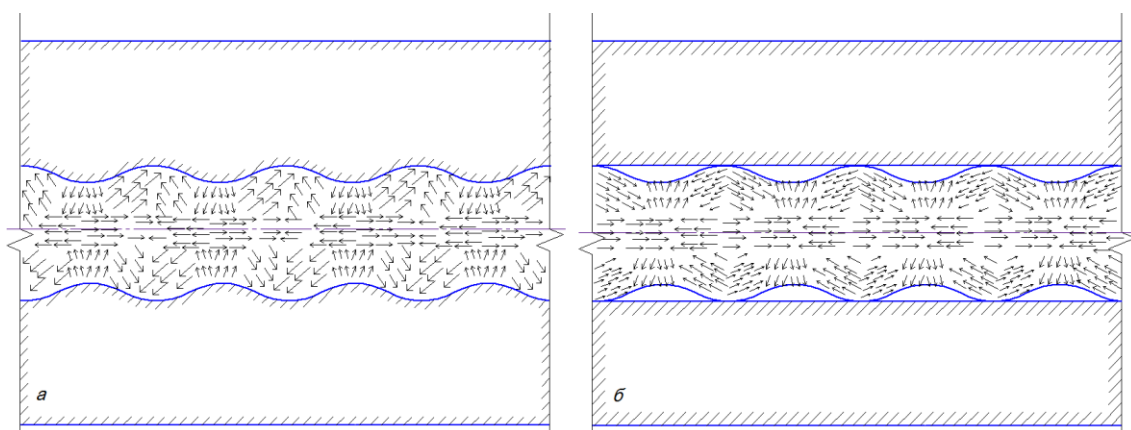
ров заготовки. Реализация способа предполагает применение валковых узлов с профилированными рабочими валками в первой клетке и с валками с гладкой бочкой во второй клетке. Предлагаемый валковый узел позволяет прокатывать заготовки с неизменной шириной  $B = \text{const}$ , что способствует повышению однородности деформационной проработки литой структуры в объеме раската. Для предотвращения уширения металла при прокатке в паре с горизонтальными приводными валками применяются вертикальные не приводные валки с зазором между ними равным ширине сляба  $B$  в исходном состоянии. На поверхности бочки горизонтальных приводных валков чередуются кольцевые бурты 4 и ручьи 5, причем радиус профиля ручьев  $r$  равен радиусу профиля буртов  $r$ , а расстояния между линиями центров цилиндрических поверхностей буртов и ручьев определяется параметром  $e$ . Валки устанавливаются с зазором между вершинами кольцевых буртов на величину  $a = h - \Delta h$  а между вершинами кольцевых ручьев – на величину  $b = h + \Delta h$ , где  $h$  – высота прокатываемой полосы,  $\Delta h$  – высота сектора окружности кольцевого ручья, определяемая из выражения  $\Delta h/2 = r - e/2 - \Delta h = 2r - e$  (рис. 3).



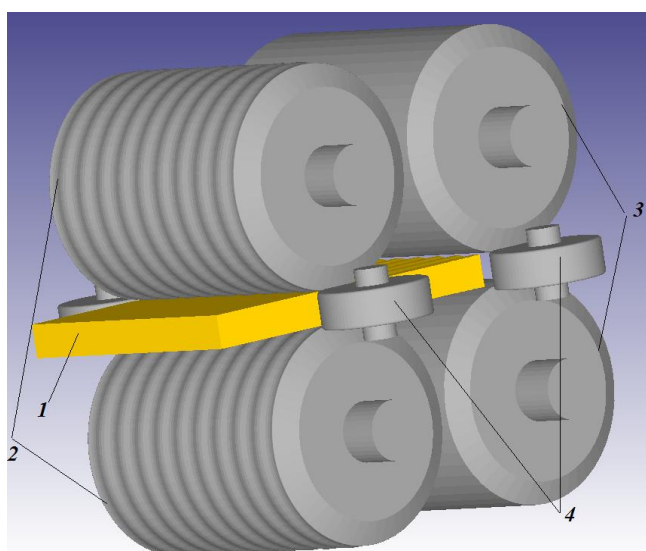
**Рис. 3. Валковый узел:**  
**1 – заготовка; 2 – вертикальные не приводные валки;**  
**3 – горизонтальные приводные валки;**  
**4 и 5 –кольцевые бурты и ручьи на бочке горизонтальных валков**

Предварительно нагретую непрерывно-литую заготовку подают в валковый узел предложенной конструкции и осуществляют в первом проходе единичное обжатие сляба буртами приводных валков до полного заполнения металла полости ручьев, металл заполняет пространство ручьев валка, образуются цилиндрические выступы на поверхности заготовки (рис. 4, а). Во втором проходе при прокатке профилированной полосы в гладких валках, происходит выравнивание поверхности заготовки, происходит обжатие профилированной полосы с обеспечением знакопеременного течения металла, что способствует повышению однородности распределения степени деформации в объеме полосы (рис. 4, б).

Рациональная калибровка инструмента и оптимальные режимы обжатия были определены из условий полного заполнения металла ручьев валка и достижения проникновения деформации в осевую зону заготовки с равномерным распределением степени деформации в объеме проката при минимальных изменениях размеров исходной заготовки. В программе DEFORM-3D (лицензия кафедры ОМД УрФУ) были поставлены и решены задачи МКЭ-моделирования нового способа прокатки толстого листа. Твердотельная модель нового способа прокатки сляба представлена на рис. 5.



**Рис. 4. Векторное поле скоростей частиц металла при обжатии на профильной (а) и гладкой бочках валков (б)**



**Рис. 5. Твёрдотельная модель нового способа прокатки сляба: 1- заготовка; приводные вертикальные валки с профилированной 2 и гладкой 3 бочками; 4 – не приводные горизонтальные валки**

Для определения рациональной формы цилиндрических сегментов буртов и ручьев валка и оптимальных величин обжатия заготовки за два прохода, соотношение параметров  $e$  и  $r$  варьировали на трех уровнях:  $e/r - 1,7; 1,8; 1,9$ , где  $e$  – расстояния между линиями центров цилиндрических поверхностей буртов и ручьев, а  $r$  – их радиус; величины относительных обжатий  $\Delta h/h$  в рассматриваемом способе прокатки принимались равными  $\Delta h/h = 0,10; 0,15; 0,20$ , где  $\Delta h = h - h_1$  – абсолютное обжатие по высоте сляба  $h$  за два прохода прокатки. Заполнение металла полости ручьев валка количественно оценивалось через коэффициент заполнения –  $\delta = \frac{h_{ме}}{h_p} 100\%$ , где  $h_{ме}$  – высота элемента сляба, заполнившего

полости ручьев валка;  $h_p$  – высота сектора окружности кольцевого ручья (см. **рис. 2**). Для оценки неравномерности распределения деформации по высоте слитка выполнялся расчет степени деформации  $\varepsilon_{ui}$ , которая была накоплена шестью частицами металла с различной

высотной координатой в сечении под ручьем валка (сечение I-I) и шестью частицами металла – в сечении под буртом валка (сечение II-II): P1, P7 – частицы на наружной поверхности заготовки ( $y = h/2$ ); P6, P12 – частицы на плоскости симметрии ( $y = 0$ ). После второго прохода прокатки сляба гладкими валками производился расчет суммарной степени деформации  $\varepsilon_{\Sigma ui}$ , накопленной частицами металла в выбранных сечениях прокатываемой полосы. Неравномерность распределения деформации по высоте слитка оценивалась с помощью коэффициента вариации

$$S/\overline{\varepsilon_u},$$

где  $S = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \overline{\varepsilon_u})^2 \right]^{1/2}$  – среднеквадратичное отклонение;  $\overline{\varepsilon_u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ui}$  –

среднее значение степени деформации по высоте;  $i$  – номер частицы;  $2n = 11$ .

Теоретическое исследование нового способа прокатки заготовки показало, что рациональным является суммарное обжатие полосы за два прохода на величину  $\Delta h/h = 0,15$  и  $0,20$ . Коэффициент вариации  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$ , который количественно определяет степень неоднородности деформации по высоте высокой заготовки, изменяется в пределах  $0,12-0,15$ , что может говорить о высоком уровне деформационной проработки литой структуры металла. По результатам решения задач МКЭ-моделирования установлено, что значение параметра формы профилированного валка  $e/r$  необходимо выбирать в диапазоне  $(1,8-1,95)$ . В этом случае, как показали исследования, металл полностью заполняет ручки валка при минимальном обжатии заготовки, создаются условия для обеспечения знакопеременного течения металла при выравнивании поверхности раската при прокатке в гладких валках при незначительных изменениях формы и размеров заготовки.

Для проверки целесообразности применения предлагаемого способа прокатки литого сляба ставилась задача сравнительного анализа деформированного состояния при прокатке сляба в валках с гладкой бочкой за один проход прокатки и в два прохода – обжатие заготовки в валковом узле предложенной конструкции с последующим выравниванием поверхности полосы и с обеспечением знакопеременной деформации. Для исследования были выбраны заготовки высотой  $h = 200, 150$  и  $100$  мм. Суммарное обжатие по высоте принималось равным  $\Delta h/h = 0,15$  и  $0,2$ . Полученные результаты оценки деформированного состояния при прокатке заготовки по предлагаемому способу, сравнивались с данными, полученными при моделировании прокатки полосы в один проход в гладких валках ( $R_g = 550$  мм).

По результатам расчетов было отмечено, что значение степени деформации в осевой зоне сляба, по предлагаемому способу (прокатка в профилированных, а затем в гладких валках), превышает в  $1,5-2$  раза значение  $\varepsilon_{ui}$  после прокатки заготовки в гладких валках с той же величиной абсолютного обжатия –  $\Delta h/h = 0,15$  и  $0,2$ ; а в области контакта заготовки с инструментом –  $2-2,5$  раза. Результаты расчетов коэффициента вариации  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$ , который количественно оценивает степень неоднородности деформации по высоте заготовки, показали, что при прокатке в один проход в гладких валках имеем более неоднородное распределение деформации по сечению очага деформации, чем при прокатке по предлагаемому способу –  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  в  $1,3-1,5$  раза выше, чем при прокатке по предлагаемому способу в условиях знакопеременной деформации.

## Выводы

Требуемые эксплуатационные характеристики сталям можно обеспечить формированием в металле однородной в объеме УДЗ структуры. Перспективным является развитие идеи интенсификации процессов обработки металлов давлением, а также разработки новых схем



деформации заготовки, в которых реализуется немонотонный характер течения частиц металла при прокатке. Однако, освоение в промышленности способов для получения материалов с УДЗ структурой требует разработки новых технических решений.

Предложены способ прокатки и инструмент деформации, с целью обеспечения интенсивной знакопеременной деформации в очаге деформации при минимальных изменениях размеров заготовки. В результате компьютерного моделирования установлено, что при прокатке по новому способу, по сравнению с существующим способом прокатки, средняя степень деформации  $\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  увеличивается в 2 раза, а показатель неоднородности деформации по толщине листа  $(S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}})$  уменьшается в 1,3-1,5 раза. Предлагаемый способ прокатки в два прохода позволит повысить качество проката за счет обеспечения интенсивной знакопеременной деформации в очаге деформации при минимальных изменениях формы и размеров заготовки.

### Список литературы

1. А.с. СССР 492780, МКИ 3 G01N 3/00. Устройство для упрочнения материала давлением / В.М.Сегал, В.Я.Щукин (СССР). 1924516/25-28: Заявлено 11.06.73. Опубл. 23.02.76. Бюл. 43.
2. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский В.И. Копылов // Известия АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115-123.
3. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования. Минск: Наука и техника. 1994. 232 с.
4. Богатов А.А., Левин И.В. О математическом моделировании формоизменения и эволюции зеренной структуры металла при обработке давлением // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2006. № 1. С. 34-46.
5. Богатов А.А., Кушнарев А.В. Моделирование термомеханического состояния металла и эволюции зеренной структуры в механике обработки металлов давлением // Производство проката. 2015. № 6. С. 42-48.
6. Imaev R.M., Imaev V.M., Salishchev G.A. The development of the submicrocrystalline structure in intermetallic TiAl during hot deformation // J. Mater. Science, 1992, V. 27. Pp. 4465 - 4470.
7. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties // J. Mater. Sci. 1993. V. 28. Pp. 2898-2902.
8. Kaibyshev O., Kaibyshev R., Salishchev G. Formation of submicrocrystalline structure in materials during dynamic recrystallization // Mater. Sci. Forum. 1993. V.113-115. Pp. 423-428.
9. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation // Mater. Sci. Eng. 1993. V.A186. Pp. 141-148.
10. Формирование субмикроструктуры в меди и никеле с использованием интенсивного сдвигового деформирования / Н.А. Ахмадеев, Р.З. Валиев, В.И. Копылов, Р.Р. Мулюков // Металлы. 1992. Т. 5. С. 96-101.
11. Valiev R.Z., Tsenev N.K. In: Hot deformation of aluminum alloys (ed. by T.G. Langdon, H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi). TMS. Warrendale, PA. 1991. P. 319.
12. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicrograined structure // Mat.Sci.Eng.A. 1991. V.137. Pp. 35-40.
13. Валиахметов О.Р., Галеев Р.М., Салищев Г.А. Механические свойства титанового сплава VT8 с субмикроструктурной структурой // ФММ. 1990. Т.10. С. 204-206.
14. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: ЛОГОС, 2000. 272 с.
15. Патент РФ № 2181314. Устройство для обработки металлов давлением Рааб Г.И., Кулясов Г.В., Полозовский В.А., Валиев Р.З., 2002.
16. Zhu Yuntion, Lowe Ferry, Valiev Ruslan, Raab Georgy Continuous equal channel angular pressing. Patent US, US 7152448 (B2), 2006-12-26, B 21C23/00.

17. Huang Yan Microstructure refinement by continuous frictional extrusion. Patent GB, GB 2409997 (B), 2007-09-19, B 21C23/21.
18. Zhu Yuntion, Lowe Ferry, Valiev Ruslan, Stolyarov Vladimir, Latysh Vladimir, Raab Georgy. Ultrafine – grained titanium for medical implants. Patent US, US 86399215 (B1), 2002-05-04, B21C23/01.
19. Keener Steven, Runyan Max Method of preparing ultra-fine grain metallic articles and metallic articles prepared thereby. Patent US, US 82004123638 (A1), 2005-07-05. C23/00.
20. Anumalasetty Venkata Nagasekhar, Hyoung Seop Kim. Analysis of T-shaped Equal Channel Angular Pressing using the Finite Element Method.// METALS AND MATERIALS International, 2008. Vol. 14. No. 5. Pp. 565-568.
21. I.H. Son, Y.G. Jin, Y.T. Im. Finite element investigations of friction condition in equal channel angular extrusion // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006. Vol. 17, Issue 1-2.
22. S. Ruzs, K. Malanik, M. Klos. Increasing SPD effectiveness by changing deformation process in the first pass through the ECAP die // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007. Vol. 23. Issue 2.
23. J. Maciejewski, H. Kopeć, H. Petryk. Finite element analysis of strain non-uniformity in two processes of severe plastic deformation // ENGINEERING TRANSACTIONS Engng. Trans., 2007. Vol. 55. Issue 3. Pp. 197–216.
24. Prediction of Temperature Rise in Equal Channel Angular Pressing. Hyoung Seop Kim // Material Transactions, 2001. Vol. 42, No. 3. Pp. 536 – 538.
25. Process Modelling of Equal Channel Angular Pressing for Ultrafine Grained Material / Hyoung Seop Kim, Pham Quang, Min Hong Seo, Sun Ig Hong, Kyeong Ho Baik, Hong Rho Lee, Do Minh Nghiep // Materials Transactions. Special Issue on Ultrafine Grained Structures, 2004. Vol. 45, No. 7. Pp. 2172 – 2176.
26. Богатов А.А., Лещев И.В. Механика деформирования и разрушения металла при равноканальном угловом прессовании в условиях плоской деформации.// Республиканский научный журнал. Технология производства металлов и вторичных материалов. Темиртау. 2011.
27. Богатов А.А., Лещев И.В. Механика деформирования и разрушения металла при равноканальном угловом прессовании в условиях плоской деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 1. С. 17-20.
28. Инновационный патент Республики Казахстан № 20970. Устройство для углового прессования. Найзабеков А.Б., Андреященко В.А., Лежнев С.Н. Бюл. 3, 2009.
29. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н. Исследование процесса деформирования заготовок в ступенчатом инструменте с роликами // Технологии и машины обработки металлов давлением. Челябинск, 2006. С. 24-27.
30. Лежнев С.Н., Шлычков А.С., Ефремов К.С. Теоретическое исследование процесса деформирования металла в равноканальной ступенчатой матрице с дополнительным противодавлением // 3-я Международная Казахстанская металлургическая конференция «Казахстанской Магнитке 50 лет», (Сборник трудов)/ Темиртау, 2010. С. 173-178.
31. Лежнев С.Н. Моделирование и исследование процесса прессования заготовок круглого поперечного сечения в равноканальной ступенчатой матрице с разной шероховатостью каналов матрицы // Республиканский научный журнал. Технология производства металлов и вторичных материалов. Темиртау, 2010, №2. 168-173.
32. Патент Республики Казахстан № 25864. Устройство для прессования металла. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Бюл. 6. 2013.
33. Патент РК № 25863. Устройство для непрерывного прессования металла. Обработка металлов давлением. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. МКИЗ В21 J 5/00, Бюл. № 7. 2013.
34. Патент РК № 25862. Устройство для непрерывного прессования металлов и сплавов. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. МКИЗ В21 J 5/00. Бюл. № 7, 2013.

35. Патент РК № 27262. Устройство для непрерывного прессования металла. Обработка металлов давлением. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А. МКИЗ В21 J 5/00. (уведомление № 6263 от 05.03.2015).
36. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Чукин М.В. Разработка и теоретическое исследование совмещенного процесса «прокатка-прессование», позволяющего получать металл с субультрамелкозернистой структурой // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвузовский сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. госуд. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 37. С. 3-12.
37. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Волокитин А.В. Исследование влияния нового совмещенного процесса деформирования «прессование-волочение» на эволюцию микроструктуры стальной проволоки // XIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and material engineering», Czestochowa, Poland, 2012. Pp. 433-437.
38. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов. МиТОМ. 2004. №. С. 7-13.
39. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывно-литой заготовки // Черные металлы. 2012, март. С. 18-21.
40. Заявка № 2014135430 Российская Федерация МПК В21J 13/02. Кузнечный инструмент / Богатов А.А., Нухов Д.Ш. № 2014135430; заявл. 29.08.2014.
41. Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Разработка способа и научных основ процесса деформации заготовки без изменения формы // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 3. С. 20-23.
42. Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Компьютерное моделирование нового способа кузнечной протяжки полос // Производство проката. 2015. № 3. С. 25-27.
43. Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование кузнечной протяжки полос без изменения формы и размеров в условиях знакопеременной деформации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. № 6. С. 442-428.
44. Заявка № 2015125502 Российская Федерация МПК В21J 13/02. Способ прокатки литого сляба / Богатов А.А., Нухов Д.Ш. № 2015125502; заявл. 26.06.2015.
45. Валковый узел: пат. Рос. Федерация. № 02029899 / А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов, № 2015119322; заявл. 21.05.2015; опубл. 28.08.2015. 3 с.

**УДК 621.778**

**ПОВЫШЕНИЕ КОМПЛЕКСА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ  
СОВМЕЩЕННО-КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ВОЛОЧЕНИЯ\***

**Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.**

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия*

Уровень свойств металлопродукции во многом определяется способом ОМД и присущими этому способу технологическими приемами. Для стальной проволоки, изготавливаемой способом волочения через монолитные волокна, характерно интенсивное снижение пластических свойств и накопление микродефектности. Причина такого поведения металла в особенностях способа – высоком контактном трении, дополнительных сдвигах металла в рабочем конусе волокна, неблагоприятной схеме напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, характеризующейся интенсивным одноосным растяжением.

\*Работа проведена в рамках реализации госзадания по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525.2014К от 18.07.2014); а также при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0178).

Это не позволяет реализовать высокие прочностные характеристики проволоки и осложняет ее дальнейшую переработку. Кроме того, все характеристики, как пластические, так и прочностные, имеют тенденцию к снижению при увеличении диаметра изготавливаемой проволоки.

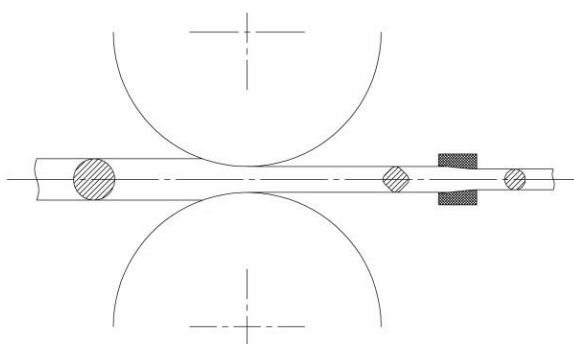
Одновременно с развитием технического прогресса растет и потребность в высококачественной проволоке, что определяет необходимость усовершенствования существующей технологии волочения. Несмотря на применение более совершенных волочильных смазок, конструкции волочильного инструмента, способа охлаждения проволоки и волок, значительного качественного прорыва в области традиционного волочения не происходит. Решение проблемы заключается не только в совершенствовании традиционного способа волочения, но и в разработке и внедрении новых технологических процессов производства проволоки, построенных по иному принципу. Появление альтернативных способов получения проволоки, таких как прокатка, безфильерное волочение, показало, что, несмотря на определенные достоинства, они не вполне пригодны для массового производства проволоки и поэтому они широкого распространения не получили.

Одним из вариантов совершенствования способа волочения может быть применение новых технических решений, основанных на комбинированных методах обработки металлов давлением. В отличие от совмещенных процессов, заключающихся в объединении в одной линии нескольких отдельных технологических операций, не меняя при этом сути волочения в монолитных волоках, для комбинированных характерно сочетание нескольких схем деформации. Комбинированный процесс представляет собой способ обработки металлов давлением, образующийся в результате объединения простых операций (прокатки, волочения, прессования), и в котором происходит интегральное наложение нагрузок в очаге деформации. Осуществление пластической деформации путем комбинированного приложения внешней нагрузки имеет большое значение в воздействии на контактные напряжения. Путем принудительного изменения кинематики контактных скольжений достигается снижение негативного действия сил трения и превращение их в активные силы, способствующие развитию деформации. Происходящая при этом смена схем деформации положительно влияет на напряженно-деформированное состояние заготовки: смена направления течения металла, появление новых систем скольжения способствуют повышению пластических характеристик проволоки. В итоге получается процесс, обладающий в силу синергетического эффекта новым комплексом свойств. В последние годы появилась тенденция разработки совмещенно-комбинированных процессов, когда на каждом последовательном этапе обработки может применяться комбинированный процесс [1, 2, 3].

Следует отметить, что широкое применение комбинированных способов во многом ограничивается необходимостью создания специального оборудования и оснастки, т.к. они не всегда встраиваются в существующие технологические линии.

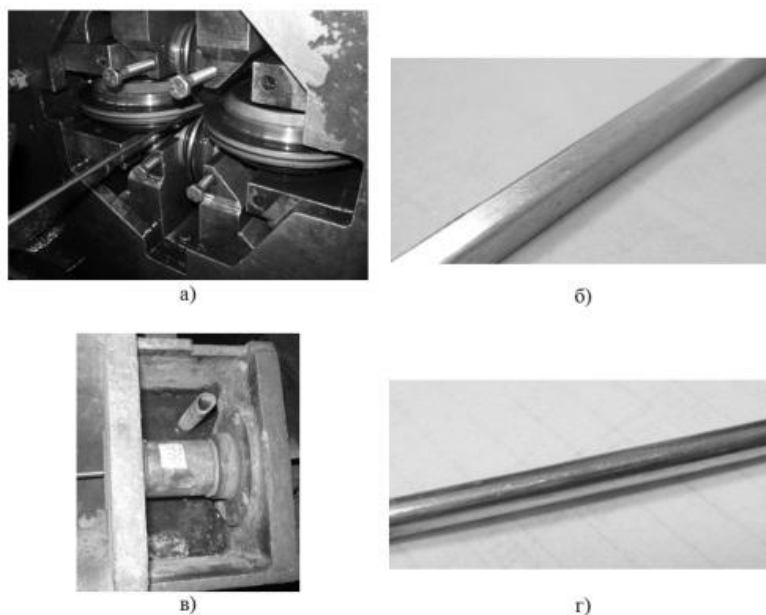
В работе [4] предложен совмещенно-комбинированный способ волочения, который представляет собой последовательную деформацию волочением в роликовой и монолитной волоках, осуществляемую за счет приложенного к переднему концу проволоки вытягивающего усилия (**рис. 1**). Обжатие за проход поделено между волочением в неприводных роликах, где преобладает схема напряженного состояния всестороннего сжатия, и волочением через монолитную волоку с двухсторонним сжатием и одноосным растяжением. Причем основная деформация происходит в монолитной волоке, а в роликовой волоке – дополнительная. При этом процесс изготовления проволоки, как и в случае традиционного волочения, остается многократным, но взамен мыльниц с волокодержателями на каждом блоке волочильной машины устанавливаются специализированные комбинированные волочильные модули. Модуль легко встраивается в линию обычной волочильной машины и не требует ее значительного переоборудования, и поэтому технологическая схема изготовления проволоки

остается традиционной. Подготовка поверхности заготовки осуществляется травлением или механическим способом в линии стана.



**Рис. 1. Схема совмещенно-комбинированного способа «прокатка-волочение»**

Способ изготовления проволоки прокаткой или волочением в роликовых волоках на готовый размер с калибровкой в монолитной волоке для достижения требуемой точности диаметра не рассматривался в виду того, что он не предполагает чередования схем деформации (рис. 2). Такой способ был бы целесообразен при производстве проволоки из труднодеформируемых сталей и сплавов из-за лучших условий деформирования. Для производства проволоки из углеродистой стали и особенно для проволоки больших диаметров с целью получения комплекса высокой прочности и достаточной пластичности необходимо комбинированное деформирование.



**Рис. 2. Четырехроликковая волока (а) для волочения промежуточного профиля (б) и монолитная волока (в) для волочения готовой проволоки (г)**

При использовании этого способа волочения предполагалось реализовать следующие его преимущества. Во-первых, за счет чередования схем деформации обеспечить лучшую деформируемость металла и более высокий уровень пластических свойств стальной проволоки. Во-вторых, снизить контактное трение, т.к. в роликовой волоке оно частично заменяется трением качения в подшипниках, а активная часть сил трения способствует втягиванию

металла в калибр валков. Отрицательный характер носит только та часть сил трения, которая возникает в канале монолитной волоки.

Одновременно применение совмещенно-комбинированного способа волочения позволит более эффективно использовать волочильное оборудование и снизить энергозатраты. Выполненный анализ параметров волочения показал, что при традиционном волочении существуют значительные резервы энергосбережения. Как правило, мощность оборудования позволяет вести волочение с более высокими, чем принято, единичными обжатиями, но они ограничиваются требованиями по уменьшению нагрева и деформационного старения, снижения расслаиваемости и др. [5]. В работе [6] показано, что мощность привода стандартного волочильного оборудования, например, станов SKET, достаточна для протягивания проволоки одновременно через клеть и монолитную волоку. При этом усилие волочения и энергозатраты возрастают незначительно, и имеется достаточный запас прочности для ведения безобрывного волочения. В связи с этим, комбинированный способ позволяет осуществить дополнительную загрузку двигателей привода волочильной машины и использовать их с более высоким КПД. При использовании комбинированного волочения можно распределить частные обжатия между монолитной и роликовой волоками так, чтобы можно было повысить частные обжатия и уменьшить число переходов, интенсифицируя тем самым технологический процесс.

Положительной стороной предложенного способа является и то, что он позволяет использовать имеющееся в метизном производстве оборудование и инструмент, совместим со скоростями грубого и среднего волочения проволоки, отличается простотой установки.

Выполненные промышленные эксперименты подтверждают, что при изготовлении стальной проволоки предлагаемым способом можно обеспечить существенное повышение ее механических свойств. В первую очередь, это выражается в сохранении более высокой пластичности проволоки. Результаты испытаний механических свойств проволоки диаметром 4,0 и 5,0 мм, изготовленной традиционным и комбинированным способами, приведены в таблице.

В экспериментах в качестве промежуточного профиля, получаемого в неприводной роликовой клетке, был использован невыполненный квадрат. Это связано с простотой его получения в имеющихся 4-х роликовых неприводных клетках типа TURKS HEAD. Однако форма промежуточного профиля может быть любой (круг, правильный многоугольник). Главное условие - разделение общей деформации за проход на две части, имеющие разные схемы напряженного состояния, а при многократном волочении будет происходить их чередование.

### Механические свойства проволоки

Способ изготовления	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Удлинение $\delta_{100}$ , %	Сужение $\varphi$ , %	Число перегибов	Число скручиваний	Оценка состояния скрученных образцов
Диаметр 4,0 мм						
Традиционный	$\frac{1540 - 1550}{1545}$	$\frac{3,2 - 3,4}{3,3}$	49,5	$\frac{10 - 11}{10,7}$	$\frac{27 - 34}{31}$	Расслоения нет
Комбинированный	$\frac{1440 - 1450}{1445}$	$\frac{4,1 - 4,4}{4,3}$	55	$\frac{12 - 13}{12,4}$	$\frac{34 - 38}{36,3}$	Расслоения нет
Диаметр 5,0 мм						
Традиционный	$\frac{1538 - 1534}{1536}$	$\frac{3,5 - 3,9}{3,7}$	51	$\frac{12 - 15}{13,3}$	$\frac{24 - 27}{25,7}$	Расслоения нет
Комбинированный	$\frac{1561 - 1544}{1552,5}$	$\frac{3,6 - 3,8}{3,7}$	50	$\frac{12 - 13}{12,7}$	$\frac{26 - 31}{28}$	Расслоения нет

С применением программного комплекса «DEFORM-3D» проведены моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния в рабочем конусе монолитной волоки при

волочении проволоки по схеме «невыполненный квадрат - круг». Моделирование выполняли в соответствии с принятыми в экспериментах маршрутами волочения.

Определено [7], что устойчивость процесса волочения и стойкость волочильного инструмента зависят от формы промежуточного профиля. Как правило, простейшие профили (овальные, треугольные, квадратные) получают в 2-, 3- и 4-х валковых калибрах. Из них наибольшей вытяжной способностью, меньшей склонностью к переполнению калибра и меньшим уширением при равных деформациях обладают 4-х валковые калибры. Эти калибры благоприятны и с точки зрения схемы напряженного состояния и повышения КПД деформации и получения высокой точности профиля [8]. В результате моделирования установлено, что промежуточный профиль, получаемый в 4-х роликовых неприводных клетях TURKS HEAD, должен представлять собой невыполненный квадрат с большим радиусом закругления. Это целесообразно и для снижения нагрузки на стенки монолитной волоки при последующем протягивании профиля.

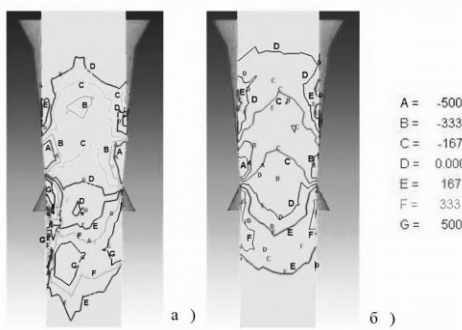
Для расчета обжатий в модуле на основе экспериментальных данных получена зависимость коэффициента заполнения калибра  $K_3$ , определяемого как отношение фактической площади поперечного сечения профиля к площади квадратного калибра, от величины коэффициента вытяжки  $\mu$ :

$$K_3 = -137,28\mu^4 + 643,13\mu^3 - 1129,3\mu^2 + 881,17\mu = 256,935.$$

Установлено, что наиболее благоприятные условия в монолитной волоке можно обеспечить при волочении промежуточного квадратного профиля о степенью заполнения калибра  $K_3$  не более 0,9. В этом случае напряженное состояние в рабочем конусе монолитной волоки мало отличается от стандартного волочения «круг в круг». Анализ результатов компьютерного моделирования координатных сеток позволяет сделать следующее заключение о положении зон интенсивного течения металла:

- наиболее интенсивная деформация происходит по диагоналям квадратной полосы;
- в поперечных сечениях с увеличением обжатия происходит перетекание металла из зон с повышенной деформации в зоны с меньшей деформацией, затем деформация по сечению выравнивается и определяется сжимающими напряжениями;
- в целом, несмотря на разницу в степени деформации по сторонам и диагоналям квадратного сечения, сильного искривления координатной сетки и интенсивных сдвигов не наблюдается, что говорит о достаточно равномерной и глубокой проработке металла по сечению.

В результате компьютерного моделирования в DEFORM-3D установлено, что при совмещенно-комбинированном волочении, распределение напряжений в очаге деформации калибрующей монолитной волоки имеет ту же картину, что и при традиционном волочении, но интенсивность поверхностных растягивающих напряжений значительно ниже (рис. 3).



**Рис. 3. Напряженное состояние в деформационной зоне при волочении проволоки диаметром 4,00 мм в монолитных волоках (а) и совмещенно-комбинированным способом (б)**

Выполненные расчеты [9-11] показали, что использовать комбинированное волочение целесообразно при изготовлении проволоки средних и больших диаметров, т.к. на практике с увеличением диаметра протягиваемой проволоки применяют пониженные частые обжатия.

В результате проведенных исследований разработана методика определения частных вытяжек и их распределения в модуле между операциями протяжки в роликах и монолитной волоке, необходимая для построения маршрутов комбинированного волочения [2].

Выполненная работа доказывает, что комбинированные процессы существенно расширяют технологические возможности традиционных способов обработки металлов давлением. Предложенный совмещенно-комбинированный способ волочения обеспечивает получение стальной высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами. Действие двух схем деформации позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием, способствует повышению деформируемости металла и сохранению его пластических свойств, что подтверждается экспериментальными исследованиями. При этом возможно осуществлять волочение с более высокими единичными обжатиями за меньшее число проходов и снизить тем самым энергозатраты.

Таким образом, разработка и реализация комбинированных процессов является важной задачей, позволяющей улучшить технико-экономические показатели процесса, обеспечить получение высококачественной стальной проволоки и повысить ее конкурентоспособность.

### Список литературы

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
2. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Совершенствование технологии производства проволоки на основе разработки модульно-комбинированных процессов волочения // *Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XIXМ междунар. науч.-практ. конф.* В 2 ч. Ч. 2. / Сиб. гос. индустр. ун-т под ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2015. 333 с., ил.
3. Харитонов В.А., Радионова Л.В., Зюзин В.И. Процессы волочения проволоки с комбинированным нагружением. Методическая разработка. Магнитогорск: МГТУ, 1999. 36 с.
4. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2014. № 12. С. 15-21.
5. Зюзин В.И., Клековкина Н.А., Харитонов В.А. и др. Оптимизация энергозатрат при волочении проволоки. Ресурсосбережение в метизном производстве. Коллективная монография. Магнитогорск. 2001. 163 с.
6. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Энергосбережение при производстве стальной проволоки совмещенным способом «протяжка-волочение» // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика*, Вып. 20. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 231-236.
7. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Выбор рациональной формы промежуточного профиля при изготовлении стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» // *Производство проката*. 2015. № 3. С. 30-33.
8. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. М., *Металлургия*, 1979. 240 с.
9. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Влияние масштабного фактора на выбор способа волочения проволоки // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2014. № 3. С. 34-37.
10. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Анализ влияния способа деформации на уровень свойств стальной проволоки // *Качество в обработке материалов*. 2014. № 1. С. 42-48.
11. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Влияние способа волочения на конкурентоспособность стальной проволоки // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 191-199.



**ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНА НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Al + 6 % Li**Назаров Ш.А.<sup>1</sup>, Ганиев И.Н.<sup>1</sup>, Норова М.Т.<sup>1</sup>, Ганиева Н.И.<sup>1</sup>, Irene Calliari<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан<sup>2</sup>Università degli Studi di Padova**Введение**

Алюминиево-литиевые сплавы являются новым классом широко известных алюминиевых систем и характеризуются прекрасным сочетанием механических свойств: малой плотностью, повышенным модулем упругости и достаточно высокой прочностью. Это позволяет создавать аэрокосмическую технику с меньшей массой, что дает возможность экономить горючее, увеличить грузоподъемность [1-5].

Выбор лантана в качестве легирующего элемента объясняется тем, что он оказывает модифицирующее действие на структуру сплава, благотворно влияя на коррозионную стойкость алюминия [6].

На диаграмме состояния Al-La со стороны алюминия протекает эвтектическое превращение  $J = Al + LaAl_4$  при концентрации 12 мас.% и 624 °С. Растворимость лантана в твердом алюминии составляет 0.05 мас.% при эвтектической температуре. Тройная система Al-Li-La в области 0,33 ат. доли лантана изучена авторами [7] и показано, что в системе не имеет место образование тройных интерметаллидов. Твердый раствор на основе алюминия находится в равновесии с двойными соединениями  $Al_{11}La_3$  ( $Al_4La$ ) и LiAl. Кроме того, соединение  $Al_4La_3$  находится в равновесии с бинарными соединениями  $Al_2Li_3$ ,  $Al_4Li_9$  и литием. Растворимость третьего компонента в бинарных соединениях незначительна. Твердость, прочность и относительное удлинение алюминия практически не меняются от введения лантана.

В настоящей работе исследования проводили в среде электролита NaCl различной концентрации, согласно рекомендациям ГОСТ 9.017-74, то есть в имитате морской воды, с целью определения влияния хлорид-ионов на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиево-литиевого сплава Al+6 % Li, легированного лантаном. Выбор исходного сплава Al+6 % Li объясняется тем, что многие промышленные алюминиево-литиевые сплавы, содержат 6 % лития.

**Экспериментальная часть**

Для приготовления сплавов использовали: алюминий марки А995 (ГОСТ 55375-2012), литий-ЛЭ1 (ГОСТ 8774-75), лантан-ЛаЭО (ГОСТ 23862.5-79). Из указанных металлов были получены сплавы в корундовых тиглях в печи сопротивления при температуре 750 °С под слоем флюса состава: NaCl-32.5; KCl-32.5; LiCl-35.

Из полученной расплава для исследования коррозионно-электрохимических свойств сплавов отливались цилиндрические образцы диаметром 8-10 мм и длиной 60-100 мм, боковая часть которых изолировалась так, что рабочей площадью служил торец электрода. Каждый образец предварительно отшлифовали, обезжировали спиртом и погружали в исследуемый раствор NaCl марки ЧДА (ГОСТ 4233-77) для установления стационарного потенциала.

Электрохимические исследования легированных лантаном сплава Al+6 % Li проводились на потенциостате ПИ-50-1.1 в потенциостатическом режиме со скоростью развёртки 2 мВ/с с выходом на программатор ПР-8 и самозаписью на ЛКД-4. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянная (20 °С) с помощью термостата МЛШ-8. Электродом сравнения служил хлорсеребряный, вспомогательным – платиновый.

Исследование проводили по методике, описанной в работах [8, 9]. Результаты коррозионно-электрохимических испытаний сплава Al+6 % Li, легированного лантаном, приведены в таблице и на рис. 1, 2.

**Коррозионно-электрохимические характеристики сплава  
легированного лантаном Al+6 % Li, в среде электролита NaCl**

Электролит NaCl, мас. %	Содержание лантана, мас. %	Электрохимические потенциалы (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор}$	$-E_{кор}$	$-E_{п.о}$	$-E_{рп}$	$i_{кор}$	$K \cdot 10^{-3}$
		В				А/М <sup>2</sup>	г/М <sup>2</sup> .ч
0,03 %	-	0,830	0,970	0,650	0,680	0,055	19,25
	0.01	0,860	1,380	0,640	0,680	0,053	17,75
	0.05	0,890	1,320	0,610	0,660	0,036	12,06
	0.10	0,980	1,300	0,600	0,640	0,044	14,74
	0.50	1,100	1,260	0,580	0,620	0,050	16,75
0,3 %	-	0,930	1,000	0,680	0,700	0,060	20,01
	0.01	0,880	1,420	0,660	0,700	0,056	18,76
	0.05	0,900	1,350	0,620	0,680	0,038	12,73
	0.10	1,110	1,334	0,620	0,660	0,050	16,75
	0.50	1,130	1,280	0,600	0,640	0,060	20,10
3 %	-	1.020	1.080	0.680	0.720	0.080	26,8
	0.01	0.910	1.460	0.630	0.680	0.060	20.01
	0.05	0.954	1.375	0.620	0.660	0.044	14.74
	0.10	1.150	1.364	0.610	0.660	0.052	17.42
	0.50	1.175	1.345	0.600	0.650	0.064	21.44

На **рис. 1** приведена временная зависимость потенциала свободной коррозии исходного сплава Al+6 % Li и сплавов, содержащих различные количества лантана в среде электролита NaCl. Видно, что как для исходного сплава, так и для легированных сплавов независимо от времени характерно резкое смещение потенциала свободной коррозии в положительную область в начальном этапе. Исследования показали, что добавки лантана смещают потенциал свободной коррозии ( $E_{св.кор.}$ ) алюминиево-литиевого сплава в более отрицательную область. Выдержка в течение 1 часа приводит к установлению потенциала свободной коррозии, что связано с образованием защитной плёнки на поверхности сплавов.

Так, если для исходного сплава Al+6 % Li  $E_{св.кор.}$  стабилизируется в течение 1 часа, то для сплавов, легированных лантаном, данный процесс завершается в течение 40-50 мин., что свидетельствует об ускорении процесса формирования защитного слоя (см. **рис. 1**). Наиболее положительное значение потенциала (-0,910 В) характерно для сплава Al+6 % Li, легированного 0,01 мас. % лантаном. Подобная тенденция имеет место во всех трёх исследованных средах.

С целью выяснения механизма процесса коррозии и оценки коррозионной стойкости сплавов в среде электролита хлористого натрия различной концентрации проведены исследования электрохимических характеристик сплавов. Результаты обобщены в **таблице** и на **рис. 2**. Что касается электрохимических характеристик исследованных сплавов в вышеуказанных условиях, то можно проследить следующую закономерность: в целом потенциал коррозии смещается в область отрицательных значений. Потенциалы пассивации и репассивации при легировании исходного сплава лантаном смещаются в положительную область.

С увеличением концентрации хлорид-ионов потенциалы коррозии и пассивации смещаются в отрицательную область, что свидетельствует о снижении коррозионной стойкости сплавов с ростом агрессивности коррозионной среды (см. **таблицу**).

Как видно из **таблицы**, минимальное значение скорости коррозии в указанных средах относится к сплаву, легированному 0,05 мас. % лантана, при дальнейшем увеличении его концентрации плотность тока коррозии растёт, следовательно, коррозионная стойкость падает.

$-E_{\text{св.кор.}}$ , В

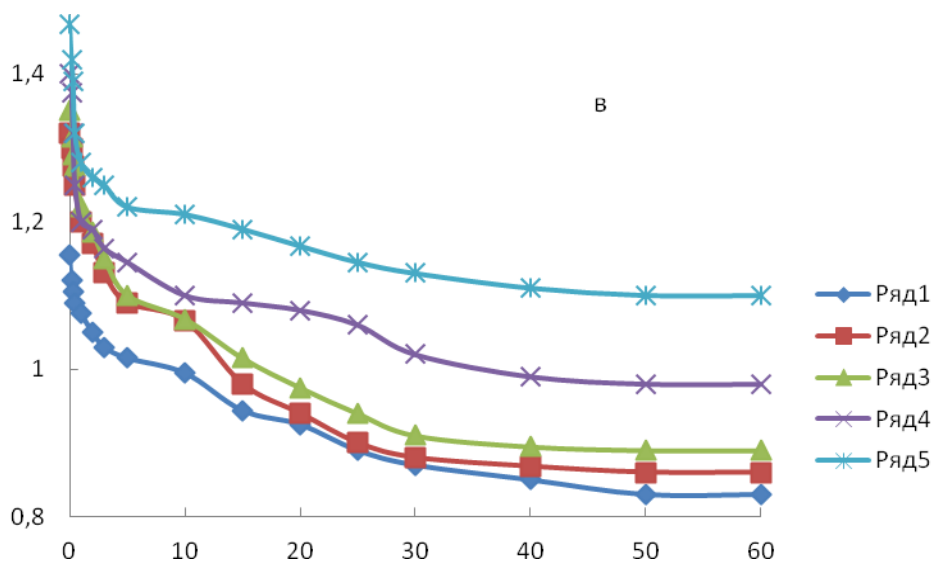
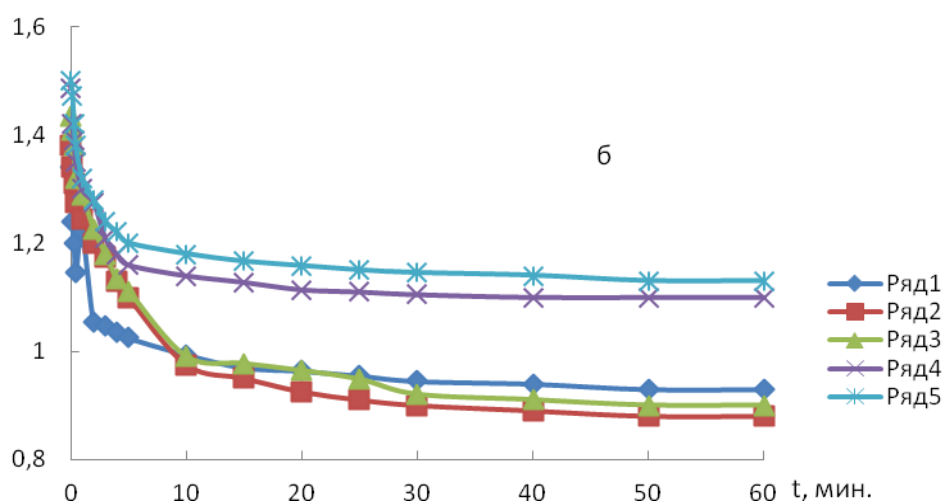
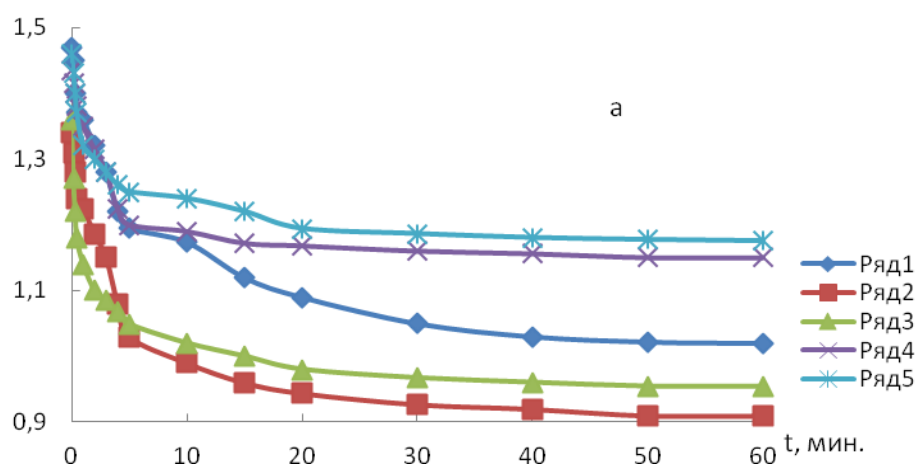
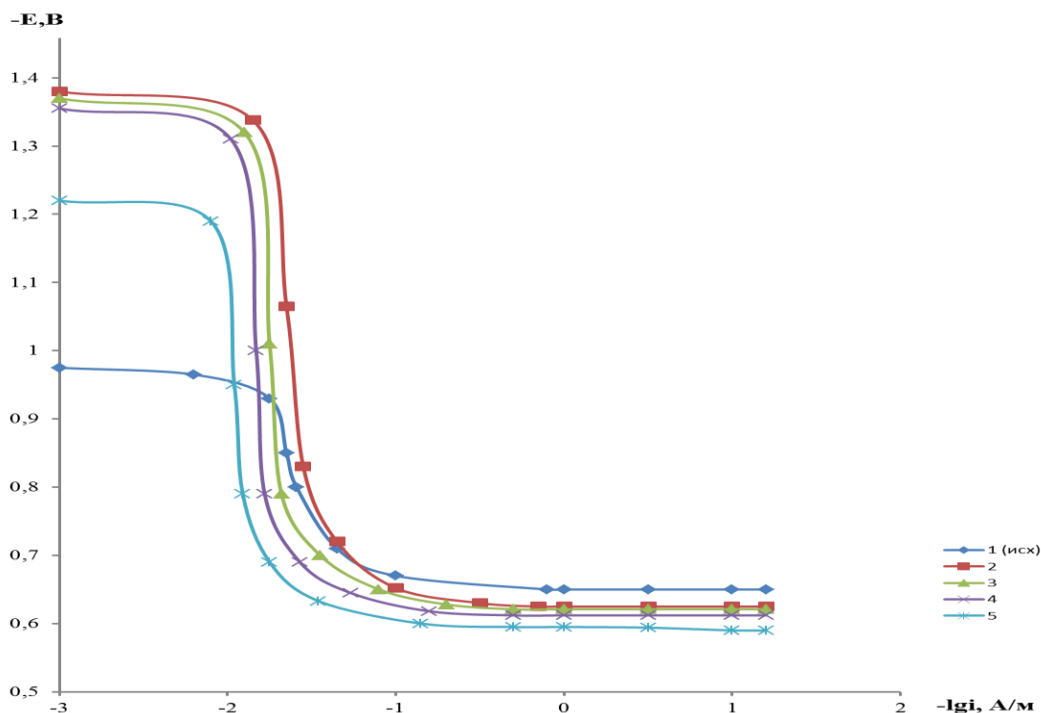


Рис. 1. Изменение потенциала (х.с.э.) свободной коррозии ( $-E_{\text{св.кор.}}$ , В) во времени сплава Al+6 % Li(1), содержащего лантан, мас. %: 0.01(2), 0.05(3), 0.10(4), 0.5(5). Электролит-раствор NaCl, мас. %: а - 3.0; б - 0.3; в - 0.03

На **рис. 2** представлены анодные ветви потенциодинамических кривых сплава Al+6 % Li, содержащего различное количество лантана в среде электролита 3 %-ного NaCl. Показан повторный ход анодной поляризационной кривой (после катодной поляризации поверхности образца), что позволяет исключить влияние оксидной пленки. Из **рис. 2** видно, что присутствие лантана несколько изменяет ход анодной кривой в сторону меньших значений плотности тока и в более положительную область значений потенциалов, при этом потенциал питтингообразования также повышается с увеличением концентрации легирующего компонента до 0,5 мас. %. С увеличением концентрации хлорид-ионов потенциал питтингообразования, как и потенциал коррозии смещается в отрицательную область.



**Рис. 2. Потенциодинамические (2мВ/с) анодные поляризационные кривые сплава Al+6 % Li(1), содержащего лантан (2-5). Электролит - 3 % раствор NaCl. E-потенциал (В),  $i$ -плотность тока(А·м<sup>-2</sup>) (обозначения те же, что и на рис. 1)**

В целом можно констатировать положительное влияние добавок лантана в пределах исследованных составов (0,005-0,5 мас. %) на коррозионно-электрохимические свойства алюминиево-литиевого сплава состава Al+6 % Li, что объясняется модифицирующим влиянием лантана на микроструктуру исходного сплава.

### Заключение

Установлено, что образование питтингов на поверхности алюминия может происходить по двум разным механизмам в зависимости от толщины оксидной пленки. Соответственно, имеется некоторая критическая толщина плёнки  $\delta_c$ . Если плёнка тоньше  $\delta_c$ , спустя очень непродолжительный инкубационный период на поверхности образуются многочисленные питтинги.

Предполагается, что в случае тонких плёнок, основной причиной появления питтингов является пробой пленки по туннельному механизму переноса электронов в дефектных местах. В случае толстых плёнок решающую роль играют Cl<sup>-</sup> ионы, которые вызывают местное активное растворение оксида. При изучении локальной коррозии алюминия (99,99 %) в 3 %-ном растворе NaCl авторами [10] подтверждена идея, что первоначально адсорбционный Cl<sup>-</sup> ион образует растворимый комплекс с металлом, который диффундирует в раствор. Также

сделано заключение, что адсорбция хлорида идёт в тех местах, которые в последующем являются зародышами питтингов. Адсорбция хлорида зависит от потенциала электрода.

Применительно к сплавам системы Al+6 % Li+La, следует отметить, что с ростом концентрации хлорид-иона в электролите, потенциалы свободной коррозии, коррозии, питтингообразования и репассивации смещаются в отрицательную область, что, в свою очередь, сопровождается ростом скорости коррозии сплавов при переходе от 0,03 %-ного к 3 %-ному электролиту NaCl.

### Список литературы

1. Fei Zhang, Jian Shen, Xiao – Dong and others Homogenization heat treatment of 2099 Al-Li Alloy // Rare Metals. 2014. Vol. 33 (1). Pp. 28-36.
2. Норова М.Т., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Коррозия алюминиево-литиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 110 с.
3. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарск. гос. техн. универ. 2013. 81 с.
4. Bairwa M.L., Date P.P. Effect of heat treatment on the tensile properties of Al-Li alloys Journal of Materials Processing Technology 153-154 (2004) 603-607.
5. Fragomeni J., Wheeler R., Jata K.V. Effect of single and duplex aging on precipitation response, microstructure, and fatigue crack behavior in Al-Li-Cu alloy AF/C-458 // J Mater Eng. Perform. 2005. № 50 (1):18.
6. Ганиев И.Н., Умарова Т.М., Обидов З.Р. Коррозия двойных сплавов алюминия с элементами периодической системы. Изд. дом LAP LAMBERT Academic publishing. 2011. 198 с.
7. Ганиев И.Н., Назаров Х.М., Одинаев Х.О. Сплавы алюминия с редкоземельными металлами. Душанбе: Маориф. 2004. 190 с.
8. Obidov Z.R., Amonova A.V., Ganiev I.N. Influence of the Ph of the medium on the anodic behavior of scandium-doped Zn55Al alloy // Russian Journal of Non –Ferrous Metals, 2013. V. 54. N. 3. Pp. 234-238.
9. Amini R. N., Ironi M.B., Ganiev I.N., Obidov Z.R., Galfan I. and Galfan II doped with calcium, corrosion resistant alloys // Oriental journal of Chemistry, 2014. V.30. N. 3. Pp. 969-973.
10. Foley R.T. Localized corrosion of aluminum alloys // Corrosion (USA). 1986. № 56. V. 42. Pp. 277-278.

УДК 621.778.5:677.721

### ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ОБЖАТИИ ПРЯДИ\*

**Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Лаптева Т.А.**

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия*

Стальной канат представляет собой витое многопроволочное изделие, обладающее малой изгибной жесткостью и высокой прочностью, способное работать под высокими нагрузками, многократно изгибаясь на роликах и блоках талевых, шахтных, крановых, экскаваторных и прочих систем. Эксплуатационная стойкость стального каната во многом определяется величиной контактных напряжений, возникающих в местах соприкосновения проволок друг с другом, а также с деталями грузовых механизмов. Контактные напряжения снижают прочностные и пластические свойства проволок, поэтому возникает необходимость в их минимизации [1, 2].

\*Работа проведена в рамках реализации госзадания по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525.2014К от 18.07.2014); а также при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0178).

Контакт между проволоками может быть точечным (при намотке каждого следующего слоя в противоположном предыдущему слою направлении), линейным (при намотке слоев в одном направлении и укладке проволок следующего слоя в канавку, образованную проволоками предыдущего слоя с тем же шагом свивки) и полосовым [1, 3], который образуется при радиальном обжати пряди линейного касания в монолитных, вращающихся, роликовых волоках и прокатных клетях [4]. Снижение величины давления на контактную площадку пропорционально увеличению ее ширины, развитие площадки ограничивается необходимостью сохранения определенной гибкости каната, косвенно определяемой наличием межпроволочного зазора, который заполняется смазкой, снижающей трение и защищающей канат от коррозии. Поэтому на этапе конструирования круглопроволочных прядей – заготовок под пластическое обжатие, необходимо учитывать геометрические параметры образуемой контактной поверхности: ширины, кривизны и формы. В современных публикациях представлены результаты исследований влияния на величину контактных напряжений ширины формируемого в процессе деформации пряди межпроволочного контакта [5-7]. Анализ изменения кривизны и формы межпроволочного контакта при обжати, а также их влияния на напряженное состояние пряди не производился. В настоящей работе описывается способ решения данной задачи методом конечно-элементного моделирования (МКЭ) с применением программного комплекса DEFORM (США), позволяющего с учетом свойств материала получать модель процесса деформации с возможностью визуального анализа результатов [8-20].

### **Разработка модели пластического обжатия проволок смежных слоев пряди в программном комплексе DEFORM**

Моделирование пластического обжатия проволок смежных слоев пряди в программном комплексе *Deform* позволяет выявлять закономерности протекания процесса обжатия, особенности геометрии контакта проволок, визуально анализировать сформировавшееся напряженно-деформированное состояние проволок.

Построение геометрии ролика проводилось в системе трехмерного моделирования *Компас-3D 6V*, геометрия прямолинейной проволоки взята из примитивов предпроцессора *Deform*. Для создания соответствующего напряженного состояния при моделировании взаимодействий отдельных проволок использовались жесткие опоры.

В процессе моделирования приняты допущения:

- деформацию проволок считаем аналогичной осадке цилиндров [21];
- за очаг деформации принимаем область течения пластической деформации.

Сопrotивление деформации характеризует параметр «интенсивность напряжения»  $\bar{\sigma}$  «*Flow stress*». Связь между напряжениями и деформациями имеет вид

$$\bar{\sigma} = c \bar{\varepsilon}^n \dot{\xi}^m + y, \quad (1)$$

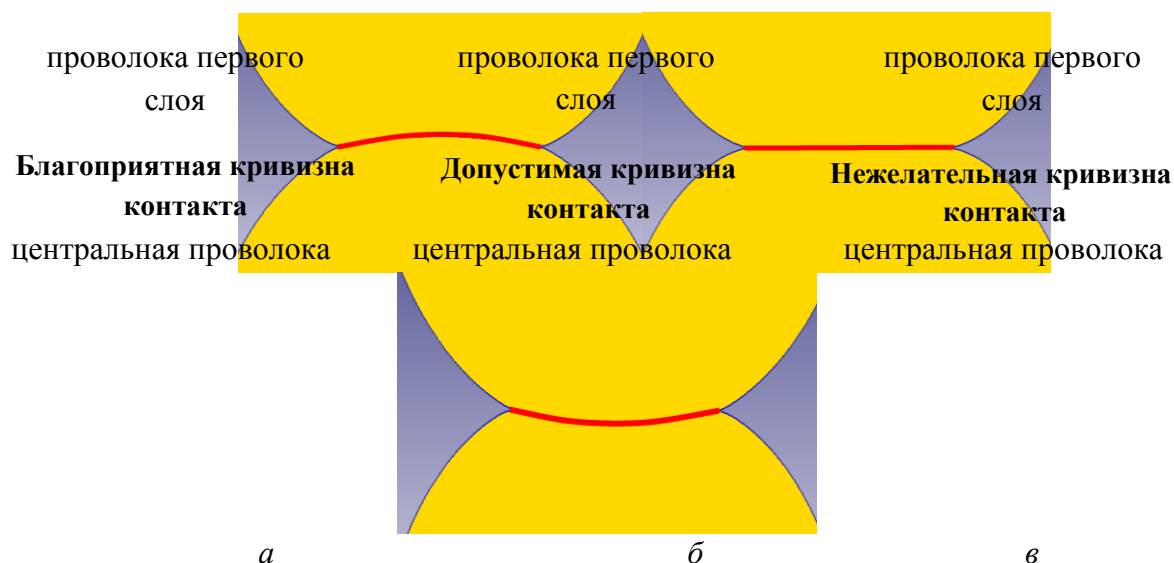
где  $c, y$  – коэффициенты,  $\dot{\xi}$  – интенсивность скоростей деформаций, мм/с·мм;  $\bar{\varepsilon}$  – накопленная в течение отрезка времени  $0 \leq \tau \leq t$  деформация (2), определяемая вдоль траектории движения частицы;  $n, m$  – степенные коэффициенты деформационного и скоростного упрочнения.

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^t \dot{\xi} d\tau. \quad (2)$$

Значение коэффициента трения в предпроцессоре *Deform* выбран в соответствии с законом Амонтона-Кулона «*Columb*» для холодной прокатки стали со смазкой и принят равным  $f = 0,12$  [22-23].

## Определение факторов, влияющих на кривизну контактных площадок проволок при обжати пряди

Кривизна контакта может иметь три принципиально различных варианта, представленных на **рис. 1**.



**Рис. 1. Разновидности кривизны межпроволочного контакта**

Первый и в меньшей степени второй вариант (см. **рис. 1, а, б**) являются благоприятными, так как проволоки верхнего слоя могут свободно скользить по нижележащей проволоке. Третий случай (см. **рис. 1, в**) неблагоприятен, так как на контактах проволоки врезаются друг в друга, затрудняя относительное проскальзывание и снижая гибкость пряди. При этом на границах контактов формируются концентраторы напряжений. Поэтому в процессе обжати важно создать такие условия, при которых кривизна проволок после обжати будет оставаться близкой к первоначальному значению.

Кривизна контактной линии может меняться в процессе деформации и изменять знак. В процессе обжати важно создать такие условия, при которых кривизна проволок после обжати будет оставаться близкой к первоначальному значению.

Для определения степени влияния факторов, значимо влияющих на кривизну контакта проволок обжатой пряди, проведен полнофакторный эксперимент ПФЭ  $2^3$ . Факторы: диаметры контактирующих проволок ( $d$ ), предел прочности ( $\sigma_с$ ) и коэффициент Лоде ( $\beta$ ), характеризующий схему напряженного состояния, отобраны в процессе предварительного поискового эксперимента. Определены шаги и уровни варьирования факторов. С условием развития контактной площадки на 80 % от максимально возможной, получено уравнение регрессии:

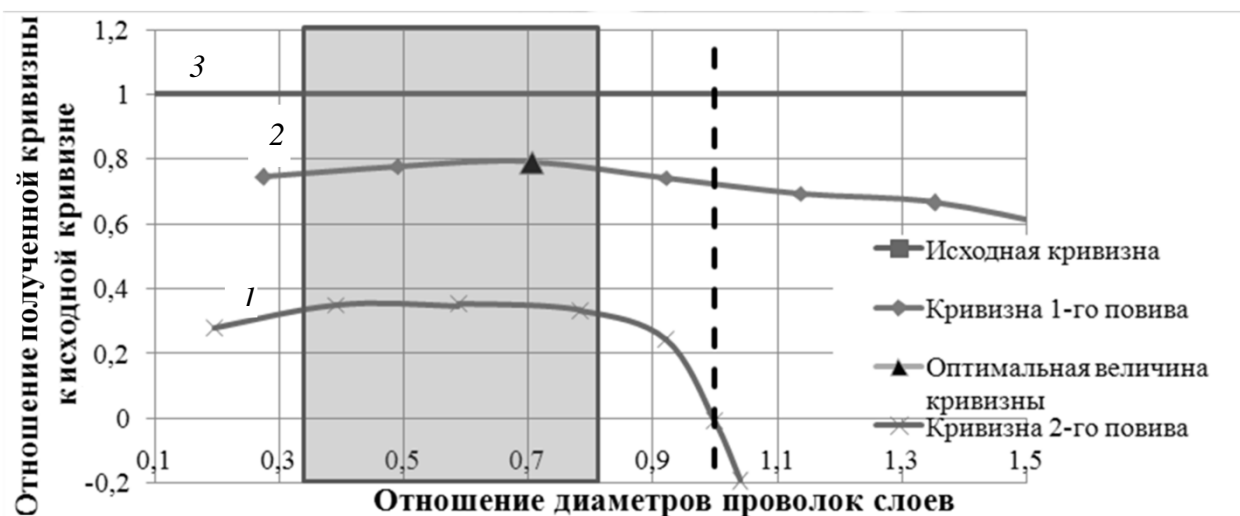
$$\chi = 220 - 56d - 185\beta - 0,13\sigma + 48d\beta + 0,03d\sigma + 0,11\beta\sigma - 0,03d\beta\sigma. \quad (3)$$

Как показывает анализ уравнения (3), увеличение любого из исследуемых факторов уменьшает кривизну площадки контакта между проволоками первого и второго слоев. Наименьшее влияние на кривизну оказывает прочность, наибольшее - СГН (чем больше  $\beta$ , тем меньше  $\chi$ ).

Совместное действие пар факторов  $\beta$  и  $d$ ,  $\beta$  и  $\sigma_с$ , а также  $d$  и  $\sigma$  - увеличивает, а совместное действие всех трех факторов - уменьшает кривизну площадки контакта. Действие двойных факторов  $d$  и  $\beta$ ;  $d$  и  $\sigma_с$ , а также всех трех факторов - малозначимо. Таким образом, varia-

ция каждого фактора по отдельности противоположна совместному действию пары факторов в том же направлении.

На **рис. 2** представлены результаты моделирования процесса совместного обжата двух проволок с многоуровневым варьированием диаметра проволоки верхнего слоя и напряженного состояния проволоки нижележащего слоя.



**Рис. 2. Изменение кривизны контакта при варьировании диаметра проволоки верхнего слоя**

Кривая 1 определяет изменение кривизны проволоки нижележащего слоя при сжатии между двумя жесткими опорами двух линейно контактирующих проволок. Схема напряжений приближена к схеме одноосного сжатия, что более характерно для проволок средних и верхних слоев пряжи в начальной стадии обжата до образования арок.

Кривая 2 определяет изменение кривизны проволоки нижележащего слоя с тем отличием, что для нижней проволоки осуществлена схема напряжений всестороннего сжатия посредством ее деформации между шестью симметричными контактами.

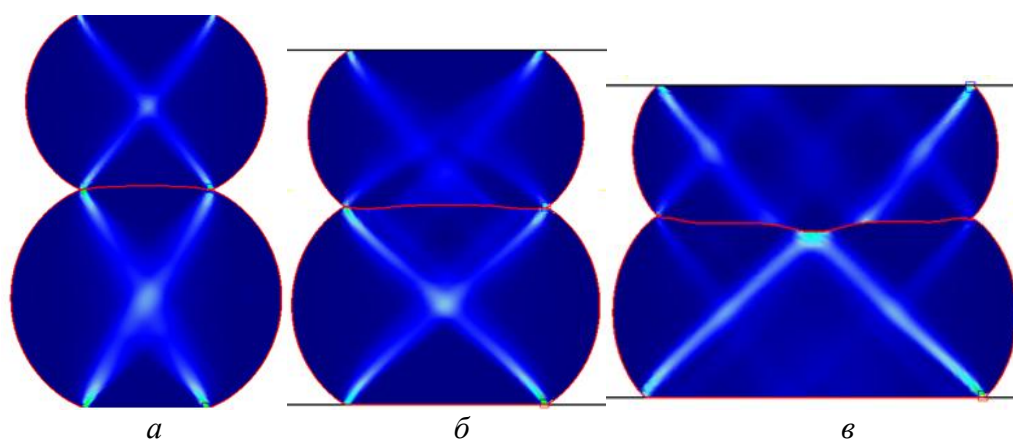
Кривая 3 отображает первоначальную кривизну контакта нижележащей проволоки.

Анализ графиков показывает, что наиболее благоприятные контактные условия образуются в том случае, когда диаметр проволоки вышележащего слоя составляет 40-80 % диаметра проволоки нижележащего слоя. Это позволяет сохранить кривизну нижележащих проволок максимально приближенной к первоначальной. Кривизну, наиболее приближенную к первоначальной, имеет центральная проволока, деформируемая в условиях всестороннего сжатия (кривая 2). Проволоки средних слоев пряжи (кривая 1), интенсивно работающие на изгиб, имеют менее благоприятную кривизну, чем центральная проволока.

### **Изменение формы межпроволочного контакта в зависимости от степени обжата пряжи**

Исследование влияния величины обжата на изменение формы межпроволочного контакта проведено в программе *Deform* при моделировании осадки двух проволок разного диаметра между двумя жесткими опорами. Эксперимент показал появление сложных форм площадок контакта с увеличением обжата. При образовании межпроволочного контакта двух проволок их фактические очаги деформации изначально почти одинаковы (**рис. 3, а**), что определяет неискаженную форму площадки контакта одинаковой кривизны по всей ее ширине.





**Рис. 3. Изменение формы контактной площадки в зависимости от степени обжатия проволок:**  
***a* – благоприятная форма контакта; *б* – допустимая форма контакта;**  
***в* – недопустимая форма контакта**

С увеличением обжатия фактические очаги деформации иксообразной формы (определяются различием диаметров, прочности и напряженного состояния проволок) раздваиваются не одновременно, поэтому давления проволок на одну точку контакта могут не совпадать. Так, при равных условиях деформирования из-за больших пропорций длины и высоты очага деформации первым будет распадаться очаг деформации проволоки меньшего диаметра. Это приводит к интенсивному перемещению контактной границы большей проволокой по краям в виде набегания (деформации) и в центре (в виде вдавливания недеформирующегося клина) (рис. 3, б).

Далее при размытии и последующих распадах фактических очагов образуются различные силовые соотношения очагов с соответствующим изменением конфигурации поверхности контакта. Поверхность становится настолько искаженной, что проволоки, сцепляясь, начинают фактически деформироваться как одно целое, образуя четко выраженную совместную иксообразную область (рис. 3, в). Искажение формы площадки еще сильнее проявляется при изменении величины значимых для процесса контактообразования факторов (напряженное состояние, прочность проволок, положение проволок, крутящий момент в проволоках и прочее). Так, особенно из-за образования новых боковых площадок контакта, сопротивление деформации проволоки повышается, кривизна новой части контакта изменяется. Это искривление поверхности может отрицательно повлиять на гибкость каната и напряженное состояние проволоки на площадке контакта. Сложные формы контактов образуются при больших степенях деформаций, а также в случае выхода одной из контактирующих проволок по диаметру за предел отношения 0,4-0,8 в ту или иную сторону.

### Вывод

Моделирование обжатия двух проволок смежных слоев пряди показало формирование требуемой геометрии контакта проволок: 1) *неширокой* контактной поверхности, образование которой значительно снижает межпроволочные напряжения и при этом не требует высоких энергетических затрат; 2) благоприятной *кривизны* контакта проволок максимально приближенной к первоначальному значению и не вызывающей рисков появления новых концентраторов напряжений на границах контактов; 3) гладкой неискаженной *формы* контакта, не препятствующей свободному проскальзыванию проволок относительно друг друга.

## Список литературы

1. Казменко В.Д. Стальной канат. Прочность и ресурс. Ленинград: Машиностроение, 1983. 72 с.
2. Мольнар В.Г., Владимиров Ю.В. Технологические основы производства стальных канатов. М.: Metallurgia, 1975. 200 с.
3. Гостенин В.А., Егоров В.Д. Эволюция и перспективы развития канатного производства // Сталь. 2001. № 5. С. 43-46.
4. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Развитие теории и технологии пластического обжатия витых изделий. Магнитогорск, 2013. 47 с. Деп. В ВИНТИ 14.02.2013, № 6-В2013.
5. Никифоров Б.А., Харитонов В.А., Зарецкий Л.М. Повышение эффективности производства пластически обжатых канатов // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2005. С. 57-61.
6. Харитонов В.А., Зарецкий Л.М. Направления развития производства пластически обжатых канатов // Моделирование и развитие технологических процессов: Сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 98-104.
7. Харитонов В.А., Зарецкий Л.М. Повышение конкурентоспособности канатов на основе совершенствования существующих и разработки новых способов пластического обжатия // Eurowire Magazine. 2005. № 6. С. 79-80.
8. Чаюн И.М., Чаюн М.И. Метод конечных элементов в исследовании деформированного и напряженного состояния канатов // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 2. Одесса: АстроПринт, 2001. С. 24-34.
9. Wehking K., Ziegler S. Berechnung eines einfachen Seils mit FEM // Draht Magazine. 2003. № 5. С. 32-36.
10. Численный анализ расчета срока службы проволочных канатов методом конечных элементов. Vilceanu Lucia, Babeu Tiberiu Dimitrie, Ghita Eugen // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 3. Одесса: АстроПринт, 2003. С. 95-100.
11. Определение напряжений в простом канате с помощью метода конечных элементов // Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 5. С. 61-63.
12. Хромов В.Г., Хромов И.В. Компьютерное проектирование технологических процессов изготовления канатов с гарантированными показателями качества // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 6. Одесса: АстроПринт, 2008. С. 130-138.
13. Хромов В.Г. Развитие технологической механики стальных канатов с учетом нелинейных пластических свойств проволоки // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 7. Одесса: АстроПринт, 2009. С. 174-183.
14. Компьютерное моделирование и расчет канатной системы кольцевых канатных дорог. Патарая Д., Нозадзе Г. и др. // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 7. Одесса: АстроПринт, 2009. С. 153-161.
15. Патарая Д., Нозадзе Г. О моделировании передачи усилия в системе приводной шкив – канат // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 7. Одесса: АстроПринт, 2009. С. 217-222.
16. Романенко В.П., Сизов Д.В. Компьютерное моделирование процесса винтовой прокатки крупных заготовок в двухвалковом стане // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 13-16.
17. Карамышев А.П., Некрасов И.И. и др. Моделирование процессов обработки металлов давлением в DEFORM-3D с целью рационального построения технологических процессов // Металлург. 2012. № 2. С. 53-54.
18. Харитонов В.А. Разработка методики управления процессом малого пластического обжатия прядей / В.А. Харитонов, Т.А. Лаптева // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. Вып. 37. С. 35-39.

19. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Расчет распределения деформаций по сечению пряди при круговом обжатии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Магнитогорск: ФГОУ ВПО «МГТУ», 2012. № 4. С. 47-51.

20. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Повышение эффективности производства стальных подвижных канатов применением калибрующего обжатия прядей // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. № 2 (41). С.13-18.

21. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.

22. Загиров Н.Н., Рудницкий Э.А. Теория обработки металлов давлением. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 56 с.

23. Долженков Ф.Е. Обработка металлов давлением. Донецк: ДонНТУ, 2005. 76 с.

**УДК 621.771**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОЛОСЫ НА МОМЕНТ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ КАТАНКИ\***

**Гарстка Т., Дыя Х., Кавалек А., Кочуркевич Б.**

*Ченстоховский Технологический Университет, Факультет Инженерии Производства и Технологии Материалов, ал. Армии Крайовой 19, 42-200 Ченстохова, Польша*

### **Введение**

Уже много лет увеличение производительности и улучшение качества были главными факторами, определяющими направления научных работ по производству катанки, а также развития систем управления и контроля [1-3]. Благодаря этому, современная прокатка такого сортамента составляет 100 т/час для одной жилы, конечная скорость прокатки – более 100 м/с при сохранении требований по геометрии, механическим свойствам и состоянию поверхности. Такие высокие параметры были достигнуты, благодаря, кроме всего прочего, введению в прокатный поток прокатных блоков [4]. На данный момент главным направлением в совершенствовании производства катанки является стремление к ограничению количества технологических операций, таких как отжиг или патентирование. Такой подход позволяет также снизить себестоимость готовой продукции, а также сделать ее производство более экологичным путем рационализации энергозатрат. На современных прокатных станах эти цели достигаются не только путем внедрения новых технологий [5], но и путем модернизации существующих, применяя возможности современных систем управления параметрами процесса прокатки и охлаждения полосы. Именно в этом направлении работают ученые кафедры обработки металлов давлением и инженерии производства, где на данный момент реализуется проект, целью которого является разработка новой, экологичной технологии производства катанки со свойствами, позволяющими исключить патентирование в процессе производства [6, 7]. Были проведены многочисленные исследования в промышленных условиях, которые заключались в измерениях энергосиловых параметров процесса прокатки [8]. Результаты исследований и их анализ являются важным источником информации для проведения математического моделирования процесса прокатки.

В работе представлены результаты исследований влияния колебания температуры по длине деформируемой полосы на суммарный момент прокатки в десятиклетьевом блоке в процессе производства катанки диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали марки С70D. Полученные результаты являются основой для усовершенствования существующей технологии производства данного типа катанки, так как мощности прокатки в исследуемом десятиклетьевом прокатном блоке составляют 1/3 общей мощности прокатки катанки.

\* Научная работа была профинансирована из средств Национального центра исследований и развития 2013-2016 гг. в рамках проекта прикладных исследований № PBS2/A5/0/2013.

## Характеристика процесса прокатки катанки

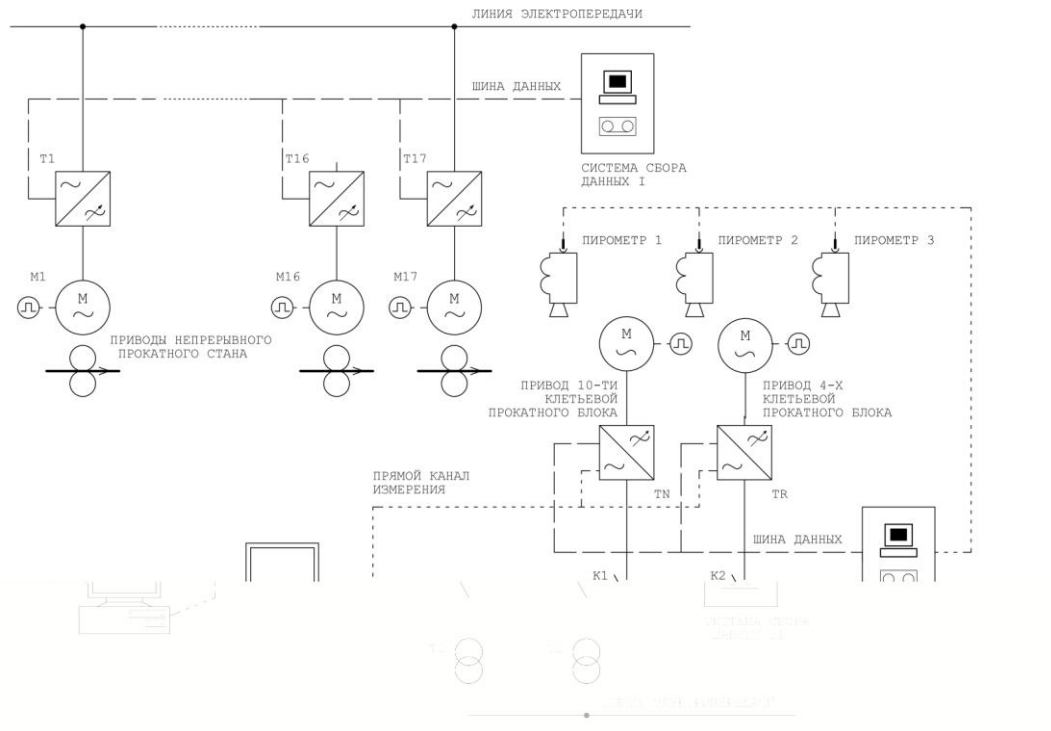
Технологический процесс производства катанки диаметром 5,5 мм в цехе, где проводились исследования, состоит из трех последовательных этапов [6-9]. Первый из них – черновая прокатка слитка квадратного сечения на непрерывном стане. В его состав входит три группы клетей (7, 6 и 4) в попеременном расположении Н/В, между которыми установлены ножи. После прокатки диаметр катанки - 20 мм, скорость после выхода из последней клетки - 7 м/сек. На следующем этапе катанку деформируют в двух прокатных блоках, разработанных фирмой Morgan. Этот блок состоит из десяти пар валков (клетей) с малым диаметром, установленных попеременно под углом  $\pm 45^\circ$  к горизонтали [1]. В результате такой установки клетки создают классическую конфигурацию Н/В, что не требует кантовки полосы между калибрами овал-круг. Привод валков производится через сложную кинематическую систему, состоящую из отдельных приводных валов и ряда роликовых и угловых зубчатых колес и амортизаторов. Вся механическая система совместно с гидравлическими системами и системами охлаждения является цельной. Деформируемая полоса в этом блоке подается с большими степенями деформации, а скорость прокатки достигает 70 м/с.

Черновая прокатка проводится в четырехклетьевом блоке, который имеет конструкцию, подобную конструкции десятиклетьевого блока. В этом блоке в двух первых проходах проводится регулируемая прокатка, а в двух последних проводится регулировка формы и размеров полосы. Скорость деформации достигает 100 м/с. После этого блока полоса направляется на последний этап – формирование катанки в мотки и их охлаждение [6].

Для регулирования температуры полосы, а тем самым для влияния на свойства готового изделия используют установленные водные камеры с регулируемой подачей воды. Первый комплект таких камер установлен перед десятиклетьевым блоком, второй – между ним и четырехклетьевым блоком, а третий – перед сматывателем в мотки. Главной целью применения таких комплектов является снижение температуры полосы и недопущение ее роста в результате выделения тепла в процессе деформации.

Каждая прокатная клеть, как и прокатные блоки, приводится в действие индукционными двигателями переменного тока. Эти двигатели рассчитаны на питание токами высокой частоты [10], которые позволяют точно регулировать скорость прокатки. Большая точность управления и быстрая реакция на изменения момента нагрузки порядка миллисекунды, благодаря встроенному алгоритму инвенторов, позволяет использовать оцениваемые таким образом величины параметров, характеризующих работу двигателей как надежный источник данных и на их основании рассчитывать энергосиловые параметры процесса прокатки. Это особенно важно, с точки зрения измерения мгновенных величин таких, как сила или момент прокатки в промышленных условиях, когда часто нет возможности установки сложной системы измерений или проведения его калибровки. Расчет через сигнальный процессор инвентора мгновенных величин, характеризующих работу приводов, выводится в виде эквивалентных сигналов тока или напряжения, либо доступны через коммуникационную магистраль.

На стане, на котором проводились исследования, установлены две системы записи данных, которые, кроме данных с привода, записывают также информацию о температуре потоков среды и параметрах процесса прокатки. Первая из них, регистрирующая данные с периодом дискретизации – 20 мс, записывает данные с непрерывного стана, а вторая, с периодом дискретизации 50 мс – данные с двух прокатных блоков. Кроме того, при необходимости быстрой регистрации протекания изменений, есть возможность установки быстрого измерительного канала с частотой записи 1 или 2 мс со специальным ПО, которое подсоединяется с инвенторами непосредственно оптическим каналом. Структура систем записи данных для измерения энергосиловых параметров и температуры полосы, показана на **рис. 1**.



**Рис. 1. Структура системы, в которой были проведены экспериментальные исследования**

### Результаты исследований

При проведении исследований были прокатаны четыре слитка длиной 7 метров из стали марки С70D с различными параметрами прокатки и охлаждения. Одним из переменных параметров была температура конца прокатки. Для этого на первом этапе управление температурой полосы регулировали путем изменения интенсивности охлаждения в первой секции водных камер (см. таблицу). В процессе исследований температуру полосы перед  $T_{we}$  и после  $T_{wy}$  прокатки в десятиклетьевом блоке измеряли с помощью пирометров, включенных в измерительную систему. Запись температуры производилась синхронно с другими измеряемыми величинами.

Так как изменение температуры полосы приводит к изменению величины энергосиловых параметров, характеризующих процесс прокатки [11], зарегистрирован также момент на приводном валке этого блока. Этот момент является суммой составляющих уменьшенного момента прокатки в каждом проходе и может быть выражен

$$M_{\Sigma 10} = \sum_{i=1}^{10} \frac{M_i}{n_i}, \quad (1)$$

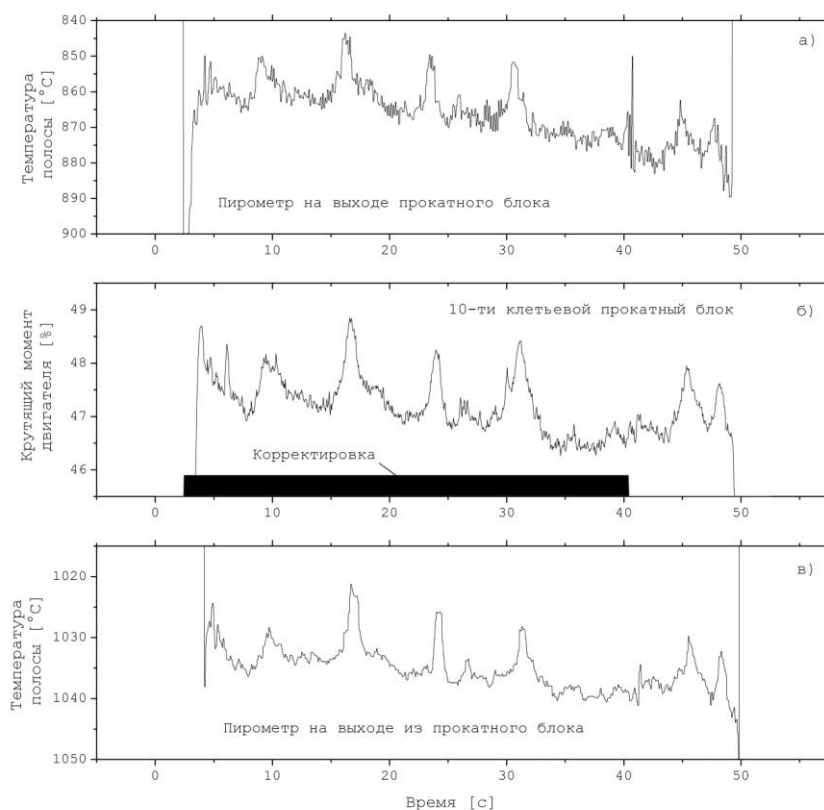
где  $M_{\Sigma 10}$  – уменьшенный суммарный момент прокатки в десятиклетьевом блоке;  $M_i$  – неизвестный момент прокатки в  $i$ -том проходе;  $n_i$  – передаточное число привода до  $i$ -той клетки

В измерительной системе, момент двигателя записывали как процентная величина его номинального момента.

## Параметры проведенных экспериментов и моделирующие функции зависимости момента прокатки от температуры

Номер полосы	Средняя температура на входе в блок $T_{we}$ [°C]	Средний суммарный момент прокатки $M_{\Sigma 10}$ [кНм]	Средняя температура на выходе из блока $T_{wy}$ [°C]	Параметры аппроксимирующей функции $M = f(T)$		
				$A_I$	$A_0$	$R$
I	866	34,8	1035	-0,059	85,63	0,9168
II	881	33,8	1042	-0,066	91,86	0,8305
III	880	33,9	1039	-0,064	89,90	0,8958
IV	898	32,5	1048	-0,060	85,96	0,6093
Среднее значение				-0,062	88,37	-

Примерное изменение температуры деформируемой полосы и момента прокатки, зарегистрированное для I слитка представлено на **рис. 2**. Представленное изменение является презентативным также, с точки зрения остальных вариантов.



**Рис. 2.** Изменение температуры на входе и выходе из десятиклетьевого прокатного блока и нагрузка двигателей, выраженная через момент прокатки полосы

Анализируя распределение температуры поверхности полосы, подаваемой в десятиклетевой блок, видно, что температура изменяется по длине, кроме того, наблюдается циклическое охлаждение полосы. Такое поведение температуры является результатом процесса нагрева полосы, в процессе которого происходит попадание холодного воздуха в камеру нагревательной печи. Всякого рода неоднородности при нагреве слитка сохраняются во всем процессе прокатки. Неравномерный нагрев наблюдается также после процесса прокатки в десятиклетевом блоке (см. **рис. 2, в**).

Колебания температуры полосы приводят к изменению значений энергосиловых параметров процесса. Этот эффект был проанализирован только для условий непрерывной прокатки прутков [11] и для стана прокатки катанки в работе [8].

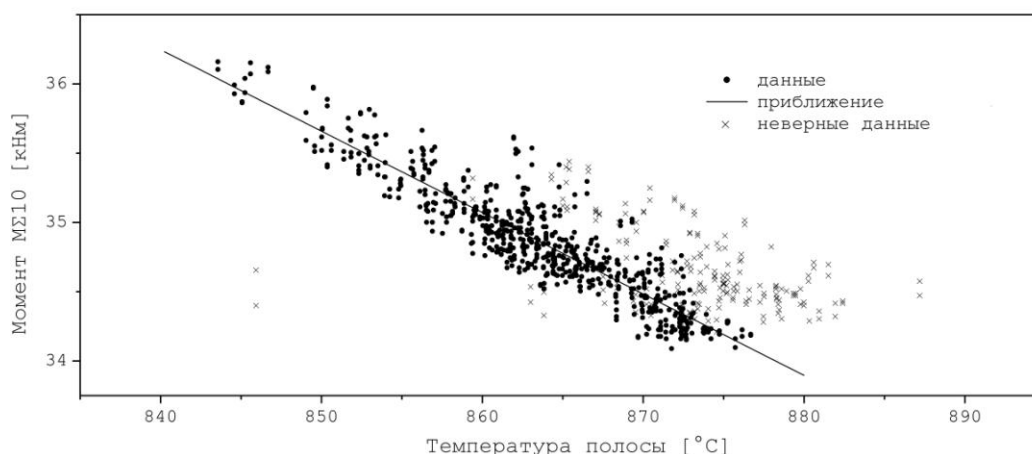
Анализируя изменения момента прокатки (см. **рис. 2, б**) на фоне изменения температуры полосы на входе (см. **рис. 2, а**), можно сделать вывод о том, что характер кривых подобный. Рост момента прокатки связан со снижением температуры деформируемой полосы. Точный анализ монотонности изменений исходной температуры полосы и момента показала, что через 40 сек от момента начала регистрации, характер изменений меняется. Это связано с проведением автоматической корректировки технологических параметров (скорости) к концу прокатки. В связи с этим, данные после автоматической корректировки не были проанализированы. Кроме того, не приняты во внимание также данные по началу прокатки, когда процесс еще не был стабилизирован. Такой же подход был принят и для анализа результатов по оставшимся слиткам.

Оригинальные данные были обработаны путем пересчета момента, выраженного в процентах на истинные значения (кНм) и введения небольшого перемещения по времени между изменениями момента и температуры. Введение перемещения по времени проведено с целью компенсации в размещении в потоке стана пирометра и прокатного блока, а также опоздания во времени ответа преобразователя переменного тока на изменения нагрузки.

Для каждой полосы была определена моделирующая функция

$$M_{\Sigma 10} = A_1 \cdot T_{we} + A_0. \quad (2)$$

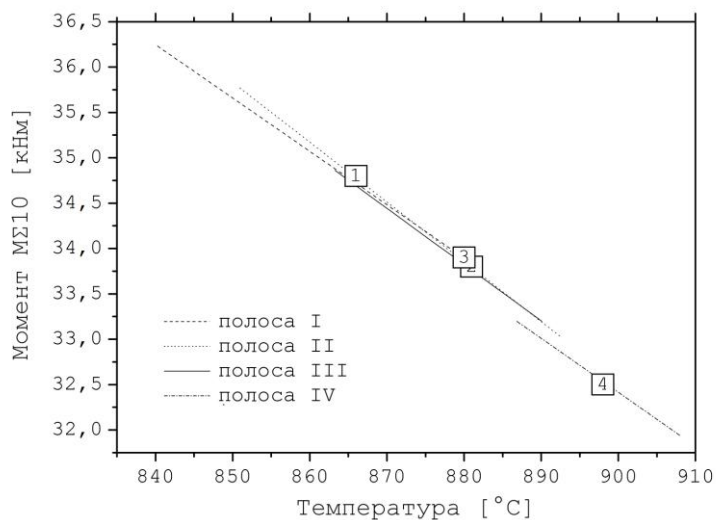
На **рис. 3** представлена примерная (для I полосы) форма облака данных, аппроксимированных по функции (2) и расположение выпадов.



**Рис. 3. Зависимость суммарного момента прокатки в десятиклетевом блоке от температуры I полосы**

Величины коэффициентов этого уравнения для каждой деформированной полосы представлены в **таблице**. На **рис. 4** представлено изменение взаиморасположения аппроксимированных функций изменения момента от температуры. Прямоугольником обозначены

пункты, соответствующие значениям средней температуры и момента для каждой полосы. Все эти данные в широком диапазоне (70 °С) расположены на одной прямой.



**Рис. 4. Взаимное расположение аппроксимирующих прямых зависимости момента прокатки от температуры полосы**

С точки зрения оценки влияния температуры на суммарный момент прокатки, важным прежде всего является знание значения направляющего коэффициента функции, моделирующей эти изменения. При усреднении результатов для всех четырех вариантов принято значение  $-0,062 \text{ кНм}/^\circ\text{C}$ . Это соответствует 10 % приросту момента прокатки при снижении температуры полосы на 50 °С. Эти результаты подтверждают данные работы [8].

Эти небольшие, на первый взгляд, изменения момента прокатки имеют дополнительное значение с экономической точки зрения и экологической перспективы потребления электроэнергии.

#### Подведение итогов

Был проведен анализ влияния температуры деформируемой полосы на суммарный момент прокатки в десятиклетьевом блоке в промышленных условиях. Благодаря колебаниям температуры в области от 840 до 910 °С удалось описать это влияние с помощью линейной функции.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе математического моделирования процесса прокатки катанки с большими скоростями деформации, анализе поведения материала при больших скоростях деформации и анализе влияния модернизации технологии производства катанки с энергетической точки зрения.

#### Список литературы

1. Cooksley R. C., Jones D., Rolling of bar, rod and sections: steel // Metal technology. 1975. No 7-8 (2). Pp. 370-377.
2. Kiefer B. V., Keyzer P. L., Schafer K. L.: In-line material characterization measurements in high speed rod rolling mills, Proceedings of the International Symposium on advanced sensors for metals processing, 38th Annual Conference on Metallurgists of CIM, Quebec City, Quebec. 1999. August. Pp. 22–26.



3. Seki R., Nakajama K., Hasegawa K., Yoshimura K.: Making to high performance and productivity improvement of steel bar and wire rod rolling process, Nippon Steel Technical Report. 2007. No. 96. July. Pp. 21-28.
4. Brochure: Morgan Vee No-Twist<sup>®</sup> Mill, 06.2013, Siemens VAI Metals Technologies GmbH.
5. Kiefer B. V., Shore T. M.: Recent innovations in high speed rod and bars mills // Millenium Steel. 2007, Pp. 151–155.
6. Knapieński M., Koczurkiewicz B., Dyja H., Kawalek A., Laber K.: The analysis of influence production conditions on properties of C70 5,5 mm diameter wire rod, Proceedings of METAL 2014, 21st – 23rd May 2014, Brno, Czech Republic
7. Дья Х., Гарстка Т., Кочуркевич Б., Кавалек А. Влияние условий прокатки на структуру катанки из высокоуглеродистой стали // Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'2014)». 2013. С. 90-95.
8. Garstka T., Dyja H., Laber K., Koczurkiewicz B., Experimental study of the power parameters in rolling proces of high carbon steel wire rod // Обработка материалов давлением. 2015. № 2(41). С.246-251
9. Laber K., Dyja H., Kałamorz M., Analysis of the technology of rolling 5,5 mm-diameter wire rod of cold upsetting steel in the morgan block mill, 11th International Symposium of Croatian Metallurgical Society „Materials and Metallurgy” SHMD’ 2014, June 22-26 Sibenik, Croatia, 2014
10. ACS 6000. Technical Catalog, ABB, 3BHS123322 ZAB E01 Rev. D, 18-09-2009, ABB Switzerland Ltd
11. Sygut P., Laber K., Mróz S., Dyja H., Wpływ nierównomiernego rozkładu temperatury na długości wsadu na parametry energetyczno-siłowe podczas walcowania prętów okrągłych, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, No 9 (2010), 540-542, ISSN 1230-3534

**УДК 621.771**

## **ТЕНДЕНЦИИ РЫНКА ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ЖЕСТЯНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ В РОССИИ**

**Файзулина Р.В.**

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия*

Аналитические исследования структуры потребления жести показали, что она была и остается одним из самых используемых материалов в производстве тары под пищевые продукты. Например, в США ~ 65 %, в Европе ~ 46 %, в России ~ 78 %, в Корею ~ 78 %. По своему назначению жесьть является стратегическим материалом, кроме того, привлекательность использования стальной упаковки состоит еще и в том, что она подлежит 100 % вторичной переработке. Одним из технологических аспектов производителей консервной тары является расширение собственного сортамента, в частности, замена старых видов упаковки. Тем не менее, сортament потребления электролуженой жести как в мире, так и в России, расширяется. Производители консервной продукции постоянно находятся в поиске обеспечения рационального использования своих изделий, а также в производстве новых видов продукции (укупорочной тары).

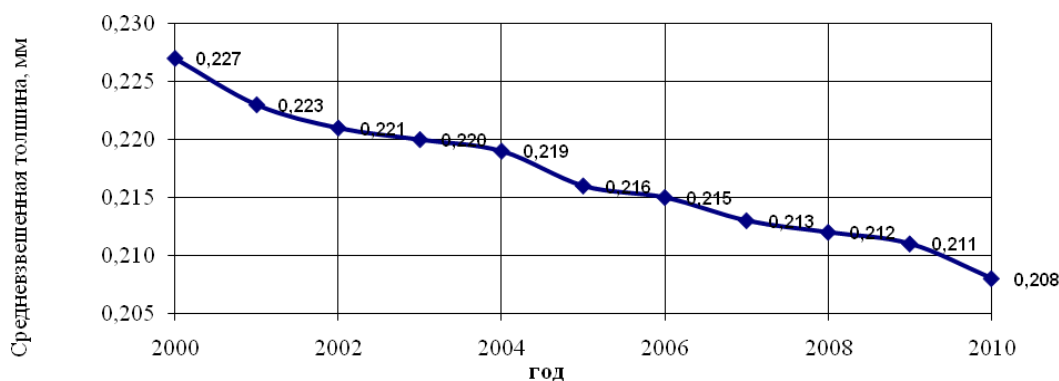
В этом направлении наиболее заметны средства укупорки - крышки типа «Twist-off», обеспечивающие возможность легкого вскрытия упаковки и надежного хранения не полностью использованного продукта; крышка ЛВК (или, как ее называют зарубежные производители «Easy Open End»); в части консервной тары - прямоугольные и конусные банки, цельнотянутые банки. Этим же стремлением определяется необходимость повышения степени использования жести (рулонная продукция, широкий раскрой, фигурный рез (скролл-рез),

сварной корпус и т.д.). Осваивая новые виды продукции, потребители жести внедряют технологии максимального использования площади потребляемого материала. При этом наблюдается тенденция потребления более тонкой жести, из чего следует, что фактически производство и потребление имеют небольшую тенденцию к росту. Так, снижение толщины жести на 0,01 мм означает увеличение ее поверхности, т.е. количества выпущенных изделий или упаковок приблизительно на 4-5 %.

Из вышеизложенного следует, что одним из основных требований современного потребителя жести является снижение толщины стальной основы и массы оловянного покрытия. Снижение толщины и массы удешевляет как саму жечь, так и снижает дальнейшие расходы по всей цепочке ее применения – на переработку, на транспортировку и складирование, вплоть до конечной упакованной продукции, то есть перспективы производства белой жести в его технологическом развитии.

Таким образом, на рынке жести требуется качественно новый продукт. Определенные шаги, касающиеся улучшения технологии производства в ОАО «ММК», представлены в [1, 2, 3]. В настоящее время при производстве жести в ОАО «ММК» применяются современные вспомогательные материалы в технологическом цикле при переработке подката для жести: в линиях травления - ингибиторы кислотной коррозии, при прокатке на 5-клетевом стане - прокатные масла (заменители пальмового масла), в агрегатах электролитической очистки - новые виды обезжиривателей.

На протяжении длительного времени у всех производителей белой жести наблюдается тенденция постоянного снижения средневзвешенной толщины жести. В различных странах она находится в диапазоне 0,172-0,240 мм, в ОАО «ММК» - 0,208 мм (минимальная толщина жести в ОАО «ММК» - 0,16 мм). На **рисунке** представлена динамика производства жести по средневзвешенной толщине в ОАО «ММК» по годам с 2000 по 2010 год. В 2010 году в ОАО «ММК» жести толщинами 0,16-0,20 мм прокатано 56,6 % от всего объема ее производства. Средневзвешенный профиль жести составил в 2010 году 0,208 мм.



**Средневзвешенная толщина жести  
(указан заказной сортамент)**

Отсутствие оборудования в ОАО «ММК» для производства жести по ГОСТ 52204-2004 ограничивает возможности производства требуемого сортамента. Тем не менее, некоторые позиции, касающиеся размеров (толщина, ширина) жести, массы оловянного покрытия (тонкие покрытия), механических свойств и твердости (жесть с повышенными пластическими свойствами) позволяют расширить сбытовой потенциал ОАО «ММК» для потребителей, производящих тароупаковочные изделия. Опыт производства жести вышеуказанных позиций в течение периода 2001-2015 гг. показал, что разработка нормативной документации (технические соглашения, технические протоколы), согласованные с потребителем позволя-

ют расширить сортамент ОАО «ММК» и по возможности удовлетворить требования потребителя.

Расширение сортамента прокатываемой жести за счет снижения толщины до 0,16 мм и увеличения ширины до 970 мм, производства жести электролитического лужения непрерывного отжига с дополнительными требованиями по механическим свойствам и гарантированным допуском по твердости, производства жести электролитического лужения с минимальной массой оловянного покрытия  $E1,4/1,4$  мг/м<sup>2</sup>, производства жести электролитического лужения с улучшенной коррозионной стойкостью и с минимальной массой оловянного покрытия  $E1,0/1,0$  мг/м<sup>2</sup>, производства жести с повышенными пластическими свойствами позволяют производителю жестяной тароупаковки снизить стоимость и получить гарантированное качество собственных изделий [2, 4, 5].

### Список литературы

1. Производство особо тонких номеров жести однократной прокатки в условиях ОАО «ММК» / Р.В. Файзулина, О.Н. Молева, Ю.А. Мельников, А.Ф. Вакильев // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. Вып. 38. С. 39-45.

2. Файзулина Р.В., Молева О.Н., Никифоров М.А. Качество жести для цельнотянутых двухэлементных банок // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 48-51.

3. К вопросу о дефектах поверхности жести / Р.В. Файзулина, О.Н. Молева, Ю.А. Кашникова, Е.В. Радюкевич // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2013. № 1 (39). С. 102-105.

4. Электролуженая жесьть непрерывного отжига с ограниченным диапазоном твердости для производства консервной тары / В.А. Парамонов, В.П. Виноградов, А.В. Титов, Р.В. Файзулина, О.Н. Молева // Сталь. 2008. № 8. С. 80-82.

5. Расширение сортамента жести производства ОАО «ММК» / Г.А. Куницын, А.А. Дьяконов, Р.В. Файзулина, О.Н. Молева, Краснов М.Л. // Сталь. 2008. № 7. С.71-72.

УДК 621.771

### **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО ТРАНСПОРТЕРА ИЗДЕЛИЙ ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»**

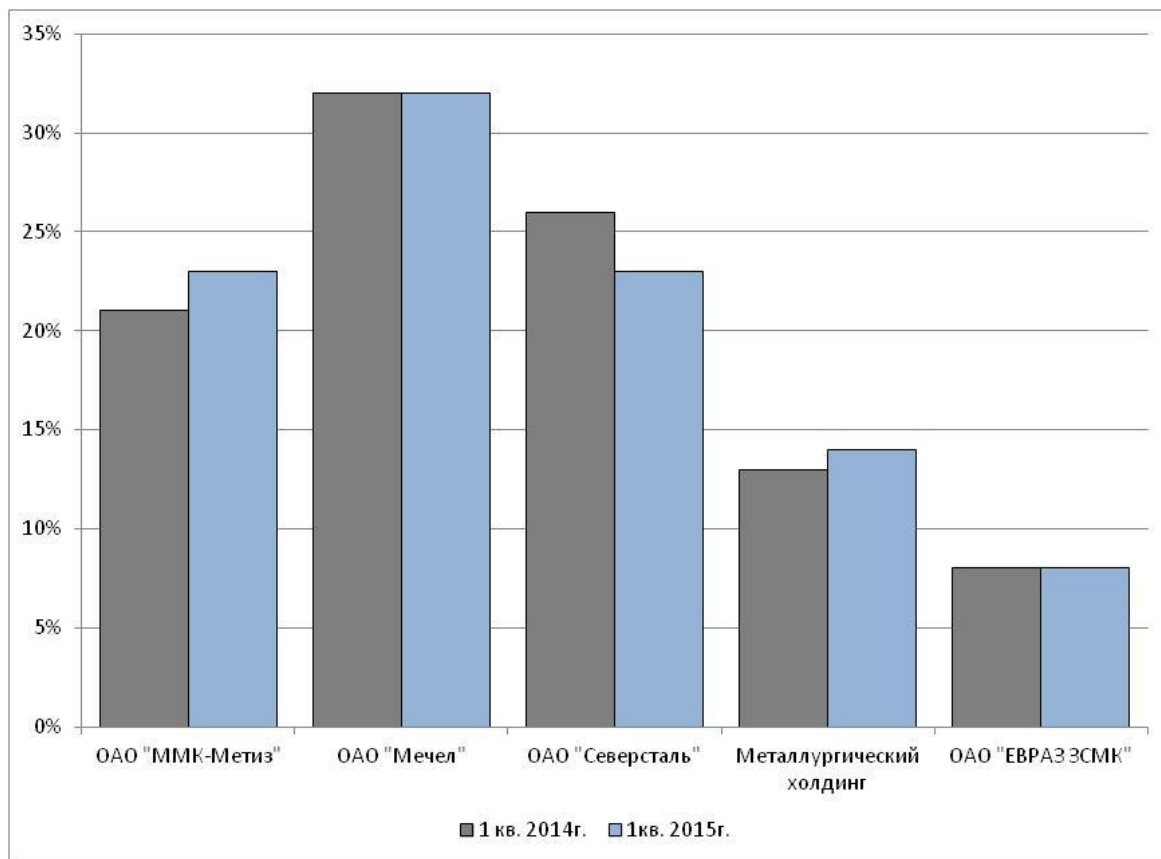
**Иващенко Е.В., Лимарев А.С.**

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск, Россия*

Производство металлоизделий играет значительную роль в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, строительство, судостроение др. В настоящее время среди всего объема выпускаемых метизов наибольшей популярностью пользуются: шурупы и саморезы, проволока для железобетонных конструкций, холоднодеформированная арматура, высокопрочные болты, современные фасонные профили, проволока с антикоррозионным покрытием, сеточные заборные секции [1].

В последнее время в связи с увеличением строительства в России крупных объектов, к которым предъявляются высокие требования по безопасности, растет спрос на высокопрочные болты. Среди основных производителей таких болтов можно выделить следующие: ОАО «ММК-Метиз», ОАО «Мечел», ОАО «Северсталь», Metallургический холдинг, ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» (рис. 1).

Производители высокопрочных болтов занимаются поставками своей продукции на внутренний и внешний рынки, Это позволяет отечественным производителям в некоторой степени избежать зависимости от развивающегося, но нестабильного внутреннего потребления. Среди основных Российских потребителей можно выделить следующие: компании: «Мостотрест», г. Ярославль; «Курганстальмост», Курганская область; Челябинский тракторный завод «ЧЗМК», г. Челябинск; «ВоронежПромМетиз», г. Воронеж; «СибПромМетиз», г. Кемерово.



**Рис. 1. Основные Российские производители высокопрочного крепежа в 1 квартале 2014 и 2015 гг.**

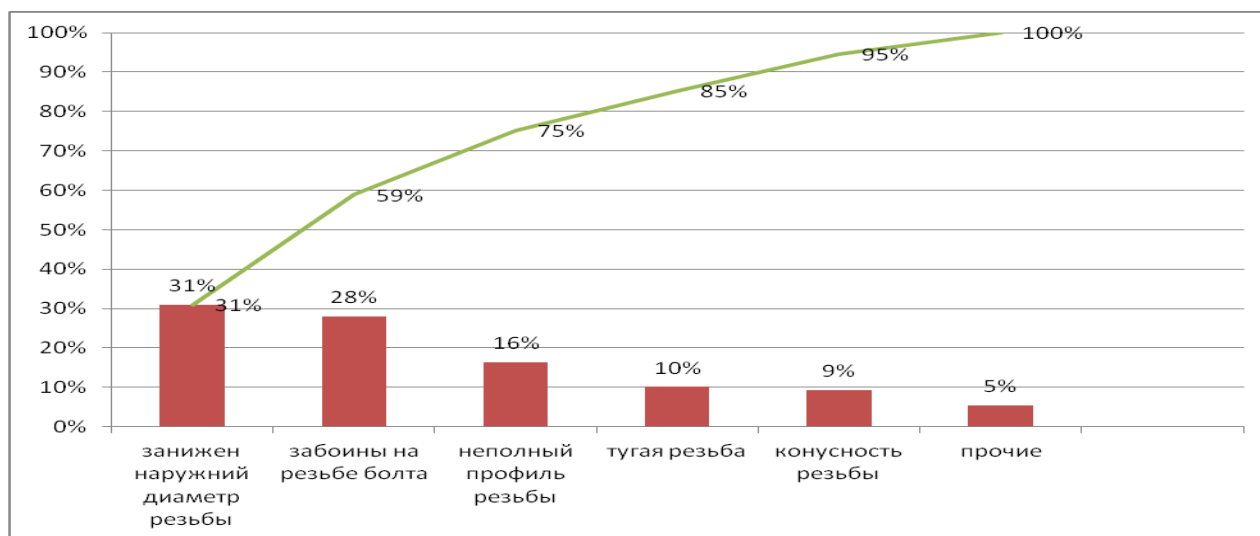
Эти компании используют высокопрочные болты для крепления стальных строительных конструкций, используемых в мостостроении, машиностроении, строительстве железных дорог, а также при строительстве крупных промышленных объектов. Высокопрочные болты применяются в различных видах монтажных соединений:

- Фрикционные. При таком типе контакта сдвиг усилия происходит через трение, которое наблюдается между плоскостями соединяемых компонентов.
- Несущие. В этом случае усилие также передается через трение, кроме этого болт подвергается нагрузке на срез и смятие.
- Фланцевые. Применяемые для их фиксации высокопрочные болты работают только на растяжение, если используются фланцы жесткой конструкции, и изгиб - на растяжение [2].

Поскольку высокопрочные болты используются в высоконагруженных конструкциях, в сложных климатических зонах, характеризующихся значительными перепадами температуры, то наиболее значимым показателем качества высокопрочных болтов является высокая устойчивость на разрыв и к постоянным динамическим или статическим нагрузкам. При этом у таких болтов должно быть четкое соблюдение всех геометрических параметров, среди

которых наибольшее значение имеет качество нарезаемой резьбы. Для соответствующего выполнения данного параметра в соответствии с запросами потребителей требуется полное соблюдение технологического процесса. Поэтому на предприятии должен быть целый комплекс мероприятий по контролю качества технологического процесса с целью снижения вероятности возникновения резьбовых и других дефектов высокопрочных болтов.

С целью повышения качества высокопрочных болтов изготавливаемых на ОАО «ММК-Метиз» был проведен анализ основных производственных дефектов (рис. 2). Наиболее значимыми дефектами, приводящим к существенным финансовым потерям, как для производителя, так и для потребителя являются резьбовые дефекты. На диаграмме видно, что наиболее часто встречающимися дефектами являются заниженный диаметр резьбы и забоины на резьбе болта. Заниженный диаметр хоть и является более распространенным дефектом, но все же позволяет сформировать болтокомплект, поэтому такой продукт может быть реализован. Наличие же забоин на резьбе болта приводит к тому, что данная продукция становится негодна для дальнейшего применения.



**Рис. 2. Диаграмма Парето**

Поскольку высокопрочные болты имеют высокую стоимость, наличие брака приводит к существенным потерям. При этом следует отметить, что такие болты могут попасть потребителям, что также сказывается и на репутации производителя. В связи с этим в ходе производства высокопрочных болтов необходимо уменьшать причины, приводящие к снижению качества продукции. Основными причинами возникновения забоин (рис. 3) является соударение резьбы о твердые поверхности кубелей (грузозахватное устройство для перемещения сыпучих грузов) или битья болтов друг об друга.

Для определения технологических этапов на которых происходит образования забоин на резьбе, рассмотрим технологический процесс производства высокопрочного болта в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». В общем случае технологический процесс включает операции представленные на рис. 4.

Таким образом, на основе представленного технологического процесса видно, что при производстве болтов на ОАО «ММК-Метиз» постоянно осуществляется пересыпка болтов, которая осуществляется на следующих этапах: высадка высокопрочных болтов и накатка резьбы, термическая обработка, упаковка. Это приводит к соударению болтов друг об друга, что нежелательно в условиях, необходимости жесткого соблюдения выполнения качества резьбы [3].



**Рис. 3. Виды забоин на резьбе высокопрочных болтов**



**Рис. 4. Технологический процесс производства высокопрочного болта в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ»**

Если на этапах термической обработки и штамповки возможно частичное устранение болтов с забоинами путем сортировки высокопрочных болтов, то на этапе упаковки изделий в ящики готовой продукции, сортировка невозможна. Так же устранение забоин на участке штамповки и термообработки продукции достаточно затратные. В силу того, что для замены оборудования нужно останавливать производство, а это влечет дополнительные затраты.

Невозможность сортировки болтов на этапе упаковки заключается в технологии процесса упаковки. Этап упаковки готовой продукции заключается в том, что кубель поступивший из термического отделения, краном поднимается до высоты приблизительно 2,5 метра и готовые изделия высыпаются в металлический бункер, где и происходит биение

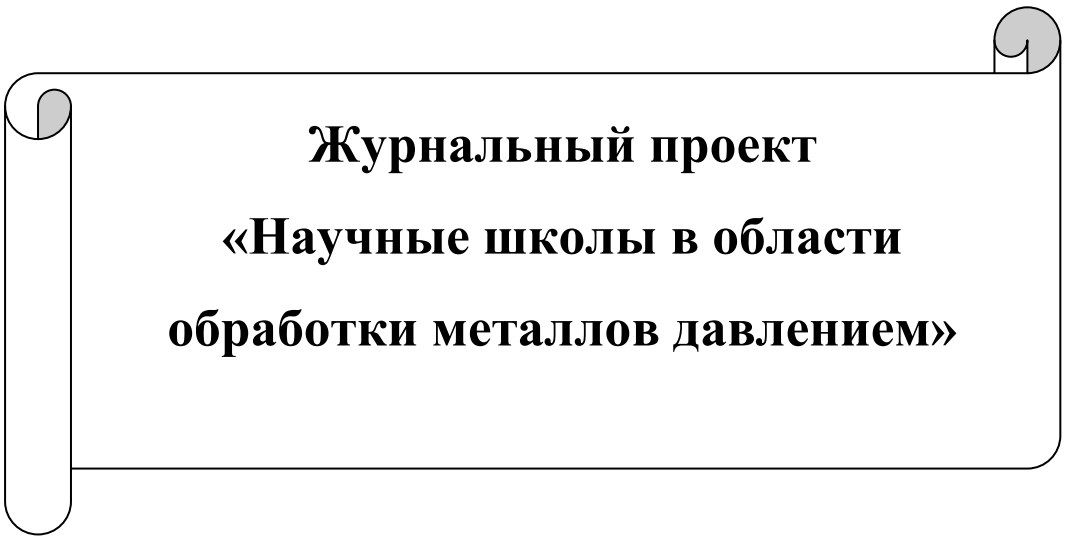
резьбы об стенки бункера, и болтов друг об друга. Далее болты ссыпаются на металлические весы и упаковываются в ящики по 60 кг.

Поскольку контроль этапа упаковки осуществить в условиях имеющегося производства не представляется возможным, то требуется совершенствование технологического процесса снижающего вероятность возникновения забоин. С этой целью предлагается провести модернизацию межоперационного транспортер изделий, путем замены его на механическую прорезиненную ленту. В предлагаемом варианте кубель при помощи грузового крана перемещается на механическую прорезиненную ленту и переворачивается под углом 90° с высоты не более 1 метра на ленту. В результате этого поступающие на ленту болты соударяются между собой и о твердые поверхности с меньшим усилием. Это приводит к снижению вероятности образования забоин. Далее болты двигаются по ленте до механических весов. Такое движение позволяет произвести их сортировку, с целью обнаружения дефектов, до отправки потребителю. Преимуществом такого способа также является то, что транспортер механизмирует передвижение объектов и обуславливает ритмичность и непрерывность процесса[4]

Использование данного ленточного транспортера предполагает значительное снижение забоин на резьбе высокопрочных болтов на 9% в год, вследствие этого ожидается повышение качества высокопрочных болтов поступающих потребителю[5].

### Список литературы

1. Консалтинговая группа "Резалт". Маркетинговые исследования, 2007-2015 гг. <http://marketing.r-cons.ru/news/5318>.
2. Строительные нормы и правила. Часть 3. Металлические конструкции. 1977.
3. Филиппов А. А., Пачурин В. Г., Пачурин Г.В. Получение качественного калиброванного проката для высадки высокопрочных болтов // Современные наукоемкие технологии. 2015.
4. Филиппов А.А. Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014.
5. Моллер А.Б., Лимарев А.С., Каледина О.С. Управление качеством продукции на основе инновационной стратегии предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015.



# Журнальный проект «Научные школы в области обработки металлов давлением»

УДК 621.771

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ (научный обзор)

**Гарбер Э.А.**

*ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», Россия*

### 1. Состояние проблемы

В листопрокатных цехах металлургических предприятий России в последние десятилетия возникли проблемы, связанные со следующими тенденциями развития отечественной и мировой экономики:

- 1) рост требований к показателям качества тонких листов (механическим свойствам, точности размеров, плоскостности, чистоте поверхности);
- 2) необходимость экономии всех видов ресурсов, уменьшения себестоимости продукции.

Под воздействием этих тенденций в сортаменте, технологии и оборудовании действующих широкополосных станов произошли большие изменения. К их числу относится уменьшение освоенной толщины как горячекатаных, так и холоднокатаных полос.

На ряде широкополосных станов горячей прокатки освоили производство стальных полос толщиной до 0,8-1,2 мм, ранее относившихся к сортаменту широкополосных станов холодной прокатки.

На широкополосных станах холодной прокатки, предназначенных для производства холоднокатаных полос толщиной до 0,5 мм автомобильного и конструкционного сортамента, освоили прокатку полос толщиной до 0,2-0,3 мм, не предусмотренных паспортными характеристиками этих станов, с жесткими допусками по разнотолщинности и плоскостности.

В связи с отмеченными изменениями сортамента и возросшей конкуренцией на мировом рынке проката, перед технологами листопрокатных цехов были поставлены следующие задачи:

1. Чтобы выполнить возросшие требования к точности размеров и плоскостности полос, возникла необходимость увеличения точности расчета режимов прокатки. Эти расчеты



основывались на классических методах теории прокатки, разработанных в 40–70-х годах 20 века применительно к сортаменту и технологии того периода [1-7].

2. Уменьшение освоенной толщины полос привело к росту обжатий на действующих станах, что вызвало увеличение сил прокатки и расхода энергии, при этом в ряде случаев нагрузка на узлы рабочих клетей и мощность двигателей главного привода повысились до значений, не предусмотренных паспортными характеристиками оборудования. Необходимо было проанализировать точность классических методов энергосилового расчета, оценить их пригодность для изменившихся условий работы станов. Это связано с тем, что при прокатке тонких полос в очагах деформации рабочих клетей, наряду с пластическими зонами, имеются упругие участки, причем с уменьшением толщины полосы протяженность упругих участков увеличивается. В большинстве известных методик при расчете контактных напряжений в упругих участках используется уравнение пластичности, то есть не учитывается тот факт, что это уравнение применимо только для пластической зоны очага деформации.

Данные о том, какую погрешность вносит в энергосиловой расчет допущение о применимости уравнений пластичности к упругим участкам очага деформации, в литературе отсутствовали. Между тем, при горячей прокатке наиболее тонких полос длина упругих участков достигает 18-30 %, а при холодной прокатке – 50 % и более от общей длины очага деформации, поэтому данный вопрос в новых условиях приобрел большую актуальность.

3. Нуждались в анализе и уточнении методики учета напряжений контактного трения в очагах деформации. В большинстве известных методов энергосилового расчета станов горячей прокатки не учитывалось то обстоятельство, что преобладающую часть длины очага деформации в рабочих клетях этих станов занимает зона прилипания, в которой отсутствует проскальзывание полосы относительно валков. Поэтому контактные напряжения в этой зоне зависят не от коэффициента трения, а от сопротивления сдвигу материала полосы.

На станах холодной прокатки, напротив, вся протяженность очага деформации находится в зоне трения скольжения, однако все известные формулы для расчета коэффициента трения скольжения не учитывали большого влияния на него предела текучести полосы, изменяющегося из-за наклепа.

4. Наконец, в большинстве методик энергосиловых расчетов станов горячей прокатки использовались устаревшие модели теплового режима: комплексная модель, позволяющая достоверно вычислять температуры полосы и валков в функции технологических параметров стана и управляющих воздействий системы охлаждения, в литературе отсутствовала.

В сумме из-за всех указанных причин погрешности энергосиловых расчетов процессов прокатки наиболее тонких полос достигали 30-40 % и более. Мы убедились в этом, обработав сотни данных о параметрах прокатки, полученных из АСУТП действующих широкополосных станов.

Решать задачи повышения качества тонких полос и совершенствования технологии широкополосных станов с использованием методик энергосилового расчета, дающих такие большие погрешности, было невозможно.

## **2. Новые решения в теории и технологии тонколистовой прокатки**

Начиная с 2000 года, ученые научной школы прокатчиков Череповецкого государственного университета совместно со специалистами предприятий выполнили комплекс теоретических, экспериментальных и промышленных исследований процессов горячей и холодной прокатки на широкополосных станах. Теоретические исследования велись путем разработки математических моделей взаимосвязанных технологических, конструктивных и энергосиловых параметров широкополосных станов, базирующихся на методах механики сплошной среды, теорий упругости и пластичности. В развитие этих научных положений для решения ряда задач теории и технологии прокатки мы применили численные методы, в частности, метод конечных элементов.

Наиболее существенные новые положения разработанных моделей в кратком изложении состоят в следующем [8-15]:

1. Напряжения в очаге деформации рабочей клетки широкополосного стана определяют отдельно на каждом участке: упругого сжатия, пластической деформации и упругого восстановления части толщины полосы.

2. На упругих участках вместо условия пластичности для расчета напряженного состояния полосы используют уравнения упругости.

3. Достоверно определяют протяженности упругих и пластического участков, а также координату границы между зонами отставания и опережения (нейтрального сечения).

4. Найдены статистически достоверные алгоритмы и численные значения коэффициентов трения и напряжений трения в очагах деформации, учитывающие специфику контактных условий горячей и холодной прокатки, при этом впервые установлено, что при холодной прокатке коэффициент трения существенно зависит от предела текучести прокатываемой полосы: уменьшается по мере возрастания предела текучести из-за наклепа.

5. При расчете затрат энергии доказано, что валки совершают полезную работу только в зоне отставания и только касательными силами, а в зоне опережения полоса возвращает валкам часть затраченной энергии.

6. Установлено, что на станах холодной прокатки, в зависимости от соотношения параметров технологического режима, могут быть очаги деформации, состоящие только из зоны отставания (без нейтрального сечения), а также с двумя нейтральными сечениями (второе – на участке упругого восстановления части толщины полосы).

7. При расчете момента и мощности двигателей главного привода рабочих клеток отказались от эмпирических коэффициентов и достоверно определили затраты энергии на вращение холостого опорного вала, в том числе их основную часть – потери на трение качения.

8. Для расчета с минимальной погрешностью поперечного профиля прокатываемой полосы, формирующегося под воздействием упругих, тепловых деформаций и профилировок валков, впервые применен метод конечных элементов, реализованный в объемной (3D) постановке в САЕ-системе (Computer Aided Engineering). Для реализации этого метода создана принципиально новая конечно-элементная модель валкового узла, в которую включены подшипниковые опоры с подушками и контактирующие с ними поверхности узла станин.

9. Разработана усовершенствованная математическая модель теплового режима и охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки (ШПСГП), отличающаяся от известных моделей тем, что расчет температуры и теплового профиля валков производится в функции параметров технологического процесса и управляющих воздействий системы охлаждения. Впервые получены достоверные значения теплофизических коэффициентов, характеризующих теплообмен в системе «полоса-рабочие валки-опорные валки-охладитель» в условиях современных станов.

Достоверность указанных выше новых решений в теории прокатки проверена в условиях действующих станов на статистически значимом количестве прокатываемых полос широкого спектра марок стали и профилеразмеров. Это обеспечило выполнение расчетов усилий прокатки, мощности главных приводов и профиля полос со средней погрешностью 5-7 %, что в 3-4 раза меньше, чем при расчетах по известным методикам.

### **3. Практическое применение новых теоретических разработок**

Применение новых теоретических положений и математических моделей позволило получить ряд практически значимых технических результатов [16-19]. Наиболее существенные из них указаны ниже.

1) Для повышения точности размеров и плоскостности тонких полос до уровня мировых стандартов, улучшения качества их поверхности и экономии энергозатрат в методику расчета технологических режимов прокатки внесены следующие новые положения:

- научно-обоснованное разделение допусков на продольную и поперечную разнотолщинность, позволяющее выдержать в жестком поле допуска колебания толщины по всей площади полосы;

- математические модели разнотолщинности и неплоскостности полос, вычисляемых в функции значимых факторов технологии прокатки;

- алгоритмы оптимизации режимов прокатки по критериям: «минимальная разнотолщинность», «минимальный расход энергии», «минимальное загрязнение поверхности полосы», «минимальная неплоскостность».

2) Впервые получены математические выражения для соотношений между силами, действующими на узел рабочих валков, исключая резонансные вибрации в рабочей клетке. Внедрение этой разработки на 5-ти клетевом стане «1700» ПАО «Северсталь» исключило вибрационные процессы в рабочих клещах, за счет чего в 2 раза снизилась отсортировка холоднокатаных листов по дефекту «ребристость», исключен дефект «полосы нагартовки» и увеличена рабочая скорость стана с 10-12 до 18-20 м/с.

3) На 4-х клетевом и 5-ти клетевом станах холодной прокатки «1700» выполнен комплекс исследований влияния положения нейтральных сечений в рабочих клетках на чистоту поверхности холоднокатаных полос и на расход энергии.

В результате испытаний достоверно установлено, что сдвиг нейтрального сечения в рабочей клетке вперед по ходу прокатки уменьшает количество загрязнений на полосе, а сдвиг в противоположную сторону уменьшает расход энергии при прокатке. На основании этих результатов внедрена в производство новая технология, позволившая значительно улучшить чистоту поверхности полос и снизить расход энергии на 2-4 %.

4) В результате исследований, проведенных на 5-ти клетевом и дрессировочном станах «1700» ПХП ПАО «Северсталь» установлены причины появления неплоскостности холоднокатаных полос. К ним относятся дефекты поперечного профиля и продольная разнотолщинность подката, неточности настройки стана холодной прокатки (или дрессировочного стана) и дополнительные факторы, производные от факторов, указанных выше.

Для выработки мероприятий, уменьшающих влияние на плоскостность холоднокатаных полос искажений поперечного профиля горячекатаного подката и улучшающих настройку стана холодной прокатки, разработана технологическая модель неплоскостности, связывающая нестабильные факторы технологии с показателями неплоскостности – высотой и шагом волны (короба).

Внедрение усовершенствованных технологических режимов в производство уменьшило отсортировку по неплоскостности холоднокатаных полос в 2 раза.

5) На 6-ти клетевом стане горячей прокатки «1700» и 12-ти клетевом стане горячей прокатки «2000» выполнены исследования влияния технологических параметров режима прокатки на колебания толщины и ширины горячекатаных полос. В ходе исследований установлено, что уменьшение обжатий в последних клетях чистовой группы широкополосного стана приводит к снижению колебаний толщины и ширины полосы. В результате на выходе из стана продольная и поперечная разнотолщинность полосы уменьшаются в 1,7-2 раза, расход энергии при прокатке сокращается на 3-5 %, а разнотолщинность подката для станов холодной прокатки снижается до диапазона  $\pm 2$  % по всей площади полосы.

6) Все усовершенствования технологии, изложенные в п.п. 1-5, были использованы ПАО «Северсталь» при разработке и промышленном внедрении новой сверхнизкоуглеродистой экономнолегированной автомобильной листовой стали марки 01ЮПД с ВН-эффектом, свойства которой соответствуют требованиям мировых стандартов. Освоение производства этой стали обеспечило для ОАО «Северсталь» конкурентные преимущества на мировом рынке сталей для автомобилестроения.

По материалам изложенных теоретических разработок и их технических приложений, использованных в производстве, представители Череповецкой научной школы прокатчиков сделали ряд докладов на Международных научно-технических конференциях в гг. Москве,

Санкт-Петербурге, Липецке, Череповце, Вологде, Токио (Япония), Венеции (Италия), Нешвиле (США), Париже (Франция), Харбине (Китай) и других городах [20-30]. Также было опубликовано большое количество статей в журналах «Производство проката», «Металлы», «Russian Metallurgy», бюллетене ОАО «Черметинформация».

Научная школа ЧГУ активно сотрудничает с учеными-прокатчиками ИМЕТ РАН [15; 19; 21; 24-28], обменивается информацией с представителями научной школы Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ): которые, в свою очередь, публикуют статьи в «Вестнике Череповецкого государственного университета», мы – в журнале МГТУ «Обработка сплошных и слоистых материалов».

Многие практически значимые результаты изложенных выше теоретических работ защищены патентами Российской Федерации.

В настоящее время ряд наших новых разработок испытывается в прокатных подразделениях ПАО «Северсталь».

### Список литературы

1. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
2. Смирнов В.С. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1967. 460 с.
3. Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А. Теория продольной прокатки. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1965. 212 с.
4. Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки. М.: Металлургия, 1966. 255 с.
5. Грудев А.П. Теория прокатки. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 280 с.
6. Робертс В. Холодная прокатка стали: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 542 с.
7. Рудской А.И., Лунев В.А., Теория и технология прокатного производства: Учеб. пособие. СПб.: Наука. 2008. 527 с.
8. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М.: Институт «Черметинформация», Череповец: ЧГУ, 2004. 416 с.
9. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Производство проката. Том 1. Книга 2. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов. М.: «Теплотехник», 2010. 274 с.
10. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки: учебник с грифом УМО РФ по образованию в области металлургии. Ст. Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 312 с.
11. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов. Монография. М.: «Теплотехник», Череповец: ЧГУ. 2015. 120 с.
12. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Никитин Д.И. Расчет мощности процесса холодной прокатки. Учеб. пособие. Череповец: ЧГУ. 2006. 120 с.
13. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки. Монография. Череповец: ЧГУ; М.: «Теплотехник», 2013. 113 с.
14. Гарбер Э.А., Шадрунова И.А. Контактное взаимодействие валков и полосы при холодной прокатке (новые решения в теории тонколистовой прокатки): Учеб. пособие (с грифом УМО РФ по металлургическим специальностям). Череповец: ЧГУ, 2003. 145 с.
15. E. Garber, A. Traino, I. Kozhevnikova. Novel Mathematical models for Cold-Rolling Process: В коллективной монографии: «Flat-rolled steel processes: advanced technologies/editor Vladimir B. Ginzburg, "CRC Press; NW, USA, Chapler16, s. 171-190.

16. Гарбер Э.А., Кожевников А.В., Кожевникова И.А. Вибрации в рабочих клетях станов холодной прокатки и методы их устранения. Учеб. пособие (с грифом УМО РФ по металлургическим специальностям). Череповец: ГОУ ВПО «ЧГУ», 2008. 143 с.
17. Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В. Формирование и контроль шероховатости поверхности прокатных валков и холоднокатаных полос. Учеб. пособие (с грифом УМО РФ по металлургическим специальностям). М.: «Теплотехник», 2009. 120 с.
18. Кузнецов В.В., Гарбер Э.А. Производство холоднокатаной листовой стали с повышенной прочностью и коррозионной стойкостью для автомобильной промышленности. Монография. Череповец: ЧГУ, 2011. 115 с.
19. Гарбер Эдуард, Поспелов Иван, Трайно Александр. Уменьшение продольной разнотолщинности горячекатаных широких полос. Монография. Saarbrücken, Deutschland, "LAMBERT Academic Publishing". 2014. 88 с.
20. Гарбер Э.А., Шадрунова И.А. Новая модель очага деформации при холодной прокатке тонких широких полос // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Современные сложные системы управления». Липецк: ЛГТУ, 2002. С. 137-140.
21. Гарбер Э.А., Шадрунова И.А., Трайно А.И., Юсупов В.С. Computer Modeling of the Deformation Cell in Cold Rolling of IF Steels as an Elastic and Plastic Medium with the View of Improving Automobile Sheets Quality. . International Forum for the Properties and Application of IF Steels «IF STEELS 2003». Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan. 2003. P. 431-435.
22. Пути уменьшения затрат электроэнергии при холодной прокатке на непрерывных станах / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова, Д.И. Никитин, В.Л. Явкин // Труды пятого Конгресса прокатчиков. (Череповец, 21-24 октября 2003 г.). М.: ОАО «Черметинформация». 2004. С. 90-94.
23. Новые решения в теории и технологии холодной прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова, А.В. Кожевников, Д.И. Никитин // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Теория и технология процессов пластической деформации». М.: МИСиС, 2004. С. 25-27.
24. E.A. Garber, I.A. Shadrunkova, V.V. Kuznetsov, A.I. Traino, V.S. Ysupov. New methods of optimization of cold rolling modes at continuous mills which provide improvement of surface cleanliness and reduction of energy consumption. 2 nd International Conference & Exhibition on New Developments in Metallurgical Process Technology (Riva del Garda, Italy, 19-21 September 2004) / Associazione Italiana di Metallurgia, 2004. P. 124-125.
25. E.A. Garber, I.A. Shadrunkova, V.V. Kuznetsov, A.I. Traino, V.S. Ysupov. Improvement of Rolling Schedules at Continuous Cold Rolling Mills. AISTech-2004. Iron & Steel Technology conference Proceedings. Volume II (September 15-17, 2004, Nashville, Tennessee). Association for Iron & Steel Technology, 2004. P. 3-9.
26. Моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки полос из IF сталей для экономии энергозатрат / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, В.А. Иводитов, А.И. Трайно, А.В. Кожевников // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию ОАО «Северсталь». Череповец: ЧГУ. 2006. С. 142-144.
27. Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, В.В. Кузнецов, А.И. Трайно, В.С. Юсупов. New methods of modeling and optimization of wide strip cold rolling schedules // Steel Rolling 2006 9-th International & 4-th European Conferences. Paris June 19-21, 2006.
28. E.A. Garber, I.A. Kozhevnikova, A.I. Traino, V.V. Kuznetsov, S.I. Pavlov. Novel Methods for Cold Rolling Process Modeling Providing Cold Roller Strip Quality Improvement, Energy Savings and Continuous Mill Rolling Speed Increase // ICIEA 2007 2-nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Harbin, China, 2007. P. 321-322.
29. Повышение эффективности листопрокатного производства на основе новых методов моделирования процессов прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, Д.Л. Шалаевский,

С.И. Павлов, В.В. Кузнецов, П.А. Тарасов // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГТУ, 2009. С. 13-15.

30. Технологические режимы непрерывного стана холодной прокатки, обеспечивающие повышение чистоты поверхности холоднокатаных полос / Э.А. Гарбер, В.В. Кузнецов, И.А. Шадрюнова, Е.В. Дилигенский, М.В. Шурыгина, М.А. Тимофеева // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 120-летию академика И.П. Бардина. Череповец, 2003. С. 187-194.

**УДК 621.771**

## **СТАНОВЛЕНИЕ МАГНИТОГОРСКОЙ ШКОЛЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ (научный обзор)**

**Зайдес С.А.**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

Посредственный учитель излагает,  
хороший учитель объясняет, вы-  
дающийся учитель показывает, ве-  
ликий учитель вдохновляет.

У. Уорд

Город Магнитогорск и Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ) отзывается в сердцах многих иркутян яркими и теплыми воспоминаниями не только о былой юности, но, прежде всего, о своих учителях и товарищах по научной работе: Г.Э. Аркулис, М.И. Бояршинов, Г.С. Гун, П.И. Денисов, В.Г. Дорогобид, Ю.И. Коковихин, Н.А. Королев, М.И. Куприн, Б.А. Никифоров, В.М. Салганик, Л.Е. Смушкевич, В.Л. Стеблянко, В.Г. Паршин, М.Г. Поляков, С.Н. Хайкин и многие другие коллеги.

Первенство построения научного моста между городами Иркутском и Магнитогорском принадлежит Николаю Николаевичу Соколовскому – заведующему кафедрой материаловедения и технологии металлов Иркутского политехнического института. В конце 60-х годов прошлого столетия под руководством академика А.И. Целикова он работал над диссертацией «Исследование проталкивания при волочении стальных прутков». Эта работа объединила два производственных предприятия: Магнитогорский калибровочный завод и Иркутский завод тяжелого машиностроения и два учебных вуза – Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова и Иркутский политехнический институт.

Пятьдесят лет назад в стране бурно развивались отрасли машиностроения, которые требовали значительного увеличения производства калиброванной стали и сортовых профилей из пруткового и бунтового металла. Практика показала, что применение калиброванной стали взамен горячекатаной позволяет снизить расход металла в машиностроительной промышленности на 20-40 %. Это обусловлено тем, что во многих отраслях, например, в сельскохозяйственном машиностроении при изготовлении валов и других стержневых деталей можно обойтись без поверхностной механической обработки на различных токарных станках, автоматах и автоматических линиях. Повышение механических свойств калиброванной стали, по сравнению с горячекатаной, также способствует снижению расхода металла в машиностроении.

Наиболее распространенным и экономически целесообразным способом изготовления калиброванной стали является холодное волочение. Увеличение производства калиброван-

ной стали на действующем оборудовании достигается за счет повышения скорости волочения, механизации трудоемких операций, внедрения многониточного волочения. В этом направлении Н.Н. Соколовский рассмотрел еще одну возможность повышения производительности технологического процесса – применение принудительного проталкивания прутков в волоку взамен механической обработки концевых участков [1].

Полученные экспериментальные данные были использованы для внедрения процесса волочения с проталкиванием в производство, а также для разработки новых конструкций проталкивателей и оснащения ими волочильных станов.

Своим учителем по обработке металлов давлением иркутяне по праву считают Григория Эммануиловича Аркулиса - доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой прокатно-волочильного производства, лауреата Государственной премии правительства РФ за разработку новой экологически безопасной, энергосберегающей технологии изготовления длинномерных биметаллических изделий. Под его руководством было защищено более 50-ти кандидатских и докторских диссертаций.

Разработке теории совместной пластической деформации различных металлов посвящена его докторская диссертация [2–4, 10]. Его научный труд был закреплен монографией «Совместная пластическая деформация различных металлов» (Москва: Изд-во «Металлургия», 1964. 272 с.). Это было совершенно новое слово в теории обработки металлов давлением. Поэтому монография была переведена на английский язык и издана в США (New York, 1966, 270 p.).



### Иркутские ученики магнитогорской школы по обработке металлов давлением

Начиная с верхнего ряда - слева направо:

1. Соколовский Николай Николаевич – к.т.н., доц., зав. каф. ИПИ.
2. Климов Владимир Николаевич – к.т.н., снс, начальник лаборатории прокатки ИПИ.
3. Копыловский Хаим Израильевич – к.т.н., доцент ИПИ.
4. Тутурин Николай Николаевич – к.т.н., доцент ИПИ.
5. Квактун Владимир Борисович – к.т.н., доцент ИПИ.
6. Велюга Леонид Дмитриевич – к.т.н., доцент ИПИ.
7. Ли Сергей Васильевич – ст. преп. ИПИ, соискатель.
8. Домрачев Айлин Филлипович – ст. преп. ИПИ, соискатель.
9. Дружинина Татьяна Яковлевна – ст. преп., аспирант ИПИ.
10. Зайдес Семен Азикович – аспирант ИПИ.
11. Полонский Анатолий Петрович – аспирант ИПИ.

Первым учеником профессора Г.Э. Аркулиса в Восточной Сибири стал Х.И. Копыловский – преподаватель кафедры сопротивления материалов Иркутского политехнического института.

В те годы в стране успешно развивалось производство не только холодноотянутой сортовой стали, но и биметаллической проволоки. Широко регулируемые физико-механические свойства делают ее незаменимой для изготовления ряда изделий, применяемых при работе в сложных условиях, и позволяют экономить дорогостоящие и дефицитные материалы. Качество стальной и биметаллической проволоки и условия ее производства существенно зависят от напряженного состояния материала в очаге деформации.

Х.И. Копыловский впервые попытался методом линий скольжения исследовать процесс волочения моно- и биметаллических круглых прутков. Было установлено влияние рабочего угла волоки, частных обжатий, удельной силы трения, а для биметалла, кроме того, – объемного содержания компонентов и отношения их механических характеристик на изменение напряженного состояния материала в очаге деформации [3, 5–9]. Выявлены зоны всестороннего растяжения в очаге деформации, способствующие образованию дефектов в металле при волочении. В 1969 году Х.И. Копыловский защитил кандидатскую диссертацию в Физико-техническом институте АН БССР на тему «Исследование методом линий скольжения напряженного состояния материала в очаге деформации при волочении круглых моно- и биметаллических прутков». Результаты исследований использованы при освоении производства сталеалюминовой проволоки на Магнитогорском метизно-металлургическом заводе.

Исследование очага пластической деформации при волочении стало центральным направлением научного исследования на кафедре сопротивления материалов в Иркутском политехническом институте. В начале 70-х годов исследования Х.И. Копыловского были продолжены В.Б. Квактуном. В диссертационной работе «Механика процесса формоизменения при осесимметричном волочении» напряженно-деформированное состояние в очаге деформации было исследовано экспериментально-аналитическим методом с использованием теории пластического течения и опытного определения интенсивности напряжений по очагу деформации путем измерения твердости. В.Б. Квактун впервые установил действительные границы очага деформирования при волочении [6–8, 13]. Определены значения коэффициента жесткости напряженного состояния, которые подтвердили предположения И.Л. Перлина о том, что материал в осевой области прутка больше предрасположен к образованию дефектов.

От изучения напряженного состояния в очаге деформации С.А. Зайдес перешел к исследованию остаточных напряжений в готовых изделиях – круглых стальных прутках. Если очаг деформации характеризует текущее напряженное состояние процесса, то остаточные напряжения непосредственно влияют на качество готовой продукции. Остаточные напряжения, возникающие в калиброванном металле, во многом определяют эффективность его использования. Так, растягивающие напряжения в периферийных слоях прутка снижают износостойкость и коррозионную стойкость, усталостную прочность, способствуют разрушению и растрескиванию металла, повышают коробление и поводку деталей.

В конце 70-х годов С.А. Зайдес под руководством профессора МГМИ М.И. Куприна успешно защищает диссертационную работу «Исследование остаточных напряжений при калибровке круглых прутков», посвященную определению влияния параметров и условий технологического процесса на величину и характер распределения остаточных напряжений в калиброванном металле.

Установлена зависимость максимальных значений компонентов тензора остаточных напряжений от степени относительного обжатия, угла рабочего конуса волоки, качества смазки. Изучено влияние на остаточные напряжения температурных режимов процесса, механических свойств материала, диаметра прутка, геометрии инструмента и других факторов [9–11]. Получены аналитические зависимости и построены номограммы для определения максимальных компонент тензора остаточных напряжений в прутках в зависимости от усло-



вий калибровки. Выявлена возможность управления остаточными напряжениями и улучшение качества металла в процессе калибровки прутков. Разработаны рекомендации по снижению уровня остаточных напряжений, уменьшения поводки и искривления прутков. Результаты исследования внедрены на Магнитогорском калибровочном заводе при изготовлении стабилизированных холоднотянутых стальных прутков. Это был новый вид продукции черной металлургии, который позволил получить положительный эффект в технологии машиностроения.

Следующий этап научных исследований в Иркутске характеризуется переходом от продукции черной металлургии к изделиям машиностроения. Калиброванный металл широко используют, в частности, при изготовлении рабочих и трансмиссионных валов артезианских турбинных насосов, которые служат для подъема воды из глубинных скважин. Трансмиссионные валы работают в сложных условиях интенсивного изнашивания, коррозии, знакопеременных нагрузок, поэтому надежность и долговечность насосов во многом определяется качеством рабочих и трансмиссионных валов.

Диссертация преподавателя кафедры сопротивления материалов Т.Я. Дружининой была посвящена повышению качества трансмиссионных валов за счет снижения остаточных напряжений и оптимизации параметров калибровки горячекатаных прутков. Для решения поставленной задачи был разработан аналитический метод расчета компонентов тензора остаточных напряжений в круглых прутках, калиброванных с малым обжатием. Были установлены связи между показателями, характеризующими уровень остаточных напряжений в калиброванном металле и его основными потребительскими свойствами: износостойкостью, коррозионной стойкостью, искривлением с течением времени, шероховатостью поверхности [9, 14]. Важным практическим результатом выполненных исследований является установление оптимального интервала (0,2-0,5 %) повторных обжатий, при которых на поверхности прутков формируются не растягивающие, а сжимающие остаточные напряжения.

Промышленная реализация результатов исследования прошла на Черемховском машиностроительном заводе им. К. Маркса, где была апробирована технология правки прутков, совмещенная с дополнительным малым обжатием на спроектированной и изготовленной комбинированной правильно-обжимной машине. В 1988 году диссертационная работа, выполненная под руководством Г.Э. Аркулиса и С.А. Зайдеса, была успешно защищена в МГМИ.

Кроме работ по исследованию напряженно-деформированного состояния в очаге пластической деформации, изучалось и качество холоднодеформированного металла. Технология калибровочного производства предусматривает обязательную стопроцентную правку прутков из-за их значительного искривления при волочении. Уменьшение величины искривления позволяет сократить потребность в правке прутков и, благодаря этому, увеличить производительность оборудования, поднять уровень его механизации и автоматизации, повысить качество калиброванного металла.

Н.Н. Тутурин под руководством профессора Аркулиса Г.Э. взялся за решение этой трудоемкой и сложной задачи. В результате выполнения большого объема экспериментальных исследований получена качественная оценка технологических факторов, нарушающих осесимметричность процесса волочения. Была выведена зависимость между условиями волочения прутков и их искривлением. Практическую ценность работы представляют требования к качеству подката и точности волочильного оборудования, обеспечивающее минимальное искривление металла. Результаты работы были внедрены на Магнитогорском калибровочном и Череповецком сталепрокатном заводах, на ИЗТМ – головном предприятии по производству цепных волочильных станков, а также опубликованы в монографии [12].

Вопросами повышения качества биметаллической проволоки занимался А.П. Полонский под руководством Г.Э. Аркулиса и Х.И. Копыловского [14]. Цель работы заключалась в изучении условий деформирования биметалла в области межслойной границы очага формирования для снижения дефектов в виде отслоений и трещин. В диссертационной работе

«Повышение качества алюмомедной проволоки за счет изменения напряженно-деформированного состояния на межслойной границе» (1986 г.). А.П. Полонский предложил уравнения, определяющие связь между скоростями перемещения разных металлов вблизи межслойной границы для плоской и осесимметричной задач, которые учитывают характер пластичного течения в этой важной области. Результаты исследования реализованы на заводе «Укркабель» по производству биметаллической проволоки.

Повышению качества холоднодеформированных изделий посвятил свою работу С.А. Кургузов. К проволоке, применяемой в электротехнической промышленности, предъявляются особые требования к состоянию поверхностного слоя. Дефекты на поверхности заготовки в виде рисок при волочении могут либо закрываться, либо преобразовываться в трещину [8]. В диссертационной работе, выполненной под руководством Б.А. Никифорова, было исследовано поведение дефектов поверхности при волочении для повышения качества проволоки, определено влияние основных параметров процесса на формоизменение впадин рисок. Для повышения качества проволоки была разработана и изготовлена опытная полировальная установка. Результаты работы внедрены на Белорецком металлургическом комбинате.

Кандидатские диссертации по обработке металлов давлением защитили также Л.Д. Велюга «Исследование напряженно-деформированного состояние очага деформации с помощью муаровых полос», и С.В. Ли «Исследование напряженно-деформированного состояния при плоской прокатке».

С начала 90-х годов началась перестройка всей системы страны и вместо валовой продукции потребовалось производство изделий качественных и конкурентоспособных. В Иркутском государственном техническом университете активизировались исследовательские работы по освоению деформационных методов обработки изделий машиностроения. Знания и опыт Магнитогорской школы ОМД получили свое дальнейшее развитие. С.А. Зайдес начал заниматься исследованием вопросов финишной обработки давлением в машиностроении.

В конце 90-х годов С.А. Зайдес защищает докторскую диссертацию «Теоретические основы охватывающего поверхностного пластического деформирования, технология и оборудование». Благодаря его работе, в университете сформировалось новое научное направление «Технологическая механика отделочно-упрочняющих процессов в машиностроении».

Теоретические и экспериментальные исследования [6–19] подтвердили эффективность финишного охватывающего деформирования при изготовлении маложестких деталей типа валов и осей. Определены оптимальные режимы деформирования, обеспечивающие высокое качество поверхностного слоя и повышение эксплуатационных характеристик деталей машин и элементов конструкций.

По технологии поверхностного пластического деформирования под руководством С.А. Зайдеса защищены кандидатские диссертации: Н.О. Тютрин «Правка маложестких цилиндрических деталей машин строчным ППД» (2000 г.), Н.В. Вулых «Формирование микрогеометрии упрочненного слоя деталей при локальном и охватывающем ППД» (2002 г.), А.С. Бубнов «Правка маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием» (2005 г.), Л.Г. Климова «Управление технологическими остаточными напряжениями при охватывающем деформировании маложестких валов» (2006 г.), А.В. Протасов «Повышение качества крупногабаритных соединений с гарантированным натягом при ремонте газовых компрессоров» (2007 г.), А.М. Токарев «Технологическое обеспечение долговечности скользящих электрических контактов поверхностным пластическим деформированием» (2010 г.), Н.А. Астафьева «Совершенствование технологии изготовления концевых фрез на основе применения винтовых пластин из быстрорежущей стали» (2011 г.), Н.В. Рудых «Оценка эффективности упрочнения поверхностным пластическим деформированием на основе компьютерной микроскопии» (2011 г.), А.В. Горбунов «Повышение качества упрочнения маложестких валов центробежным обкатыванием» (2013 г.) [20–28].

В настоящее время ведутся работы по определению напряженно-деформированного состояния по микроструктурному изображению, по исследованию возможности изготовления винтовых пластин из быстрорежущей стали холодным деформированием, по восстановлению размеров и формы изделий стесненным деформированием, по повышению качества скользящих контактов поверхностным пластически деформированием, по повышению жесткости длинномерных валов технологическими методами и другие.

Магнитогорскую школу по обработке металлов давлением в разное время закончили Н.Н. Соколовский, Х.И. Копыловский, Н.Н. Тутурин, В.Н. Климов, В.Б. Квактун, С.В. Ли, Л.Д. Велюга, С.А. Зайдес, А.П. Полонский, Т.Я. Дружинина, А.Ф. Домрачев, Э.И. Фильчагина, С.А. Кургузов.

### Список литературы

1. Соколовский Н.Н. К вопросу определения величины усилия при проталкивании прутков в волоку // Труды Иркутского политехнического института, вып. 26, 1966. С. 123-128.
2. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Metallurgy. 1964. 253 с.
3. Аркулис Г.Э., Копыловский Х.И. Влияние условий волочения на образование трещин в проволоке // Сталь. 1970. № 8. С. 756-759.
4. Аркулис Г.Э., Зайдес С.А., Куприн М.И. и др. Влияние параметров калибровки на остаточные напряжения в холоднотянутых прутках // Вестник машиностроения. М. 1980. № 10. С. 63-68.
5. Копыловский Х.И. О распределении напряжений в очаге деформации при волочении круглых прутков // Известия вузов. Черная металлургия. 1969. № 3. С. 90-94.
6. Копыловский Х.И., Квактун В.Б. Деформация материала при волочении круглого прута // Вопросы механики деформируемых сред. Труды Иркутского политехнического института. 1971., вып. 65. С. 29-34.
7. Копыловский Х.И., Квактун В.Б., Фильчагина Э.И. Исследования изменения прочностных свойств материала в очаге деформации при волочении // Вопросы механики деформирующих сред: Сб. науч. работ. Иркутск. Полит. ин-т., 1971. № 65. С. 104-107.
8. Освоение повышенных скоростей волочения алюминиевой проволоки / А.Ф. Домрачев, С.А. Зайдес, В.Б. Квактун, Х.И. Копыловский // Кабельная техника. М. 1978. № 8. С. 83-86.
9. Остаточные напряжения в металле при калибровке прутков / М.И. Куприн, Х.И. Копыловский, С.А. Зайдес, Т.Я. Дружинина // Вестник машиностроения. М. 1979. № 6. С. 36-39.
10. Влияние условий волочения на жесткость схемы остаточных напряжений и качество калиброванной стали / Г.Э. Аркулис, С.А. Зайдес, М.И. Куприн, Л.Е. Смушкевич // Теория и практика производства метизов: межвуз. сб. науч. трудов. Свердловск, 1979. № 8. С. 52-57.
11. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Гос. ун-т, 1992. 200 с.
12. Тутурин Н.Н. Конструкции современных волочильных машин». М.: Изд-во Машиностроение, 1968. 236 с.
13. Домрачев А.Ф., Зайдес С.А., Квактун В.Б. и др. Освоение повышенных скоростей волочения алюминиевой проволоки // Кабельная техника. 1977. № 8. С. 10-12.
14. Полонский А.П., Дружинина Т.Я. Получение биметаллической заготовки для исследования процессов волочения // Исследования по механике деформируемых сред. Иркутск, 1976. Вып. 1. С. 68-72.
15. Денисов П.И., Медведев А.Г., Велюга Л.Д. Оптимальные углы волок и обжатия при калибровке прутков автоматной стали // Сб. науч. работ. Магнитогорск, 1974.

№ 140. С. 97-103

16. Зайдес С.А. Исаев А.Н., Механика процессов поверхностно-пластического деформирования. М.: LAP LAMBERT Academic Publishing.(Germany), 2012. 415 с.

17. Зайдес С.А. Охватывающее деформационное упрочнение маложестких валов // Упрочняющие технологии и покрытия. М. 2008. № 2. С. 42–46.

18. Зайдес С.А. Физико-геометрическое моделирование охватывающего поверхностного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия, М. 2008. № 3. С. 59–64.

19. Зайдес С.А. Состояние технологии поверхностного пластического деформирования в России // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2015. № 2 (43). С. 18–21.

20. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Повышение качества валов малой жесткости центробежным обкатыванием // Вестник машиностроения. 2015. № 12. С. 72–77.

21. Зайдес С.А., Тютрин Н.О. Численное моделирование процесса правки валов строчным поверхностным пластическим деформированием // Механика деформируемых сред в технологических процессах: межвуз. сб. науч. трудов. Иркутск, 2000. С. 6–10.

22. Зайдес С.А., Бубнов А.С. Напряженное состояние при правке стесненным сжатием стержневых изделий // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. междунар. сб. науч. тр. / Под ред Г.С. Гуна. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 18–22.

23. Зайдес С.А., Климова Л.Г. Геометрическая стабилизация маложестких изделий из калиброванной стали // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. междунар. сб. науч. тр. / Под ред Г.С. Гуна. Магнитогорск, 2004. № 30. С. 57–60.

24. Зайдес С.А., Протасов А.В. Повышение качества соединений с гарантированным натягом при сборке узлов крупнотоннажных кривошипных валов газовых компрессоров // Сборка в машиностроении, приборостроении М. 2009. № 1. С. 64–70.

25. Зайдес С.А., Рудых Н.В. Тестирование программы по определению НДС на основе компьютерной микроскопии // Контроль. Диагностика. М., 2012. №2 (164) февраль. С. 58-63.

26. Зайдес С.А., Вулых Н.В. Охватывающее упрочнение маложестких валов. Теория, технология. М.: LAP LAMBERT Academic Publishing.(Germany), 2013. 223 с.

27. Зайдес С.А., Астафьева Н.А. Холодная завивка пластин из быстрорежущей стали // Дизайн. Теория и практика. М. 2013. № 14. С. 52–56.

28. Zaydes S.A., Gorbunov A.V. Determining strength properties of surface layer in metal // Central-Asian Material Science Journal. 2015. № 1. Pp. 64–71.

*Статья посвящается памяти  
Сергея Сергеевича Яковлева*

**УДК 621.771**

**СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КАФЕДРЫ  
«МЕХАНИКА ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ»  
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
(научный обзор)**

**Кухарь В.Д., Ларин С.Н., Пасынков А.А.**  
*Тульский государственный университет, Россия*

В 1939 году, в соответствии с требованиями промышленности, в действующем тогда Тульском механическом институте (ТМИ) была организована подготовка специалистов по холодной и горячей обработке металлов давлением [1-3].

В довоенное и военное время подготовка специалистов осуществлялась по ускоренным учебным программам.

После окончания войны подготовка студентов стала вестись по нормальной учебной программе. На кафедру пришли молодые преподаватели: Лебедев К.В., Шевелев В.В., Обозов И.П., Успенский Б.И. и опытные производственники, пришедшие из промышленности: Аврутин С.В., Давыдов В.И., Малов А.Н., а также Ренне И.П., окончивший первый выпуск в ТМИ по специальности «Горячая штамповка».

С 1946 по 1954 гг. кафедрой «Технология штамповочного производства» руководил Малов А.Н., а в период с 1954 по 1956 г. и с 1956 по 1961 гг. заведующими кафедрой были доцент Ренне И.П. и профессор Попов Е.А.

С приходом на кафедру молодых преподавателей значительно активизировалась научная деятельность. Основное научное направление кафедры было связано с исследованием процессов вытяжки с утонением стенки, обжима краевой части заготовки, гибки, отбортовки. Исследования по гибке листовых заготовок, выполненные И.П. Ренне, стали классическими, и нашли отражение в учебниках, монографиях и справочниках по листовой штамповке.

В этот же период получили начальное развитие идеи нового метода исследования деформированного состояния при сложном нагружении в процессах обработки металлов давлением с помощью координатной сетки, разработанные И.П. Ренне. Этот метод широко используется и в настоящее время при анализе процессов штамповки.

Результаты проведенных исследований нашли свое отражение в учебниках, монографиях, справочниках, научных статьях и стали основой для защиты кандидатских диссертаций. Так, в 1953 г. кандидатскую диссертацию защитил Ренне И.П., в 1963 г. - Обозов И.П., а в 1957 г. докторскую диссертацию защитил Попов Е.А.

С 1956 по 1962 год на кафедре основное внимание уделялось исследованию совмещенных процессов листовой штамповки с целью их интенсификации, разработке методики построения кривых истинных напряжений и исследованию на ее базе механических свойств некоторых листовых металлов. Это направление исследовательской работы в значительной степени обусловлено тенденцией расширения применения совмещенных процессов в современной технологии.

Одновременно велись исследования по установлению влияния режимов термической обработки и эффективности действия смазки при горячей штамповке на стойкость и износ штампов. Изучено влияние легирующих элементов на свойства штамповых сталей и разработан методика определения износа штампов.

В 1963 году был организован Тульский политехнический институт (ТПИ), а механико-машиностроительный факультет переименован в механический. В его состав вошла кафедра «Технология штамповочного производства», которую возглавил Ренне И.П. (1963-1970 гг.). Ему принадлежит значительная роль в подготовке научных кадров на кафедре. Им подготовлено свыше 50 кандидатов и 3 доктора технических наук.

В 1964 г. при кафедре организуется отраслевая научно-исследовательская лаборатория № 5 (ОНИЛ-5), открывается аспирантура. К этому времени кафедра пополнилась молодыми сотрудниками, защитившими кандидатские диссертации (С.А. Валиев, А.С. Базык, С.П. Яковлев), а также способными специалистами-выпускниками и производственниками (А.С. Маленичев, Н.В. Купор, А.К. Евдокимов и др.).

Открытие ОНИЛ-5 и аспирантуры способствовало дальнейшему развитию научно-исследовательской работы, развитию связей с производством и подготовки научных кадров.

В 1971 г. докторскую диссертацию защитил Ренне И.П., а в 1972 г. была защищена докторская диссертация Яковлевым С.П., который в 1970 г. был назначен руководителем кафедры и руководил ею свыше 30 лет.

Основным направлением научной деятельности С.П. Яковлева являлась разработка методов анализа и расчетов статических и динамических процессов обработки металлов давлением на основе создания обобщенных математических моделей, в которых учитываются реальные свойства анизотропии и неоднородности механических свойств материала. Эти разработки позволяют научно обосновать выбор рациональных технологических параметров

процессов обработки металлов давлением, обеспечивающих интенсификацию процессов, экономию материалов и повышение качества получаемых изделий.

Яковлев С.П. являлся руководителем научной школы «Теория и технология формоизменения изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при различных термомеханических режимах в процессах обработки давлением».

По этому научному направлению, начиная с 1968 года, началась подготовка кадров высшей квалификации. Под научным руководством и при его консультации выполнили и защитили кандидатские диссертации свыше 100 человек. Яковлев С.П. осуществлял консультации и оказывал помощь в работе при выполнении и подготовке к защите докторских диссертаций 35 соискателей.

В 2004 г. заведующим кафедрой «Механика пластического формоизменения» был назначен д.т.н., профессор Яковлев С.С.



*Коллектив кафедры 2014 года*

Яковлев С.С. был руководителем научной школы «Механика формообразования изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при различных термомеханических режимах деформирования».

Основные научные результаты кафедры относятся к разработке теоретических методов определения деформаций при плоском стационарном и нестационарном пластическом течении, способов решения смешанной краевой задачи, экспериментального подхода к оценке деформаций при стационарном течении на базе теории пластического течения.

В это же время получили развитие теоретические методы учета влияния начальной анизотропии и неоднородности материала в расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Были получены основные соотношения для анализа процессов, протекающих в условиях плоского напряженного, плоского деформированного и осесимметричного состояний. Установлены режимы ведения процесса вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей, позволяющие получить оболочки практически без образования фестонов, что исключает операцию подрезки торца и создает условия для экономии металла.

На кафедре активно проводятся работы по развитию теории обработки металлов давлением анизотропных материалов при различных температурных условиях деформирования. Предложен вариант теории пластичности начально-ортотропного тела с анизотропным уп-

рочением, который основан на условии текучести Мизеса – Хилла, неоднородном расширении поверхности нагружения без перемещения в шестимерном пространстве напряжений, связанном с главными осями анизотропии, и предполагающей справедливость ассоциированного закона течения. Вводятся деформационные или энергетические параметры упрочнения. Рассматриваются одно- и многопараметрические модели анизотропного упрочнения. Разработан подход к выбору математической модели анизотропного упрочнения ортотропного тела для анализа процессов пластического формоизменения.

Для анализа процессов формоизменения анизотропного листового материала при медленном горячем деформировании сформулированы уравнения связи между скоростями деформаций и напряжениями, получены уравнения состояния при ползуче-пластическом деформировании (кратковременной ползучести) анизотропного материала. Разработаны феноменологические модели разрушения (энергетическая и деформационная) анизотропного листового материала при кратковременной ползучести, основанные на принципе линейного накопления повреждаемости в области пластической деформации и деформации ползучести.

Научные результаты, полученные в процессе научно-исследовательской работы, способствовали развитию и совершенствованию методической работы и использованию научных результатов при многоуровневой подготовке бакалавров, инженеров и магистров, которых выпускает кафедра с 1992/93 учебного года.

Подготовка магистров ведется по направлениям подготовки 150700 «Машиностроение» профиля «Машины и технологии обработки металлов давлением», направлению 151000 «Технологические машины и оборудование» профиля «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок» и профиля «Высокоэффективные методы обработки металлов давлением».

В 1996 г. состоялся первый выпуск бакалавров, а в 1998 г. – первый выпуск магистров, многие из которых поступили в аспирантуру. Введение многоуровневой подготовки бакалавров, инженеров, магистров потребовало большой работы над учебными планами и тщательной методической подготовки, связанной с пересмотром многих методических указаний и пособий. На кафедре были введены специализации по «Технологии горячей штамповки» и «Технологии холодной штамповки», предусматривающие подготовку инженеров на базе научных достижений кафедры. В этой связи был подготовлен цикл новых дисциплин, раскрывающих особенности штамповки анизотропных материалов, основы компьютерного моделирования, технологии магнитно-импульсной штамповки, ротационной вытяжки и т.д.

Последние годы характеризуют кафедру новым подъемом в области научно-исследовательской и учебной работы. Постоянная связь с крупнейшими ведущими промышленными центрами и исследовательскими институтами и рядом крупнейших вузов страны позволили кафедре определить фундаментальный характер работ, состоящий в создании основ ресурсосберегающих процессов деформирования при изготовлении изделий машиностроения с высокими техническими требованиями.

В это время кафедра активно сотрудничает с целым рядом организаций, таких как Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, АО «НПО «СПЛАВ», ОАО «КБП», ОАО ЦКБА, ОАО «ТНИТИ», ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», РКК «Энергия» им. С.П. Королева», ОАО «ГНПП Техномаш», ОАО «НПО им. С.А. Лавочкина», ОАО «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», ОАО «НПО машиностроения», НПО «Энергомаш»; с рядом машиностроительных заводов: ОАО «Штамп», Машзавод им. В.М. Рябикова, ОАО «НПО «Базальт», а также с вузами страны: МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ «МАМИ», Санкт-Петербургский государственный университет, Балтийский технический университет "Военмех", МГТУ «СТАНКИН», Южно-Уральский государственный университет, Московский государственный институт стали и сплавов (технический университет), ОрелГТУ, Чувашский госуниверситет, МГТУ «МАИ», Самарский аэрокосмический университет, Липецкий ГТУ и др.

Научная и практическая ценность выполненных работ позволила значительно усовершенствовать учебный процесс и провести солидную подготовку научных кадров через аспирантуру и докторантуру.

На кафедре МПФ активно осуществляется подготовка кадров высшей квалификации. За последние пять лет (2011-2015 гг.) под научным руководством ведущих ученых кафедры успешно прошли защиты 26 кандидатских и 5 докторских диссертаций.

Ежегодно сотрудниками кафедры МПФ публикуется свыше 100 научных статей в центральной печати и межвузовских сборниках научных трудов и подаются более 5 заявок на патенты РФ. На кафедре МПФ активно ведется работа по изданию монографий и учебных пособий (ежегодно выпускается по несколько монографий и учебных пособий), многие из которых имеют гриф учебно-методического объединения вузов РФ по университетскому и политехническому образованию. За последние 5 лет издано 10 монографий [4-12], 11 учебных пособий [13-22], 2 учебника [23, 24] и 1 справочник [25].

В настоящее время подготовка бакалавров техники и технологии направления 15.03.01 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением», а также магистров по направлениям подготовки 15.04.01 «Машиностроение» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

На протяжении многих лет сотрудники кафедры проф., д.т.н. Яковлев С.П., проф., д.т.н. Яковлев С.С., проф., д.т.н. Усенко Н.А., проф., д.т.н. Трегубов В.И., проф., д.т.н. Панфилов Г.В., проф., д.т.н. Черняев А.В. принимают активное участие в работе специализированных ученых советов по присуждению степеней кандидата и доктора наук в Тульском государственном университете и других вузов страны.

Достижения кафедры неоднократно демонстрировались на различных выставках и презентациях, таких, например, как Региональная выставка-ярмарка «Дни Тульской области в Москве» - выставочный комплекс в Сокольниках; Межрегиональная выставка-ярмарка конкурентоспособных проектов и разработок «Наследники Демидовых», г. Тула; Лейпцигская ярмарка, международных салонах изобретений, новой техники и товаров, международных выставках «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции», Всемирном Салоне инноваций «Брюссель - Эврика», Российская молодежная научная и инженерная выставка с международным участием, Всероссийская научная конференция молодых исследователей в рамках Всероссийского научного форума молодых исследователей «Шаг в будущее», Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» и др.

По результатам научно-исследовательской работы сотрудники кафедры неоднократно были удостоены звания лауреата премии имени С.И. Мосина (в 1976 г., 2002 г., 2006 г., 2008 г., 2010 г.) в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение. Ежегодно сотрудники кафедры МПФ становятся лауреатами регионального конкурса «Инженер года».

В 1982 г. профессору С.П. Яковлеву была присуждена премия Совета Министров СССР за создание и внедрение новых технологических процессов и специального оборудования в области машиностроения. В 1998 г. профессора Яковлев С.П. и Яковлев С.С. были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники за разработку научных основ и ресурсосберегающих процессов деформирования при изготовлении изделия машиностроения с высокими техническими требованиями; в 2006 г. – премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку комплекса технологий и научное обеспечение производственных процессов пластического формообразования особо ответственных деталей машиностроения из высокопрочных анизотропных материалов; а в 2011 г. профессор Яковлев С.С. в составе авторского коллектива был удостоен присуждения премии правительства в области образования за создание научно-учебно-педагогического комплекса по подготовке кадров высшей квалификации в области инновационных и высоких технологий обработки металлов давлением.



За большие достижения в области развития экономики России д.т.н., проф. Яковлев С.П., Яковлев С.С. и Трегубов В.И. были удостоены звания лауреата премии имени А.Н. Косыгина Российского Союза товаропроизводителей (2005 г.), премии Тульской области в области науки и техники имени академика Б.С. Стечкина (2006 г.).

Интенсивная научно-исследовательская работа, проводимая на кафедре, явилась базой для привлечения к научной деятельности студентов, подготавливаемых кафедрой.

Научно-исследовательская работа студентов на кафедре МПФ является практической составляющей учебного процесса, способствующей углубленному пониманию роли обработки металлов давлением в развитии машиностроения и перспектив совершенствования технологий. Благодаря проводимым исследованиям студент приобретает уверенность в надежности получаемых знаний и начинает формироваться его компетентность и опыт, без которых специалист может и не состояться.

На кафедре успешно развивается научное направление – теория проектирования высокопроизводительных автоматических загрузочных устройств для штучных предметов обработки при загрузке их в технологические системы, прежде всего операций обработки давлением. Возглавляет это направление заслуженный деятель науки и техники, профессор, д.т.н. Усенко Н.А. Им подготовлено более 30 кандидатов наук, 3 доктора наук. Результаты исследований опубликованы в шести монографиях (в этом числе один справочник), получено более ста свидетельств на изобретения.

На кафедре много лет функционировало студенческое конструкторское бюро (СКБ) «Механик» - одна из форм студенческой научно-исследовательской работы. Работа СКБ тесно увязывалась с учебным процессом. Студентами выполнялись реальные курсовые и дипломные проекты по курсу «Технология холодной штамповки». Разработанные конструкции штампов и технологические процессы внедрялись на машиностроительных предприятиях РФ. Студенческое конструкторское бюро принимало участие в различных выставках, и его работы неоднократно отмечались дипломами областных, зональных и всероссийских организаций, а также многочисленными грамотами.

За значительный вклад в теорию и технологию обработки металлов давлением в 1997 г. кафедре было присвоено имя Н. Демидова.

За последние годы кафедра пополнилась молодыми, перспективными специалистами в области обработки металлов давлением и это означает дальнейшее ее развитие на благо науки и российского образования.

### Список литературы

1. Яковлев С.П. 65 лет кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета // Заготовительные производства (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2004. № 10. С. 21-24.

2. Яковлев С.П. К 65-летию кафедры «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2005. № 1. С. 3–9.

3. Яковлев С.С., Яковлев С.П. 70 лет кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2009. № 11. С. 14-15.

4. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании. М.: Машиностроение, 2009. 265 с.

5. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, Я.А. Соболев, С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, С.Н. Ларин. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.

6. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

7. Яковлев С.С., Черняев А.В., Трегубов В.И. Изотермическое деформирование осесимметричных деталей в режиме кратковременной ползучести. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 161 с.

8. Яковлев С.С., Трегубов В.И. Теория и технология изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 232 с.

9. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. Теория и технология штамповки анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2012. 400 с.

10. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.

11. Глубокая вытяжка анизотропных материалов / С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, В.Д. Кухарь, В.Ю. Травин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 225 с.

12. Митин О.Н. Кухарь В.Д., Яковлев С.С. Штамповка цилиндрических заготовок с внутренним рифлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 113 с.

13. Руководство по дипломному проектированию. В 5-и частях. Часть 2. Листовая штамповка. Типовые конструкции штампов и оборудование: учебное пособие / В.И. Трегубов, Н.Ф. Шпунькин, С.Н. Ларин, В.И. Платонов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. 293 с.

14. Руководство по дипломному проектированию. В 5-и частях. Часть 5. Кузнечно-штамповочное оборудование и средства автоматизации: учебное пособие / В.И. Трегубов, А.С. Маленичев, Н.Е. Проскураков, Ю.Г. Нечепуренко. Тула: ТулГУ, 2008. 292 с.

15. Руководство по дипломному проектированию. В 5-и частях. Часть 3. Проектирование технологических процессов ОМД и оснастки. Горячая штамповка: учебное пособие / Э.А. Иванова, В.И. Трегубов, В.И. Платонов, А.А. Пасынков. Тула: ТулГУ, 2009. 142 с.

16. Руководство по дипломному проектированию. В 5-и частях. Часть 4. Организационно-экономическая часть дипломных проектов кузнечно- и листоштамповочных цехов: учебное пособие / И.А. Гусев, Е.С. Маленичев, В.И. Трегубов, Е.Б. Чачина, Л.А. Васин, В.А. Курский. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 215 с.

17. Руководство по дипломному и курсовому проектированию. В 5 частях. Часть 2. Листовая штамповка. Технологические расчеты. Расчет и проектирование штампов: учебное пособие / О.М. Герасимова, В.И. Трегубов, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 258 с.

18. Иванова Э.А., Трегубов В.И., Платонов В.И., Пасынков А.А. Специальные технологические процессы горячей обработки металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 160 с.

19. Сборник задач с решениями по курсу «Теория обработки металлов давлением»: учеб. пособие / С.П. Яковлев, В.А. Голенков, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 145 с.

20. Руководство по дипломному проектированию. Часть 6. Охрана труда и окружающей среды / Э.М. Соколов, М.В. Ларина, В.И. Трегубов, С.Н. Ларин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 125с.

21. Специальные технологические процессы холодной обработки металлов давлением. В 2 частях. Ч. 1. Специальные технологические процессы холодной штамповки: учеб. пособие / В.А. Коротков, В.Д. Кухарь, В.И. Трегубов, А.С. Маленичев, Е.С. Маленичев, С.В. Недошивин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 181 с.

22. Специальные технологические процессы холодной обработки металлов давлением. В 2 частях. Ч. 2. Специальные технологические процессы листовой штамповки с нагревом: учеб. пособие / С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, С.Н. Ларин, В.И. Платонов, А.А. Пасынков, А.А. Перепелкин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 88 с.

23. Теория обработки металлов давлением. Учебник для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование» / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь // под редакцией В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Изд-во «Машиностроение», 2009. 442 с.

24. Теория обработки металлов давлением: 3-е издание / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь. М.: Машиностроение, 2013. 442 с.

25. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

**УДК 621.774.37:539.319**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ (научный обзор)**

**Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В.**

*ФГБУО ВП «Пермский национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия*

Современный интерес к сверхпроводниковым материалам основан на стремительно развивающихся технологических возможностях совершенствования структуры композитов и адаптации их свойств к требованиям технических применений. Актуальной проблемой мировой практики является разработка крупномасштабных магнитных систем. В рамках проекта ITER (Международного термоядерного экспериментального реактора) - создается уникальное поле для исследований характеристик системы сверхпроводящих магнитов первого энергетического термоядерного реактора. Совершенствование производства позволит РФ выполнить обязательства в рамках работ по созданию международного термоядерного реактора ITER с участием России, США, Японии и ряда стран ЕС, а также выйти на новый рынок высокотехнологичных изделий.

Из множества низкотемпературных сверхпроводниковых (НТСП)-сплавов и соединений в процессе 40-летних исследований определились два лидера – обладающий достаточно высокой прочностью сплав Nb-Ti и интерметаллическое соединение Nb<sub>3</sub>Sn, удовлетворяющие основным запросам электроэнергетики и электрофизики. Именно Nb-Ti и Nb<sub>3</sub>Sn при рабочих температурах от 1.8 до 8 °К перекрывают представляющий практический интерес интервал рабочих магнитных полей и плотностей тока в электротехнических и электрофизических устройствах.

В настоящее время в ОАО "Чепецкий механический завод" (г. Глазов, Удмуртия) организовано промышленное производство низкотемпературных сверхпроводников для магнитной системы Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER) [1]. На стадии освоения производства на кафедре Динамики и прочности машин были выполнены предварительные расчеты технологии.

Следует отметить, что используемая в настоящее время технология производства сверхпроводников не является оптимальной, поэтому основной упор авторов данной статьи сделан на оптимизацию процесса производства.

Основными проблемами при промышленном производстве сверхпроводниковых изделий являются их разрушение в процессе производства, энергозатраты и стойкость технологического инструмента при многократном пластическом деформировании (волочением), являющемся ключевым этапом технологического цикла и определяющим качество производимых низкотемпературных сверхпроводниковых изделий.

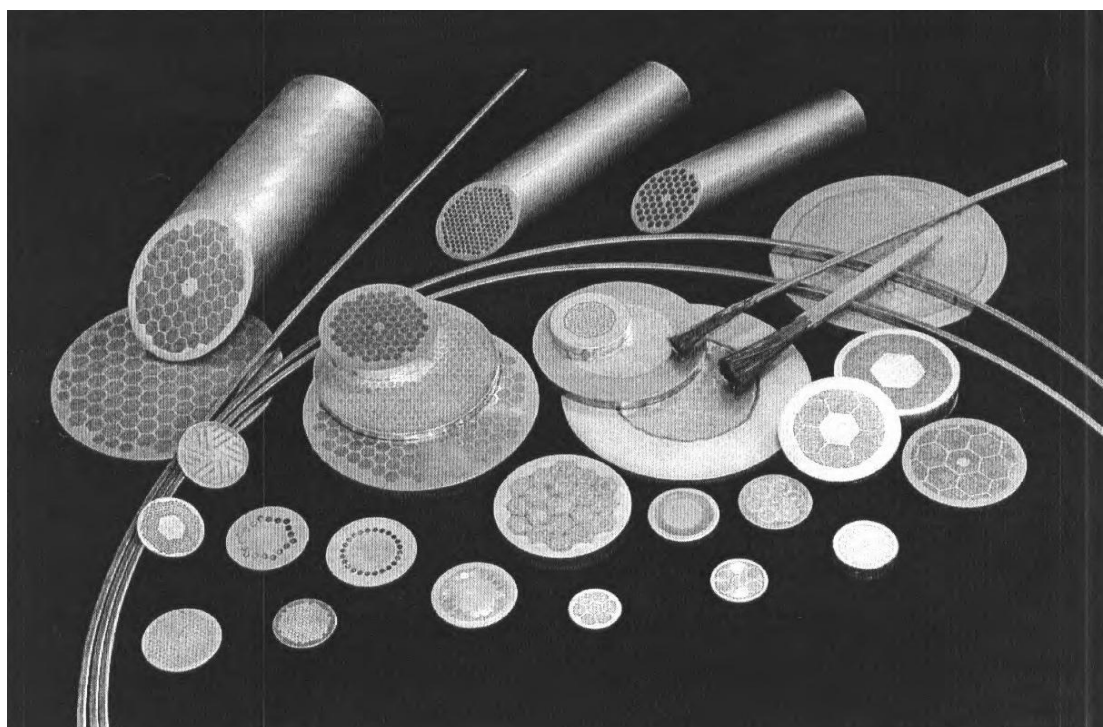
Анализ современного состояния проблем и технологии производства показывает, что в настоящее время отсутствуют систематические исследования многократного пластического деформирования материалов сложной внутренней структурой, типа сверхпроводников, применительно к проектированию и оптимизации их производства.

Поэтому актуальными задачами является разработка научно обоснованных методик проектирования и оптимизации технологических процессов производства сверхпроводников. Решение поставленных задач позволит совершенствовать и оптимизировать производство высококачественных композиционных сверхпроводников в промышленных масштабах.

При проведении исследований в области производства сверхпроводников кафедра Динамики и прочности машин Пермского национального исследовательского политехнического университета сотрудничает с Магнитогорским государственным техническим университетом им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск), Южно-Уральским государственным университетом (г. Челябинск), Уральским федеральным университетом имени первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург), Ижевским государственным техническим университетом им. Калашникова (г. Ижевск), техническим университетом Лилль 2 (Франция).

Технические сверхпроводящие кабели представляют собой сложные композитные конструкции из разнородных материалов с ультратонкими (до долей микрона) волокнами собственно сверхпроводящего материала (**рис. 1**).

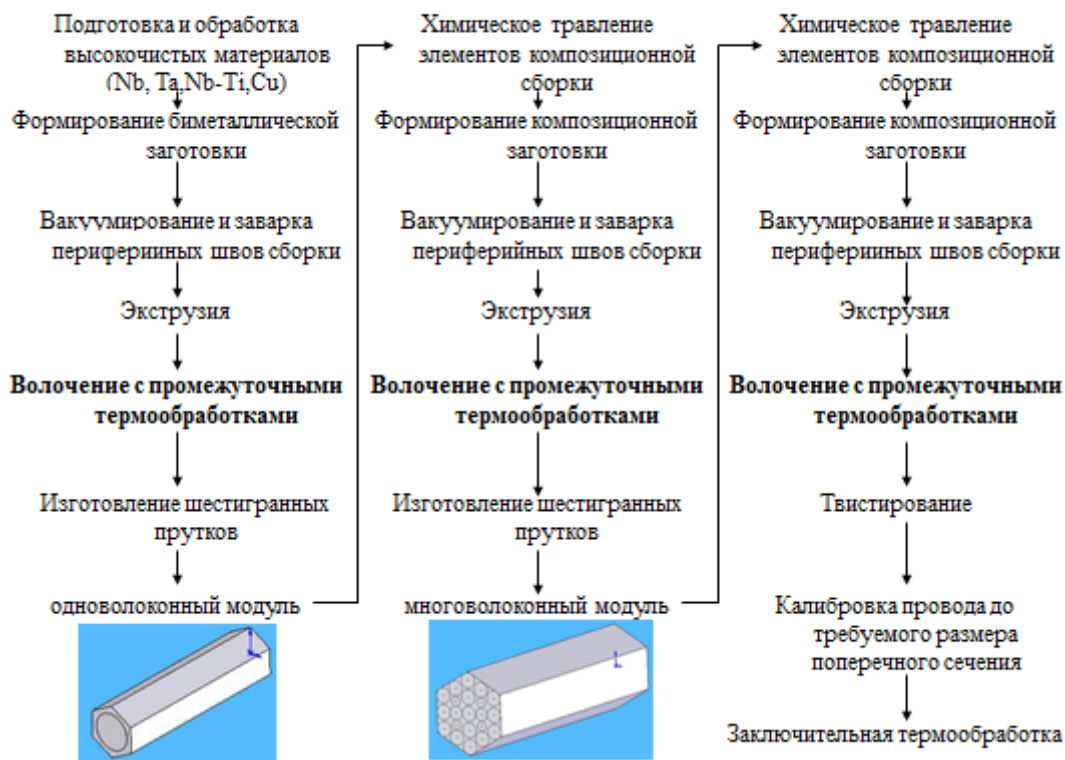
Как следует из **рис. 1**, композиционные сверхпроводники представляют собой трансверсально-изотропную конструкцию, содержащую сверхпроводящие волокна, распределенные в матрице из высокочистой меди или резистивного сплава на основе меди.



**Рис. 1. Некоторые конструкции сверхпроводников**

Технологический процесс производства низкотемпературных сверхпроводников представляет собой область технологической металлургии, включающей многостадийный процесс пластического деформирования прессованием и последующего многократного деформирования в коническом волочильном инструменте (**рис. 2**).

В основе технологии производства сверхпроводников лежит пластическая деформация прессованием и многократным волочением. Процесс волочения заключается в протягивании заготовки через конический волочильный инструмент, общее количество переходов при производстве сверхпроводников составляет несколько десятков. Передний конец протягиваемой заготовки находится в условиях одноосного растяжения, при этом возникает опасность его разрушения при превышении предельных обжатий. Величина обжатия за проход волочения определяет, в свою очередь, общее количество проходов в процессе изготовления сверхпроводника.



**Рис. 2. Этапы производства композиционных проводников**

Одной из величин, характеризующих меру пластической деформации при волочении, принято считать коэффициент вытяжки, определяемый по формуле

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1}, \quad (1)$$

где  $F_0$  – начальная (исходная) площадь сечения заготовки;  $F_1$  – площадь сечения после прохода.

При многократном волочении определяется суммарная вытяжка

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{F_0}{F_k}, \quad (2)$$

где  $F_k$  – конечная площадь сечения протягиваемого изделия, которая равна произведению разовых вытяжек по переходам маршрута многократного волочения

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n. \quad (3)$$

При одинаковых значениях разовых вытяжек  $\lambda_{cp}$  имеем

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{cp}^n, \quad (4)$$

где  $n$  – количество переходов маршрутов многократного волочения.

Из соотношения (4) определяется количество переходов многократного волочения при изготовлении изделия с конечной площадью сечения  $F_k$  из заготовки с площадью сечения  $F_0$

$$n = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{\ln \lambda_{cp}^n}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что с увеличением разовой вытяжки количество переходов уменьшается, процесс является более технологичным и экономичным.

Другим важным показателем процесса волочения является напряжение волочения, определяющее параметры процесса волочения

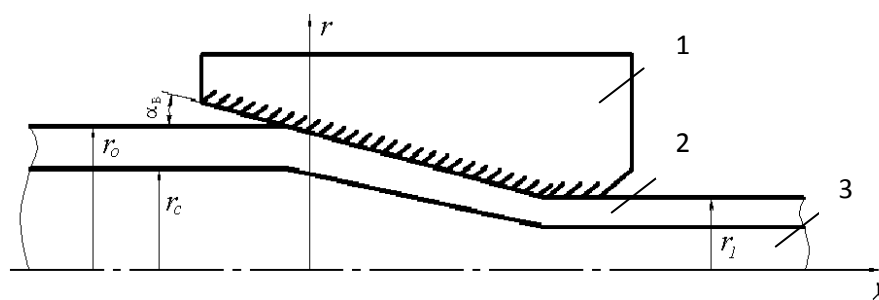
$$\sigma_{вол} = \frac{P}{F_1}, \quad (6)$$

где  $P$  - приложенное к переднему концу заготовки усилие волочения.

При деформации в конических инструментах существует зона оптимальных углов, в пределах которой усилие волочения при прочих равных условиях имеет минимальное значение. При малых углах рабочего конуса происходит увеличение контактной поверхности и, следовательно, сил трения. С увеличением угла рабочего конуса контактная поверхность уменьшается, уменьшается сила трения и падает общее давление металла на волоку. Однако с повышением угла  $\alpha_v$  возрастает неравномерность деформации, степень деформации и ухудшаются условия смазки – все это ведет к повышению усилия волочения. Таким образом, в результате сложного взаимодействия перечисленных факторов образуется оптимальный угол или зона оптимальных углов.

Достижение минимального значения  $\sigma_{вол}$  является основной задачей при проектировании оптимальных маршрутов волочения. Обеспечение минимальных значений напряжения волочения позволяет обеспечить минимальный расход энергии при волочении, увеличить единичные обжатия (вытяжку) за счет снижения вероятности обрыва переднего конца заготовки и повысить стойкость технологического инструмента.

При волочении наряду с деформацией, связанной с изменением площади поперечного сечения, заготовка подвергается дополнительным сдвиговым деформациям на входе в волочильный инструмент и выходе из него (рис. 3).



**Рис. 3. Схема волочения сверхпроводниковой заготовки:  
1 – волока, 2 – оболочка, 3 – сердечник**

В монографии [3] предложена формула для определения средней по сечению степени деформации при пластической деформации осесимметричных изделий, учитывающая дополнительные сдвиговые деформации в волочильном инструменте

$$\varepsilon_{cp} = 2 \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_e, \quad (7)$$

где  $\alpha_e$  – угол наклона образующей инструмента к оси волочения.

Степень деформации определяется как  $\ln \lambda$ , дополненная вторым слагаемым соотношения (7). С увеличением угла конусности волочильного инструмента степень деформации растёт.

Прочность переднего конца заготовки зависит от напряжения волочения. В настоящее время из существующих формул для определения напряжения волочения заготовок круглого сечения наиболее известной для применения является формула И.Л. Перлина

$$\sigma_{вол} = 2 \ln \frac{d_0}{d_1} [\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s + \sigma_q)] + \sigma_q, \quad (8)$$

где  $\sigma_s$  – среднее по очагу деформации сопротивление деформации протягиваемой заготовки;  $f$  – коэффициент внешнего трения;  $\alpha_n$  – приведенный угол волокни;  $\sigma_q$  – напряжение противонапряжения.

С учетом дополнительных сдвиговых деформаций на входе в конический инструмент и выходе из него предложена модифицированная формула для определения напряжения волочения в следующем виде

$$\sigma_{вол} = \left( \ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_e \right) [\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s + \sigma_q)] + \sigma_q. \quad (9)$$

При этом И.Л. Перлин предлагает принимать  $\operatorname{tg} \alpha_n = 0,65 \operatorname{tg} \alpha_e$ .

Геометрия волочильного инструмента, как правило, стандартизирована. Учет дополнительных сдвиговых деформаций позволяет определить оптимальную вытяжку для заданной (стандартной) геометрии волочильного инструмента, обеспечивающих минимальные значения напряжения волочения.

Учет дополнительных сдвиговых деформаций позволяет определить оптимальные углы конусности волочильного технологического инструмента из условий минимума напряжения волочения.

Оптимальные значения угла конусности определяются из условия

$$\frac{\partial \sigma_{вол}}{\partial \operatorname{tg} \alpha_e} = 0. \quad (10)$$

Продифференцировав выражение (9), с учетом преобразований, получим

$$\operatorname{tg} \alpha_e = 1,414 \sqrt{f \ln \lambda \left( 1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_s} \right)} \quad (11)$$

и соответственно

$$\alpha_e^{opt} = \operatorname{arctg} \left[ 1,414 \sqrt{f \ln \lambda \left( 1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_s} \right)} \right]. \quad (12)$$

При отсутствии противонапряжения ( $\sigma_q = 0$ ), что характерно для большинства случаев, соотношение (12) принимает вид

$$\alpha_e^{opt} = \operatorname{arctg} 1,414 \sqrt{f \ln \lambda}. \quad (13)$$

Данный подход определения оптимальной геометрии технологического инструмента при пластическом деформировании использован для определения напряжения волочения монометаллической, биметаллической и триметаллической заготовок в форме проволоки и прутков. Подобный подход использован и для процесса прессования, предшествующего волочению. На выполненные решения получен ряд патентов (см. список патентов).

### Заключение

Созданы технологические основы производства низкотемпературных трансверсально-изотропных нанокompозитных сверхпроводников для международного термоядерного экспериментального реактора.

Предложены теоретические зависимости для определения энергосиловых параметров процессов прессования и волочения применительно к особенностям конструкций низкотемпературных сверхпроводников.

Выполнена оптимизация геометрии технологического инструмента для производства моно-, би-, триметаллических конструкций сверхпроводников.

### Список литературы

1. Разработка сверхпроводников для магнитной системы ИТЭР в России / А.К. Шиков, А.Д. Никулин, А.Г. Силаев и др. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2003. № 1. С. 36–43.
2. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1972. 176 с.
3. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О степени деформации при осесимметричном деформировании // Известия вузов. Черная металлургия. 2000. № 11. С. 31-34.
4. Механика пластического деформирования трансверсально-изотропных композиционных сверхпроводниковых материалов / Г.Л. Колмогоров, В.Н. Трофимов, М.Г. Штуца, Т.В. Чернова. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 217 с.
5. Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки. М.: Металлургия, 1975. 256 с.
6. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
7. Гидропрессование труднодеформируемых тугоплавких металлов и сплавов / Г.Л. Колмогоров, В.Г. Михайлов, Ю.А. Барков, В.Л. Карлинский. М.: Металлургия, 1991. 142с.
8. Колмогоров Г.Л., Орлов С.И., Шевляков В.Ю. Инструмент для волочения. М.: Металлургия, 1992. 144 с.
9. Критерии прочности и расчет механической надежности конструкций / В.И. Аликин, П.В. Анохин, Г.Л. Колмогоров, И.Е. Литвин. Пермь: ПГТУ, 1999. 158 с.
10. Колмогорова Г.Л., Лежнева А.А. Оптимальное проектирование конструкций. Пермь: Изд-во перм. гос. техн.ун-та, 2009. 168 с.
11. Патент № 2101108 РФ. Способ волочения изделий (варианты) / Колмогоров Г.Л., Коноплев В.Н., Мельникова Т.Е., Иванов В.А., Каменев С.А., Шпаковский Л.Н., Федотов Н.А., Зуев А. Оpubл. 10.01.88.
12. Патент № 2126731 РФ. Способ волочения изделий/ Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Курапова Н.А., Дудина Н.М., Иванов В.А., Федотов Н.А. Оpubл. 27.02.99.
13. Патент № 2128329. РФ. Способ определение показателя деформативности материала / Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Курапова Н.А. Оpubл. 27.03.99.
14. Патент № 2310533 РФ. Способ волочения изделий / Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Латышева Т.В. Оpubл. 20.11.2007.
15. Патент № 2415390 РФ. Способ определения остаточных напряжений в прутковых и проволочных изделия / Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Оpubл. 27.03.2011.



16. Патент № 2404873 РФ. Способ волочения прутковых и проволочных изделий Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В. Оpubл. 27.11.2010.
17. Патент № 2432220 РФ. Способ производства биметаллических прутковых и проволочных изделий / Г.Л. Колмогоров, Е.К. Кобелева, Ю.А. Власова, Т.В. Чернова. Оpubл. 27.10.2011.
18. Патент № 2480301 РФ. Способ волочения биметаллических прутковых и проволочных изделий / Г.Л. Колмогоров, Т.В. Чернова, Ю.А. Власова, М.В. Снигирева. Оpubл. 27.04.2013.
19. Патент № 2492011 РФ. Способ производства триметаллических прутковых и проволочных изделий / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Кобелева Е.К. Оpubл. 10.09.2013.
20. Патент № 2526346 РФ. Способ прессования заготовок / Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Чернова Т.В., Кошелева Н.А. Оpubл. 20.08.2014.
21. Патент № 2528302 РФ. Способ прессования биметаллических заготовок / Колмогоров Г.Л., Кошелева Н.А., Чернова Т.В. Оpubл. 10.09.2014.
22. Патент № 2536849 РФ. Способ волочения полиметаллических многослойных прутковых и проволочных изделий / Колмогоров Г.Л., Бурдина Ю.А., Чернова Т.В. Оpubл. 27.12.2014.
23. Патент № 2544320 РФ. Способ прессования триметаллических заготовок/ Колмогоров Г.Л., Кошелева Н.А., Чернова Т.В. Оpubл. 20.03.2015.
24. Патент № 2553747. РФ. Способ деформирования монометаллических прутковых и проволочных изделий / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А., Снигирева М.В. Оpubл. 20.06.2015.
25. Патент № 2558753. РФ. Способ производства многожильного сверхпроводящего провода на основе соединения Nb<sub>3</sub>Su / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А., Снигирева М.В. Оpubл. 10.08.2015.
26. Колмогоров Г.Л., Ковалев А.Е., Шутова Е.С. Нагнетающая способность инструмента для гидродинамического волочения при наличии проскальзывания смазки // Известия вузов. Цветная металлургия. 2003. № 4. С. 67-69.
27. Колмогоров Г.Л., Филиппов В.Б., Кузнецова Е.В. О скорости деформации при волочении // Известия вузов. Цветная металлургия. 2005. № 8. С. 17-19.
28. Колмогоров Г.Л., Филиппов В.Б., Чернова Т.В. О реализации условий улучшенного (смешанного) режима трения при волочении // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 2. С.20-21.
29. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при волочении // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 17-18.
30. Колмогоров Г.Л., Филиппов В.Б., Чернова Т.В. Об оптимальной геометрии волочильного инструмент // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 41-43.
31. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при производстве трубных изделий // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 4. С. 30-32.

## РЕФЕРАТЫ

### УДК 621.771

**Паршиков Р.А., Золотов А.М., Рудской А.И. Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния металла в процессах интенсивной пластической деформации.**

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования и эксперимента для таких процессов интенсивной пластической деформации, как равноканальное угловое прессование и 2D ковка. При моделировании в качестве сравнительных характеристик процессов использовались два критерия: равномерность величины накопленной деформации в сечении заготовки и коэффициент жесткости напряженного состояния. Экспериментальные исследования проводились с использованием специальной оснастки для равноканального углового прессования, а также на комплексе для физического моделирования деформационных процессов Gleeble 3800.

Рис. 12. Библ. 8 назв.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, 2D-ковка, напряженно-деформированное состояние, неоднородность, численное моделирование.

### УДК 621.771

**Найзабеков А.Б.; Лежнев С.Н. Панин Е.А., Арбуз А.С. Моделирование совмещенного процесса «винтовая прокатка-прессование» в программном комплексе Simufact.Forming.**

Данная работа посвящена моделированию нового энергосберегающего совмещенного процесса «винтовая прокатка-прессование» в программном комплексе Simufact.Forming. В ходе моделирования были изучены основные параметры напряженно-деформированного состояния и микроструктуры. Варьирование основных технологических параметров показало, что влияние температуры нагрева заготовки играет значительную роль в степени измельчения зерна. В то время как скорость деформации, в допускаемых конструкцией стана пределах, не оказывает существенного влияния на микроструктуру.

Рис. 8. Библ. 7 назв.

**Ключевые слова:** моделирование, совмещенный процесс, винтовая прокатка-прессование, микроструктура, напряженно-деформированное состояние.

### УДК 621.778.1-426.014:621.785.01

**Харитонов В.А., Столяров А.Ю., Лысенин А.В. Упрочняющая термическая обработка проволоки для армирования бортовых колец шин.**

В данной статье представлены результаты исследования повышения прочности высокоуглеродистой проволоки для армирования бортов автомобильных шин после высокотемпературного отпуска. Приведены теоретически обоснованные гипотезы о протекании структурных изменений в стали в процессе термообработки. Также приведен комплекс требований к бортовой проволоке, соответствующей современным мировым требованиям.

Рис. 4. Табл. 1. Библ. 13 назв.

**Ключевые слова:** бортовая проволока, высокотемпературный отпуск, высокоуглеродистая сталь, волочение, прочность.

### УДК 621:771.23–022.532:621.785

**Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А. Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости.**

Традиционным методом определения прочностных характеристик материалов является испытание образцов на растяжение. Для сверхвысокопрочных сталей требуются современные разрывные машины высокой мощности. В данной работе проанализированы методы оп-

ределения прочности металла по твердости, которые являются наиболее простыми и мало затратными. По результатам статистического анализа экспериментальных данных были получены зависимости условного предела текучести и временного сопротивления разрыву от твердости для высокопрочного и сверхвысокопрочного проката. Высокая точность полученных аппроксимаций позволяет оценивать механические характеристики металла без прямых испытаний на растяжение и избежать использования дорогостоящего лабораторного оборудования.

Рис. 2. Табл. 7. Библ. 11 назв.

**Ключевые слова:** высокопрочные стали, метод испытания, предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение, твердость, статистический анализ, эмпирические зависимости

#### УДК 621.771

**Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Лещев И.В. Разработка инновационных процессов обработки металлов давлением на основе интенсивной знакопеременной деформации.**

В работе, используя литературные данные, приведены сведения о влиянии механизма пластической деформации на формирование субмикроструктурной структуры сталей и сплавов и поставлена задача развивать процессы обработки металлов давлением на основе применения интенсивной знакопеременной деформации. В качестве примера инновационного процесса прокатки высоких слитков с незначительными изменениями размеров заготовки за два прохода. Результаты компьютерного моделирования показали, что при новом способе прокатки можно повысить однородность деформации по высоте и степень деформации в осевой зоне слитка.

Рис. 5. Библ. 45 назв.

**Ключевые слова:** литая структура; знакопеременная деформация; дисперсность структуры; математическое моделирование; продольная прокатка листа; коэффициент вариации; осевая и приконтактная зоны очага деформации.

#### УДК 621.778

**Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения.**

В работе рассмотрены альтернативные способы изготовления проволоки. Показаны преимущества комбинированных способов волочения. Предложен комбинированный способ волочения, реализуемый в модулях «роликовая волока – монолитная волока» позволяющий повысить пластические свойства проволоки. Выполнено компьютерное исследование предложенного способа.

Рис. 3. Табл. 1. Библ. 9 назв.

**Ключевые слова:** волочение, монолитная волока, роликовая волока, комбинированное волочение, компьютерное моделирование.

#### УДК 669.017:620.197

**Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И. Irene Calliari. Влияние лантана на анодное поведение сплава Al +6 % Li.**

Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала  $2\text{мВ}\cdot\text{С}^{-1}$  исследовано коррозионно-электрохимическое поведение сплава Al+6%Li, легированного лантаном в среде электролита NaCl различной концентрации. Показано, что добавки лантана уменьшают скорость коррозии исходного сплава почти в 2 раза. Установлено смещение в отрицательную область потенциала коррозии, и в положительную область потенциалов питтингообразования и репассивации. Увеличение концентрации

хлорид-ионов способствует росту скорости коррозии сплавов, а электрохимические потенциалы смещаются при этом в область отрицательных значений.

Рис. 2. Табл. 1. Библ. 10 назв.

**Ключевые слова:** сплав Al + 6 % Li; лантан; потенциостатический метод; электролит NaCl; потенциал коррозии; потенциал питтингообразования; скорость коррозии.

УДК 621.778.5:677.721

**Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Лаптева Т.А. Формирование геометрии контактной поверхности проволок при пластическом обжатии пряди.**

Произведено моделирование процесса обжатия двух проволок смежных слоев пряди, определены факторы, влияющие на кривизну, ширину и форму поверхности контакта проволок при обжатии пряди.

Рис. 3. Библ. 23 назв.

**Ключевые слова:** прядь, проволока, обжатие, волока роликовая, контакт межпроволочный, форма, размер, кривизна, напряжения контактные.

УДК 621.771

**Гарстка Т., Дыя Х., Кавалек А., Кочуркевич Б. Экспериментальный анализ влияния изменения температуры деформируемой полосы на момент в процессе прокатки катанки.**

В статье представлены результаты исследований влияния колебания температуры деформируемой полосы на суммарный момент прокатки в десятиклетьевом прокатном блоке в процессе прокатки катанки конечного диаметра 5,5 мм из высокоуглеродистой стали марки С70D. Исследования были проведены в промышленных условиях одного из прокатных цехов по производству катанки Республики Польша. Исследования являются частью научно-исследовательского проекта, который заключается в разработке экологичной технологии прокатки по усовершенствованной технологии катанки из высокоуглеродистой стали с целью повышения свойств готового изделия.

Рис. 4. Табл. 1. Библ. 11 назв.

**Ключевые слова:** прокатка катанки, измерения, температура полосы, момент прокатки, прокатный блок

УДК 621.771

**Файзулина Р.В. Тенденции рынка потребительской жестяной тары и упаковки в России.**

Основное назначение белой жести – производство тары для консервной промышленности. Уровень качества белой жести определяется возможностями ее производства и условиями переработки у потребителя. В статье представлены некоторые возможности производства жести в ОАО «ММК» на соответствие современным требованиям: размерный сортамент, жечь электролитического лужения с минимальной массой оловянного покрытия E1,0/1,0-E1,4 /1,4 мг/м<sup>2</sup>, дополнительные требования по механическим свойствам и гарантированным допуском по твердости.

Рис.1. Библ. 5 назв.

**Ключевые слова:** тенденции рынка, жечь, жестяная тароупаковка

УДК 621.771

**Иващенко Е.В., Лимарев А.С. Повышение качества высокопрочных болтов путем совершенствования межоперационного транспортера изделий, изготавливаемых в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».**

В условиях современного рынка для повышения конкурентоспособности предприятия необходимо производить метизную продукцию высокого качества, которая бы полностью отвечала требованиям потребителя. Наиболее важным показателем качества высокопрочных

болтов является характеристики нарезаемой резьбы. Выполнение данного параметра в соответствии с запросами потребителей требует соответствующего осуществления технологического процесса. В данной статье рассмотрен комплекс мероприятий направленный на улучшение качества технологического процесса с целью снижения вероятности возникновения забоин и других дефектов высокопрочных болтов.

Рис.4. Библ. 5 назв.

**Ключевые слова:** резьбовые дефекты, забоина, высокопрочный болт, механическая прорезиненная лента.

#### **УДК 621.771**

**Гарбер Э.А. Развитие методов моделирования энергосиловых и деформационных параметров широкополосных станов (научный обзор).**

Изложен обзор новых решений в теории и технологии горячей и холодной прокатки широких стальных полос, полученных учеными научной школы прокатчиков Череповецкого государственного университета в 2000-2016 гг., а также использования результатов этих решений на действующих широкополосных станах.

Библ. 30 назв.

**Ключевые слова:** научная школа прокатчиков, теория и технология горячей и холодной прокатки, широкополосные станы.

#### **УДК 621.771**

**Зайдес С.А. Становление магнитогорской школы обработки металлов давлением в Восточной Сибири (научный обзор).**

В статье приведен историческая справка о становлении и развитии научных направлений по обработке материалов давлением в Иркутском политехническом институте (в настоящее время Иркутский национальный исследовательский технический университет, ИрНИТУ). Отмечается, что первые научные исследования были выполнены почти 50 лет назад под научным руководством Г.Э. Аркулиса – заведующего кафедрой прокатно-волоочильного производства Магнитогорского горно-металлургического института им. Г.И. Носова. В статье упоминаются ученые ИрНИТУ, внесшие значительный вклад в изучение процессов обработки давлением. Современные достижения ученых ИрНИТУ в области обработки материалов давлением имеют богатую историю, ознаменованную значительными научными событиями.

Рис. 1. Библ. 28 назв.

**Ключевые слова:** становление, магнитогорская школа, обработка металлов давлением, научные исследования.

#### **УДК 621.771**

**Кухарь В.Д., Ларин С.Н., Пасынков А.А. Становление и развитие кафедры «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета (научный обзор).**

В статье приведены сведения о кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета с ее основания, в 1939 году, по настоящее время. Приводятся сведения о руководителях и сотрудниках кафедры за период ее существования, их достижениях, научных интересах. Определенное внимание уделено научным школам, руководителями которых долгие годы являлись Яковлев С.П. и Яковлев С.С. Кроме того, в статье уделено внимание научно-методической работе кафедры, приведены сведения о направлениях подготовки бакалавров и магистров.

Рис. 1. Библ. 25 назв.

**Ключевые слова:** механика пластического формоизменения, кафедра, научная школа, обработка металлов давлением, анизотропия.

**УДК 621.774.37:539.319**

**Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В. Совершенствование и оптимизация технологии производства длинномерных композиционных сверхпроводящих материалов для магнитных систем (научный обзор).**

Представлены научные и практические аспекты механики пластического деформирования композиционных сверхпроводниковых материалов при производстве низкотемпературных сверхпроводников. Приведены сведения из теории сверхпроводимости, технологические процессы производства низкотемпературных сверхпроводников, основной упор сделан на особенности пластического деформирования многопереходным волочением трансверсально-изотропной композиционной многоволоконной структурно-неоднородной заготовки. Предложена методика определения оптимальной геометрии технологического инструмента для производства моно-, би-, триметаллических конструкций сверхпроводников.

Рис. 2. Библ. 31 назв.

**Ключевые слова:** композиционный сверхпроводник, пластическое деформирование, напряжение, прессование, многократное волочение, вытяжка, трансверсально-изотропное тело, оптимизация, угол конусности.

## REPORTS

### UDK 621.771

#### **Parshikov R.A., Zolotov A.M., Rudskoy A.I. Analysis of stress-strain state inhomogeneity of metal during severe plastic deformation.**

In the present work the numerical simulation and experimental results for the following severe plastic deformation processes: equal channel angular pressing and 2D forging are presented. Two criteria - regularity of strain intensity distribution and rigidity coefficient of stressed state – were used for comparative analysis. Experimental research of severe plastic deformation processes was carried out by special ECA-pressing tool and GLEEBLE SYSTEM 3800 complex used for physical simulation of deformation processes.

Fig. 12. Bibliograf. 8 names.

**Key words:** severe plastic deformation, equal channel angular pressing, 2D forging, stress-strain state, inhomogeneity, numerical simulation.

### UDK 621.771

#### **Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Arbuz A.S. Simulation of the combined process "helical rolling-pressing" in the software package Simufact. Forming.**

This work is devoted to the simulation of new energy-saving combined process "helical rolling-pressing" in program Simufact.Forming. During the simulation were studied the main parameters of stress-strain state and microstructure. The variation of the main technological parameters showed that the influence of the heating temperature of the workpiece plays a significant role in the degree of grain grinding. While the speed of deformation, allowed by the mill design limits, has no significant effect on the microstructure.

Fig. 8. Bibliograf. 7 names.

**Keywords:** modeling, combined process, helical rolling-pressing, microstructure, stress-strain state.

### UDK 621.778.1-426.014:621.785.01

#### **Kharitonov V.A., Stolyrov A.U., Lysenin A.V., Wire hardening heat treatment for reinforcement bead rings of tires.**

The article presents the research results of increasing strength high-carbon bead wire as a result of high-temperature tempering. There are some examples of structural changes in the steel during heat treatment. Also there is given the set of requirements for bead wire, corresponding to the modern world requirements.

Fig. 4. Table 1. Bibliograf. 13 names.

**Keywords:** bead wire, high-temperature tempering, high-carbon steel, drawing, strength.

### UDK 621:771.23–022.532:621.785

#### **Chukin M.V., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. The definition of mechanical properties by hardness of high-strength and ultra-high-strength steels.**

The traditional method of strength properties definition of materials is elongation test. For testing ultra-high-strength steels a modern high capacity tensile-testing machine is needed. In this article the analysis of the simplest and the cheapest hardness test methods is made. Yield limit and tensile strength versus hardness relations for high-strength and ultra-high-strength steels were made according to the analysis of experimental data. The pin-point accuracy of approximations permits to define mechanical properties of metal without elongation tests and use of expensive laboratory equipment.

Fig. 2. Table 7. Bibliograf. 11 names.

**Keywords:** high-strength steel, test method, yield strength, tensile strength, relative elongation, hardness, statistic analysis, empirical dependence.

#### **UDK 621.771**

**Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., Leshev I.V. Development of innovative processes metal forming through intensive alternating strain.**

In this paper, using literature data, provides information on the effect of plastic deformation on the formation mechanism submicrocrystalline structure of steels and alloys, and tasked to develop metal forming processes through the application of an alternating intense deformation. As an example of the innovation process rolling high bars with minor changes the size of the workpiece in two passes. Computer simulation results have shown that the new method can improve the uniformity of the rolling height and the degree of deformation strains in the axial zone of the ingot.

Fig. 5. Bibliograf. 45 names.

**Key words:** cast structure; alternating deformation; degree of dispersion; math modeling; lengthwise rolling; coefficient of variation; axial and near-contact zones of the deformation zone.

#### **UDK 621.778**

**Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения.**

The paper discusses alternative ways of manufacturing the wire. Advantages of combined methods of drawing. We propose a combined method of drawing, implemented in modules "roller die - wire die" which allows to increase the plastic properties of the wire. Achieved computational study of the proposed method.

Fig. 3. Table 1. Bibliograf. 9 names.

**Keywords:** drawing, wire die, roller die, combined drawing, computer simulation.

#### **UDK 669.017:620.197**

**Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Norova M.T., Ganieva N.I. Irene Calliari. Influence lanthanum on the anodic behavior of alloys Al+6%Li**

Potentiostatic method in potentiodynamic mode at 2 mV potential sweep speed • C-1 the corrosion-electrochemical behavior of the alloy Al + 6% Li, doped lanthanum electrolyte NaCl in different concentrations environment. It is shown that the addition of lanthanum reduces the corrosion rate of the initial alloy is almost 2 times. Established offset the negative region of the corrosion potential and the positive region and pitting repassivation potentials. Increasing the concentration of chloride ions promotes the corrosion rate of alloys and electrochemical potentials are shifted while negative values.

Fig. 2. Table 1. Bibliograf. 10 names.

**Keywords:** alloy Al + 6% Li; lanthanum; potentiostatic method; electrolyte NaCl; corrosion potential; pitting potential; corrosion rate.

#### **UDK 621.771**

**Haritonov V.A., Ivantsov A.B., Lapteva T.A. The formation of the geometry contact surface wires during plastic compression of the strand**

A simulation of the process compression wires of two adjacent layers of the strand, the factors that affect the curvature, width and shape of the contact surface wires during compression strand.

Fig. 3. Bibliograf. 23 names.

**Keywords:** strand, wire, compression, die roller, a contact wire, the shape, size, curvature, contact stress.



#### **UDK 621.771**

**Garstka T., Dyja H., Kawalek A., Koczurkiewicz B. Experimental analysis of the deformed metal strip temperature influence during its changing on the wire rod moment at rolling.**

The results of investigation of deformed metal strip temperature changing on the total moment in the ten stand rolling stand at manufacturing metal rod with 5.5 mm in diameter from high carbon steel grade C70D. The investigations were carried out in the industrial conditions at one of the rolling shops for wire rod manufacturing in the Poland Republic. These investigations are the part of the scientific and research project aimed at technological process improvement for the finished product properties amendment.

Fig. 4. Table. 1. Bibliograf. 11 names.

**Key words:** rolling, wire rod, measurements, metal strip temperature regulation, rolling moment, rolling stand, water chambers, energy-power parameters

#### **UDK 621.771**

**Faizulina R.V. Market trends of tinfoil packaging in Russia.**

The main appointment of tinfoil - the packaging production for the canning industry. Level of quality by tinfoil is determined by the possibilities of its production and the processing conditions at the consumer. This article presents some possibilities of tinfoil production at "MMK" for compliance with the modern requirements: an assortment of sizes, tinfoil with a minimum mass of tin coating E1,0/1,0- E1,4 /1,4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, additional requirements by the mechanical properties and a guaranteed tolerance of hardness.

Fig. 1. Bibliograf. 5 names.

**Key words:** tinfoil, the packaging for the canning industry from a tinfoil

#### **UDK 621.771**

**Ivashenko E.V., Limarev A.S. Improving the quality of high-strength bolts by improving inter-operation of conveyor products manufactured in conditions of MMK-METIZ.**

In today's market to enhance the competitiveness of the enterprise hardware necessary to produce high quality products, which fully meet the requirements of the consumer. The most important indicator of the quality of high strength bolts is characteristics of a cut carving. The implementation of this option in accordance with the needs of consumers requires the appropriate implementation of the process. This article considers the complex of measures directed on improvement of quality of technological process to reduce the likelihood of nicks and other defects of high-strength bolts.

Fig. 4. Bibliograf. 5 names.

**Keywords :** defects thread, indentation, high-strength bolt, mechanical rubber tape.

#### **UDK 621.771**

**Garber E.A. Development of methods of energy-power and deformation parameters of the wide strips rolling mills (scientific review).**

The paper presents an overview of new solutions in the theory and technology of hot and cold rolling of wide steel strips, which were obtained by scientists of scientific school of steel rollers of Cherepovets State University during the period 2000-2016, as well as application of the results of the solutions at operating wide strip rolling mills.

Bibliograf. 30 names.

**Key words:** scientific school of steel rollers of Cherepovets State University, wide strip rolling mills.

**UDK 621.771****Zaydes S.A. Magnitogorsk scientific school formation on Metal processing in the eastern Siberia (scientific review).**

The paper presents the historical overview of the background and development the scientific areas on metal processing in Irkutsk polytechnic institute (at present time Irkutsk national research technical university, INRTU). It is mentioned that the first scientific investigations were developed approximately 50 years ago under the scientific leadership of G.E. Arkulis who was the head of the rolling and drawing department at Nosov Magnitogorsk mining and metallurgical institute. Scientists of INRTU who brought the significant contribution into the metal processing investigation are mentioned in the paper. State-of-the art achievements of the scientists of INRTU are based on the long lasting historical background which is rich with major scientific events.

Fig. 1. Bibliograf. 28 names.

**Key words:** formation, magnitogorsk scientific school, the scientific areas.

**UDK 621.771****Kukhar V.D., Larin S.N., Pasyukov A.A. Formation and development department "Mechanics plastic deformation" Tula State University (scientific review).**

This article provides information about the Department of "Mechanics of plastic deformation" of the Tula State University since its foundation, in 1939, to the present. The information on the managers and staff of the department during the period of its existence, their achievements and scientific interests. Particular attention is paid to scientific schools, the heads of which were Yakovlev S.P. for years and Yakovlev S.S. In addition, attention is paid to the scientific and methodical work of the department, provides information about the directions of bachelor's and master's degrees. The article is dedicated to Yakovlev S.S.

Fig. 1. Bibliograf. 25 names.

**Keywords:** mechanical plastic deformation, department, scientific school, metal forming, anisotropy.

**UDK 621.771****Kolmogorov G.L., Chernova T.V. Perfecting and optimization of production technology of long-measuring composite superconducting materials for magnetic systems (scientific review).**

Scientific and practical aspects of mechanics of composite superconducting materials plastic deformation by low-temperature superconductors production are discussed. Information from superconductivity theory, technological processes of low-temperature superconductors production are discussed. The main accent is on feature of transversal-isotropic composite multigrain heterogeneous blank plastic deformation by multitransition drawing. The procedure of technological tool optimal geometry definition for production of mono-, bi- and trimetallic superconductor constructions is offered.

Fig. 2. Bibliograf. 31 names.

**Key words:** composite superconductor, plastic deformation, stress, molding, multistage drawing, transversal-isotropic solid, optimization, conicity angle.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Арбуз Александр Сергеевич** – докторант кафедры нелинейной физики и физики твердого тела. Казахский национальный университет им. Альфараби, г. Алматы, Казахстан. E-mail: [zubra\\_kz@mail.ru](mailto:zubra_kz@mail.ru).

**Бережная Галина Андреевна** - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Тел. 8(3519)29-84-31. E-mail: [galina\\_1609@mail.ru](mailto:galina_1609@mail.ru).

**Богатов Александр Александрович** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: [omd@urfu.ru](mailto:omd@urfu.ru).

**Галлямов Денис Эдуардович** - аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Круг научных интересов: проблемы получения высококачественной стальной проволоки и совершенствование процесса волочения. E-mail: [gallyamov2010@gmail.com](mailto:gallyamov2010@gmail.com).

**Ганиев Изатулло Наврузович** – зав. лабораторией Института химии им. В.И. Никитина, академик АН Республики Таджикистан, д.х.н., профессор. E-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru).

**Ганиева Наргис Изатуллоевна** – к.т.н., доцент Института химии им. В.И. Никитина, Республика Таджикистан. г. Душанбе. E-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru).

**Гарбер Эдуард Александрович** - д-р техн. наук, профессор кафедры МиАМЗ, Череповецкий государственный университет. г. Череповец, Россия. E-mail: [mamz2011@mail.ru](mailto:mamz2011@mail.ru).

**Гарстка Томаш** - к.т.н., доцент, Ченстоховский Технологический Университет, Факультет Инженерии Производства и Технологии Материалов.

**Гущина Марина Сергеевна** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». г. Магнитогорск, Россия. Тел. 8(3519)29-85-25. E-mail: [marina.mgn.89@mail.ru](mailto:marina.mgn.89@mail.ru).

**Дыя Хенрик** – д-р техн. наук, проф. Факультета инженерии производства и технологии материалов, Ченстоховский Технологический Университет, Польша. E-mail: [dyja@wip.pcz.pl](mailto:dyja@wip.pcz.pl).

**Зайдес Семен Азикович** - д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой машиностроительных технологий и материалов, Национальный исследовательский «Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu).

**Золотов Александр Максимович** – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры «Технология и исследование материалов», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого». E-mail: [plast-ftim@mail.ru](mailto:plast-ftim@mail.ru).

**Иванцов Артем Борисович** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии и стандартизации филиала ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова в г. Белорецке». [art.belor@yandex.ru](mailto:art.belor@yandex.ru).

**Иващенко Елена Вячеславовна** – студентка кафедры «Технологий сертификации и сервиса автомобилей» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Россия.

**Кавалек Анна** – профессор, Ченстоховский технологический университет, Институт обработки металлов давлением и инженерной безопасности, (Польша).

**Каллиари Ирэн** – доцент, Школа инженерии, Университет г. Падуа, Италия.

**Колмогоров Герман Леонидович** – заслуженный работник Высшей школы РФ, д-р техн. наук, профессор, действительный член РАЕН, профессор кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета. г. Пермь, Россия. E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru).

**Кочуркевич Барташ** - к.т.н., доцент, Ченстоховский Технологический Университет, Факультет Инженерии Производства и Технологии Материалов.

**Кухарь Владимир Денисович** - д-р техн. наук, профессор, проректор, Тульский государственный университет. г. Тула, Россия. E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru).

**Лаптева Татьяна Александровна** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Россия. E-mail: [art.belor@yandex.ru](mailto:art.belor@yandex.ru).

**Ларин Сергей Николаевич** - д-р техн. наук, проф., и.о. зав. кафедрой «Механика пластического формоизменения», Тульский государственный университет. г. Тула, Россия. Тел. (4872) 35-14-82. E-mail: [Larin\\_1@rambler.ru](mailto:Larin_1@rambler.ru).

**Лежнев Сергей Николаевич** - канд. техн. наук, доцент, Карагандинский государственный индустриальный университет. г. Темиртау, Республика Казахстан. E-mail: [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru).

**Лещев Иван Владимирович** – мл. науч. сотрудник кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.

**Лимарев Александр Сергеевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологий сертификации и сервиса автомобилей» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Россия. E-mail: [aslimarev@mail.ru](mailto:aslimarev@mail.ru).

**Лысенин Александр Викторович** - инженер кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». г. Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-81. E-mail: [Pak6393@yandex.ru](mailto:Pak6393@yandex.ru).

**Назаров Шухратджон Абдугуломович** – аспирант Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан. г. Душанбе. E-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru).

**Найзабеков Абдрахман Батырбекович** – академик, д-р техн. наук, профессор, ректор Рудненского индустриального института. г. Рудный, Казахстан.

**Норова Муаттара Турдыевна** – ведущий научный сотрудник Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан. г. Душанбе. E-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru).

**Нухов Данис Шамильевич** – мл. науч. сотрудник кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». г. Екатеринбург, Россия. E-mail: [danis\\_nuchov@mail.ru](mailto:danis_nuchov@mail.ru).

**Панин Евгений Александрович** – м.т.н., ст. преп. кафедры ОМД КГИУ, Карагандинский государственный индустриальный университет. г. Темиртау, Казахстан. E-mail: [cooper802@mail.ru](mailto:cooper802@mail.ru).

**Паршиков Руслан Александрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент. кафедры «Технология и исследование материалов», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого». г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [plast-ftim@mail.ru](mailto:plast-ftim@mail.ru).

**Пасынков Андрей Александрович** - канд. техн. наук, доц., Тульский государственный университет. г. Тула, Россия. (4872) 35-14-82. E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru).

**Полецков Павел Петрович** - д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологий обработки материалов», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Тел. 8(3519) 29-85-25. E-mail: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru).

**Рудской Андрей Иванович** – д-р техн. наук, член-корр. РАН, ректор, проф. кафедры «Технология и исследование материалов» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия.

**Столяров Алексей Юрьевич** – канд. техн. наук, главный технолог ООО «Специальные технологии». г. Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 49-84-13.

**Файзулина Римма Вафировна** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519)298470.

**Харитонов Вениамин Александрович** – канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Круг научных интересов: проблемы модернизации действующих и разработки новых технических процессов изготовления волочением, протяжкой, прокаткой проволоки различного назначения и изделий из неё. г. Магнитогорск, Россия. Контактный тел.: (3518) 29-84-81.

**Чернова Татьяна Вячеславовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет. г. Пермь, Россия. E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru).

**Чукин Михаил Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий обработки материалов, первый проректор-проректор по научной и инновационной работе, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». г. Магнитогорск, Россия. Тел. 8(3519) 29-85-26. E-mail: [m.chukin@mail.ru](mailto:m.chukin@mail.ru).

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Arbuz Alexandr Sergeevich** - doctoral candidate of Non-linear physics and solid state physics department, Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan.

**Berezhnaya Galina Andreevna** - Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Russia. Phone: 8(3519)29-84-31. E-mail: [galina\\_1609@mail.ru](mailto:galina_1609@mail.ru).

**Bogatov Aleksander Aleksandrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: [omd@urfu.ru](mailto:omd@urfu.ru).

**Calliari Irene** – associate Prof., Engineering School, University Padua, Italy.

**Chernova Tatyana Vyacheslavovna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of chair “Dynamics and strength of machines”, Perm national researching polytechnic university. Russia. E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru)

**Chukin Mihail Vitalevich** - D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector-Vice Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk. Russia. Phone: 8(3519) 29-85-26. E-mail: [m.chukin@mail.ru](mailto:m.chukin@mail.ru).

**Dyja Henryk** – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: [dyja@wip.pcz.pl](mailto:dyja@wip.pcz.pl).

**Faizulina Rimma Vafirovna** – Ph.D. (Eng.), senior teacher of physics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Phone: 8(3519) 29-84-70.

**Gallyamov Denis Eduardovich** - postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Circle of scientific interests: the problem of obtaining high quality steel wire and improving the process of drawing. Magnitogorsk. Russia. E-mail: [gallyamov2010@gmail.com](mailto:gallyamov2010@gmail.com)

**Ganiev Izatullo** – Doctor of chemical science, professor, academic. Academy science of the Republic of Tajikistan, Head of laboratory Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin. Republic of Tajikistan.

**Ganieva Nargis** – Leading Researcher Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, Republic of Tajikistan.

**Garber Eduard Aleksandrovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia. E-mail: [mamz2011@mail.ru](mailto:mamz2011@mail.ru)

**Garstka Tomasz** - PhD, Eng., Assistant Professor on Czestochowa University of Technology Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Institute of Metal Forming and Safety Engineering.

**Gushchina Marina Sergeevna** - Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: [marina.mgn.89@mail.ru](mailto:marina.mgn.89@mail.ru).

**Ivantsov Artem Borisovich** – cand.tech.sci., «The Magnitogorsk State Technical University him G.I. Nosova». [art.belor@yandex.ru](mailto:art.belor@yandex.ru).

**Ivashenko Elena Vyacheslavovna** – student of the Department “Technology, certification and servicevehicles”, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Kowalek Anna** – Prof., Czestochowa University of Technology, Institute of Metal Forming and Engineering Safety (Poland).

**Kharitonov Veniamin Aleksandrovich** - Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Circle of scientific interests: problems of modernization of existing and development of new technological processes of manufacturing drawn bars, wire, roll wire of different purposes and products of it. Russia. Tel.: (3519) 29-84-81.

**Kholmogorov German Leonidovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, valid member of RANS, professor of chair “Dynamics and strength of machines” of Perm national researching polytechnic university. Perm, Russia. E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru)

**Koczurkiewicz Bartosh** - Koczurkiewicz, PhD, Eng., Assistant Professor on Czestochowa University of Technology Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Institute of Metal Forming and Safety Engineering.

**Kukhar Vladimir Denisovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, prorector, Tula State University. Russia, E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru).

**Lapteva Tatiana Alexandrovna** – Ph.D. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University. Russia. [art.belor@yandex.ru](mailto:art.belor@yandex.ru).

**Larin Sergey Nikolaevich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the department MPF, Tula State University. Tula. Russia. E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru),

**Leshev Ivan Vladimirovich** – ml. nauch. sotr. of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: [omd@urfu.ru](mailto:omd@urfu.ru).

**Legnev Sergey Nikolaevich** - Ph.D. (Eng.), associate Professor Karaganda state industrial university, Temirtau, Republic of Kazakhstan. E-mail: [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru)

**Limarev Aleksandr Sergeevich** - Ph.D. (Eng.), associate Professor of the Department “Technology, certification and servicevehicles”, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [aslimarev@mail.ru](mailto:aslimarev@mail.ru).

**Lysenin Alexander Viktorovich** – engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. Phone: (3519) 29-84-81. E-mail: [Pak6393@yandex.ru](mailto:Pak6393@yandex.ru).

**Nazaybekov Abdrakhman Batyrbekovich** – Academician, D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. E-mail: [rector@mail.ru](mailto:rector@mail.ru).

**Nazarov Shuhratjon** – PhD student Institute of Chemistry named after V.I.Nikitin, Academy of Sciences, Republic of Tajikistan;

**Norova Muattara** – Leading Researcher Institute of Chemistry named after V.I.Nikitin, Academy of Sciences, Republic of Tajikistan;

**Nukhov Danis Shamilyevich** - ml. nauch. sotr. of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: [danis\\_nuchov@urfu.ru](mailto:danis_nuchov@urfu.ru).

**Panin Evgeniy Aleksandrovich** – m.t.s., senior teacher of “Metal Forming” department of KSIU, Karaganda state industrial university, Temirtau, Kazakhstan; E-mail: [cooper802@mail.ru](mailto:cooper802@mail.ru).

**Parshikov Ruslan Aleksandrovich** - Ph.D. (Eng.), associate Professor of Materials Technologies and Investigation Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: [plast-ftim@mail.ru](mailto:plast-ftim@mail.ru)

**Pasyнков Andrey Aleksandrovich** - Ph.D. (Eng.), associate Professor, Tula State University Tula, Russia. [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru),

**Poletskov Pavel Petrovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. 8(3519)29-85-25. E-mail: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru).

**Rudskoy Andrey Ivanovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Rector, Professor of Materials Technologies and Investigation Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**Stolyrov Alexei Uryvich** - Ph.D. (Eng), chief technologist enterprise «Special technologies», Magnitogorsk, Russia. Phone: (3519) 49-84-13/

**Zaydes Semion Azikovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the department «Irkutskiy State Technical University». Irkutsk. Russia. E-mail: [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu).

**Zolotov Aleksandr Maksimovich** - D.Sc. (Eng.), Professor of Materials Technologies and Investigation Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: [plast-ftim@mail.ru](mailto:plast-ftim@mail.ru).

**УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!**  
**МЫ ПРИГЛАШАЕМ ВАС К УЧАСТИЮ В НАШЕМ ЖУРНАЛЕ В КАЧЕСТВЕ**  
**АВТОРОВ, РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ И ЧИТАТЕЛЕЙ**

**ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ**

**1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)**

**1.1. Наименование** статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

**1.2. Аффiliation.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

**1.3. Аннотация** (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

**Онлайн - перевод запрещается!**

**1.4. Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов.

**2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ**

**2.1. Введение** (постановка проблемы)

**2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки**

**2.3. Результаты исследования и их обсуждение**

**2.4. Заключение** (выводы)

**2.5. Список литературы** (на русском и английском языках)

**3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ**

**3.1.** Рекомендуемый объем статьи – 6-8 стр.

**3.2.** Текст статьи, сведения об авторах, аннотация ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуется следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 12 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов - автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах \*.TIF, \*.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150x235 мм. В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. Например:

*Рис. 4. Расчетная зависимость  $\gamma(t) = I_{nt} / I_{n0}$  от времени и удаленности КЗ от выводов асинхронного двигателя*

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

**3.3.** При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц СИ.

**4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ**

**4.1. Рецензия.**

**4.2. Экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати на бланке, с подписями, печатью.