ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

**Том 17 № 6 июнь 2019**

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

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

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

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

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

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

**Чукин М.В., Корчунов А.Г., Тулупов О.Н.** Международные проекты Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова . . . . . .243

### Литейное и сварочное производства

**Вдовин К.Н., Дерябин А.В., Позин А.Е., Подосян А.А., Юсин А.Н.** Стойкость кристаллизаторов МНЛЗ . . . . . .246
**Шекшеев М.А., Михайлицын С.В., Сычков А.Б., Ширяева Е.Н., Шеметова Е.С.** Разработка сварочных электродов с композитным наномодифицирующим покрытием . . . . .252

### Кузнечно-штамповочное производство

**Барышников М.П., Ишимов А.С., Барышникова А.М.** Физическое и математическое моделирование реологических свойств в процессах горячей пластической деформации с учетом динамической рекристаллизации с использованием комплекса Gleeble 3500 . . . . . .255

### Прокатно-волочильное производство

**Пивоварова К.Г., Гун Г.С., Корчунов А.Г.** Влияние технологических свойств смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали при волочении . . . . . .261
**Терентьев Д.В., Платов С.И., Жиркин Ю.В., Козлов А.В., Славин В.С.** Повышение ресурса тяжелонагруженных узлов машин и агрегатов металлургического производства . . . . .265

### Материаловедение и новые материалы

**Денисов С.В., Брайчев Е.В., Стеканов П.А., Полецков П.П., Гущина М.С., Никитенко О.А.** Разработка режимов термической обработки толстолистового проката из криогенной низкоуглеродистой никелевой стали . . . . . .271
**Швеёва Т.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О.** Склонность сталей к образованию трещин при закалке в растворах полимера . . . . . .278

### Информация

**Гун И.Г., Вахитов А.Р., Гун Е.И., Калмыков Ю.В., Сальников В.В.** Разработка конструкции и технологии производства внутренних рулевых наконечников автомобиля . . . . .284

***Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts***

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2019

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

# BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press Forging, Foundry and Other Productions)

Published since 2003, January

Vol. 17 № 6 June 2019

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

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

**Editorial Assistant**
SERIKOVA E.A.

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

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

## CONTENTS

**Chukin M.V., Korchunov A.G., Tulupov O.N.** International projects of Nosov Magnitogorsk State Technical University . . . . . 243

### Foundry and Welding Productions

**Vdovin K.N., Deryabin A.V., Pozin A.E., Podosyan A.A., Yusin A.N.** Durability of continuous casting machine moulds . . . . . 246
**Sheksheev M.A., Mikhaylitsyn S.V., Sychkov A.B., Shiryaeva E.N., Shemetova E.S.** Development of welding electrodes with composite nanomodification coating . . . . . 252

### Forging and Stamping Production

**Baryshnikov M.P., Ishimov A.S., Baryshnikova A.M.** Physical and mathematical modeling of rheological properties in hot plastic deformation processes with dynamic recrystallization with use of Gleeble 3500 system . . . . . 255

### Rolling and Drawing Production

**Pivovarova K.G., Gun G.S., Korchunov A.G.** Effect of lubricants' performance on surface quality of calibrated steel at drawing . . . . . 261
**Terent'ev D.V., Platov S.I., Zhirkin Yu.V., Kozlov A.V., Slavin V.S.** Increasing of service life of heavy loaded units of machines and aggregates in metallurgical production . . . . . 265

### Physical Metallurgy and New Materials

**Denisov S.V., Braychev E.V., Stekanov P.A., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Nikitenko O.A.** Development of heat treatment regimes of hot-rolled plate from cryogenic low-carbon nickel steel . . . . . 271
**Shveeva T.V., Pesin A.M., Pustovoytov D.O.** Tendency of steel to formation of cracks at polymer solutions quenching . . . . . 278

### Information

**Gun I.G., Vakhitov A.R., Gun E.I., Kalmykov Yu.V., Sal'nikov V.V.** Development of design and production technology of axial joints for automobile . . . . . 284

***Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming; 05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies and in Chemical Abstracts database***

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2019

**М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, О.Н. Тулупов**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Международные проекты Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова

*В 2019 г. опорный вуз Южного Урала — Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова) отмечает 85-летний юбилей!*

Университет известен как многопрофильный научно-образовательный центр с широкой географией творческих и научных связей с ведущими российскими и зарубежными вузами. Вуз удостоен государственной награды — ордена Трудового Красного Знамени и благодарности Президента Российской Федерации.

В МГТУ им. Г.И. Носова обучается около 14 000 студентов по 328 техническим и гуманитарным направлениям высшего и среднего профессионального образования. Действует 6 докторских диссертационных советов по 11 научным специальностям, работают 106 докторов наук и более 500 кандидатов наук. Одиннадцать образовательных программ удостоены первого места в номинации "Лучшие образовательные программы инновационной России".

На базе вуза действует 4 научно-исследовательских института: Наносталей, Металлургических технологий и обработки материалов давлением, Комплексного освоения георесурсов, Исторической антропологии и филологии. За последние годы 7 проектов университета получили право на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств и государственной поддержки научных исследований по постановлениям Правительства РФ № 218 и № 220. Научные коллективы и молодые исследователи ежегодно становятся победителями в конкурсах грантов Президента РФ, Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований. На базе университета созданы детский технопарк "Кванториум", "Проектная школа", функционирует научно-образовательный центр "Schneider Electric — МГТУ им. Г.И. Носова", развивается R&D-центр, осуществляющий разработки в направлении Индустрии 4.0.

Университет активно сотрудничает со стратегическим партнером в области подготовки кадров и проведения совместных научных исследований ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат", а также с другими ведущими предприятиями региона и страны.

Выпускники МГТУ им. Г.И. Носова работают во всех регионах страны и за рубежом. Среди выпускников — руководители министерств, крупнейших горно-металлургических, машиностроительных и химических предприятий и компаний, депутаты Законодательного собрания и Государственной думы РФ, лауреаты Премии правительства России [1].

Университет активно развивает международную научно-образовательную деятельность. Заключено более 60 договоров о сотрудничестве с ведущими мировыми университетами и компаниями из 28 стран мира. В университете обучается более 500 иностранных студентов из 10 стран. Университет является членом Ассоциации ведущих высших учебных заведений Российской Федерации и Республики Индия.

В вузе реализуются программы студенческого обмена с университетами Италии, Франции, Чехии, Сербии, Германии, Болгарии и Китая. Участниками программ обмена ежегодно становятся десятки студентов университета.

Большое внимание в МГТУ им. Г.И. Носова уделяется повышению квалификации молодых ученых. Аспиранты университета неоднократно становились победителями конкурса на получение стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом и проходили научные стажировки в ведущих университетах Италии, Германии, Швеции, Польши и Китая. Действует программа о совместном научном руководстве аспирантами с Падуанским университетом (Италия, г. Падуя).

С 2015 г. университет ежегодно проводит международные молодежные школы-семинары Magnitogorsk Rolling Practice [2]. Школа-семинар посвящена обмену опытом в области обработки металлов давлением, включающей полный спектр вопросов от моделирования и предварительных лабораторных испытаний до промышленного внедрения инновационных конкурентоспособных технологий. Формат проведения предусматривает пленарные лекции известных зарубежных

и отечественных ученых и доклады молодых ученых, специализирующихся в области обработки металлов давлением. Неотъемлемой частью программы является индустриальный тур на крупнейшие предприятия Магнитогорска. Опыт проведенных конференций неоднократно приводил к генерации новых научных коллективов молодых ученых из разных стран мира, способных реализовывать научно-технологические инициативы и инжиниринговые проекты. На сегодняшний день бренд Magnitogorsk Rolling Practice по оценке независимых экспертов является ведущим научно-техническим мероприятием в России для молодых ученых в области обработки металлов давлением.

Стратегия инновационного развития и жесткая конкуренция на рынке диктуют необходимость поиска новых производственных технологий и специалистов, способных их генерировать и реализовывать. Решить эту задачу МГТУ им. Г.И. Носова планирует путем разработки уникальной программы магистратуры в области передовых металлургических технологий для привлечения на обучение абитуриентов со всего мира с последующей интеграцией их стартап-проектов в региональную экономику. Университет сегодня предпринимает усилия по объединению своих кросс-дисциплинарных компетенций и разработке на этой основе программы подготовки специалистов в области Advanced Metallurgical Engineering с учетом растущего рынка и требований работодателей. Основу магистерской подготовки составляют новые научные знания, полученные учеными университета в ходе выполнения инновационных научных проектов [3—5].

В 2018 г. МГТУ им. Г.И. Носова приступил к реализации международной программы постдипломной подготовки руководителей "EMBA General Management" совместно с Высшим институтом коммерции г. Парижа (Франция).

С 2013 г. университет принимает активное участие в программах Европейского Союза по поддержке научных и образовательных проектов: TEMPUS, Horizon 2020, Erasmus+. Credit mobility, Erasmus+. Capacity Building Erasmus+. Jean Monnet Module.

В период с 2013 по 2017 г. МГТУ им. Г.И. Носова участвовал в трех TEMPUS проектах: "Modernization of two cycles (MA, BA) of competence-based curricula in Material Engineering according to the best experience of Bologna Process", "Enhancement of Russian Creative Education: New Master Program in Digital Arts in Line with the EU Standards", "Ecological Education for Belarus, Russia and Ukraine". В проектах принимали участие 51 университет и шесть высокотехнологичных компаний из Европейских стран и стран СНГ. Были разработаны и внедрены в учебный процесс новые образовательные программы для бакалавров и магистров в области материаловедения, экологического образования и цифрового дизайна на основе лучших практик участвующих университетов.

С 2017 г. в университете реализуется проект "Excellence in Engineering Education through Teacher Training and New Pedagogic Approaches in Russia and Tajikistan" в рамках программы "Erasmus + Capacity Building in Higher Education". Проект реализуется совместно с вузами Румынии, Латвии, Великобритании, Республики Таджикистан.

В рамках программы "Erasmus+. Jean Monnet" разрабатывается проект "European best practices of youth entrepreneurship and possibility of their implementation in Russia", посвященный изучению опыта цивилизованного молодежного предпринимательства в Европе и возможности его применения при организации малых инновационных предприятий в России.

В 2016 г. сотрудники МГТУ им. Г.И. Носова в составе международного консорциума выиграли конкурс в рамках программы "HORIZON 2020" с проектом: "Fracture Across Scales and Materials, Processes and Disciplines". Проект реализуется под руководством Университета Шефилда (Великобритания) с вузами и организациями Италии, Франции, Германии, Швеции, Австрии, Греции и др.

В развитии сотрудничества с ведущими университетами Индии ученые университета выполняют фундаментальные научные проекты, поддержанные Российским фондом исследований и Департаментом науки и технологии правительства Индии: "Numerical simulation and development of new hybrid processing methods for complex-shaped products made of ultrahigh strength materials" и "Systematic analysis of the effect of combined mode of deformation on the structure and properties of pearlitic grade steel wires". Реализуется грант одного из крупнейших благотворительных фондов Италии Fondazione Cassa di Risparmio di Padova e Rovigo на выполнение международного научного проекта "Transformation Induced Plasticity STEel for wires and ropes Production/TIP STEP".

В 2018 г. при поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления Правительства РФ № 220 в МГТУ им. Г.И. Носова состоялось открытие международной лаборатории "Механика градиентных наноматериалов". Коллектив лаборатории занимается разработкой наукоемких производственных технологий и опытно-экспериментального оборудования для создания новых градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений в различных отраслях промышленности. Для обсуждения результатов деятельности лаборатории дважды в год проводятся научно-практические семинары "Magnitogorsk Materials Week" с приглашением ведущих ученых мира в области интенсивной пластической деформации.

Более 14 лет университет сотрудничает с мировым лидером в области металлургического машиностроения Danieli (Италия). МГТУ им. Г.И. Носова является единственным университетом в России, который участвовал в подготовке персонала для компании [6]. Многолетнее партнерство позволило приступить к реализации крупномасштабного проекта "Инновационный парк МГТУ — Danieli" в рамках концепции InnovAction Show&Research&Training Park. Целью проекта является создание инфраструктуры и методики совместного продвижения ультрасовременных инноваций в области технологии производства, оборудования,

обучения персонала, технической поддержки существующих потребителей и в поиске новых партнеров.

Университет уделяет значительное внимание развитию взаимодействия между странами БРИКС в металлургической отрасли. Совместно с международным Союзом "МЕТАЛЛУРГМАШ" и международным научным мостом по теме БРИКС в развитие Проекта ЮНИДО "Технологическое и инновационное партнерство между странами БРИКС для развития среднего бизнеса" университет выступил в качестве разработчика концепции международного промышленного сотрудничества стран БРИКС в области металлургии. В основу концепции положен опыт формирования технологических кластеров, реализующих научно-производственный потенциал стран БРИКС в области металлургии [7].

В 2014—2016 гг. сотрудники университета приняли участие в технологическом аудите металлургического предприятия Хосе Марти (г. Гавана) по заказу Министерства промышленности Кубы. По итогам аудита был разработан документ "Обоснование инвестиций", который лег в основу программы технического, технологического и кадрового перевооружения завода в рамках межправительственного кредитного соглашения Россия—Куба. В рамках этого проекта была проведена переподготовка ведущих специалистов кубинского завода в МГТУ им. Г.И. Носова по программе "Эксплуатация и ресурсосбережение для современных металлургических комплексов по производству стали и сортового проката" [8].

В 2018 г. университет включился в выполнение нового международного проекта по технологическому аудиту и запуску металлургического завода компании United Steel Industries в Объединенных Арабских Эмиратах. Проектом предусмотрены комплексный инжиниринг, научно-исследовательские и конструкторско-технологические разработки по запуску оборудования на проектную мощность и развитию его сортамента, а также большой объем реализации обучающих программ переподготовки специалистов завода.

Коллектив Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова продолжает и приумножает лучшие традиции вузов России, уверенно интегрируется в международное научно-образовательное пространство.

По оценкам ведущего мирового рейтингового агентства QS МГТУ им. Г.И. Носова входит в ТОР-350 рейтинга лучших университетов стран БРИКС и в ТОП-300 лучших университетов стран Развивающейся Европы и Центральной Азии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колокольцев В.М., Филатов В.В.** Магнитка. Сталь. Люди // Черные металлы. 2016. № 12. С. 60—67.

2. **Корчунов А.Г.** Международная молодежная научно-практическая конференция Magnitogorsk Rolling Practice 2018 в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова // Черные металлы. 2018. № 19. С. 6—8.

3. **Чукин М.В., Корчунов А.Г., Гун Г.С и др.** Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения. М.: Металлургиздат, 2014. 276 с.

4. **Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Зайцева М.В. и др.** Исследование макро-микромеханики деформирования перлитной стали в многостадийных технологиях производства арматурных канатов // Сталь. 2018. № 7. С. 44—48.

5. **Чукин М.В., Голубчик Э.М., Копцева Н.В. и др.** Разработка и исследование инновационной технологии изготовления многофункциональных инварных сплавов нового поколения // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия "Техника и технологии". 2016. № 5. С. 744—479.

6. **Гибкие** решения в технологии и подготовке кадров: позитивный опыт сотрудничества с компанией Danieli / О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, Д. Нигрис, М.В. Чукин, Д.М. Кинзин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 81—85.

7. **Концепция** международного промышленного сотрудничества стран БРИКС: развитие инжиниринга и инноваций / М.В. Чукин, О.Н. Тулупов, И.В. Кульков, А.Б. Моллер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 69—72.

8. **Управление** качеством при модернизации оборудования и процессов (сталь-сортовой прокат) на основе повышения квалификации кадров в рамках российско-кубинского сотрудничества / О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, А.В. Наливайко, М. Райес, Х. Гуэрра // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 4. С. 106—113.

*Михаил Витальевич Чукин, д-р техн. наук, ректор;*
*Алексей Георгиевич Корчунов, д-р техн. наук,*
*проректор по международной деятельности,*
international@magtu.ru;
*Олег Николаевич Тулупов, д-р техн. наук,*
*проректор по научной и инновационной работе*

УДК 621.746.5.047:666.14

**К.Н. Вдовин, А.В. Дерябин**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова),*
**А.Е. Позин, А.А. Подосян, А.Н. Юсин**
*(ОАО "Механоремонтный комплекс", г. Магнитогорск)*

# Стойкость кристаллизаторов МНЛЗ

*Подробно изложены материалы, которые могут способствовать увеличению эксплуатационной стойкости важнейшего устройства машины непрерывного литья заготовок — медного кристаллизатора. Показано, что есть всего три пути увеличения этой стойкости: использование новых материалов; использование различных покрытий; конструктивные изменения стенок кристаллизатора, повышающие интенсивность отвода теплоты из расплава. Несмотря на большое количество элементов, которыми можно легировать медь для повышения стойкости стенок кристаллизаторов, она остается наиболее доступной и относительно недорогой. Выявлены современные способы покрытия стенок кристаллизаторов и материалы, применяемые для защиты стенок кристаллизаторов от износа. Рассмотрены материалы, увеличивающие стойкость медных стенок в несколько раз, они успешно внедрены на ряде металлургических заводов. Коротко изложены возможности изменения конструкции стенок кристаллизаторов, которые также увеличивают стойкость стенок кристаллизаторов более чем в 2 раза.*

**Ключевые слова:** кристаллизатор; медь; стенки кристаллизаторов; покрытия; износостойкость; МНЛЗ.

*The materials that can increase the operating resistance of the most important device of the continuous casting machine — the copper mould are described in detail. It is shown that there are only three ways to increase this resistance: the use of new materials; the use of various coatings; structural changes in the mould walls, increasing the intensity of heat removal from the melt. It is shown that despite the large number of elements that can be alloyed with copper to increase the resistance of the moulds walls, it remains the most affordable and relatively expensive. Identify current ways to cover the moulds walls and materials used to protect the moulds walls from wear. Materials that can increase the resistance of copper walls several times are considered and they successfully implemented in number of metallurgical plants. The possibilities of changing the structure of the mould walls, which also increase the resistance of the moulds walls more than twice, are briefly outlined.*

**Keywords:** crystallizer; copper; moulds walls; coatings; wear resistance; continuous casting machine.

Кристаллизатор *машины непрерывного литья заготовок* (МНЛЗ) является важнейшим устройством, от которого зависит качество получаемого слитка, обеспечивая кристаллизацию жидкого металла. Поэтому конструкция кристаллизатора должна обеспечивать хороший теплоотвод, высокую стойкость и безопасность работы.

Являясь основным узлом МНЛЗ, кристаллизатор выполняет следующие функции: отводит теплоту разливаемого металла к охладителю (от 10 до 30 % всего имеющейся в нем теплоты), формирует на поверхности образующейся заготовки надежную корочку, которая может выдержать ферростатическое давление жидкого металла после выхода из кристаллизатора, обеспечивает форму выходящей заготовки. Продолжительность работы всей разливочной машины зависит от работоспособности кристаллизатора, обеспечивающейся его эксплуатационной стойкостью [1].

Стенки кристаллизатора, изготовленные из медного сплава, в процессе разливки испытывают значительные напряжения из-за термоциклирования, а в условиях длительной работы эти напряжения накапливаются, превышают предел упругости и даже предел текучести, и медь начинает работать в условиях длительной ползучести [2].

Немаловажную роль в работе кристаллизатора играет механизм его качания, который передает ему возвратно-поступательное движение по фиксированной траектории. Ее нарушение приводит к изгибу оболочки формирующегося слитка, а при движении вверх происходит вдавливание его части в корку

слитка. Такие смещения могут достигать 2,5 мм, что приводит к образованию трещин по следам качания и снижению ресурса работы секций.

*Цель работы* — обзор и анализ существующих методов увеличения стойкости медных стенок кристаллизаторов.

Можно выделить основные направления при решении проблемы стойкости рабочих стенок кристаллизатора:

1. Использование новых материалов.
2. Использование различных покрытий.
3. Конструктивные изменения стенок кристаллизатора, повышающие интенсивность отвода теплоты из расплава.

Стойкость кристаллизатора зависит от материала, из которого он изготовлен. Самым распространенным является высокотеплопроводная медь, ее главные недостатки: низкая твердость, низкая температура разупрочнения (250...300 °С) вследствие собирательной рекристаллизации, способность взаимодействовать со сталью.

По мнению А.К. Николаева [3], чистую медь нельзя использовать для изготовления кристаллизаторов из-за: деформации стенок в вертикальном и поперечном направлениях; напряжений в них выше предела текучести меди; возможно, что эта деформация связана также с изменением размеров стенки под действием циклической термической обработки в результате термоструктурных напряжений, вызываемых анизотропностью кристаллов по коэффициенту линейного расширения и упругим свойствам; появления трещин от термической усталости; износа в результате трения слитка о поверхность кристаллизатора, приводящего к нарушению его теплового баланса.

Указанные причины выхода из строя медных кристаллизаторов касаются как гильзовых, так и сборных кристаллизаторов. Деформация в сборных кристаллизаторах приводит к раскрытию стыков между рабочими стенками. Все это сказывается на качестве отливаемых слитков: резко ухудшается качество поверхности, появляются трещины вследствие затрудненной усадки затвердевшей корочки слитка, постоянные прорывы металла из-за неудовлетворительного охлаждения и т.д. [3—5].

Температуру разупрочнения материала можно повысить легированием меди такими элементами, как хром, кремний, никель, серебро, бериллий, олово, магний. Основное преимущество таких сплавов — повышение температуры разупрочнения, что уменьшает деформацию рабочих стенок, но при этом снижается теплопроводность. Например, медь, легированная долями процента серебра, олова или циркония, имеет коэффициент теплопроводности 370...380 Вт/(м·К), а из-за уменьшения теплопроводности по сравнению с чистой медью примерно на 50 °С возрастает температура стенок кристаллизатора, достигая 265 °С [2].

Основным сплавом для изготовления стенок кристаллизаторов в России является медь, легированная серебром, несмотря на его высокую стоимость. При использовании узких стенок из сплава меди с серебром (0,1 % Ag) удается увеличить их стойкость в 1,4 раза. За рубежом широкое распространение получили дисперсионно-твердеющие бронзы: хромистая, кобальтоберилиевая, хромоциркониевая. Эти сплавы имеют еще более высокую стоимость, трудны в литье и при механической обработке. Более дешевой является медь марки М1р, которую применяют на некоторых предприятиях несмотря на образующуюся усадку после разливки чуть более 200 плавок. Существует технология восстановления медных стенок после усадки [1].

Опыт эксплуатации таких узких стенок кристаллизатора показал, что основной износ узких стенок из меди МС происходит в нижней части кристаллизатора из-за истирания на длине 300...500 мм по рабочим торцам в области радиусов 8000 и 7740 мм на участке шириной до 70 мм (рис. 1) [6]. Это объясняется увеличением силы, с которой затвердевшая корка прижимается к стенкам кристаллизатора вследствие усадки и роста ферростатического давления жидкого металла.

В кристаллизаторах квадратного сечения (сортовых) в первую очередь износ происходит по углам из-за искажения профиля (ромбичностью) сортовой заготовки при ее прохождении через кристаллизатор и значительных сил трения в углах, где заготовка образует острый угол [7].

Межремонтный период эксплуатации кристаллизатора можно разделить на три интервала: интервал интенсивной приработки (от 1-й до 20-й плавки), интервал окончательной приработки (от 20-й до 30-й плавки), интервал стабильной работы кристаллизатора (после 30-й плавки) [1].

В качестве экспериментального материала для узких стенок в ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ПАО "ММК") был опробован

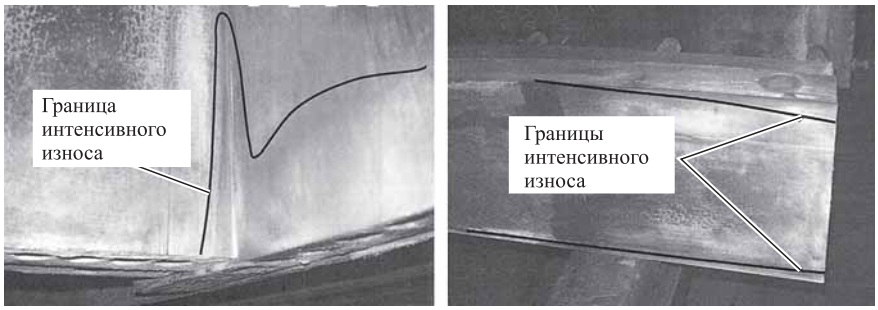



**Рис. 1. Износ узких стенок кристаллизатора**

сплав МН2,5КоКрХ. В отличие от сплава МС он требует сложной ресурсоемкой термической обработки. В результате время изготовления одной стенки увеличилось более чем в 2 раза. На всех стенках из этого материала во время работы МНЛЗ образовались трещины на уровне мениска жидкой стали в области заглушки верхнего коллектора.

Известно, что основной проблемой выбора материала для изготовления стенок кристаллизаторов МНЛЗ является поиск сплава с повышенной теплопроводностью для продолжительной работы при повышенных температурах и с высокой износостойкостью, чтобы противостоять трению о вытягиваемый сляб. При выборе материала для стенок кристаллизатора МНЛЗ необходимо учитывать влияние температуры их рабочей поверхности на механические и физические свойства и износостойкость данного сплава. Чем ниже теплопроводность материала стенок кристаллизатора, тем выше температура их рабочей поверхности. При снижении теплопроводности до 150...200 Вт/(м·К) происходит резкое увеличение температуры стенок кристаллизатора. Поэтому для изготовления стенок следует выбирать материал с высокими механическими свойствами при повышенной температуре и коэффициентом теплопроводности не менее 150...200 Вт/(м·К).

С учетом изложенного выше сформулированы требования к материалу стенок кристаллизатора МНЛЗ и ЭШП [2, 8, 9]:

- высокая теплопроводность;
- химическая нейтральность по отношению к расплаву;
- достаточная твердость и износостойкость;
- способность выдерживать длительные термосмены в диапазоне рабочих температур разливки;
- стабильность свойств в процессе эксплуатации;
- способность сохранять необходимую геометрию и размеры рабочей полости кристаллизатора.

А.К. Николаев предложил для изготовления стенок кристаллизаторов применять сплав М3рЖ, содержащий, % мас.: 0,05...0,1 Sn; 0,02...0,07 Fe; 0,01...0,07 P; остальное — Cu, который по своим механическим свойствам в 2—3 раза превосходит медь марок М1р и М2р [3—5].

По диаграмме состояния Cu—Fe видно, что при содержании железа до 0,3 % в меди можно получать стабильный однофазный твердый раствор замещения. Исследования таких сплавов показали, что они имеют более высокие, чем чистая медь износостойкость и твердость (рис. 2) [3, 10, 11].

Исходя из требований к тепловой прочности стенок кристаллизатора, можно сделать вывод, что самая нагруженная часть находится в зоне

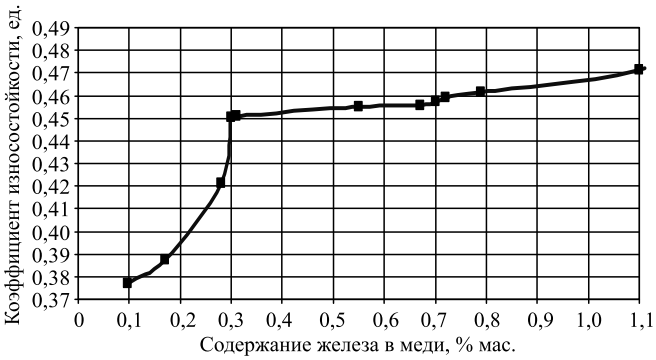



**Рис. 2. Зависимость коэффициента износостойкости от содержания железа в меди**

мениска, где формируется корочка заготовки, по мере удаления от мениска корочка становится толще; резко снижаются интенсивность отвода теплоты и температура поверхности медных пластин. На выходе из кристаллизатора корочка обладает уже достаточной прочностью, ее поддерживают ролики и уже окончательно понижение температуры заготовки происходит в зоне вторичного охлаждения.

Второе важное требование к стенкам основано на экономическом факторе: необходимо обеспечить максимально возможный срок их службы. В верхней части стенки должны выдерживать большую теплопередачу и одновременно ограничить напряжения кристаллизации в формирующейся структуре за счет максимального замедления начального охлаждения. Легкие абразивные воздействия наблюдают в средней части кристаллизатора и сильные — в его нижней части, где закристаллизовавшаяся корочка заготовки скользит по медной стенке и сдирает материал кристаллизатора и шлакообразующую смесь [12].

Из-за повышения требований к качеству разливаемого металла для снижения количества различного рода дефектов на заготовках, связанных с контактом сталь—медь, а также быстрого износа стенок кристаллизаторов, возникла необходимость искать пути защиты их от износа.

Коллектив специалистов группы SMS и СМС-ЧЕЛТЕК (г. Челябинск) считают, что необходимость использования покрытий стенок кристаллизаторов можно разделить на две группы: решение проблемы качества слябов и блюмов и проблемы снижения износа стенок кристаллизаторов [13]:

— покрытие смягчает интенсивность охлаждения особенно в зоне мениска, снижая при этом термомеханические напряжения;

— покрытие предотвращает адгезию меди в поверхность сляба, которая является причиной "паучковых трещин";

— уменьшение локального износа в нижней части кристаллизатора, таким образом, снижается вероятность дополнительного инициирова-

ния напряжения корочки сляба, которая приводит к внутренним трещинам;

— предупреждение размягчения и рекристаллизации меди;

— защита от случайных включений и повреждений, механических царапин.

Для увеличения стойкости гильз кристаллизаторов применяют различные виды износостойких покрытий: однослойные (Cr, Ni); двухслойные (Ni, Cr); трехслойные (Ni—Co—Cr); керамические и др.

Эффективным методом покрытия стенок кристаллизаторов считают разработанный SMS Millcraft технологический процесс "в коробе", который позволяет покрывать кристаллизатор в сборе (медные плиты вместе с рубашкой охлаждения). Такое покрытие является исключительным процессом, использующим только объекты, подлежащие покрытию, две широкие плиты и две дополнительные стенки, образующие короб, куда и помещают никель, в процессе работы никелевый раствор закачивают и сливают из этого короба [13].

Широкое распространение за рубежом для повышения технологических характеристик материала кристаллизаторов нашли процессы поверхностного упрочнения, т.е. нанесение защитных покрытий. Различают следующие способы покрытий: гальванический (электрохимический); напыление (пневматическое, детонационное); плакирование меди листовым материалом; термодиффузионное насыщение поверхности; наплавка.

Постепенное изменение гальванических покрытий на медных плитах кристаллизаторов МНЛЗ (рис. 3) показывает, что вначале покрытия были чисто хромовые, затем никель-хромовые и современные никель/никель-кобальтовые или другие вариации [14].

В настоящее время твердость покрытий по Виккерсу обычно составляет 220...1200 HV (керамических), а теплопроводность — от 30 до 90 Вт/(м·К).

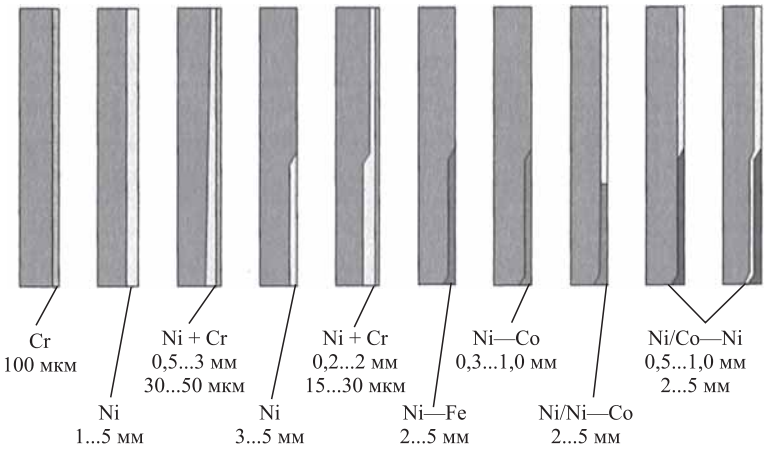



**Рис. 3. Гальванические покрытия на медных плитах кристаллизаторов МНЛЗ**

В ООО "Корад" (г. Москва) организовали работы по нанесению гальванического покрытия на бывшие в эксплуатации стенки кристаллизатора и провели испытания в условиях ПАО "Северсталь". Наносили покрытия фирмы KME Europa Metall AG (Германия) двух типов: AMC-HN20 — покрытия никеля твердостью 220 HV и AMC-HN40 — покрытие из сплава никеля с кобальтом твердостью 400 HV. Испытания показали, что эффект по качеству сляба при использовании обоих покрытий одинаков, но снижена доля слябов, пораженных поверхностными дефектами (в 6 раз), увеличена стойкость стенок по износу.

Авторы работы [12] считают, что наиболее перспективным направлением снижения интенсивности износа стенок кристаллизаторов МНЛЗ и повышения качества поверхности получаемых слябов может быть нанесение различных покрытий на узкие стенки. Чисто хромовое покрытие неэффективно для кристаллизаторов слябовых МНЛЗ. При малой толщине покрытия оно легко разрушается, особенно при прохождении захоложенных концов слитка. При большой толщине слой отслаивается из-за разных коэффициентов теплового расширения хрома и меди. Никелевое покрытие дает более качественное сцепление. Так как покрытие медных стенок различными материалами уменьшает процесс отвода теплоты от стали к меди, повышается температура на стенках, что влияет на сцепление материала покрытия и меди. При увеличении толщины покрытия значительно возрастают термические напряжения в материале покрытия из-за разницы в коэффициентах теплового расширения металлов.

Оптимальными стенками кристаллизаторов для покрытия являются прямые (либо с радиусом 10 м и более) с низкой конусностью. По данным японской фирмы "Кавасаки стил", наиболее качественным является Fe—Ni-покрытие (с содержанием железа 4...6 %). Подобную технологию применяют многие ведущие мировые компании (SMS-Demag, Danielli, KME).

Стойкость покрытий определяется не только их износостойкостью. Большое значение имеет различие температур и коэффициентов термического удлинения между покрытием и медью. Слой хрома окажется растянутым, и напряжения в нем составят около 400 МПа, и за счет пластической деформации покрытие отслоится уже через 40...80 плавок [6, 15—17].

В работе [14] описаны результаты промышленного испытания кристаллизаторов на МНЛЗ ПАО "ЕВРАЗ НТМК", проведенных по технологии японской компании MISHIMA KOSAN Co., Ltd, осуществляющей проектирование, изготовление и сервис

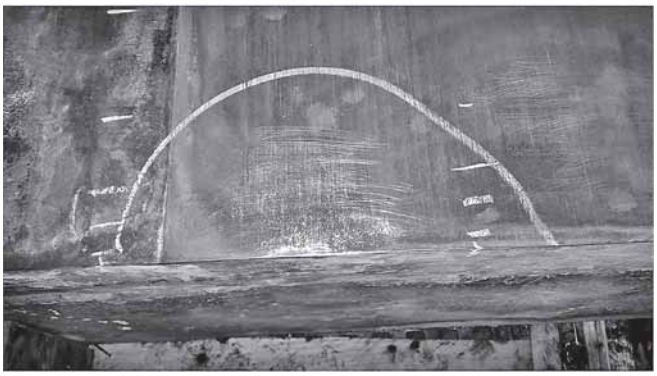
кристаллизаторов любых типов. При подготовке к внедрению установлено, что для повышения стойкости стенок кристаллизатора необходимо: применение материала с повышенной стойкостью при высоких температурах; уменьшение градиента температуры на рабочей поверхности стенки кристаллизатора за счет более эффективного и равномерного теплоотвода; придание необходимых эксплуатационных свойств рабочей поверхности кристаллизатора вследствие нанесения газотермического покрытия; совершенствование конструкции кристаллизатора.

Широко разрекламированы покрытия фирмы KME AMC®-HN 40 твердостью 350...420 HV, предполагаемая стойкость которых должна быть 500 плавок. Испытания покрытий широких стенок кристаллизаторов, проведенные на ММК (рис. 4), показали, что средняя стойкость стенок кристаллизаторов составила 250...300 плавок.

При осмотре обеих широких стенок на расстоянии 9...6 мм от нижнего среза медной стенки выявлен интенсивный износ никелевого покрытия, вскрылась медь (см. рис. 4, *а*). Глубина износа составила на базовой стенке до 2,1 мм, а на стенке малого радиуса до 2,6 мм.

При осмотре широких стенок визуально наблюдали износ никелевого покрытия, медь не вскрылась (см. рис. 4, *б*). Замеры износов широких стенок проведены на станках с помощью индикатора. На базовой стенке максимальная глубина износа равна 1,2 мм, а на стенке малого радиуса — 2,2 мм.

*а)*



*б)*

**Рис. 4. Износ покрытия на стенке кристаллизатора:**
*а* — 295 плавок; *б* — 504 плавки

Положительный опыт гальванического покрытия получен в ПАО "Северсталь". Сотрудники фирмы "KM Европа Металл" (Германия) нанесли на щелевые стенки кристаллизатора никелевый сплав AMC-HN40. Толщина на широких стенках составила вверху 0,5 мм, внизу 1,5 мм; на узких стенках — вверху 0,5, внизу 2,0 мм. При разливке слябов сечением 1450×250 мм стойкость кристаллизатора с таким покрытием 236 плавок против стандартных 124, объем зачистки слябов по сетчатым трещинам снизился в 6,5 раза [18].

Газоплазменное напыление, хотя и позволяет расширить перечень применяемых материалов, но требует затрат на термообработку, что сказывается на стоимости кристаллизатора, а также необходимо устранять повышенную шероховатость получаемого покрытия.

Наиболее прост метод термодиффузии, позволяющий увеличить твердость поверхности, получить упрочненный слой глубиной до 2,0 мм, достичь минимального снижения теплопроводности материала и благодаря образованию переходного слоя на границе покрытие—основа обеспечить высокую прочность сцепления. Известно, что стойкость такого кристаллизатора в 4—6 раз выше, чем с другими покрытиями [3].

Для детонационного покрытия медной поверхности применяют амперит (карбид вольфрама — 88 % и кобальт — остальное) или другие материалы, например карбид хрома с никелем. Напыление проводят выстрелами из специальной пушки, во взрывную камеру которой подаются пропан-бутановая смесь, кислород, аргон и напыляемый порошок [19].

Одним из самых современных и очень эффективных способов нанесения защитных покрытий на медные стенки является лазерная наплавка. Лазерный луч, точечно нагревая локальный участок наплавляемой поверхности до температуры 6000 °С, расплавляет и наплавляет подающийся в среде защитного газа (аргона) порошок покрытия. Наплавку осуществляют различными материалами, в том числе композитными (более 2 000 видов наплавочных порошков) [16].

Компания Corus Process Engineering (Великобритания) начала проводить опыты по эксплуатации кристаллизаторов со 100 % специальным керамическим покрытием CASTCOAT. При этом установили, что коэффициент трения керамики примерно в 2,5 раза меньше, чем у широкой грани из меди. Предварительные результаты показали увеличение стойкости в 2 раза [20].

Третий способ увеличения стойкости стенок кристаллизаторов — конструктивные изменения

стенок кристаллизатора, повышающие интенсивность отвода теплоты из расплава, — подробно описан в работе [21].

На начальном этапе исследования применяли различные вставки в тело стенок кристаллизаторов (например, из коррозионно-стойкой стали). Их устанавливали в нижней части узких граней во выфрезерованные в стенках пазы и крепили стальными шпильками. Такие вставки позволяли увеличить стойкость кристаллизаторов в 1,5—2,0 раза без изменения основных технологических параметров. Экспериментировали с конфигурацией охлаждающих каналов в стенках кристаллизаторов.

Построив кривые усадки стали в кристаллизаторе, изменили профиль кристаллизатора и получили поликонусные (трехплоскостные) узкие стенки, в нижней части которых по радиусным поверхностям выполнили специальные клиновые фаски. Это позволило в рабочей полости кристаллизатора создать дополнительные зоны разгрузки контактного давления ребер граней вытягиваемой заготовки на поверхность узких стенок. Это снизило интенсивность их трения о стенки, повысило их стойкость более чем в 2 раза и улучшило качество заготовки.

Оценив возможные способы увеличения стойкости кристаллизаторов, сделан вывод: в настоящее время наиболее перспективным является способ нанесения защитных покрытий стенок кристаллизаторов, который из года в год совершенствуется и внедрен на основных металлургических предприятиях России.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Непрерывная** разливка стали. Расчет медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, Т.П. Ларина, И.Е. Петров. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 190 с.
2. **Лякишев Н.П., Шалимов А.Г.** Развитие технологии непрерывной разливки стали. М.: ЭЛИЗ, 2002. 208 с.
3. **Николаев А.К.** К дискуссии о материалах для кристаллизаторов МНЛЗ // Металлоснабжение и сбыт. 2004. № 7/8. С. 108—115.
4. **Николаев А.К., Ашихмин Г.В.** Применение жаропрочных медных сплавов в кристаллизаторах непрерывного литья слитков // Цветная металлургия. 2003. № 11. С. 28.
5. **Гильзовые** кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ / В.Б. Ганкин, Б.А. Сивак, Г.И. Николаев, А.К. Велитченко, В.Н. Киреев // Тяжелое машиностроение. 1997. № 5. С. 19—22.
6. **Опыт** эксплуатации узких медных стенок кристаллизаторов на ММК / К.Н. Вдовин, А.А. Подосян, А.А. Нефедьев // Теория и технология металлургического производства. 2006. Вып. 6. С. 87—93.
7. **Модернизация** конструкции кристаллизатора и совершенствование технологии разливки стали на сортовых МНЛЗ / К.Н. Вдовин, С.Н. Ушаков, О.А. Марочкин; В.В. Точилкин // Технология металлов. 2013. № 9. С. 38—41.
8. **Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Канфер В.Д.** Создание технологии повышения эксплуатационной стойкости медных кристаллизаторов МНЛЗ // Труды VI конгресса сталеплавильщиков. М.: ОАО "Черметинформация", 2001. С. 288—291.
9. **Гильзовые** кристаллизаторы сортовых УНРС / В.Б. Ганкин, Г.И. Николаев, А.К. Белитченко и др. // Труды II конгресса сталеплавильщиков. М.: ОАО "Черметинформация", 1994. С. 281—283.
10. **Осинцев О.Е., Федоров В.Н.** Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
11. **Вдовин К.Н., Синицкий Е.В., Нефедьев А.А.** Влияние легирования на механические свойства меди // Особенности обработки и применения изделий из тяжелых цветных металлов: материалы Междунар. практ. конф. Екатеринбург: УРО РАН, 2006. С. 94—103.
12. **Кристаллизаторы** МНЛЗ с высоким ресурсом эксплуатации. Опыт внедрения на ОАО "ЕВРАЗ НТМК" / А.А. Вопнерук, Р.Ф. Исхаков, А.Б. Котельников и др. // Труды XII конгресса сталеплавильщиков. Выкса: ЗАО "Металлургиздат", 2013. С. 319—323.
13. **Люзе А., Сиврикова С.Р.** Комплексный подход при выборе покрытия кристаллизаторов МНЛЗ // Труды XII конгресса сталеплавильщиков. Выкса: ЗАО "Металлургиздат", 2013. С. 324—326.
14. **Новые** материалы и технологии при создании и производстве кристаллизаторов МНЛЗ с высоким ресурсом эксплуатации / А.Б. Котельников, А.А. Вопнерук, А.В. Макаров и др. // Юбилейный сборник Междунар. конф. "Мировые тенденции развития технологии непрерывной разливки стали". 2017. С. 112—124.
15. **Бровман М.Я.** Непрерывная разливка металлов. М.: Экомет, 2007. 484 с.
16. **Анализ** возможности получения покрытий лазерной наплавкой на стенках кристаллизатора установок непрерывной разливки стали / Ю.С. Коробов, А.А. Вопнерук, А.Б. Котельников и др. // Юбилейный сборник Междунар. конф. "Мировые тенденции развития технологии непрерывной разливки стали". 2017. С. 125—136.
17. **Герасимова А.А., Глухов Л.М., Радюк А.Г.** Нанесение покрытий на узкие стенки кристаллизаторов МНЛЗ для повышения качества поверхности слябов // Металлург. 2014. № 5. С. 64—66.
18. **Радиальный** слябовый кристаллизатор с щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А.А. Макрушин, А.В. Куклев, Ю.М. Айзин и др. // Металлург. 2005. № 2. С. 39—41.
19. **Теплофизические** свойства детонационно напыленного никеля на медные пластины кристаллизаторов МНЛЗ / К.Н. Вдовин, Г.А. Дубский, Е.Н. Астапов и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 57—60.
20. **Первые** кристаллизаторы с полностью керамическим покрытием // Новости черной металлургии за рубежом. М.: ОАО "Черметинформация", 2006. Вып. 1. 36 с.
21. **Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М.** Непрерывная разливка стали. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. 540 с.



*Константин Николаевич Вдовин, д-р техн. наук,* vdovin@magtu.ru;
*Андрей Владимирович Дерябин, канд. техн. наук;*
*Андрей Евгеньевич Позин, канд. техн. наук;*
*Артур Арутюнович Подосян, канд. техн. наук;*
*Александр Николаевич Юсин, канд. техн. наук*

УДК 621.791

**М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков, Е.Н. Ширяева, Е.С. Шеметова**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Разработка сварочных электродов с композитным наномодифицирующим покрытием*

*Приведены результаты исследования влияния различных вариантов компоновки покрытия электродов на структуру наплавленного металла. Установлено, что наилучший эффект модифицирования обеспечивает вариант электрода с трехслойной компоновкой покрытия, когда модифицирующий слой находится между шлако- и газообразующими слоями покрытия.*

**Ключевые слова:** покрытый электрод; сварка; наплавка; нанопорошок; карбид вольфрама; тугоплавкие соединения; модифицирование; микроструктура; механические свойства.

*The study results of influence of various options for coating of electrodes on structure of the deposited metal are presented. It is established that the best modification effect is provided by option of three layer coating electrode when the modifying layer is between of the slag and gas-forming layers of the coating.*

**Keywords:** coated electrode; welding; surfacing; nanopowder; tungsten carbide; refractory compounds; modification; microstructure; mechanical properties.

На сегодняшний день дуговая сварка покрытыми электродами — основной, а в некоторых случаях единственный способ соединения конструкционных материалов.

Все большее применение в сварных конструкциях находят легкие сплавы и полимерные материалы, однако главным конструкционным материалом остается сталь. В последние годы были разработаны новые стали, обладающие повышенным комплексом механических и специальных свойств, обеспечиваемых, в частности, за счет их наноструктурирования [1]. В связи с этим возникает необходимость разработки новых марок покрытых электродов с улучшенными технологическими и металлургическими свойствами, обеспечивающих формирование эффективной структуры металла сварных соединений высокопрочных сталей [2—4].

Добиться улучшения характеристик наплавленного металла можно за счет введения в расплав сварочной ванны тугоплавких нанодисперсных компонентов, которые обеспечивают эффект модифицирования [5, 6].

Важной задачей при сварке является введение модифицирующих компонентов в расплав сварочной ванны. Это связано с тем, что модифицирование при сварке затруднено, так как перегрев переплавляемого электрода дезактивирует компоненты [7].

Чтобы повысить усвояемость модифицирующих компонентов металлом сварочной ванны, прибегают к определенным техническим решениям, в частности применяют электроды с многослойным — композитным покрытием, чередующим в себе модифицирующие и шлако- и газообразующие слои [8].

*Цель работы* — исследование влияния различных вариантов компоновки покрытия электродов на структуру наплавленного металла, определение наиболее эффективного варианта покрытия.

Экспериментальные электроды с композитным покрытием изготовляли в лаборатории "Резание и сварка" МГТУ им. Г.И. Носова по технологии "окунания". Рассматривали три варианта компоновки покрытия (рис. 1):

1. Модифицирующий слой *2* располагается внутри шлако- и газообразующего покрытия *3*, примыкая к непосредственно металлическому стержню *1* (см. рис. 1, *а*);

2. Модифицирующий слой *3* располагается между шлако- и газообразующими слоями покрытия *2*, *4* (см. рис. 1, *б*);

3. Модифицирующий слой *3* располагается снаружи шлако- и газообразующего покрытия *2* (см. рис. 1, *в*).

Исходными материалами для изготовления электродов служили: стержни из стальной проволоки Св-08А диаметром 3 мм и длиной 350 мм; шлако- и газообразующие компоненты, %: 54 $CaCO_3$; 15 $CaF_2$; 9 $SiO_2$; 13 FeMn; 9 FeSi и свя-

* Работа выполнена при финансовой поддержке "Фонда содействия инновациям" (договор № 118 ГУ/2017).

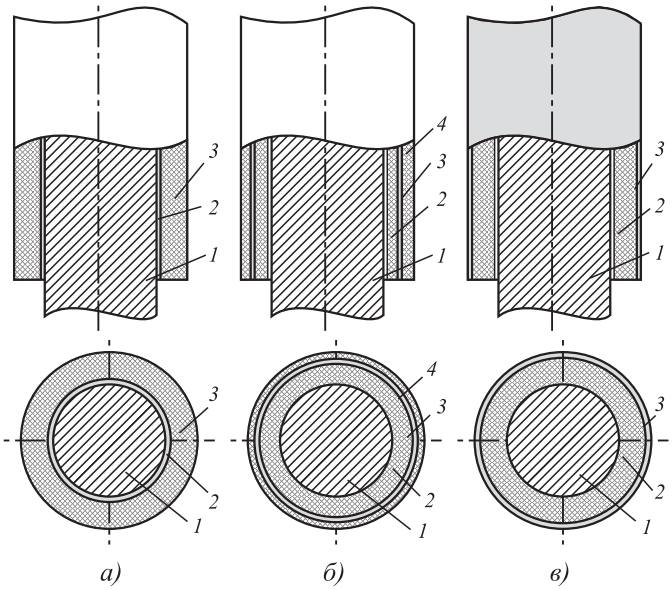



**Рис. 1. Варианты компоновки покрытия электродов:**

*а* — модифицирующий слой внутри покрытия; *б* — модифицирующий слой в центре покрытия; *в* — модифицирующий слой снаружи покрытия

зующее — жидкое натриевое стекло; модифицирующий компонент, состоящий из наноразмерного порошка карбида вольфрама WC (размер частиц 50...1000 нм), полученного коллоидным измельчением в жидкой среде, и связующего вещества, в качестве которого использовано жидкое натриевое стекло.

В общем виде технология нанесения слоев покрытия на металлический стержень описана на примере электрода с трехслойным покрытием (см. рис. 1, *б*).

Первоначально на стальной стержень наносили внутренний слой обмазки толщиной 0,5 мм, состоящий из шлако- и газообразующих компонентов. Далее электрод сушили на воздухе при температуре 20 °С в течение 12 ч, а затем проводили термическую обработку в электропечи в течение 1 ч при температуре 400 °С. Далее на поверхность внутреннего слоя наносили тонкий слой наноразмерного порошка толщиной 0,2...0,3 мм, перемешанного с жидким натриевым стеклом при соотношении: 70 % порошок, 30 % связующее. Электрод сушили на воздухе при температуре 20 °С в течение 12 ч, а затем выполняли термическую обработку в электропечи в течение 1 ч при температуре 300 °С. Далее на электрод снова наносили слой толщиной 0,2 мм из шлако- и газообразующих компонентов, сушили при температуре 20 °С в течение 12 ч, затем осуществляли термическую обработку в электропечи в течение 1 ч при температуре 400 °С.

Ручную дуговую наплавку экспериментальными электродами проводили на пластины толщиной 8 мм, выполненные из стали марки Ст3, на постоянном токе обратной полярности. Сила сварочного тока составляла 130...140 А. Затем из пластин вырезали поперечные образцы для металлографических исследований. Образцам присвоены обозначения электродов, которыми они были выполнены, т.е. "а", "б", "в".

Структуру наплавленного металла исследовали на травленых образцах с помощью светового микроскопа "Микромед-Мет" с применением системы компьютерного анализа изображений ScopePhoto.

Твердость металла измеряли по ГОСТ 9450—76 на твердомере HV-1000. Выполняли три измерения при нагрузке на индентор 2,943 Н (0,3 кгс).

Исследования наплавленного металла показали, что структура всех образцов (рис. 2) характеризуется наличием периферийного феррита, выпавшего по границам первичных зерен, также наблюдаются образования видманштеттового феррита. В образцах на рис. 2, *а* и *в* в структуре присутствуют крупные столбчатые кристаллиты, при этом в образце на рис. 2, *б* наблюдается гло-

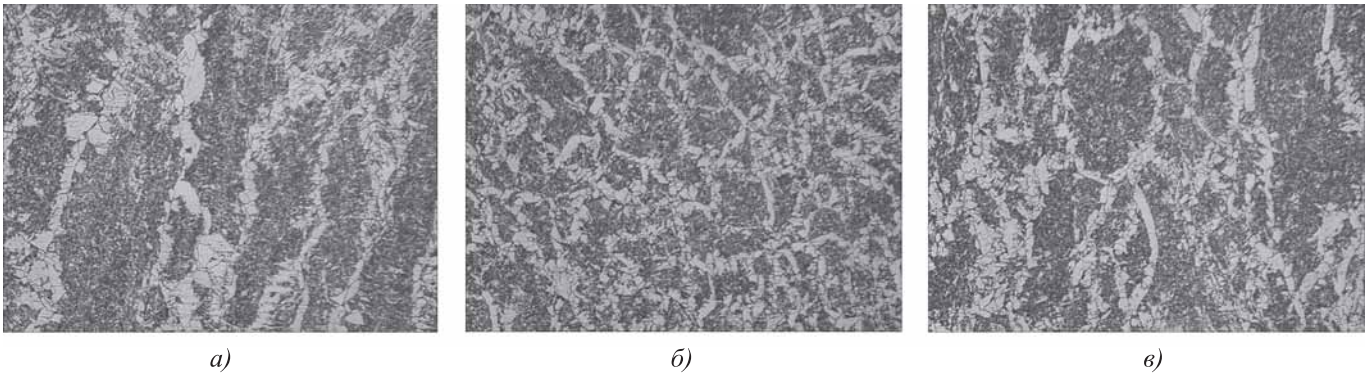



**Рис. 2. Столбчатые кристаллиты (образец "а") (*а*), глобулярные кристаллы в виде непрерывной матрицы (образец "б") (*б*) и крупные глобулярные кристаллы (образец "в") (*в*). ×100**

булярная структура в виде непрерывной матрицы. Твердость металла всех образцов находится на уровне 195...208 HV, что объясняется одинаковым фазовым составом наплавленного металла.

Из анализа полученных результатов следует, что эффект модифицирования лучше всего реализуется в образце, наплавленном электродом с трехслойным покрытием (см. рис. 1, *б*). Это может быть связано с тем, что данная компоновка покрытия при расплавлении обеспечивает более эффективный переход модификатора в расплав сварочной ванны. Тогда как при варианте № 1 (см. рис. 1, *а*) модифицирующий слой находится слишком близко к высокотемпературной зоне столба дуги, вследствие чего происходит его дезактивация.

Вариант № 3 (см. рис. 1, *в*) также не обеспечивает необходимый эффект, что может быть связано с потерей модифицирующего компонента в процессе сварки-наплавки, когда вследствие неравномерного нагрева и плавления торца электрода происходит механическое разрушение и отпадание тонкого модифицирующего слоя. И только вариант № 2 (см. рис. 1, *б*) в полной мере позволяет избежать потери модифицирующего эффекта.

## Выводы

1. Изготовлена экспериментальная партия электродов с композитным наномодифицирующим покрытием.
2. Структура металла, наплавленного экспериментальными электродами, характеризуется наличием периферийного феррита, выпавшего по границам первичных зерен, а также некоторым количеством видманштеттового феррита.
3. Твердость наплавленного металла всех образцов находится на уровне 195...208 HV.
4. Наилучший эффект модифицирования обеспечивает вариант электрода с трехслойной компоновкой покрытия, когда модифицирующий слой находится в центре шлако- и газообразующих слоев покрытия.
5. На основе результатов исследований был получен патент на полезную модель [9].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Назначение** и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 85—88.
2. **Электроды** для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе / И.Н. Зверева, А.Д. Картунов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Металлургия". 2015. Т. 15. № 1. С. 92—95.
3. **The research** on surface properties of welding slags and electrode coatings / S.V. Mikhaylitsyn, M.A. Sheksheev et al. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 724—730.
4. **Исследование** вязкости жидких сварочных шлаков и расплавов электродных покрытий / С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 4. С. 280—287.
5. **Феноменологическая** модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак и др. // Вопросы материаловедения. 2015. № 4. С. 159—168.
6. **Исследование** влияния ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама на структуру наплавленного металла / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Металлургия". 2018. Т. 18. № 4. С. 128—136.
7. **Модифицирование** структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак и др. // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 6. С. 41—47.
8. **Пат. 2407617 Российская Федерация, МПК[7] B 23 K 35/365.** Электрод для дуговой сварки и наплавки / Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак. Опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36.
9. **Пат. 186838 Российская Федерация, МПК[7] B 23 K 35/02.** Электрод для дуговой сварки и наплавки / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков, Н.А. Игалдин, А.А. Ишмуратов. Опубл. 05.02.2019, Бюл. № 4.



*Максим Александрович Шекшеев, канд. техн. наук,* shecsheev@yandex.ru;
*Сергей Васильевич Михайлицын, канд. техн. наук;*
*Александр Борисович Сычков, д-р техн. наук;*
*Елена Николаевна Ширяева;*
*Елена Сергеевна Шеметова*

УДК 621.7.08, 621.77.08

**М.П. Барышников, А.С. Ишимов, А.М. Барышникова**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Физическое и математическое моделирование реологических свойств в процессах горячей пластической деформации с учетом динамической рекристаллизации с использованием комплекса Gleeble 3500*

*Рассмотрено влияние процесса динамической рекристаллизации на реологические свойства стали 20 при физическом моделировании процесса горячей осадки с использованием комплекса Gleeble 3500. Получена функция, устанавливающая зависимость напряжения текучести от параметров деформирования, таких как скорость, степень и температура, которую можно использовать при конечно-элементном анализе процессов горячей обработки давлением.*

**Ключевые слова:** горячая деформация; динамическая рекристаллизация; реологические свойства.

*The effect of the dynamic recrystallization process on the rheological properties of steel 20 in the physical modeling of the hot upsetting process using the Gleeble 3500 system is considered. Function is obtained that establishes the dependence of the yield stress on the deformation parameters, such as speed, degree and temperature, which can be used for finite element analysis of the hot working processes.*

**Keywords:** hot deformation; dynamic recrystallization; rheological properties.

В процессах горячей пластической деформации на напряжение текучести оказывает влияние множество различных факторов, таких как скорость, степень и температура деформации, химический состав обрабатываемого материала и др. В связи с этим актуальной задачей при конечно-элементном анализе становится получение непрерывной математической функции, связывающей указанные параметры.

На сегодняшний день российскими и зарубежными учеными разработаны различные математические модели, позволяющие рассчитать напряжение текучести в процессах горячей пластической деформации. Однако наибольшее распространение получили математические модели, учитывающие влияние процесса динамической рекристаллизации. Динамическая рекристаллизация протекает непосредственно в процессе горячего деформирования и вносит существенный вклад в изменение уровня напряжений в заготовке. Определив параметры кинетики данного процесса, становится возможным управление процессом зернообразования и формирования необходимой микроструктуры.

Процесс динамической рекристаллизации протекает в несколько этапов. Начальная стадия сопровождается непрерывным ростом напряжения текучести в результате увеличения плотности дислокаций. При достижении критической плотности дислокаций (критическая степень деформации) наблюдается снижение скорости деформационного упрочнения, которая становится равной нулю при достижении пикового значения напряжения текучести. В этот момент над процессами деформационного упрочнения начинают преобладать процессы разупрочнения.

Дальнейшее увеличение степени деформации приводит к снижению напряжения текучести и выходу его на установившийся уровень. Наличие установившейся стадии при горячей деформации можно рассматривать как ее основное отличие от холодной деформации [1]. Начальный процесс деформационного упрочнения сопровождается увеличением плот-

* Исследование проведено в рамках реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 (соглашение № 074-02-2018-329 от 16 мая 2018 г.).

ности дислокаций и началом формирования ячеистой структуры. Дислокационные петли распространяются от источников Франка—Рида, находящихся внутри ячеек. Пересечение дислокационных петель с другими дислокациями вызывает образование порогов, которые порождают точечные дефекты при дальнейшем движении дислокаций, что способствует переползанию краевых дислокаций [2]. Спад уровня напряжений вызван аннигиляцией дислокаций противоположных знаков в стенках ячеек.

Установившаяся стадия может быть охарактеризована равновесием между возникающими и аннигилируемыми дислокациями. Основные особенности данной стадии — равноосность и постоянство субзерен, а также неизменные углы разориентировки между ними.

**Методика экспериментального исследования.** Проведено исследование реологических свойств в процессе горячей пластической деформации на примере стали 20. В качестве метода экспериментального исследования выбрана горячая осадка между плоскими бойками, изготовленными из твердого сплава. Выбранная методика проведения эксперимента позволяет достичь высоких степеней деформации и обеспечить точное описание процессов упрочнения и разупрочнения. Испытание на сжатие позволяет достичь высоких степеней деформации, что необходимо для точного описания процессов, протекающих во время горячей деформации [3].

Цилиндрические образцы из стали 20 имели следующие размеры: длина $l$ = 15 мм, диаметр $d$ = 10 мм. Такая геометрия выбрана для обеспечения наибольшей устойчивости образцов во время деформирования, поскольку в работе [4] показано, что при соотношении $\frac{l}{d} > 2$ возможна потеря устойчивости.

При этом изотермическая деформация сжатием осуществлялась с истинной логарифмической степенью деформации 0,8:

$$\varepsilon = 2\ln\left(\frac{d_0 + \Delta d}{d_0}\right), \qquad (1)$$

где $d_0$ — исходный диаметр образца; $\Delta d$ — изменение размера образца в процессе деформирования.

Степень деформации определяли непосредственным измерением диаметра образца с использованием датчика поперечной деформации CGauge комплекса Gleeble 3500.

Нагрев осуществляли до температуры 1200 °С, а затем образец охлаждали до температуры деформации, которая изменялась в следующем диапазоне 1200; 1150; 1100; 1000 и 900 °С. Более мелкий шаг изменения температуры в интервале 1200...1100 °С (50 °С) выбран для получения более достоверной информации о влиянии температуры на зависимость напряжения текучести от степени деформации.

Скорость деформации составляла: 0,01; 0,1; 0,5; 1 и 5 $с^{-1}$.

Для уменьшения коэффициента трения на границе контакта образец—боек и предотвращения бочкообразования использовали высокотемпературную противозадирную никелевую смазку.

**Результаты экспериментального исследования.** В соответствии с методикой проведения эксперимента определены экспериментальные зависимости напряжения текучести σ от степени деформации ε при различных температурно-скоростных условиях деформирования (рис. 1).

На всех полученных экспериментальных зависимостях напряжения текучести от степени деформации наблюдается наличие пикового значения напряжения текучести, что свидетельствует о протекании процесса динамической рекристаллизации. Только при температуре деформации 900 °С и скорости деформации 5 $с^{-1}$ в процессе деформирования наблюдается непрерывный рост напряжений, при этом единственным механизмом перераспределения и частичной аннигиляции дислокаций является динамический возврат [5, 6]. На всех экспериментально полученных зависимостях $\sigma = f(\varepsilon)$, за исключением $T$ = 900 °С и $\varepsilon$ = 5 $с^{-1}$, наблюдается выход на установившийся уровень напряжений, который свидетельствует о равенстве скоростей процессов упрочнения и разупрочнения.

**Методика математического описания реологических зависимостей.** Полученные экспериментальные зависимости напряжения текучести от степени, скорости и температуры деформации использованы для определения коэффициентов следующей системы уравнений:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \left[\sigma_{sat}^2 + \left(\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2\right)\exp(-\Omega\varepsilon)\right]^{0,5}, \\ \varepsilon < \varepsilon_c; \\ \sigma_p - \left(\sigma_p - \sigma_{ss}\right)\left(1 - \exp\left[-K\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^N\right]\right), \\ \varepsilon > \varepsilon_c. \end{cases} \qquad (2)$$

Система уравнений (2) состоит из двух уравнений. Первое уравнение системы (2) позволяет описать участок деформационного упрочнения и разупрочнение за счет динамического возврата, в него входят параметры: $\sigma_{sat}$ — установившееся напряжение в результате динамического возврата; $\sigma_0$ — условный предел текучести; Ω — параметр, характеризующий процесс деформационного упрочнения; $\varepsilon_c$ — критическая степень деформации.

После того, как значение степени деформации во время деформирования превысит кри-

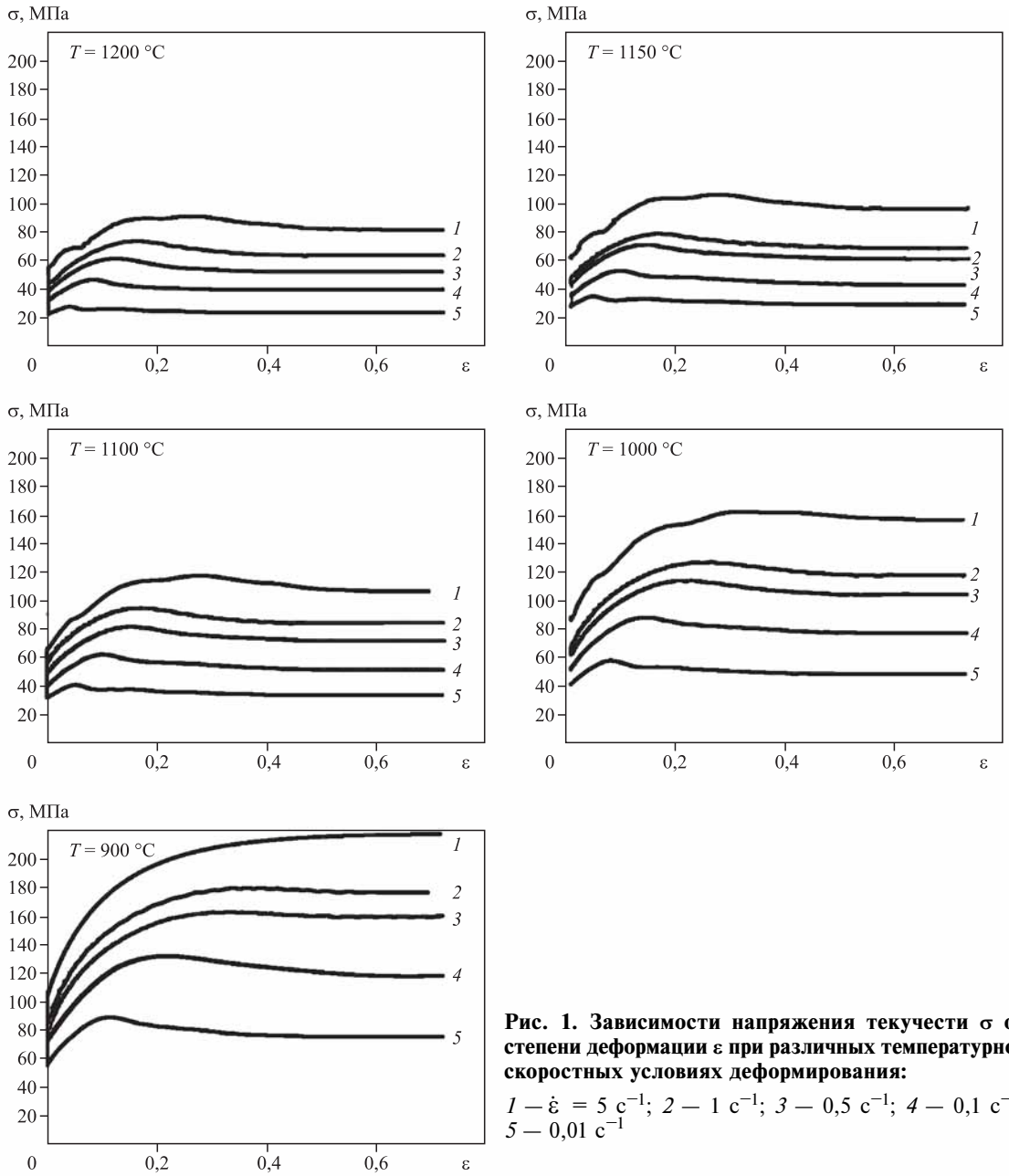



**Рис. 1. Зависимости напряжения текучести σ от степени деформации ε при различных температурно-скоростных условиях деформирования:**

*1* — $\dot{\varepsilon}$ = 5 с$^{-1}$; *2* — 1 с$^{-1}$; *3* — 0,5 с$^{-1}$; *4* — 0,1 с$^{-1}$; *5* — 0,01 с$^{-1}$

тическое значение, для описания реологических свойств сталей необходимо использовать второе уравнение системы (2). Оно позволяет описать изменение реологических свойств стали после достижения критической степени деформации. С помощью второго уравнения системы (2) становится возможным описание процесса разупрочнения и определения доли рекристаллизованной структуры в результате протекания процесса динамической рекристаллизации. В эту часть системы уравнений входят следующие параметры: $\sigma_p$ — пиковое значение напряжения текучести; $\sigma_{ss}$ — установившееся напряжение текучести; $\varepsilon_p$ — степень деформации, соответствующая пиковому значению напряжения текучести; $K$, $N$ — параметры, характеризующие кинетику процесса рекристаллизации.

Необходимо установить связь параметров, входящих в систему уравнений (2), с параметром Зинера—Холломона ($Z$), характеризующим температурно-скоростные параметры деформации:

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \qquad (3)$$

где $Q$ — энергия активации, кДж/моль; $R$ — универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/(моль·К)); $T$ — абсолютная температура, К.

Следующим этапом исследования является установление связи параметров, входящих в уравнение (2), и параметра $Z$ (рис. 2).

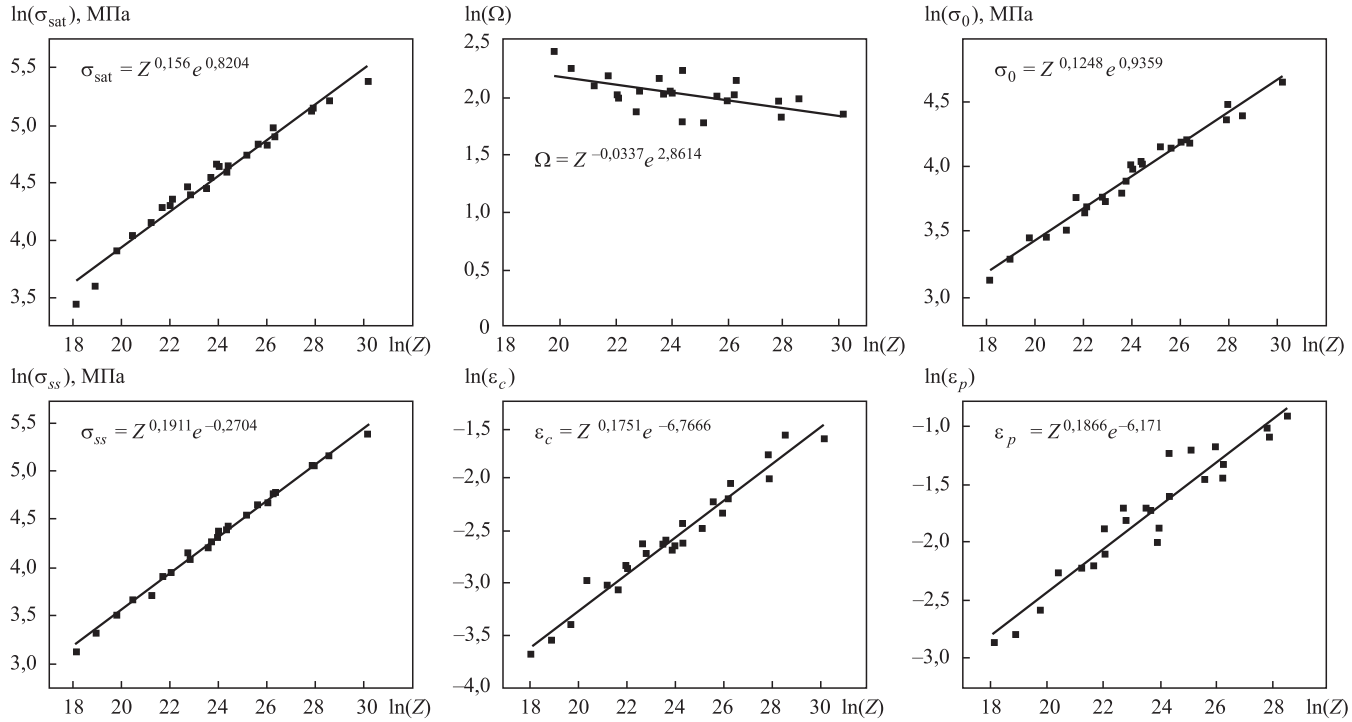



**Рис. 2. Зависимости параметров модели от параметра Зинера—Холломона**

Условный предел текучести определяется при остаточной деформации 0,02 % от общей степени деформации.

Установившееся напряжение текучести $\sigma_{ss}$ соответствует точке на экспериментальной кривой текучести, когда напряжение текучести перестает изменяться.

Параметры модели, такие как $\sigma_{sat}$ и $\Omega$, определяли по методу наименьших квадратов при описании экспериментальной зависимости напряжения текучести от степени деформации на участке от точки, соответствующей условному пределу текучести, до точки, соответствующей критической степени деформации, с использованием первого уравнения системы (2).

После определения условного установившегося напряжения в результате протекания процесса динамического возврата, а также установившегося напряжения текучести возможна оценка кинетики протекания процесса динамической рекристаллизации по следующей математической зависимости:

$$X_d = \frac{\sigma_c - \sigma}{\sigma_{sat} - \sigma_{ss}}, \qquad (4)$$

где $X_d$ — доля рекристаллизованной структуры; $\sigma_c$ — напряжение текучести, соответствующее критической степени деформации.

Кроме уравнения (4) кинетика процесса динамической рекристаллизации может быть описана с применением другой зависимости, представленной во втором уравнении системы (2):

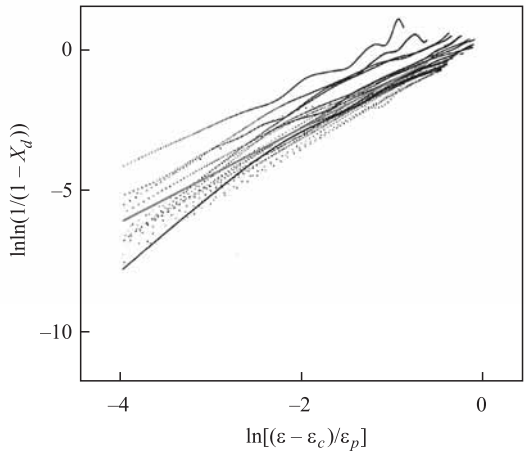



**Рис. 3. Зависимость $\ln\ln(1/(1 - X_d))$ от $\ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]$ для всего набора экспериментальных данных**

$$X_d = 1 - \exp\left(-K\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^N\right). \qquad (5)$$

Для определения коэффициентов $K$ и $N$ приравнены уравнения (4), (5) и прологарифмированы обе части уравнения для построения графической зависимости вида $\ln\ln\left(\frac{1}{1 - X_d}\right)$ от $\ln\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)$ (рис. 3). Коэффициенты в уравнении линейной зависимости, используемой для аппроксимации этой группы кривых, будут соответствовать численным значениям $K$ и $N$: 0,59737 и 1,678 соответственно.

Подставив в систему уравнений 2 определенные зависимости переменных $\sigma_{sat}$, $\Omega$, $\sigma_0$, $\sigma_{ss}$, $\varepsilon_c$, $\varepsilon_p$ от параметра $Z$, получим:

$$\sigma(\varepsilon)=\begin{cases}\left[\left(Z^{0,156}e^{0,8204}\right)^2+\left(\left(Z^{0,1248}e^{0,9359}\right)^2-\left(Z^{0,156}e^{0,8204}\right)^2\right)e^{-\left(Z^{-0,0337}e^{2,8614}\right)\varepsilon}\right]^{0,5}, & \varepsilon<\varepsilon_c;\\ \left(\dfrac{Z}{e^{-1,66}}\right)^{\frac{1}{5,85}}-\left(\left(\dfrac{Z}{e^{-1,66}}\right)^{\frac{1}{5,85}}-\left(Z^{0,1911}e^{-0,2704}\right)\right)\left(1-e^{-0,59737\left(\frac{\varepsilon-\left(Z^{0,1751}e^{-6,7666}\right)}{\left(Z^{0,1866}e^{-6,171}\right)}\right)^{1,678}}\right), & \varepsilon>\varepsilon_c.\end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, получена система уравнений, позволяющая описать реологические свойства стали 20 при горячей пластической деформации, а именно установлена связь напряжения текучести и параметров деформирования, таких как скорость, степень и температура деформации.

Показано, что зависимость напряжения текучести от степени деформации, рассчитанная с использованием уравнения (6), хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 4).

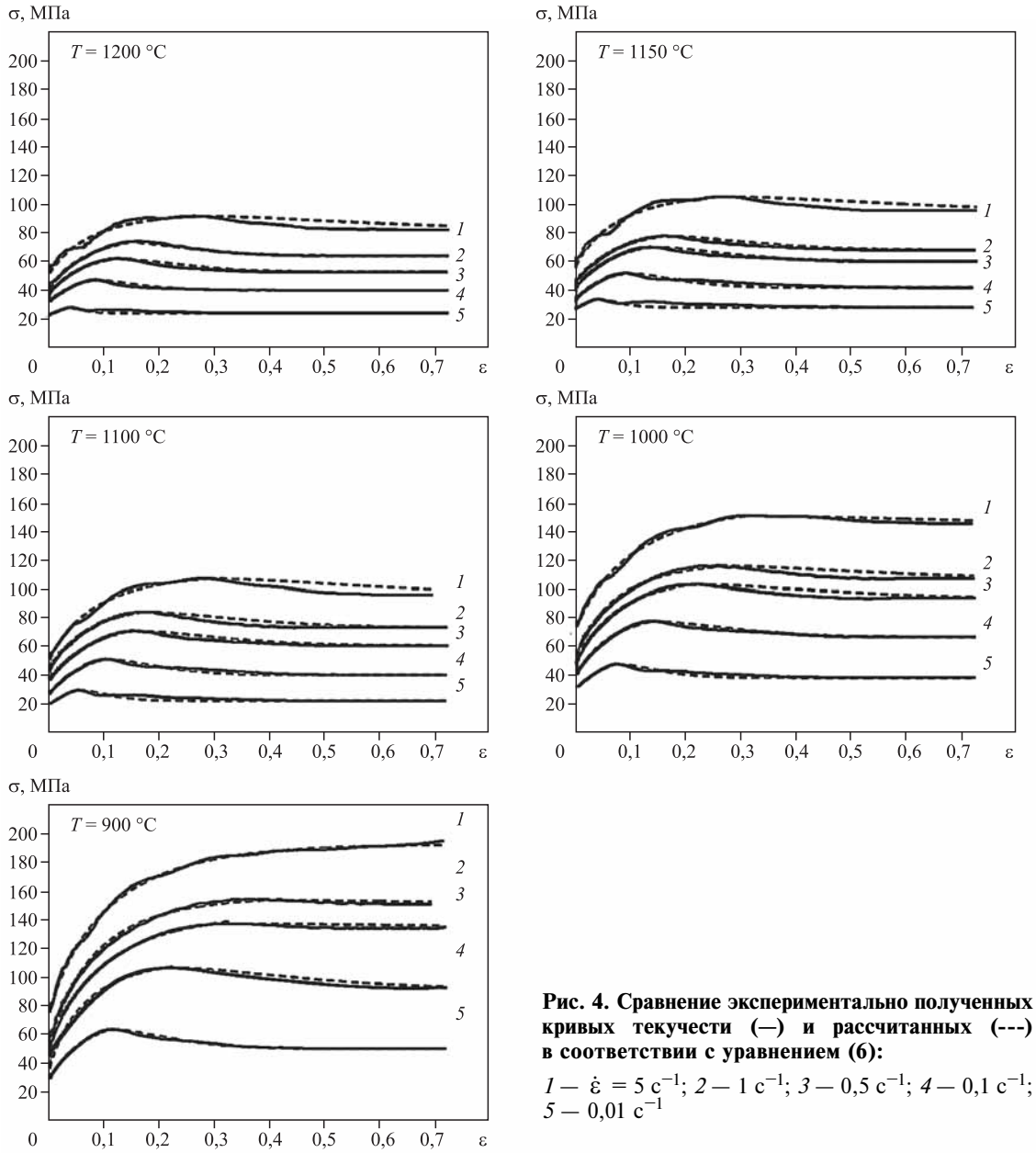



**Рис. 4. Сравнение экспериментально полученных кривых текучести (—) и рассчитанных (---) в соответствии с уравнением (6):**

*1* — $\dot{\varepsilon}$ = 5 с$^{-1}$; *2* — 1 с$^{-1}$; *3* — 0,5 с$^{-1}$; *4* — 0,1 с$^{-1}$; *5* — 0,01 с$^{-1}$

## Выводы

1. С применением современного исследовательского комплекса Gleeble 3500 получены экспериментальные зависимости напряжения текучести от степени деформации при различных скоростях и температурах деформации, на которых отчетливо видны основные этапы протекания процесса горячей деформации: деформационное упрочнение, динамический возврат и рекристаллизация.

2. На основе анализа экспериментальных данных для стали 20 получены численные значения коэффициентов, входящих в систему уравнений (2).

3. Формализована система уравнений (6), описывающая реологические свойства стали 20, которую можно применять в системах управления станами для своевременного прогнозирования свойств. Полученную систему уравнений можно легко интегрировать в существующие программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, такие как Deform 3D, Qform, SIMULIA Abaqus.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пуарье Ж.П.** Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. Пер. с фр. М.: Металлургия, 1982. 272 с.

2. **Пуарье Ж.П.** Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 287 с.

3. **Исследование** процесса динамической рекристаллизации в углеродистых сталях при горячей деформации на основании физического моделирования на комплексе Gleeble 3500 / А.С. Ишимов, М.П. Барышников, М.С. Жеребцов, Ю.Ю. Ефимова, О.А. Никитенко // Инновационные технологии в машиностроении и материаловедении: сб. тезисов 2-й науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: ПНИПУ, 2014. С. 30—33.

4. **Сопротивление** деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин, М.Я. Бровман, А.Ф. Мельников. М.: Металлургия, 1964. 261 с.

5. **Физическое** моделирование деформационного измельчения структуры углеродистой стали с использованием комплекса Gleeble 3500 / А.С. Ишимов, М.В. Чукин, О.А. Никитенко, Ю.Ю. Ефимова, Н.В. Копцева, М.П. Барышников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 10: в 2 ч. Ч. 2. С. 18—27.

6. **К вопросу** выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации / А.С. Ишимов, М.П. Барышников, М.В. Чукин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 43—50.

*Михаил Павлович Барышников, канд. техн. наук;*
*Алексей Сергеевич Ишимов, канд. техн. наук,*
TTSoprano.A@gmail.com;
*Анна Михайловна Барышникова*

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

**"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"**

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

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

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

УДК 621.771

**К.Г. Пивоварова, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Влияние технологических свойств смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали при волочении

*Рассмотрен современный метод оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов для волочения калиброванной стали с использованием синхронного термического анализа. Приведены особенности методики проведения эксперимента и обработки опытных данных с помощью калориметрических и термогравиметрических кривых. Предложены показатели оценки термической и термоокислительной стабильности смазочных материалов, позволяющие определять температурный диапазон работоспособности и потенциальный ресурс их применения при увеличении скорости волочения, способствующей значительному разогреву контактных поверхностей. Исследовано влияние различных смазочных материалов (СВС-У и И-5А) на термическую и термоокислительную стабильность. Показано, что термоокислительная стабильность смазок для сухого волочения выше, чем индустриальных масел. Установлено влияние термоокислительной стабильности смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали.*

**Ключевые слова:** смазочный материал; термоокислительная стабильность; кривые ДСК; кривые ТГ; калиброванная сталь; качество поверхности.

*Some advanced techniques for analysing the performance of lubricants for drawing of calibrated steel based on simultaneous thermal analysis are considered and the approach to conducting experiments and processing the experimental data using calorimetry and thermogravimetric curves are given. Criteria for evaluating of the thermal and thermal oxidation stability of lubricants are proposed, allowing to determine the lubricants' temperature range of performance and how long they can potentially last at higher drawing speed associated with high temperatures of friction surfaces. The effect of different types of lubricants (such as I-5A and SVS-U) on the thermal and thermal oxidation stability. It is shown that thermal oxidation stability of dry drawing lubricants is higher than of industrial oils. Relationship between the thermal oxidation stability of lubricants and the surface quality of calibrated steel is established.*

**Keywords:** lubricant; thermal oxidation stability; DSC curves; TGA curves; calibrated steel; surface quality.

**Введение.** Эффективность развития металлообрабатывающих отраслей промышленности во многом зависит от темпов наращивания мощностей по производству качественной калиброванной стали. Под качеством калиброванной стали понимают весь комплекс ее потребительских свойств: механические свойства, шероховатость поверхности, точность размеров, макро- и микроструктуру, минимальную кривизну, отсутствие дефектов.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к качеству поверхности калиброванной стали, оказывающей существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин: износостойкость, сопротивление усталости, стабильность посадок, коррозионную стойкость и др. Уровень требований регламентируется ГОСТ 1051, ГОСТ 14955 и техническими условиями. Среди показателей, характеризующих качество поверхности, особое место занимают параметры шероховатости, а именно, среднее арифметическое отклонение профиля *Ra* [1].

Формирование параметров шероховатости поверхности калиброванной стали является сложной комплексной проблемой, включающей в себя вопросы подготовки поверхности заготовки и инструмента, а также выбора смазочных материалов. При волочении калиброванной стали в качестве смазочных материалов используют сухие порошкообразные мыла, преимущественно

натриевые [2—4], водные эмульсии [5], масляные и консистентные смазки [6].

Особенность процесса волочения состоит в том, что значительная часть энергии в результате внешнего трения и пластической деформации превращается в теплоту, которая нагревает деформируемый металл, волоку и смазочный материал. В очаге деформации при волочении давления достигают 1000...10 000 МПа, температура — 200...300 °С.

Однако по исследованиям Е.В. Пальмова температура на контактной поверхности волоки может достигать 600 °С, а по данным Р.Б. Красильщикова даже 750...800 °С. Хотя такие температуры сохраняются недолго, они отрицательно сказываются на эффективности смазочных материалов. Повышение температуры приводит к изменению реологических свойств смазочных материалов (вязкости, предела прочности на сдвиг и др.), ухудшению условий их прохождения через очаг деформации и частичному выгоранию (окислению), что нарушает условия волочения и способствует ослаблению экранирования смазочным материалом поверхности деформируемой стали. При этом сглаживание микрорельефа поверхности металла улучшается, но возрастает опасность появления задиров, рисок и других поверхностных дефектов [7, 8].

Способность смазочных материалов противостоять окислению в тонком слое при повышенных температурах и давлениях (термоокислительная стабильность) является одной из важнейших эксплуатационных характеристик [9, 10]. С повышением температуры термоокислительная стабильность уменьшается, это будет приводить к повышению вязкости смазочных материалов, а следовательно, окажет влияние на качество поверхности деформируемого металла.

*Цель работы* — изучение влияния термоокислительной стабильности смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали при волочении, в частности, на параметр шероховатости поверхности *Ra*.

**Материалы и методики исследования.** В качестве объекта исследования выбраны смазочные материалы, широко применяемые при волочении калиброванной стали: смазка для сухого волочения СВС-У (ТУ 113-07-11.075—91) и индустриальное масло И-5А (ГОСТ 20799). В ОАО "ММК-МЕТИЗ" смазку для сухого волочения СВС-У применяют на стане барабанного типа В-1/750, индустриальное масло И-5А — на волочильном стане "Шумаг" (тип KZ-RP-IB).

Исходной заготовкой для экспериментального волочения калиброванной стали служил горячекатаный прокат из стали 40 диаметром 17,0 мм, химический состав которого следующий, % мас.: 0,41 C; 0,23 Si; 0,60 Mn; 0,016 S; 0,014 P; 0,12 Cr; 0,08 Ni.

Калиброванную сталь получали в калибровочном цехе ОАО "ММК-МЕТИЗ" по традиционной технологической схеме: из бунта в бунт на стане В-1/750; из бунта в пруток на стане "Шумаг". Опытное волочение проводили со степенью деформации 11,4 %. По результатам численного расчета температурных полей при волочении калиброванной стали были определены скорости волочения, обеспечивающие в очаге деформации температуру 300 °С: для стана В-1/750 скорость волочения составила 70 м/мин; для стана "Шумаг" — 30 м/мин [11—14].

Параметр шероховатости поверхности *Ra* в продольном направлении измеряли на базовой длине 0,8 мм по периметру образцов на четырех трассах по восемь повторений на каждой с помощью профилометра PGN-l (Mahr GmbH, Германия) по ГОСТ Р ИСО 4287—2014.

Термоокислительную стабильность смазочных материалов определяли на приборе синхронного термического анализа STA Jupiter 449 F3, предназначенного для проведения при одном измерении образца одновременно *дифференциальной сканирующей калориметрии* (ДСК) и *термогравиметрического анализа* (ТГ). При измерении автоматически фиксировались кривые изменения массы (ТГ) и кривые изменения теплового потока (ДСК). Полученные данные обрабатывались с помощью программы Netzsch Proteus Analysis.

Термические кривые смазочных материалов массой 3,0...3,5 мг записывали со скоростью 10 °С/мин в потоке воздуха (30 см$^3$/мин) при повышении температуры от комнатной до 600 °С. Исследования проводили в корундовых тиглях (прокаленных при 600 °С). В качестве эталона использовали пустой корундовый тигель. Тигли закрывали крышками с небольшим отверстием для того, чтобы избежать деформации и разрыва тигля в результате термического расширения газа.

Термическую стабильность определяли по температуре начала окисления смазочных материалов, термоокислительную стабильность — по потере массы в интервале от 130 до 300 °С.

**Результаты исследования и их обсуждение.** На термограмме смазки для сухого волочения СВС-У (рис. 1) видно, что во время нагрева образца уже при температуре около 50 °С (кривая *2*) начинается незначительный эффект потери массы, который продолжается до 130 °С, что связано с испарением

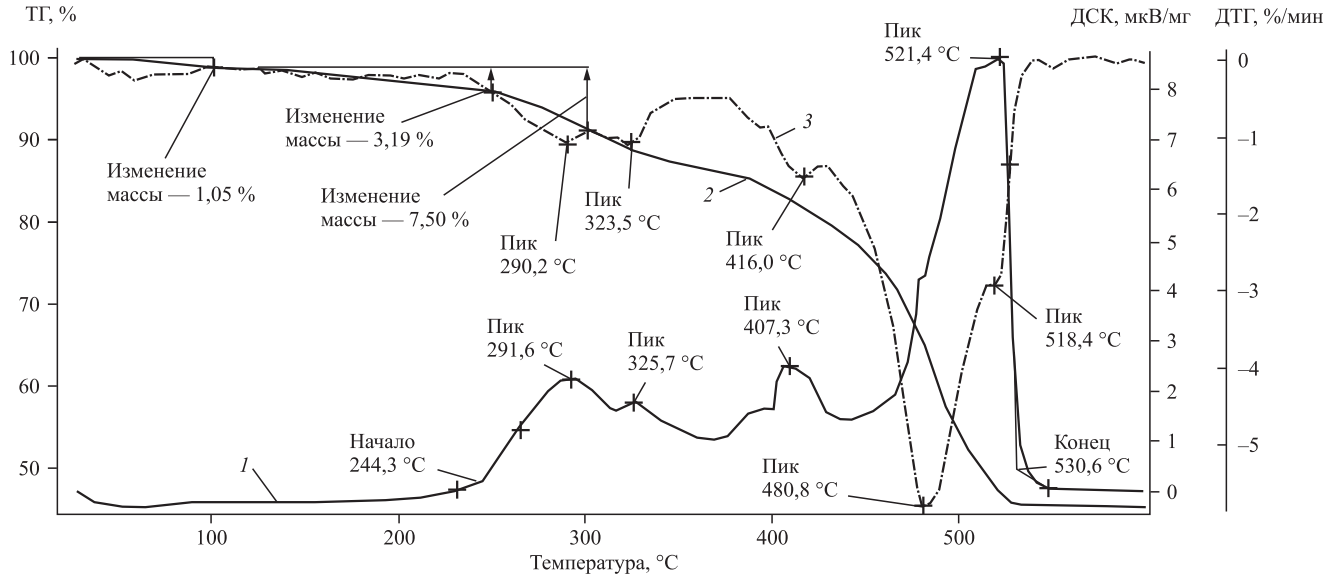



**Рис. 1. Термограмма смазки для сухого волочения СВС-У:**
*1* — кривая ДСК; *2* — кривая ТГ; *3* — кривая ДТГ

влаги (1,05 %). Свыше 200 °С потери массы образца значительно увеличиваются. При этом на кривой ДСК в диапазоне температур 200...600 °С фиксируется ряд экзотермических эффектов (при 290, 324, 407 и 521 °С), соответствующих выгоранию смазки СВС-У. Начало ее окисления отмечается при температуре 244 °С, потери массы при этом составляют 3,2 %. Процесс выгорания смазки СВС-У многоступенчатый и на каждой стадии он протекает с различной скоростью. Максимальная скорость выгорания фиксируется в диапазоне температур 450...550 °С при 481 и 518 °С (кривая *3*). Наличие на кривой ДТГ высокотемпературного плеча при 518 °С свидетельствует о наличии в составе смазки СВС-У триглециридов или высокомолекулярных эфиров, обеспечивающих ей высокую смазывающую способность.

В диапазоне температур 300...450 °С максимальная скорость выгорания индустриального масла И-5А (рис. 2) отмечается при температуре 400 °С (кривая *3*), что характерно для углеводородных масел. Термическая стабильность масла И-5А, определенная по температуре начала окисления первого экзотермического пика,

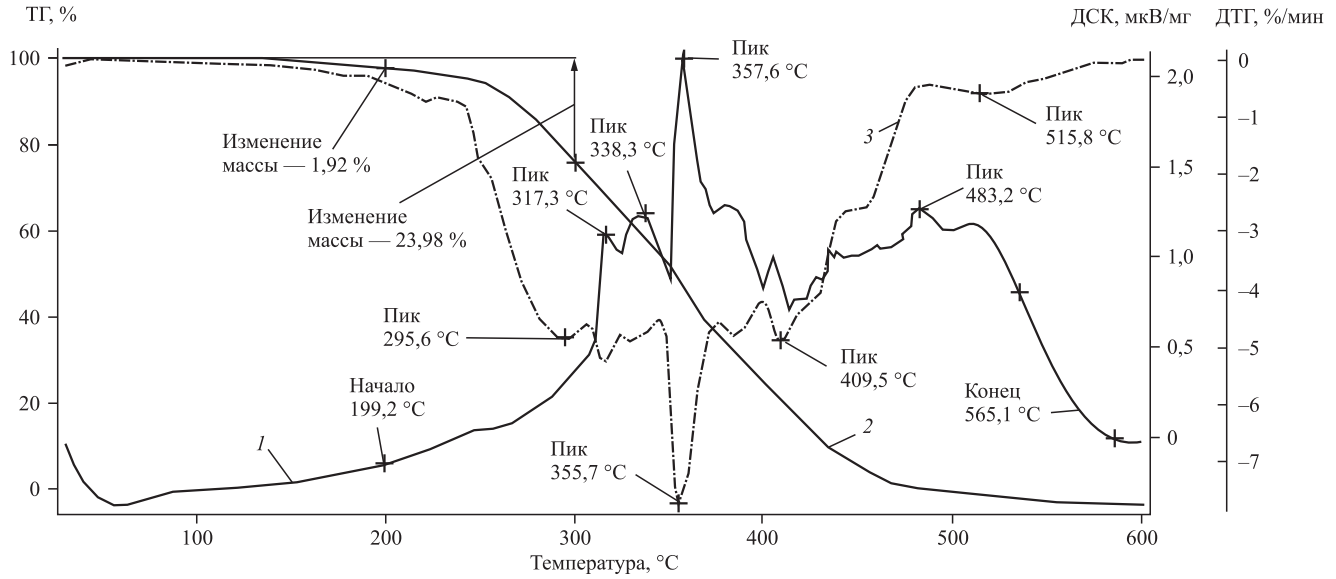



**Рис. 2. Термограмма индустриального масла И-5А:**
*1* — кривая ДСК; *2* — кривая ТГ; *3* — кривая ДТГ

**Влияние термоокислительной стабильности смазочных материалов на шероховатость поверхности калиброванной стали**

| Смазочный материал | Термоокислительная стабильность, % (потери массы при температуре 300 °С) | Параметр шероховатости поверхности *Ra*, мкм | |
|---|---|---|---|
| | | заготовки | калиброванной стали |
| СВС-У | 7,5 | 3,9 | 1,9 |
| И-5А | 24,0 | | 1,4 |

составляет 199 °С. Свыше температуры 200 °С индустриальное масло И-5А начинает интенсивно окисляться, что подтверждается наличием экзотермических эффектов на кривой ДСК (при 317, 338, 357 и 483 °С). При этом в диапазоне температур 200...450 °С на кривой ТГ фиксируются значительные потери массы, которые составляют 95 %. Скорость выгорания индустриального масла И-5А максимальна при температуре 356 °С.

Результаты термоаналитических исследований показали, что термическая устойчивость смазки для сухого волочения СВС-У выше, чем индустриального масла И-5А, и составляет 242 и 199 °С соответственно. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами работы [15], авторы которой считают, что органические вещества являются термически стабильными, если при температурах эксплуатации их потери массы не превышают более 5 %. Для смазки СВС-У эта величина потерь массы наблюдается при температуре 265 °С, для индустриального масла И-5А — при 230 °С.

Результаты термоокислительной стабильности (см. таблицу) показали, что в случае повышения температуры в очаге деформации при волочении до 300 °С индустриальное масло И-5А будет выгорать быстрее, чем смазка для сухого волочения СВС-У. При этом толщина смазочной пленки индустриального масла И-5А в результате выгорания будет уменьшаться, что приведет к более интенсивному сглаживанию микрорельефа поверхности металла. Это также подтверждено экспериментальными результатами (см. таблицу), согласно которым параметр шероховатости поверхности *Ra* калиброванной стали после волочения с применением масла И-5А меньше, чем при использовании смазки СВС-У. Однако на поверхности калиброванной стали, полученной с использованием смазки И-5А, обнаружены риски и задиры. Следовательно, смазки с низкой термоокислительной стабильностью не обеспечивают высокое качество поверхности при высоких скоростях и температурах.

Смазка для сухого волочения СВС-У имеет высокую термоокислительную стабильность, что способствует отсутствию поверхностных дефектов на поверхности калиброванной стали, и ее можно использовать при высоких скоростях и температуре волочения, если к качеству поверхности калиброванной стали не предъявляется высоких требований по параметру шероховатости *Ra*.

**Заключение.** Показана возможность исследования термоокислительной стабильности технологических смазок термогравиметрическим методом при непрерывном изменении температуры испытаний, позволяющим определить температурные параметры процесса окисления, интенсивность и скорость их протекания, а также оценить потенциальный ресурс их применения для получения калиброванной стали с высокими потребительскими свойствами.

Установлено, что высокое качество поверхности калиброванной стали достигается при использовании смазки СВС-У при режимах волочения, обеспечивающих в очаге деформации температуры 242...265 °С, или индустриального масла И-5А при режимах волочения, обеспечивающих в очаге деформации температуры 199...230 °С.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Корчунов А.Г.** Производство калиброванного металла со специальной отделкой поверхности // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 7. С. 35—40.

2. **Корчунов А.Г., Лебедев В.Н., Пивоварова К.Г.** Прогнозирование изменения показателей качества калиброванного проката при различных режимах деформационной обработки // Сталь. 2012. № 2. С. 120—124.

3. **Перспективы** производства калиброванного проката / Е.Л. Кандауров, С.В. Кривощеков, А.Д. Носов и др. // Сталь. 2005. № 1. С. 70—71.

4. **Совершенствование** производства калиброванного и обточенного проката из автоматных и легированных сталей / С.М. Вершигора, А.А. Черняк, В.П. Рудаков, А.А. Чупин // Сталь. 2004. № 2. С. 39—40.

5. **Владимиров Ю.В.** Современное зарубежное механическое оборудование для производства калиброванного металла // Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1991. № 11. С. 29—56.

6. **Зайдес С.А.** Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1992. 200 с.

7. **Способ** формирования микрогеометрии поверхности катанки и мелкого сорта: пат. 2196650 Рос. Федерация: МПК[7] В 21 В 1/16 / С.И. Платов, Д.В. Терентьев, В.Н. Урцев, С.А. Морозов, А.А. Макарчук,

В.С. Славин; заявитель и патентообладатель ЗАО "Техномаг". № 2001117476/02; заявл. 27.06.01; опубл. 20.01.03, Бюл. № 2. 3 с.

8. **Корчунов А.Г.** К вопросу обеспечения качества продукции в технологиях метизного производства // Металлург. 2008. № 10. С. 67—72.

9. **Mang T., Bobzin K., Bartels T.** Industrial tribology: tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 644 p.

10. **Безбородов Ю.Н.** Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных масел по параметрам термоокислительной стабильности: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.11.13; Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2009. 40 с.

11. **Корчунов А.Г., Константинов Д.В.** Моделирование процесса волочения проволоки с учетом зависимости коэффициента трения от температуры контактной поверхности // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 4. С. 16—23.

12. **Влияние** скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали / М.Н. Верещагин, Ю.Л. Бобарикин, А.Н. Савенок, А.В. Веденеев, М.Ю. Целуев, О.И. Игнатенко // Литье и металлургия. 2008. № 1 (45). С. 40—48.

13. **Korchunov A., Polyakova M., Gun G.** Recovery effect in drawing of steel bar for sizing // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 676—681.

14. **Мультимасштабное** моделирование структурно-фазовых превращений в стали при волочении / Д.В. Константинов, К. Бзовски, А.Г. Корчунов, Р. Кужиак, М. Пьетчшек, О.П. Ширяев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 90—98.

15. **Павлова С.А., Журавлева И.В., Толчинский Ю.И.** Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1983. 120 с.

*Ксения Григорьевна Пивоварова, канд. техн. наук,*
k.pivovarova@magtu.ru;
*Геннадий Семёнович Гун, д-р техн. наук;*
*Алексей Георгиевич Корчунов, д-р техн. наук*

УДК 62-233.2, 62-233.3/.9

**Д.В. Терентьев[1], С.И. Платов[1], Ю.В. Жиркин[1], А.В. Козлов[2], В.С. Славин[1]**
*([1]Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова,*
*[2] Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск)*

# Повышение ресурса тяжелонагруженных узлов машин и агрегатов металлургического производства

*Представлены результаты теоретических разработок и технических решений, направленных на повышение эффективности металлургического производства за счет увеличения ресурса машин и агрегатов доменного, сталеплавильного и прокатного переделов, снижения себестоимости готовой продукции, путем разработки принципиально новых эффективных конструкций рабочих узлов и улучшения фрикционных условий их функционирования. Цель исследований — повышение эффективности металлургического производства вследствие обеспечения надежной эксплуатации и продления ресурса машин и агрегатов доменного, сталеплавильного и прокатного переделов научно-обоснованным выбором узлов трения, их герметизации, применяемых смазочных материалов и систем смазывания.*

**Ключевые слова:** износ; смазочные материалы; подшипниковые узлы; зубчатые зацепления; редукторы; скиповые лебедки; системы смазывания; металлургические агрегаты.

*The results of theoretical developments and engineering solutions aimed to enhance the effectiveness of metallurgical production by increasing the service life of machines and assemblies used in blast furnace, steel-smelting and rolling workshops and decreasing the total production cost of finished goods are presented. The suggested ways of achieving it are the development of brand new effective designs of units and the improvement of frictional conditions of their functioning. The research aims to enhance the effectiveness of metallurgical production by insuring dependable service and increasing the service life of machines and assemblies used in blast furnace, steel-smelting and rolling workshops. It is accomplished by scientifically grounded choice of friction units, their hermetic sealing, lubricants and systems for lubrication.*

**Keywords:** wear; lubricants; bearing parts; gearings; reduction gearboxes; hoisting machines; systems for lubrication; metallurgical assemblies.

На каждом металлургическом переделе в технологическом процессе задействованы сотни и тысячи агрегатов и рабочих узлов, от надежности и эффективности работы которых зависят объем и качество готовой продукции. Опыт создания и эксплуатации машин и оборудования показывает, что одними из основных причин выхода из строя деталей и рабочих органов являются износ и повреждение поверхностей трения. Потери от трения и износа огромны. Поэтому с точки зре-

ния экономии материальных и трудовых ресурсов борьба с износом деталей машин и, соответственно, увеличение ресурса их работы является важной и актуальной задачей.

Представленная работа является единым комплексом научно-технических разработок, направленных на решение этих задач путем разработки и совершенствования конструкций рабочих узлов трения и улучшения фрикционных условий их функционирования.

Проанализированы современные подходы увеличения ресурса тяжелонагруженных узлов трения, к которым относятся зубчатые зацепления и подшипниковые узлы, работающие в металлургических агрегатах на различных переделах.

Практически для всех предложенных моделей для определения толщины масляной пленки, коэффициента трения, а также прогнозирования износа и ресурса узлов трения недостаточно экспериментальных данных, а полученные теоретические результаты, связанные со сложностью описываемого процесса, носят противоречивый характер [1—4].

Значительные контактные напряжения, которые испытывают тела качения подшипниковых узлов и зубчатые зацепления редукторов, температурные условия эксплуатации узлов трения, наличие абразивных частиц в окружающей среде, все эти факторы изменяют первоначальные параметры применяемых смазочных материалов и требуют выбора режимов смазывания для конкретных условий эксплуатации.

Несмотря на большую номенклатуру применяемых в настоящее время смазочных материалов, присадок к ним и систем смазывания, практически отсутствуют методики по подбору эффективных смазочных материалов, систем и режимов смазывания тяжелонагруженных узлов трения металлургических агрегатов в зависимости от условий их работы.

В связи с этим необходимо развивать практическую методологию исследований для решения перечисленных проблем.

В качестве основных узлов трения, работающих в металлургических агрегатах, в работе приняты зубчатые зацепления и подшипники качения, при этом проведена комплексная оценка процессов взаимодействия контактируемых поверхностей узлов трения [5—22].

Для анализа процесса износа узлов трения использовали основы контактной гидродинамики для проведения эластогидродинамических расчетов неконформных пар трения и за основу взят параметр $\lambda$ [3], характеризующий режим трения в контактах, который равен отношению толщины $h_0$ смазочного слоя к приведенному среднеквадратичному значению параметра шероховатости $Ra$ поверхностей контактирующих тел.

Данный параметр $\lambda \geqslant 4$ является основным условием реализации режима эластогидродинамической (жидкостной) смазки и его возможно достичь только при определенной толщине $h_0$ масляной пленки в зоне контактирующих поверхностей.

При этом впервые предложено при определении параметра $\lambda$ учитывать маслоемкость поверхности, т.е. не только высотные, но и шаговые параметры микрорельефа контактируемых поверхностей и параметры опорной кривой [15].

Для физического моделирования процессов, происходящих в силовых зубчатых передачах при различных условиях нагружения и смазывания, был сконструирован и изготовлен лабораторный стенд с замкнутым силовым контуром [13].

Технические характеристики лабораторного стенда обеспечивают возможность моделирования процессов, протекающих в реальных объектах. В качестве одних из таких объектов моделирования были выбраны зубчатые зацепления большого и малого редукторов скиповой лебедки доменной печи. Выбор данных редукторов был обусловлен тем, что их зубчатые зацепления являются тяжелонагруженными и работают в условиях высоких контактных напряжений, что вызывает разогрев зубьев, поэтому знание характера изменения свойств смазочных материалов в процессе эксплуатации является важным для увеличения ресурса редукторов и скипового подъемника.

Исследования по физическому моделированию позволили получить результаты, которые были использованы при разработке усовершенствованных уплотнительных устройств и систем смазывания редукторов скиповых лебедок доменного цеха ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ПАО "ММК") [19, 20, 23].

В частности, было предложено повысить класс вязкости масел, используемых для смазывания зубчатых зацеплений, до 220...460 с учетом нагрева зубьев в процессе эксплуатации. Успешно прошли промышленные испытания циркуляционные системы смазывания. Внедрение предложенных решений позволило сократить расход смазочных материалов, применяемых в редукторах, в среднем на 30 % и повысить ресурс зубчатых зацеплений в 1,2—1,3 раза.

Для моделирования процессов смазывания подшипниковых узлов использована установка, устройство и работа которой представлены в работе [19].

Технические характеристики данного лабораторного стенда обеспечивают возможность моделирования процессов, протекающих в подшипниковых узлах реальных промышленных объектов, таких как ролики МНЛЗ, опоры прокатных валков станов горячей и холодной прокатки и т.п.

На данной экспериментальной установке проведены исследования процессов фрикционного взаимодействия в подшипниковых узлах роликовых секций МНЛЗ, подшипниках рабочих валков чистовой группы клетей и отводящего рольганга стана 2000 горячей прокатки, подшипниках промежуточных роликов реверсивного стана 2500 холодной прокатки ПАО "ММК".

Известно, что триботехнические и физико-химические свойства смазочных материалов в значительной степени зависят от условий эксплуатации узлов трения, в которых они используются. Вопрос сохранения требуемых свойств смазочных материалов особо остро стоит для узлов трения, работающих в экстремальных условиях: высоких температурах, повышенном содержании абразивных частиц в окружающей среде, наличии агрессивных сред и т.д.

В связи с этим в рамках данной работы проведен ряд промышленных исследований и экспериментов.

В частности, выполнен мониторинг свойств пластичных и жидких смазочных материалов, применяемых для смазывания подшипниковых узлов и зубчатых зацеплений редукторов скиповых лебедок доменных печей. Исследования проводили в течение 6 месяцев эксплуатации данных редукторов, на протяжении которых периодически отбирали пробы смазочных материалов для спектрально-химического анализа. В процессе анализа определяли кинематическую вязкость минерального масла и его кислотное число КОН, для пластичного смазочного материала из подшипниковых узлов редукторов — пенетрацию при 25 °С и температуру каплепадения, также оценивали содержание механических примесей.

По результатам анализа осуществлены оценка эффективности уплотнительных узлов и интенсивность износа узлов трения и предложены конструкции усовершенствованных уплотнительных устройств подшипниковых узлов редукторов и циркуляционную систему смазывания зубчатых зацеплений порционного действия. Внедрение предложенных технических решений в условиях доменного цеха ПАО "ММК" показало их эффективность за счет снижения расхода смазочных материалов на 10...15 % и снижения износа зубчатых зацеплений и подшипников качения в 1,2—1,25 раза.

Установлено, что абразивные частицы, выносимые колошниковыми газами через засыпные аппараты доменных печей, попадают на детали и узлы механизмов колошника, скиповых подъемников и других агрегатов, образуя при этом твердые осаждения на рабочих поверхностях. Наличие абразивных частиц и твердых осаждений на трущихся поверхностях механизмов увеличивает их износ и снижает ресурс агрегатов. Снижение выбросов колошниковой пыли различных фракций и уменьшение твердых осаждений являются важными задачами, для решения которых были проведены исследования характера образования твердых осаждений и предложены пути снижения количества абразивных частиц, выносимых колошниковыми газами.

Для решения поставленных задач проведены аналитические исследования количества колошниковой пыли, выносимой через неплотности засыпного аппарата, в зависимости от температуры колошниковых газов и объема доменной печи. Установлена зависимость между составляющими фракциями колошниковой пыли, температурой, монтажным зазором, шероховатостью контактных поверхностей конуса и чаши и скоростью частиц колошникового газа.

Дана количественная оценка площади впадин между параметрами шероховатости контактных поверхностей, являющимися дополнительными каналами для прохождения колошникового газа. Увеличение площади поперечного сечения зазоров между конусом и чашей при параметре шероховатости $Rz = 10$ мкм по сравнению с идеально гладкими при монтажном зазоре 0,03 мм составляет до 60 %. Более крупные фракции пыли (0,63 мм) проходят через зазоры деталей засыпных аппаратов с меньшей скоростью, чем мелкие фракции (0,048 мм). Увеличение монтажного зазора повышает скорость истечения колошникового газа. Рост параметра шероховатости обработки контактных поверхностей увеличивает общую площадь поперечного сечения контактного зазора между конусом и чашей с одновременным повышением сопротивления прохождению колошникового газа. Наиболее интенсивно на увеличение скорости частиц колошниковой пыли влияет температура колошникового газа: при ее повышении от 200 до 500 °С (в 2,5 раза) скорость частиц колошниковой пыли возрастает в 1,28 раза.

Анализ полученных результатов показал, что для доменных печей объемом 1370 м$^3$ угловые деформации нижнего кольца чаши составляют при температуре 200 °С — 12,6′ и при 500 °С — 25,2′, для доменных печей объемом 2000 м$^3$ при 200 °С — 11,2′ и при 500 °С — 23,7′. Угловые деформации нижнего кольца чаши изменяют характер контакта между конусом и чашей, образуя клинообразную щель, которая расширяется к низу контактного пояса. Увеличение зазора в нижней части кольца чаши составляет для доменных печей объемом 1370 м$^3$ при температуре 200 °С — 0,41 мм и при 500 °С — 0,82 мм, для доменных печей объемом 2000 м$^3$ при 200 °С — 0,56 мм и при 500 °С — 1,185 мм.

Увеличение зазоров повышает количество колошникового газа, проходящего через засыпные аппараты, а соответственно, и количество выносимой в атмосферу колошниковой пыли и способствует увеличению твердых осаждений на их контактных поверхностях. Образование угловой щели изменяет направление выхода колошникового газа в сторону поверхности конуса засыпного аппарата, способствуя образованию продувов на нем. Поворот нижнего кольца чаши приводит к уменьшению протяженности контакта чаши и конуса по ходу колошниковых газов и, как следствие, к уменьшению сопротивления их истечению. Таким образом, контакт чаши и конуса в процессе эксплуатации доменной печи происходит не по контактным поверхностям, а по кольцевой линии верхней части кольца чаши, что значительно ускоряет его износ в верхней части.

Увеличение объема доменных печей более 2000...3000 м$^3$ усложняет работу конусных загрузочных устройств по ряду причин. В частности, увеличение диаметра элементов профиля печи сопровождается ростом диаметра колошника, большого конуса и его чаши, соответственно увеличиваются площади контактной поверхности большого конуса и его чаши. Также увеличение площади сечения колошника и размера подачи ведет к росту сегрегации материалов по крупности, что повышает неравномерность распределения газов по окружности: увеличивается неравномерность по количеству газов и их температуре. В связи с этим для печей объемом более 2000...3000 м$^3$ повышение герметичности конусных загрузочных устройств является более актуальным.

Для улучшения герметичности засыпного аппарата рекомендуется выполнять шлифование контактной поверхности чаши с углом конусности на 15′...20′ больше по сравнению с углом конусности контактной поверхности конуса. Разница в углах наклона контактных поверхностей конуса и чаши компенсируется угловой деформацией нижнего кольца чаши в процессе эксплуатации доменной печи.

Далее были проведены промышленные исследования и эксперименты по увеличению стойкости подшипниковых узлов роликовых секций МНЛЗ.

Основной причиной выхода из строя подшипниковых опор роликов роликовых секций МНЛЗ являются температуры в зоне контакта подшипникового узла. Это происходит вследствие того, что роликовые секции работают в условиях повышенных температур, в результате чего происходит разрушение уплотнений, вытекает базовое масло из пластичного смазочного материала, а также попадают вода и механические примеси взамен базового масла, что приводит к нарушению условий реализации жидкостного трения.

Для повышения стойкости подшипниковых узлов проведены исследования по внедрению систем смазывания типа масло—воздух для подшипниковых узлов роликовых секций МНЛЗ. Проведенные в рамках диссертационной работы исследования показали, что воздух оказывает удовлетворительное охлаждающее воздействие на смазываемый узел. В среднем температуру узла можно понизить на 10...20 %. В дальнейших исследованиях была предложена усовершенствованная система смазывания, позволяющая корректировать температуру подаваемой масловоздушной смеси. Кроме этого, были разработаны усовершенствованные конструкции подшипниковых и уплотнительных узлов роликов роликовых секций, внедрение которых в условиях ККЦ ПАО "ММК" позволило увеличить межремонтный период роликовых секций в 1,3—1,4 раза и снизить расход смазочных материалов на 20 %.

Проведенный комплекс исследований, включающий в себя теоретические и экспериментальные исследования, физическое моделирование на испытательных лабораторных стендах, промышленные испытания предложенных технических решений, позволил разработать методологию модернизации и совершенствования условий эксплуатации тяжелонагруженных узлов трения металлургических агрегатов [7] (см. рисунок).

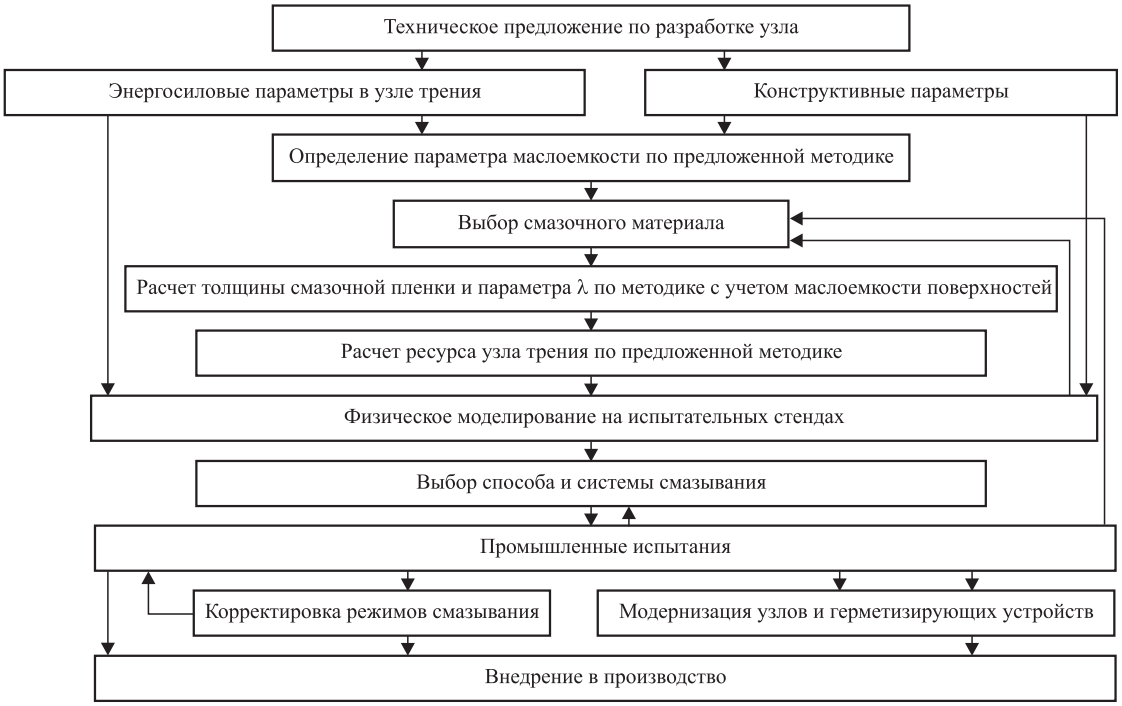
Использование данной методологии позволяет в лабораторных условиях выбирать с достаточной для практики точностью смазочные материалы и системы смазывания узлов трения металлургических агрегатов для повышения их ресурса.

**Основные результаты и выводы.** На основании выполненных исследований изложены научно-технические и технологические решения, заключающиеся в развитии методов исследования фрикционного взаимодействия и условий эксплуатации тяжелонагруженных узлов трения металлургических агрегатов, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроительной, металлургической и других отраслей промышленности.

Предложенная методология модернизации и совершенствования условий эксплуатации тяжелонагруженных узлов металлургических агрегатов дает возможность сократить время и материальные затраты на промышленные испытания смазочных материалов, выбрать систему смазывания, подходящую для конкретных условий эксплуатации узла трения, повысить ресурс агрегатов и снизить затраты на ремонт и покупку комплектующих.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработан комплекс методов физического моделирования процессов эксплуатации узлов




**Методология модернизации и совершенствования условий эксплуатации тяжелонагруженных узлов металлургических агрегатов**

трения в зависимости от применяемых смазочных материалов, систем и условий смазывания. С помощью данных методов определены:

— условия фрикционного взаимодействия зубчатых зацеплений редукторов скиповых лебедок, подшипниковых узлов роликов роликовых секций МНЛЗ, подшипников рабочих валков и роликов рольганга транспортно-отгрузочной линии стана 2000 горячей прокатки, межклетьевых роликов двухклетьевого реверсивного стана 2500 холодной прокатки;

— в лабораторных условиях оценены эффективность применения различных смазочных материалов и их влияние на ресурс узлов трения.

2. Исследовано влияние условий работы узла трения (температура, нагрузки и др.) на триботехнические и физико-химические свойства смазочных материалов в процессе эксплуатации. Установлено, что наибольшее влияние на свойства смазочных материалов оказывают температура и количество абразивных частиц в окружающей среде. Для смазочных материалов, используемых в редукторах скиповых лебедок, получено, что кислотное число в процессе эксплуатации увеличивается под воздействием высоких температур в 1,5 раза, что приводит к старению смазочного материала, повышению его вязкости в 1,1 раза, снижению пенетрации в 1,5 раза. Учет этих факторов на этапе выбора смазочного материала и системы смазывания позволяет повысить ресурс узлов трения на 20...25 %.

3. Впервые получены аналитические зависимости для определения угловых деформаций нижнего кольца чаши при различных схемах нагружения и температурных режимах эксплуатации засыпных аппаратов доменных печей. Использование данных зависимостей позволяет повысить герметичность загрузочного устройства, снизить выбросы колошниковых газов и уменьшить количество абразивных частиц, попадающих в узлы трения агрегатов доменных печей, в 1,5—2,0 раза.

4. Разработаны и внедрены в условиях доменного цеха ПАО "ММК" системы смазывания и уплотнительные устройства механизмов скиповых лебедок, предложены эффективные смазочные материалы. Предложенные технические решения позволили увеличить ресурс редукторов скиповых лебедок в 1,2—1,3 раза.

5. Разработан ряд конструкций подшипниковых узлов и пар трения роликовых секций слябовых МНЛЗ. Использование предложенных конструкций позволило увеличить герметичность узлов трения и повысить ресурс подшипниковых узлов в 2 раза.

6. Разработаны и внедрены режимы смазывания подшипниковых узлов роликовых секций слябовых МНЛЗ при использовании систем смазывания масло—воздух. Предложена усовершенствованная система смазывания. Использование этой системы позволяет поддерживать постоянную температуру в подшипниковых узлах, обеспечивая устойчивый режим

смазывания. Внедрение данных решений в условиях кислородно-конвертерного цеха позволило уменьшить расход подшипников за счет увеличения их ресурса на 170 шт. в год и сократить расход пластичного смазочного материала на 48 т в год.

7. Предложенная централизованная система смазывания подшипниковых узлов роликовых секций сортовых МНЛЗ внедрена в условиях электросталеплавильного цеха ПАО "ММК". Внедрение предложенной системы позволило снизить износ подшипниковых узлов и увеличить их ресурс и роликовых секций в 1,4 раза.

8. Модернизированы и усовершенствованы режимы смазывания, а также конструкции уплотнительных и подшипниковых узлов рабочих валков, межклетьевых роликов и рольгангов станов горячей и холодной прокатки. Предложенные решения внедрены на стане 2000 горячей прокатки и двухклетьевом реверсивном стане 2500 холодной прокатки ПАО "ММК".

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Трение**, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
2. **Подшипники качения:** справочник-каталог / под ред. В.Н. Нарышкина и Р.В. Коросташевского. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
3. **Хебда М., Чичинадзе А.В.** Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
4. **Елманов И.М.** Снижение потерь на трение и повышение долговечности тяжелонагруженных подшипников качения применением жидких смазочных материалов с высоким модулем сдвига // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 11. С. 22—26.
5. **Investigation** of interaction of carbonitrided teeth friction surfaces in gear wheels / Y.V. Zhirkin, Y.A. Puzik, V.S. Slavin, D.V. Terentyev // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 655—658.
6. **Experimental** method of calculation to estimate the thickness of lubricating film in the friction unit depending on oil absorption of contacting surfaces / D. Terentyev, N. Ogarkov, S. Platov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. Manufacturing Technologies, Tools and Equipment. 2018. No. 224. Article Number 01106. P. 1—6.
7. **Методология** модернизации и совершенствования условий эксплуатации тяжелонагруженных узлов металлургических агрегатов / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Ю.В. Жиркин // Перспективные материалы и технологии: материалы междунар. симпозиума. В 2 ч. / под ред. В.В. Рубаника. 2017. С. 254—256.
8. **Моделирование** фрикционных условий работы подшипниковых узлов слябовых УНРС с целью выбора рациональных режимов смазывания / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Ю.В. Жиркин и др. // Черные металлы. 2013. № 4 (976). С. 11—14.
9. **Исследование** и разработка режимов смазывания подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, Д.В. Терентьев, Ю.В. Жиркин и др. // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 98—100.
10. **Разработка** рациональных режимов смазывания подшипниковых узлов слябовых машин непрерывного литья заготовок / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Ю.В. Жиркин и др. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. 2014. № 1 (190). С. 164—168.
11. **Влияние** режимов эксплуатации и маслоемкости контактных поверхностей на толщину смазочной пленки в тяжелонагруженных узлах трения металлургических агрегатов / Д.В. Терентьев, Н.Н. Огарков, С.И. Платов, А.В. Козлов // Черные металлы. 2018. № 9. С. 60—64.
12. **Повышение** герметичности конусных засыпных аппаратов доменных печей / Д.В. Терентьев, Н.Н. Огарков, С.И. Платов, В.А. Некит // Черные металлы. 2017. № 6. С. 19—24.
13. **Пат. на полезную модель 88445 Российская Федерация, МПК G01M13/02.** Стенд для испытания зубчатых передач / С.И. Платов, А.М. Чумиков, Ю.В. Жиркин, О.С. Железков, Е.И. Мироненков, Д.В. Терентьев; заявитель и патентообладатель ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат". Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31.
14. **Исследование** свойств смазочных материалов при эксплуатации редукторов скиповых лебедок доменных печей / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Ю.В. Жиркин // Черные металлы. 2017. № 8. С. 34—37.
15. **Маслоемкость** контактных поверхностей в процессах обработки металлов давлением / Н.Н. Огарков, С.И. Платов, Е.С. Шеметова и др. // Металлург. 2017. № 1. С. 79—82.
16. **Повышение** надежности и долговечности деталей и узлов металлургического оборудования / С.И. Платов, Л.Е. Кандауров, О.С. Железков и др. // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 50—55.
17. **Совершенствование** режимов смазывания подшипников рабочих валков прокатных станов при использовании системы "масло—воздух" / Г.Н. Юрченко, С.И. Платов, О.С. Железков и др. // Производство проката. 2007. № 6. С. 40—42.
18. **Расчет** тел качения подшипников на контактную усталостную прочность с использованием метода конечных элементов / С.И. Платов, О.С. Железков Г.Н. Юрченко и др. // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2006. № 4. С. 73—77.
19. **Физическое** моделирование условий эксплуатации зубчатых зацеплений редукторов скиповых лебедок доменных печей / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Ю.В. Жиркин и др. // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2017. № 2. С. 208—218.
20. **Развитие** теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев и др. // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 112—114.
21. **Терентьев Д.В.** Исследование количества твердых осаждений и пути их уменьшения с целью повышения ресурса узлов и механизмов доменных печей // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 28—34.
22. **Жиркин Ю.В.** Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин: учебник. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 330 с.
23. **Investigation** of interaction of carbonitrided teeth friction surfaces in gear wheels / Y.V. Zhirkin, Y.A. Puzik, V.S. Slavin, D.V. Terentyev // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 655—658.



*Дмитрий Вячеславович Терентьев, канд. техн. наук,* ktnterentyev@mail.ru;
*Сергей Иосифович Платов, д-р техн. наук;*
*Юрий Васильевич Жиркин, канд. техн. наук;*
*Александр Васильевич Козлов, д-р техн. наук;*
*Вячеслав Семёнович Славин, д-р техн. наук*

УДК 621.785:621.771.23-022.532

**С.В. Денисов, Е.В. Брайчев, П.А. Стеканов**
*(ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат"),*
**П.П. Полецков, М.С. Гущина, О.А. Никитенко**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Разработка режимов термической обработки толстолистового проката из низкоуглеродистой никелевой стали*

*Рассмотрено влияние различных видов термической обработки (однократной и двойной нормализации, однократной, двойной закалки и последующего отпуска) на микроструктуру и механические свойства толстолистового проката из криогенной конструкционной низкоуглеродистой никелевой стали (9 % Ni), предназначенной для производства изделий (резервуаров, трубопроводов) для хранения и транспортировки сжиженных природных газов при температурах до минус 196 °С. Показано, что лучшей хладостойкостью обладают образцы проката после двойной закалки из межкритического интервала температур и последующего высокого отпуска.*

**Ключевые слова:** листовой прокат; никелевая сталь (9 % Ni); хладостойкость; мартенсит; остаточный аустенит; механические свойства; термическая обработка; криогенная техника; резервуары для хранения сжиженных природных газов.

*Different heat treatment processes of 9 % Ni steel for large liquefied natural gas storage tanks are performed in laboratory heating furnace. The former was special heat treatment process consisting of quenching and intercritical quenching and tempering (Q—IQ—T). The second was heat treatment process only consisting of quenching and tempering (Q—T). The latter was heat treatment process consisting of double normalization and tempering (N—N—T). Mechanical properties are measured by tensile testing and charpy impact testing, and the microstructure is analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy. The results showed that highest mechanical properties are obtained from the Q—IQ—T process, and Charpy V-notch impact toughness at cryogenic temperature minus 196 °C; achieved value of 190 J/cm$^2$. Microstructure analysis revealed that samples of the Q—IQ—T process had about 4.4 % of austenite in needle-like martensite.*

**Keywords:** plate; nickel-alloyed steel (9 % Ni); cold resistance; martensite; retained austenite; mechanical properties; heat treatment; cryogenic engineering; liquefied natural gas storage.

**Введение.** На сегодняшний день природный газ — наиболее экономичный, экологичный и безопасный вид топлива. Использование природного газа в качестве моторного топлива является одним из приоритетных направлений развития нефтегазового комплекса РФ [1].

В России ведется широкомасштабная работа по созданию производств *сжижения природного газа* (СПГ) и его транспортировки в условиях Арктики. Проект "Ямал СПГ" реализуется на полуострове Ямал за Полярным кругом на базе Южно-Тамбейского месторождения [2]. Оператором Проекта является ОАО "Ямал СПГ" — совместное предприятие ПАО "НОВАТЭК", концерна TOTAL, Китайской Национальной Нефтегазовой Корпорации и Фонда Шелкового пути. Проект предусматривает ежегодное производство около 16,5 млн т сжиженного природного газа с поставкой на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона и Европы. ПАО "НОВАТЭК" также разворачивает другой крупный проект "Арктик СПГ-2". Новый СПГ-завод будет производить около 19,8 млн т сжиженного газа в год на Гыданском полуострове в Сибири. Предприятие планируется запустить в 2023 г. [3].

Российские компании "Роснефть", "Газпром", "Печора СПГ" и другие также активно работа-

* Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 03.G25.31.0235).

ют над созданием в ряде регионов России новых производств по сжижению природного газа. По оценке министра энергетики РФ Александра Новака, с введением в строй этих объектов доля России на мировом рынке СПГ к 2035 г. может увеличиться от 4 до 15...20 %.

Хранение СПГ осуществляется в криогенных резервуарах. В мировой практике применяют следующие криогенные конструкционные материалы: ферритная сталь, содержащая около 9 % Ni; нержавеющая сталь типа 10Х18Н10Т; сплав, содержащий 36 % Ni, с низким коэффициентом линейного расширения (инвар); алюминиевые сплавы. Выбор материала обусловлен точкой кипения соответствующего газа.

Все эти материалы должны гарантировать отсутствие хрупких разрушений конструкций при криогенной температуре, характерной для СПГ [4, 5]. Как показали исследования, наиболее перспективным материалом с точки зрения низкого содержания дорогостоящих легирующих элементов, высокой прочности, удовлетворительной свариваемости и возможности его изготовления на отечественных металлургических предприятиях является сталь, содержащая 9 % Ni [6].

В 1951 г. в Канаде из стали с 9 % Ni были изготовлены кислородные и азотные регенераторы. Начиная с 1958 г. различными предприятиями произведены тысячи тонн полуфабрикатов (листов, поковок и др.) из этой стали. В настоящее время никелевую сталь (9 % Ni) широко применяют для изготовления внутренних стенок криогенных резервуаров.

Листовая сталь, содержащая 9 % Ni, была включена в стандарты США, Франции, Японии и других стран:

— EN 10028-4: 2017 "Прокат плоский стальной для работы под давлением. Технические условия. Часть 4. Никелевая легированная сталь с заданными свойствами при низких температурах";

— ASTM A353/A353M—17 "Стандартная спецификация на толстолистовой прокат для сосудов давления. Дважды нормализованная и отпущенная легированная сталь с содержанием никеля 9 %";

— ASTM A 553/A 553M—17 "Стандартная спецификация на толстолистовой прокат для сосудов давления. Закаленная и отпущенная легированная сталь с содержанием никеля 7, 8 и 9 %";

— JIS G3127—13 "Сталь листовая никелевая для сосудов, работающих под давлением при низких температурах".

Центр стандартизации и сертификации металлопродукции подготовил и опубликовал первую редакцию проекта национального стандарта ГОСТ Р "Прокат толстолистовой из криогенных сталей. Технические условия" (уведомление о разработке проекта стандарта от 30.01.2019). В этом стандарте сталь с 9 % Ni представлена маркой 0Н9. Технические требования зарубежных и национальных стандартов РФ к листовому прокату из криогенной никелевой стали приведены в табл. 1.

Требуемый сложный комплекс свойств (повышенная прочность при нормальной температуре в сочетании с высокой ударной вязкостью при криогенных температурах до −196 °С) можно обеспечить за счет специального легирования стали и применения правильно подобранной термической обработки, при которой должны быть достигнуты структурная однородность, мелкое зерно и снятие внутренних напряжений.

*Цель работы* — исследование влияния термической обработки на механические свойства и микроструктуру низкоуглеродистой никелевой стали (9 % Ni), используемой для получения, перевозки и хранения сжиженных газов.

**Материал и методы исследований.** Особенностью данного исследования является применение оборудования научно-производственного комплекса "ИЦ Термодеформ-МГТУ", имитирующего реальные процессы производства стали и проката [7, 8]. В вакуумной индукционной печи ZG-0.06L были выплавлены слитки стали 0Н9, химический состав которой представлен в табл. 2.

Никель в этой стали является основным легирующим элементом, который снижает температуру хладноломкости α-железа, повышает сопротивление распространению трещины в феррите, увеличивает стабильность аустенита [6]. Однако низкотемпературные механические свойства зависят не только от содержания в стали никеля, но и от фазового состава, в частности, от количественного соотношения α- и γ-фаз, формирующихся в процессе термодеформационной обработки стали.

Полученные слитки низкоуглеродистой никелевой стали (см. табл. 1) высотой 300 мм нагревали до температуры 1200 °С, осаживали на гидравлическом прессе П6334 до 20 мм (черновая стадия), далее прокатывали до толщины 10 мм на реверсивном стане ДУО 500 (чистовая стадия прокатки с окончанием деформации при 900 °С). Раскаты охлаждали на спокойном воздухе до температуры окружающей среды.

Термическую обработку проводили по различным режимам:

1. Однократная нормализация при температуре 780 °С (т.е. примерно на 50 °С выше точки $Ac_3$) с последующим высоким отпуском при 600 °С для снятия напряжений, растворения карбидов и образования достаточного количества стабильного остаточного аустенита при охлаждении до −196 °С.

2. Двойная нормализация (первая при 900 °С для гомогенизации стали в области γ-твердого раствора, вторая при 780 °С для измельчения

**1. Технические требования к прокату из криогенной низкоуглеродистой стали (9 %Ni)**

| Нормативный документ | Марка стали | Состояние поставки | Толщина проката, мм | $\sigma_{0,2}$, Н/мм$^2$ | $\sigma_в$, Н/мм$^2$ | $\delta_5$, % | *KC*V, Дж/см$^2$, при температуре | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | при температуре $\left(20^{+15}_{-10}\right)$ °С | | | −170 °С | −196 °С |
| | | | | в поперечном направлении | | | в поперечном/продольном направлении | |
| | | | | не менее или в диапазоне | | | | |
| ГОСТ Р (проект, первая редакция) | 0Н9 | З + О; Н, Н + О; ТМО | 8...70 | 575 | 640 | 18 | 75/— | 60/— |
| JIS G3127 | SL9N520 | Н + Н + О | 6...16 | 520 | 690...830 | 21 | —/— | —/42,5 |
| | | | >16 | | | 25 | | |
| | | | >20 | | | 21 | | |
| | SL9N590 | З+О | 6...16 | 590 | | 21 | —/— | —/51,3 |
| | | | >16 | | | 25 | | |
| | | | >20 | | | 21 | | |
| EN 10028-4 | X8Ni9 + NT640 | Н+Н+О | ⩽30 | 490 | 640...840 | 18 | —/75 | —/62,5 |
| | | | 30 < *t* ⩽ 50 | 480 | | | | |
| | X8Ni9 + QT640 | З+О | ⩽30 | 490 | | | 56,3/— | 50/— |
| | | | 30 < *t* ⩽ 125 | 480 | | | | |
| | X8Ni9 + QT680 | | ⩽30 | 585 | 680...820 | | 75/100 | 62,5/87,5 |
| | | | 30 < *t* ⩽ 125 | 575 | | | | |
| | X7Ni9 | | ⩽30 | 585 | | | 112,5/137,5 | 100/125 |
| | | | 30 < *t* ⩽ 125 | 575 | | | | |
| ASTM A 353 | A 353 | Н + Н + О | Без ограничений | 515 | 690...825 | 20,0 ($A_{50}$) | —/— | 33,8/42,5 |
| ASTM A 553 | A 553 (тип I) | З + О | <50 | 585 | | | —/— | |

Примечание. Состояние поставки: Н — нормализация; З — закалка; О — отпуск; ТМО — термомеханическая обработка.

зерна) с последующим высоким отпуском при 600 °С для повышения ударной вязкости.

3. Однократная закалка с 830 °С из однофазной аустенитной области с охлаждением в воде, высокий отпуск при 600 °С с охлаждением на воздухе.

4. Двойная закалка — первая из однофазной аустенитной области при температуре нагрева 830 °С для получения исходной мартенситной структуры, вторая из межкритического интервала ($Ac_1$...$Ac_3$) при температуре нагрева 670 °С в целях измельчения микроструктуры и стабилизации остаточного аустенита, далее высокий отпуск при 600 °С.

Образцы проката подвергали механическим испытаниям по стандартным методикам:

— испытания на растяжение проводили на плоских образцах типа II по ГОСТ 1497 при температуре $\left(20^{+15}_{-10}\right)$ °С на универсальной испытательной машине фирмы ZWICK GmbH&Co.МП серии Z2000;

— испытания на ударный изгиб осуществляли на маятниковом копре RKP 450 в соответствии с ГОСТ 22848—77 на поперечных образцах размерами 10,0×5,0 мм с V-образным надрезом при температуре −196 °С. За результат испытания на

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

| Сталь | C | Si | Mn | S | P | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0Н9 экспериментальная плавка | 0,05 | 0,19 | 0,35 | 0,002 | 0,004 | 8,70 |
| 0Н9 по ГОСТ Р | 0,03...0,10 | 0,10...0,45 | 0,20...0,80 | ⩽0,005 | ⩽0,010 | 6,50...11,00 |
| SL9N520, SL9N590 по JIS G3127 | ⩽0,12 | ⩽0,30 | ⩽0,90 | ⩽0,015 | ⩽0,015 | 8,50...9,50 |
| X7Ni9 по EN 10028-4 | ⩽0,10 | ⩽0,35 | 0,30...0,80 | ⩽0,005 | ⩽0,015 | 8,50...10,0 |
| A353 по ASTM A 353, A553 (тип I) по ASTM A 553 | ⩽0,13 | 0,15...0,40 | ⩽0,90 | ⩽0,015 | ⩽0,015 | 8,50...9,50 |

ударный изгиб принимали среднее арифметическое значение, полученное на трех образцах.

Металлографические исследования опытных образцов стали выполнены в ЦКП НИИ Наносталей при МГТУ им. Г.И. Носова на оптическом микроскопе Zeiss Axio Observer при увеличениях до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Микроструктуру при увеличениях более 1000 крат исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах.

Дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК) проводили на приборе синхронного термического анализа STA (Iupiter 449 F3) фирмы NETZSCH (Германия). Образец нагревали до температуры 900 °С в среде инертного газа (аргон) при скорости нагрева 20 °С/мин в корундовом тигле. Масса образцов около 70 мг.

Количество остаточного аустенита определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Количественную оценку осуществляли путем соотношения интегральных интенсивностей дифракционных максимумов от системы плоскостей (111) аустенитной ($2\theta = 67{,}1°$) и (110) мартенситной ($2\theta = 68{,}7°$) фаз.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Микроструктура опытных образцов после горячей прокатки с последующим охлаждением на воздухе представляет собой смесь продуктов превращения переохлажденного аустенита различной морфологии и состоит преимущественно из зернистого (или глобулярного) бейнита $Б_г$ (около 65 %) и верхнего бейнита $Б_в$ (35 %) (рис. 1, *а*, *б*). Глобулярный бейнит представляет собой бейнитный феррит (α-фаза) с "островками" мартенситно-аустенитной составляющей (МА) (мартенсита с остаточным аустенитом) (рис. 1, *в*). Верхний бейнит — пластины с карбидными частицами, расположенными преимущественно на их границах размером от 80 нм (рис. 2, *г*). Доля остаточного аустенита по данным рентгеноструктурного дифрактометра 1,3 %.

Результаты механических испытаний образцов стали 0Н9 после горячей прокатки (без тер-

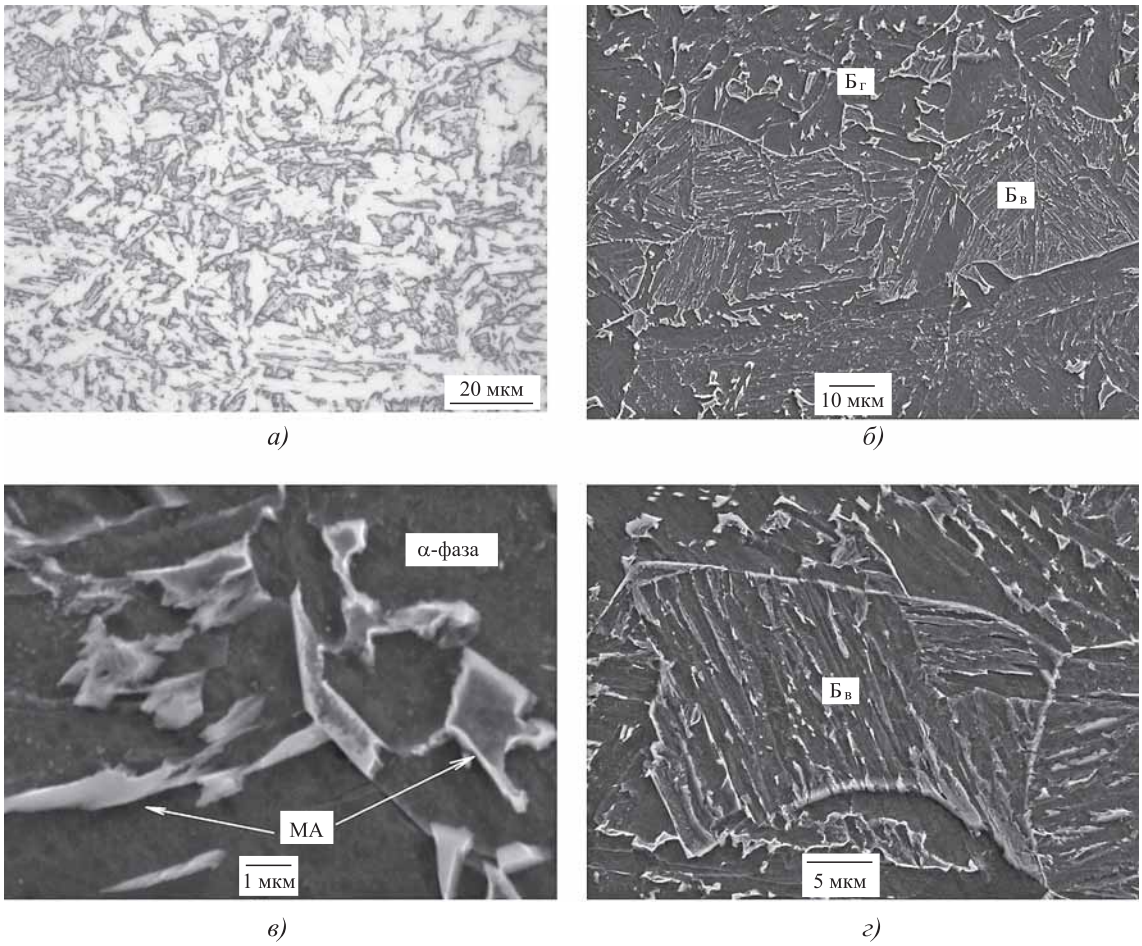



**Рис. 1. Характерные микроструктуры образца после горячей прокатки с последующим охлаждением на воздухе:**

*а* — световая микроскопия; *б*—*г* — РЭМ

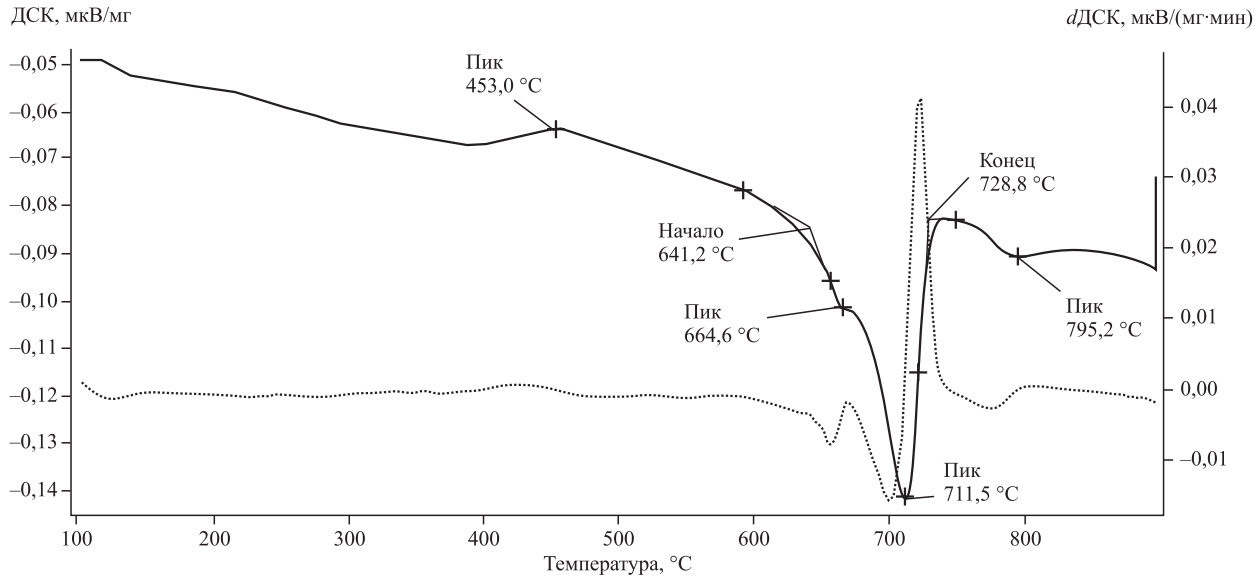



**Рис. 2. Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии при нагреве горячекатаного образца стали 0Н9**

мической обработки) свидетельствуют о высоких прочностных свойствах проката — временное сопротивление достигает $\sigma_в$ = 880 Н/мм$^2$, однако пластичность и хладостойкость стали не отвечают требуемым значениям — ударная вязкость $KCV^{-196}$ = 34 Дж/см$^2$ (норма по EN 10028-4 не менее 100 Дж/см$^2$), относительное удлинение $\delta_5$ = 15,5 % (при норме не менее 18 %).

ДСК-анализ опытных образцов криогенной стали 0Н9 с химическим составом, приведенным в табл. 2, позволил определить критические точки: $Ac_1$ ≈ 641 °С и $Ac_3$ ≈ 729 °С (рис. 2). На основании полученных данных ДСК-анализа определены температурные интервалы различных видов термической обработки.

Микроструктура образца после однократной нормализации при 780 °С (на 50 °С выше критической точки $Ac_3$) и последующего отпуска при 600 °С представляет собой глобулярный бейнит, состоящий из α-фазы с размером зерна до 5 мкм и мартенситно-аустенитных участков (МА) со средним размером от 1 до 5 мкм, выделившихся преимущественно по границам зерен (рис. 3, *а*, *в*).

Применение нормализации с небольшим перегревом выше $Ac_3$ на 50 °С привело к значительному измельчению размера зерна до 5 мкм (после горячей прокатки с охлаждением на воздухе размер зерна составлял около 40...50 мкм). Доля остаточного аустенита при этом возросла до 2,57 %, однако ударная вязкость $KCV^{-196}$ остается достаточно низкой и составляет 21,7 Дж/см$^2$ (табл. 3). Пониженные показатели хладостойкости связаны с образованием крупных мартенситно-аустенитных участков (МА) по границам зерен, которые охрупчивают сталь (рис. 3, *в*).

После двойной нормализации от температуры 900 °С (на 170 °С выше температуры $Ac_3$) и 780 °С (выше $Ac_3$ на 50 °С) и последующего отпуска при 600 °С происходит интенсивный распад закаленных структур с образованием специальных карбидов как внутри, так и на границах игл α-фазы и первичного зерна аустенита (рис. 3, *б*, *г*).

Как известно, первая нормализация при более высокой температуре (900 °С) проводится для выравнивания содержания никеля в аустените [10], вторая нормализация — для измельчения аустенитного зерна. Таким образом, структура после двойной нормализации и высокого отпуска состоит из отпущенного малоуглеродистого мартенсита и остаточного аустенита, что позволило обеспечить достаточно высокие характеристики прочности — временное сопротивление 780 Н/мм$^2$, пластичности — относительное удлинение 22 % и хладостойкости — ударная вязкость *KC*V при температуре −196 °С возросла до 179 Дж/см$^2$.

После одинарной закалки с нагревом до 830 °С и последующего охлаждения в воде формируется структура пакетно-реечного (дислокационного) низкоуглеродистого мартенсита [11]. Последующий нагрев закаленной стали приводит к диффузионному распаду закаленной структуры. Микроструктура образца после закалки от 830 °С и последующего отпуска при температуре 600 °С сопровождается выделением углерода из твердого раствора, образованием и ростом специальных карбидов легирующих элементов размером от 60 нм и 400 мкм, их сфероидизацией и коагуляцией (рис. 4, *а*, *в*). Причем выделение карбидной фазы протекает преимущественно по границам зерен (в местах, наиболее обедненных легирующими элементами). Размер бывших игл мартенсита составляет 15,4 мкм. Количество остаточного аустенита не превышает 0,5 %, со-

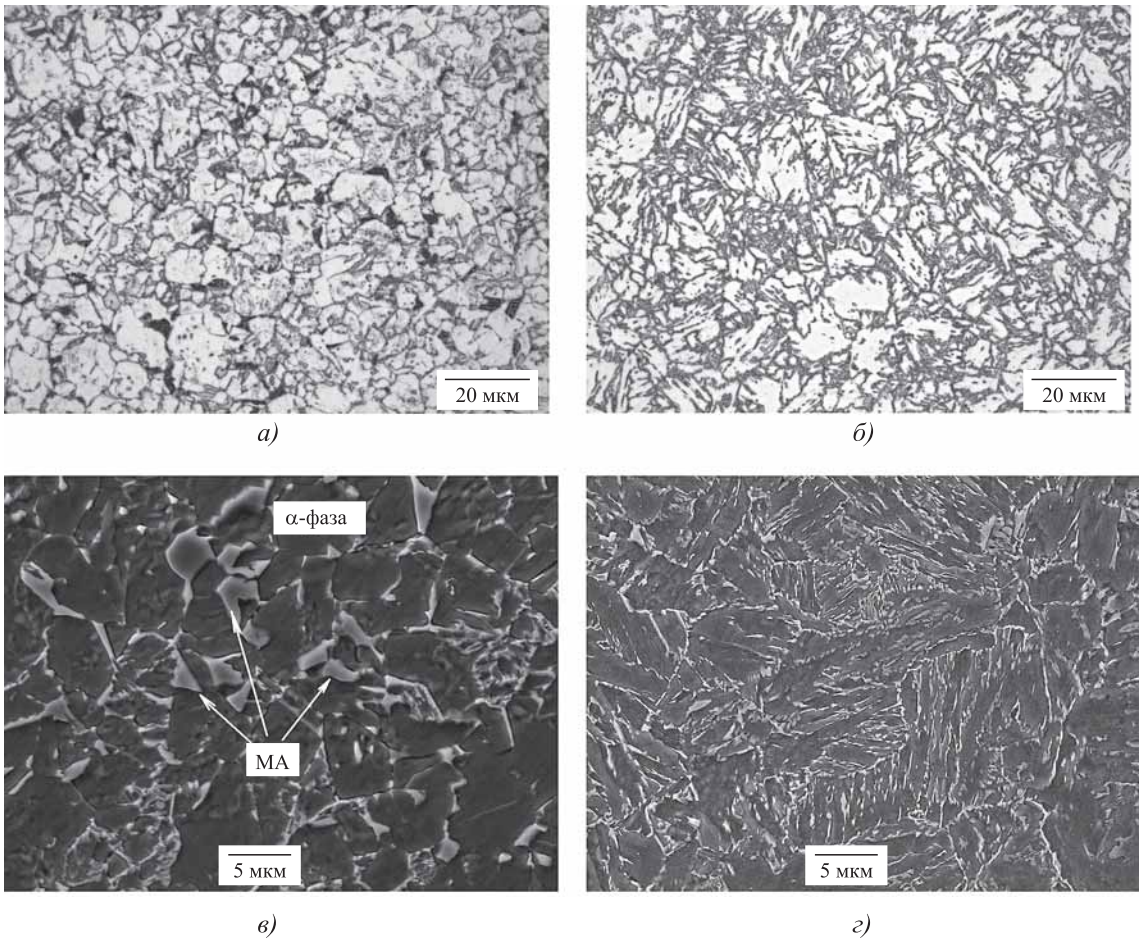



**Рис. 3. Характерные микроструктуры образцов после однократной нормализации 780 °С и отпуска при 600 °С (*а, в*); после двойной нормализации 900, 780 °С и отпуска при 600 °С (*б, г*):**

*а, б* — световая микроскопия; *в, г* — РЭМ

ответственно и ударная вязкость после такой обработки ниже, чем после двойной нормализации и отпуска: $KCV^{-196}$ = 130 Дж/см$^2$.

Микроструктура образца после двойной закалки в воде: первая из γ-области (830 °С), вторая из межкритического интервала температур (670 °С) и последующего отпуска с нагревом до температуры 600 °С состоит из α-фазы, реек "нового" мартенсита, формирующихся при второй закалке, участков отпущенного мартенсита, который был сформирован после первой закалки и претерпел распад при нагреве [12, 13].

Установлено, что применение двойной закалки (830 и 670 °С) и последующего отпуска при

**3. Результаты исследования влияния различных видов термической обработки на механические свойства образцов горячекатаного листового проката из криогенной стали 0Н9**

| Температура ТО, °С | | | Количество остаточного аустенита $A_{ост}$, % | Механические свойства | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Нормализация | Закалка | Отпуск | | $KCV^{-196}$, Дж/см$^2$ | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_в$ | $\delta_5$, % |
| | | | | | Н/мм$^2$ | | |
| — | | | 1,30 | 34,3 | 660 | 880 | 15,5 |
| 780 | — | 600 | 2,57 | 21,7 | 500 | 710 | 22,5 |
| 900, 780 | — | | 2,60 | 179 | 730 | 780 | 22,0 |
| — | 830 | 600 | ⩽0,5 | 130 | 830 | 850 | 16,0 |
| — | 830, 670 | | 4,4 | 190 | 740 | 800 | 22,0 |
| **X8Ni9 + NT640, EN 10028-4** | | | | **⩾62,5** | **⩾490** | **640...840** | **⩾18** |
| **X7Ni9, EN 10028-4** | | | | **⩾100** | **⩾585** | **680...820** | **⩾18** |

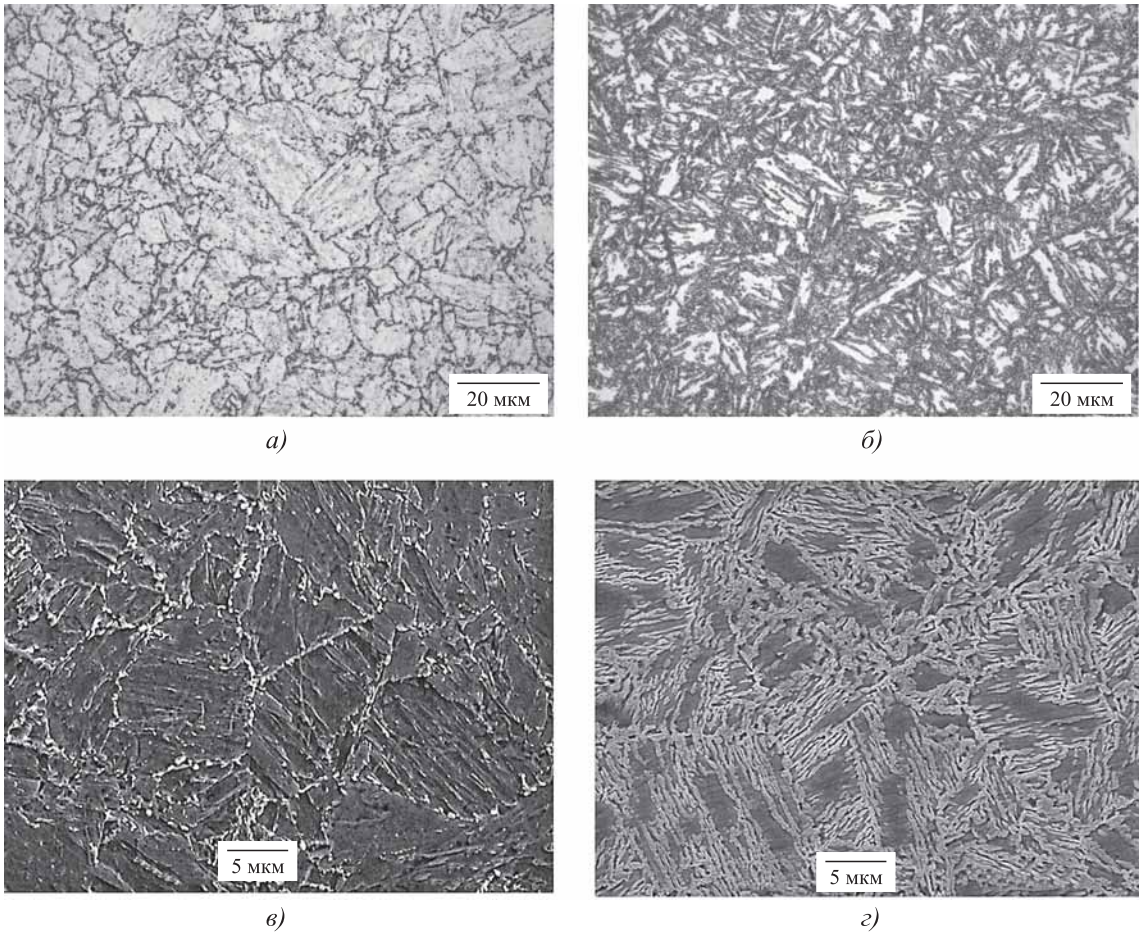



**Рис. 4. Микроструктуры образцов после одинарной закалки от 830 °С и отпуска при 600 °С (*а*, *в*); после двойной закалки от 830, 670 °С и отпуска при 600 °С (*б*, *г*):**

*а*, *б* — световая микроскопия; *в*, *г* — РЭМ

температуре 600 °С приводит к увеличению доли стабильного остаточного аустенита до 4,4 % и уменьшению средней длины игл мартенсита до 12,5 мкм, следствием этого является повышение ударной вязкости $KCV^{-196}$ до 190 Дж/см$^2$.

Результаты исследования влияния различных видов термической обработки на механические свойства криогенной конструкционной стали 0Н9 приведены в табл. 3.

## Выводы

1. Установлено влияние термической обработки (однократной и двойной нормализации, закалки и последующего высокого отпуска) на особенности формирования микроструктуры и механические свойства стали 0Н9 (9 % Ni), предназначенной для производства резервуаров для хранения сжиженных газов.

2. Наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы низкоуглеродистой никелевой стали после одинарной закалки с нагревом до γ-области и последующего охлаждения в воде. Минимальные прочность и хладостойкость получены после одинарной нормализации с незначительным перегревом выше $Ac_3$ и последующего высокого отпуска.

3. Оптимальное сочетание прочности и хладостойкости имеют образцы проката после двойной закалки в воде (первая из однофазной аустенитной области, вторая из межкритического интервала температур) и последующего высокого отпуска при 600 °С с охлаждением на воздухе. В результате такой термообработки формируется дисперсная пластинчатая дуплексная структура, состоящая из α-фазы, реек "нового" мартенсита, участков со структурой отпущенного мартенсита и остаточного стабильного аустенита с объемной долей около 4 %.

Использование полученных результатов новых научных данных позволит создавать и совершенствовать технологические режимы термической обработки сплавов указанного состава.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Проект** Постановления Правительства Российской Федерации "Об утверждении Государственной программы Российской Федерации "Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива" (подготовлен Минтрансом России 18.04.2017). URL: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56608756/ (дата обращения: 21.12.2018).
2. **Ямал СПГ.** URL: http://yamallng.ru (дата обращения: 21.12.2018).
3. **СПГ 2019.** Конгресс Россия. URL: https://www.lngrussiacongress.com/investment-projects (дата обращения: 2018.12.21).
4. **Анализ** технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков, Д.Г. Емалеева, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия". 2017. Т. 17. № 2. С. 52—60.
5. **Назначение** и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев, А.С. Кузнецова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 85—88.
6. **Банных О.А., Ковнеристый Ю.К.** Стали для работы при низких температурах. М.: Металлургия, 1969. 191 с.
7. **Научно-производственный** комплекс "Термодеформ" для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова, С.В. Денисов, Д.Н. Чикишев // Сталь. 2014. № 4. С. 104—107.
8. **Физическое** моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.П. Полецков, П.А. Стеканов, Г.А. Бережная, Д.Ю. Алексеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3 (47). С. 37—39.
9. **Исследование** влияния многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры криогенной конструкционной стали / П.П. Полецков, С.В. Денисов, О.А. Никитенко, М.С. Гущина, П.А. Стеканов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 2. С. 29—40.
10. **Разработка** перспективных образцов криогенных сталей для газовозов и стационарных танков-хранилищ сжиженного природного газа, предназначенных для использования в условиях Арктики / М.Ю. Матросов, В.Н. Зикеев, П.Г. Мартынов, Е.В. Шульга, В.С. Никитин, В.Н. Половинкин, Ю.А. Симонов, А.А. Семин // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4 (24). С. 80—89.
11. **Ульянин Е.А., Сорокина Н.А.** Стали и сплавы для криогенной техники. М.: Металлургия, 1984. 208 с.
12. **On microstructure** formation features of 9 % nickel cold-resistant steel and its properties brought about by different heating treatment procedures / Pavel P. Poletskov, Olga A. Nikitenko, Dmitry M. Chukin, Marina S. Gushchina, Sergey A. Fedoseev // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2018. 53. 5. 967—976.
13. **Effect** of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Microstructure of a 9 % Ni Steel for Large LNG Storage Tanks // J.M. Zhang, H. Li, F. Yang, Q. Chi, L.K. Ji, Y.R. Feng. Journal of Materials Engineering and Performance. December. 2013. Vol. 22 (12). P. 3867—3871.



*Сергей Владимирович Денисов, д-р техн. наук;*
*Евгений Викторович Брайчев;*
*Павел Александрович Стеканов;*
*Павел Петрович Полецков, д-р техн. наук;*
*Марина Сергеевна Гущина,*
gushchina.ms@mail.ru;
*Ольга Александровна Никитенко, канд. техн. наук*


УДК 621.785.6.063:621.78.019.8:669.017


**Т.В. Швеёва** *(Казанский (Приволжский) федеральный университет),*
**А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов**
*(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*


# Склонность сталей к образованию трещин при закалке в растворах полимера


*Исследованы свойства водных растворов полиалкиленгликоля в качестве закалочной среды. Показаны отличительные признаки такой среды от воды и масла МЗМ-16. Представлены результаты по трещиностойкости инструментальных и конструкционных сталей при закалке в растворах полимера. Установлена связь между концентраторами напряжений в изделиях с образованием трещин при закалке специальных образцов. Разработаны и предложены к практическому применению диаграммы по определению склонности сталей к образованию трещин при закалке. Водные растворы с содержанием полимера 25...50 % рекомендованы к использованию для закалки при термической обработке стальных изделий.*


**Ключевые слова:** сталь; трещинообразование; закалочная среда; твердость; растворы полимера; прокаливаемость; детали автомобиля.


*The properties of aqueous solutions of polyalkylene glycol as quenching medium are studied. The distinctive features of such environment from water and MZM-16 oil are shown. The results on the crack resistance of tool and structural steels during quenching in polymer solutions are presented. The relationship between stress concentrators in products with the formation of cracks during quenching of special samples is established. The chart to determine the tendency of steel to crack during quenching are developed and proposed for the practical application. Aqueous solutions with 25...50 % polymer content are recommended for use for quenching at the heat treatment of steel products.*


**Keywords:** steel; cracking; quenching medium; hardness; polymer solutions; hardenability; car parts.

**Введение.** Для объемной и поверхностной закалки деталей машин и инструмента в России и за рубежом широко применяют водные растворы полимеров [1—5]. При выборе таких закалочных сред обычно стремятся к гарантированному получению высокой закаливаемости стали на поверхности и по сечению изделия, исключению трещинообразования на деталях, обеспечению сохранения физико-химических свойств среды на протяжении длительной эксплуатации, ее экологичности и т.д. [4—9].

Охлаждающая способность синтетических закалочных сред зависит от содержания полимера в воде и температуры раствора и может изменятся от скорости охлаждения в воде до скорости охлаждения в масле [1, 4, 9]. Важное значение при этом уделяется скорости ее охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения в стали, как наиболее ответственному за образование закалочных трещин в изделиях. Однако даже эти знания по охлаждающей способности среды не позволяют избежать образования закалочных трещин на деталях. Причиной этому может служить наличие концентраторов напряжений на деталях, таких как шпоночные пазы, шлицевые и резьбовые соединения, отверстия, различные виды сопряжений между сечениями и т.д. [10—12].

Таким образом, при принятии решений о внедрении закалочных сред необходимы сведения о склонности к трещинообразованию деталей сложной формы и конфигурации. Такая задача является важной и актуальной в любом термическом производстве.

*Цель работы* — исследование склонности стали к образованию закалочных трещин на изделиях с различными концентраторами напряжений при закалке в водных растворах полимера.

**Материалы и методы исследований.** Трещиностойкость при закалке исследовали на специализированных образцах из конструкционных и инструментальных сталей, химический состав которых приведен в табл. 1. В качестве водорастворимого полимера использовали полиалкиленгликоль [13].

Склонность стали к образованию трещин при закалке изучали на дисковых образцах с канавкой, цилиндрических ступенчатых образцах с отношением диаметров ступеней $d/D$ от 0,25 до 0,90 и прямоугольных параллелепипедах с квадратным основанием длиной 60 мм и стороной квадрата $a$ = 10...100 мм (рис. 1). Температуру нагрева под закалку изменяли от 800 до 900 °С для сталей 40ХН2МА и 42ХМФА и от 780 до 1250 °С для сталей Х12М и У10. От каждой температуры закаливали по 10 образцов. Выявление трещин на закаленных образцах после выдержки 2 ч осуществляли магнитно-люминесцентным методом на установке HV-700 фирмы Karl Deutsch (Германия).

Диаграммы трещиностойкости сталей 40ХН2МА и 42ХМФА при закалке в водных растворах полимера строили по методике, разработанной Е.И. Малинкиной [11], с использованием прямоугольных параллелепипедов с квадратным основанием.

Для нагрева образцов применяли лабораторные муфельные печи М-10, М-12 (Германия) и СНОЛ 2.2,5.1,8/11-И2 (Россия). Закалку образцов проводили в воде, масле МЗМ-16 и водных растворах с содержанием полимера от 5 до 50 %. Для определения твердости использовали твердомеры ТК-2М и ХР-250. Содержание полимера в жидкости контролировали по плотности раствора (рис. 2).

Среднюю скорость охлаждения в различных температурных интервалах определяли по кривым охлаждения внутренней поверхности медной полой полусферы диаметром 20 мм и толщиной 1,7 мм [14], интенсивность охлаждения

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

| Марка стали | C | Cr | Ni | Mn | Si | Mo | V | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| У10 | 0,99 | 0,26 | 0,14 | 0,28 | 0,30 | — | — | 0,022 | 0,026 |
| Х12М | 1,46 | 11,7 | 0,07 | 0,31 | 0,24 | 0,47 | 0,26 | 0,019 | 0,021 |
| 40ХН2МА | 0,40 | 0,72 | 1,35 | 0,68 | 0,25 | 0,16 | — | 0,018 | 0,021 |
| 42ХМФА | 0,41 | 1,04 | 0,08 | 0,72 | 0,24 | 0,38 | 0,11 | 0,020 | 0,018 |

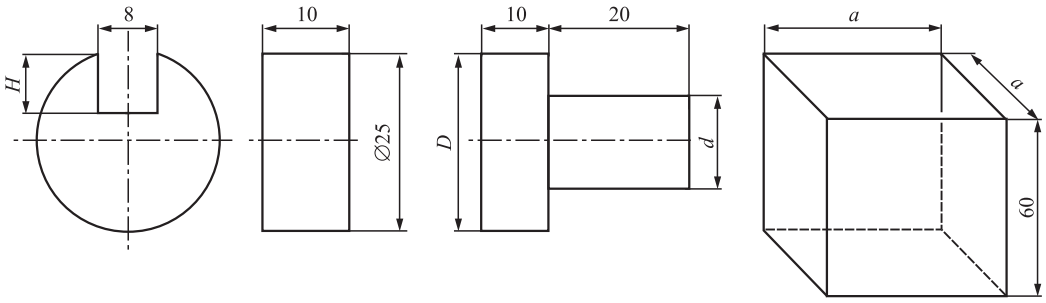



**Рис. 1. Форма и размеры образцов для оценки склонности стали к трещинообразованию**

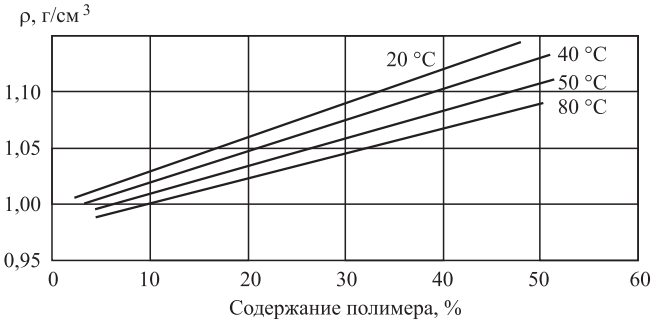



**Рис. 2. Изменение плотности водных растворов полиалкиленгликоля в зависимости от температуры среды и содержания полимера**

водных растворов полимера в заданных интервалах температур — по отношению к воде и маслу МЗМ-16. Закаливаемость сталей 40ХН2МА и 42ХМФА оценивали по результатам пробных закалок образцов ∅ 30×120 мм.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Для разработки рациональных режимов термической обработки кроме информации о закономерностях структурных превращений и связи между структурой и свойствами стали необходимо знать, как осуществить надлежащие структурные превращения без образования трещин и достичь высокой закаливаемости изделия. В табл. 2 приведены значения твердости после закалки сталей двух марок в воде, масле и водных растворах полимера.

Установлено, что исследуемые стали достигают высокой закаливаемости в процессе закалки не только в воде, но и в растворах с содержанием полимера 5...50 % при рабочей температуре среды 20...50 °С, а также в масле МЗМ-16.

Важное значение при закалке изделий имеет скорость охлаждения в определенных интервалах температур, которые являются ответственными за показатели закаливаемости и трещиностойкости стали. Исследования показали, что водные растворы полиалкиленгликоля занимают промежуточное положение между водой и маслом по охлаждающей способности (табл. 3). Об этом свидетельствует и их интенсивность охлаждения (см. табл. 3) в различных температурных интервалах.

Водные растворы полимера имеют преимущество перед закалочным маслом МЗМ-16 по интенсивности охлаждения в исследуемых интервалах температур, поэтому особое внимание было уделено оценке стойкости стали к образованию закалочных трещин.

Установлено, что независимо от формы и размера закаливаемых образцов, изготовленных из стали 40ХН2МА, их склонность к образованию трещин снижается с уменьшением скорости охлаждения в мартенситном интервале. Количество образцов с трещинами также снижается с уменьшением стороны квадрата *a* образцов типа III и отношения диаметра ступеней *d*/*D* образцов типа II (табл. 4).

При закалке образцов типа I из стали 40ХН2МА в растворе с содержанием 40 % полимера трещин на них не обнаружено, в то время как на ступенчатых цилиндрических образцах

**2. Твердость сталей 40ХН2МА и 42ХМФА при закалке в различных средах**

| Марка стали | Температура закалочной среды, °С | Твердость поверхности/сердцевины образцов ∅30×120 мм, HRC, в различных средах | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вода | Водный раствор с содержанием полимера, % | | | | | Масло МЗМ-16 |
| | | | 5 | 15 | 25 | 32,5 | 50 | |
| 40ХН2МА | 20 | 58/56 | 58/56 | 58/55 | 56/55 | 56/54 | 55/53 | — |
| | 50 | — | 57/54 | 57/53 | 56/53 | 56/52 | 54/52 | 56/53 |
| 42ХМФА | 20 | 59/58 | 58/58 | 58/56 | 58/53 | 58/53 | 58/51 | — |
| | 50 | — | 58/56 | 58/56 | 57/53 | 56/52 | 56/50 | 58/54 |

**3. Интенсивность охлаждения водных растворов полиалкиленгликоля в различных температурных интервалах**

| Содержание полимера в растворе, % | Интенсивность охлаждения в интервале температур, °С | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 800...100 | | | 800...650 | | | 650...300 | | | 300...100 | | |
| | $v_{ср}$, °С/с | $H_в$ | $H_м$ | $v_{ср}$, °С/с | $H_в$ | $H_м$ | $v_{ср}$, °С/с | $H_в$ | $H_м$ | $v_{ср}$, °С/с | $H_в$ | $H_м$ |
| 0 (вода) | 405 | 1,0 | 6,5 | 268 | 1,0 | 6,8 | 417 | 1,0 | 4,2 | 530 | 1,0 | 9,4 |
| 5 | 258 | 0,64 | 4,1 | 260 | 0,9 | 6,6 | 276 | 0,66 | 2,7 | 238 | 0,45 | 4,2 |
| 15 | 220 | 0,50 | 3,5 | 225 | 0,84 | 5,7 | 228 | 0,56 | 2,3 | 207 | 0,39 | 3,7 |
| 32,5 | 171 | 0,42 | 2,7 | 196 | 0,73 | 5,0 | 175 | 0,42 | 1,7 | 140 | 0,26 | 2,5 |
| 50 | 56 | 0,11 | 0,9 | 48 | 0,18 | 1,2 | 61 | 0,14 | 0,6 | 60 | 0,11 | 1,07 |
| Масло МЗМ-16 | 62 | 0,13 | 1,0 | 39 | 0,15 | 1,0 | 100 | 0,24 | 1,0 | 56 | 0,105 | 1,0 |

Обозначения: $v_{ср}$ — средняя скорость охлаждения в изучаемом интервале температур; $H_в$, $H_м$ — интенсивность охлаждения водных растворов полимеров по отношению к воде и маслу МЗМ-16 соответственно.

**4. Влияние формы и размера образца из стали 40ХН2МА на трещиностойкость при закалке 860 °С**

| Содержание полимера в растворе, % | $v_{м.ср}$, °С/с | Количество образцов с трещинами, % | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | тип I | тип II ($d/D$) | | | | тип III ($a$, мм) | |
| | | | 0,25 | 1 | 0,7 | 0,9 | 5 | 20 |
| 0 (вода) | 530 | 100 | 80 | 80 | 100 | 100 | 40 | 100 |
| 5 | 238 | | 50 | 60 | — | — | 20 | |
| 15 | 207 | 40 | 40 | 40 | | | | 90 |
| 35 | 132 | 10 | 20 | 30 | 70 | 60 | 0 | 70 |
| 40 | 96 | 0 | 10 | | 60 | 40 | | 40 |
| 45 | 78 | | 0 | 10 | 30 | 20 | | 20 |
| 50 | 60 | | | 0 | 10 | 10 | | |

Обозначение. $v_{м.ср}$ — средняя скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения (300...100 °С).

с переменным сечением (тип II) наблюдаются продольные трещины даже при закалке в растворе с содержанием 50 % полимера (см. табл. 4).

Качественная закалка стали 40ХН2МА получена на образцах типа I при охлаждении в водном растворе с содержанием 40 % полимера, на образцах типа II с отношением $d/D$ = 0,25 — в растворе с 45 % полимера и $d/D$ = 0,5 — в растворе с 50 % полимера, а также на образцах типа III со стороной квадрата $a$ = 5 мм — в растворе с 35 % полимера.

При закалке образцов типа I, но изготовленных из стали 42ХМФА, выявлено, что с увеличением содержания полиалкиленгликоля в растворе количество образцов с трещинами уменьшается с 80 % при закалке в растворе с 35 % полимера до 10 % при закалке в растворе с 40 % полимера. Применение растворов с 45...50 % полимера в качестве закалочной среды позволило полностью исключить закалочные трещины на образцах типа I из стали 42ХМФА.

Полученные результаты показали, что трещиностойкость контрольных образцов зависит от их формы, размера, марки применяемой стали и скорости охлаждения в мартенситном интервале. Поэтому контрольные образцы могут характеризовать только трещинообразование при закалке деталей, близких по форме и геометрии к испытанным образцам.

Для определения возможности использования закалочной среды на основе полимера для инструментальных сталей У10 и Х12М изучали склонность этих сталей к трещинообразованию на образцах типа I. Выбор указанной формы контрольного образца для оценки трещиноустойчивости стали при закалке объясняется наличием шпоночных пазов и канавок на многих видах инструментов.

Установлено, что с увеличением содержания полимера в растворе и уменьшением температуры закалки количество образцов, пораженных трещинами, снижается (рис. 3). Закалка в водном растворе с содержанием 32,5 % полимера полностью исключает появление трещин на об-

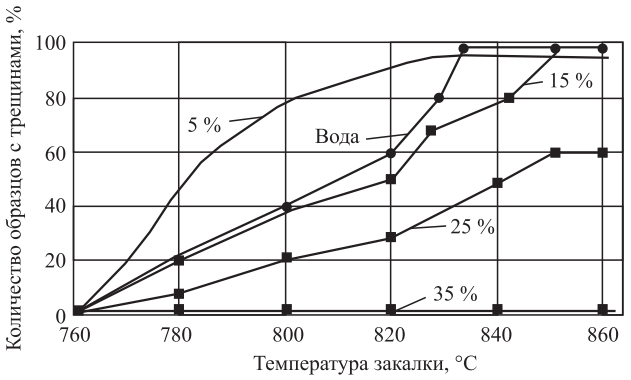



**Рис. 3. Влияние температуры закалки и содержания полимера в растворе на образование трещин в образцах из стали У10**

разцах из стали У10 независимо от температуры нагрева под закалку. Твердость образцов во всех случаях соответствовала 62...64 HRC.

Количество образцов с трещинами, закаленных в растворе с 5 % полимера, больше, чем при их закалке в воде. Последнее связано с более продолжительной областью пузырькового кипения водного раствора полимера и минимальным временем существования капель жидкости в этом температурном интервале.

Отсутствие трещин на образцах типа I из стали Х12М наблюдается при охлаждении в растворах с содержанием полимера более 25 % при температуре закалки 810...1050 °С (рис. 4).

Для оценки влияния размеров образцов на трещинообразование сталей 40ХН2МА и 42ХМФА при закалке строили диаграммы размер образца—температура закалки с обозначением области возникновения закалочных трещин. Для построения таких диаграмм использовали образцы типа III со стороной квадрата 10...100 мм и длиной 60 мм.

Определено, что область возникновения трещин ограничена со стороны больших и малых размеров образцов (рис. 5). Трещины отсутствуют при уменьшении температуры закалки.

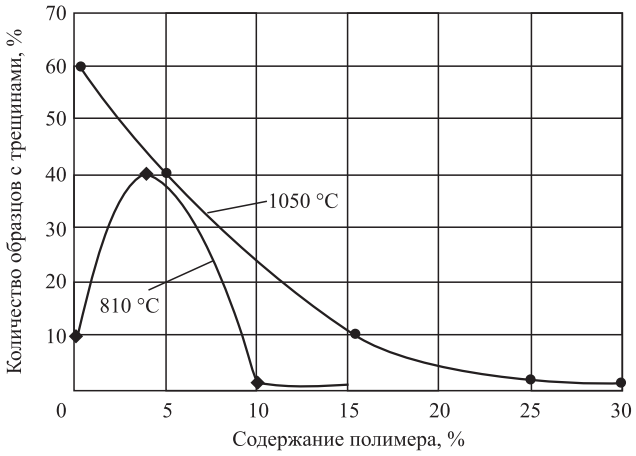



**Рис. 4. Влияние содержания полимера и температуры закалки на образование трещин в образцах из стали Х12М**

Отсутствие трещин на образцах малого размера связано с преобладанием остаточных напряжений, которые на поверхности деталей являются сжимающими, над напряжениями, имеющими противоположный знак, полученными в результате фазовых превращений.

При больших размерах образцов в результате неполной прокаливаемости напряжения от фазовых превращений уменьшаются или даже принимают противоположный знак, в результате чего склонность к образованию трещин снижается.

В промежуточной области размеров образцов напряжения от фазовых превращений преобладают над температурными напряжениями, что приводит к растрескиванию деталей при закалке.

При снижении температуры закалки опасная зона сужается, и при температуре ниже $Ac_3$ трещинообразование не наблюдается, что связано с уменьшением фазовых напряжений за счет снижения доли мартенсита в структуре (из-за неполной аустенизации при нагреве).

Для стали 40ХН2МА, имеющей большую пластичность, чем сталь 42ХМФА, зона трещинообразования смещается в область меньших размеров.

При увеличении содержания полимера от 32,5 до 50 % (уменьшение скорости охлаждения) наблюдается сужение области образования трещин. Особенно заметно сужение области трещинообразования на стали 40ХН2МФА (см. рис. 5).

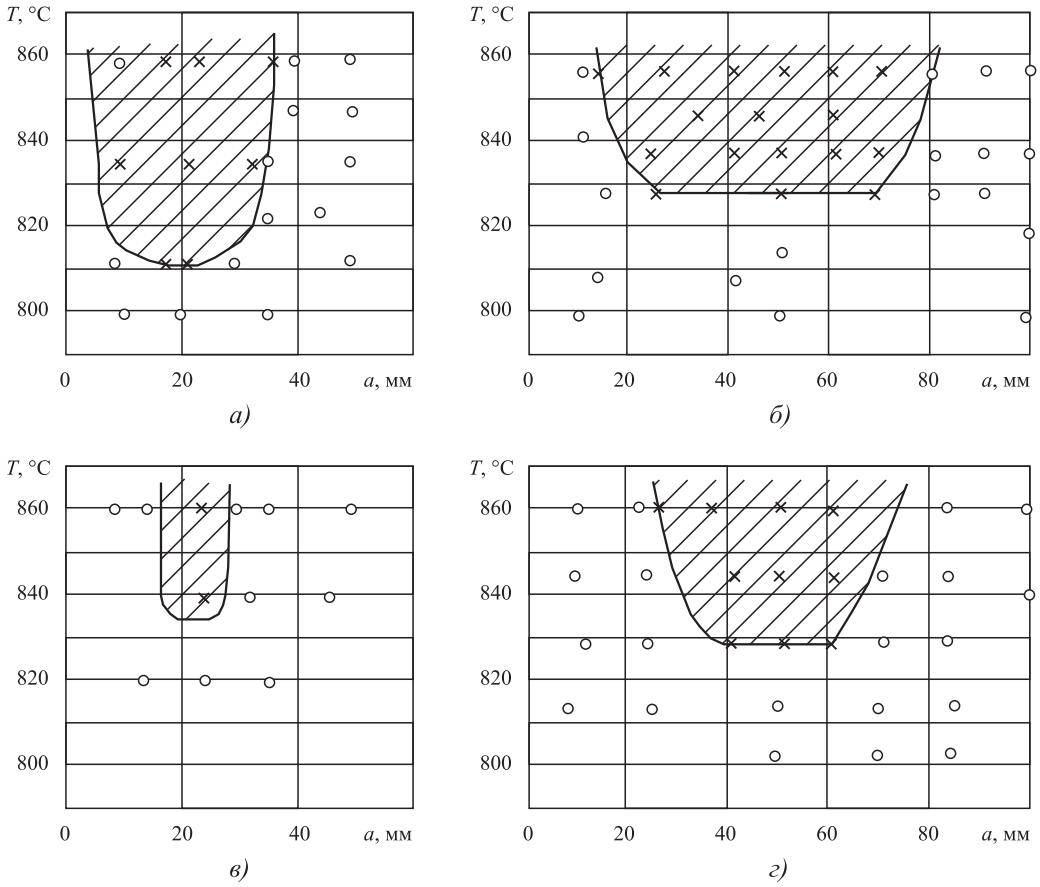



**Рис. 5. Трещинообразование образцов типа III из сталей 40ХН2МА (*а*, *в*) и 42ХМФА (*б*, *г*) при закалке в водных растворах с различным содержанием полимера:**

*а*, *б* — 32,5 %; *в*, *г* — 50 %

Водные растворы с содержанием полимера 32,5 % рекомендуется применять для изделий из стали 42ХМФА сечением менее 10 мм и более 70 мм; для изделий из стали 40ХН2МА — более 40 мм. В растворах с содержанием полимера 50 % рекомендуется закаливать изделия из стали 42ХМФА сечением менее 20 мм и более 70 мм, из стали 40ХН2МА — сечением менее 20 мм и более 30 мм.

При опытно-промышленной закалке тяжелонагруженных деталей автомобиля "КАМАЗ" — шатунов из стали 40Х112МА и коленчатых валов из стали 42ХМФА — трещины отсутствовали: на шатунах при закалке в водном растворе с 48...50 % полимера, на коленчатых валах — с 32,5...35 % полимера, что согласуется с результатами исследования трещинообразования на образцах типа III (см. рис. 5). Опасными сечениями коленчатого вала с точки зрения трещинообразования при закалке являются коренные и шатунные шейки, размер которых превышает 80 мм, т.е. коленчатый вал можно отнести на диаграмме к образцам больших размеров. По геометрическим размерам детали типа шатуна относятся к области малых размеров образцов. Длительное использование водного раствора с 32,5...35,0 % полимера для закалки коленчатых валов и с 48,0...50,0 % полимера — для закалки шатунов подтвердило стабильность получения качественной закалки при одновременном отсутствии трещин на деталях.

При закалке образцов типа I из стали 42ХМФА в водных растворах с содержанием полимера 35 % на них наблюдаются трещины, в то время как при закалке образцов типа III со стороной квадрата более 70 мм в среде такого же состава трещин не обнаружено. Это, по-видимому, связано с различной формой и сечением образцов. Образцы типа I имели полную прокаливаемость, что могло привести к возникновению высоких растягивающих напряжений от фазовых превращений. Кроме того, в них возникают меньшие температурные напряжения. В результате этого в поверхностном слое образцов типа I возникли более высокие растягивающие напряжения, чем в образцах типа III.

Таким образом, форма и размеры образцов, использованных для оценки трещинообразования сталей при закалке, в значительной мере оказывают влияние на получаемые результаты. Для деталей, имеющих острые концентраторы напряжений, а также резкие переходы сечений, целесообразно для оценки трещиностойкости использовать образцы типа I и III соответствующего размера.

**Заключение.** Исследована интенсивность охлаждения водных растворов полиалкиленгликоля по отношению к воде и маслу МЗМ-16. Показано, что растворы полимера имеют промежуточную скорость охлаждения между водой и маслом. При закалке в водных растворах полимера достигается высокая закаливаемость стали на поверхности и в сердцевине изделия.

Установлено, что трещинообразование в стали зависит от формы изделия и наличия концентраторов напряжений. Рекомендовано использовать дисковые образцы со шпоночным пазом для оценки трещиностойкости инструментальных сталей, а плоские и ступенчатые образцы — для конструкционных сталей.

Разработаны и предложены к практическому применению диаграммы для оценки трещиностойкости сталей 40ХМ2МА и 42ХМФА.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Закалочные** среды / В. Люты; под ред. С.Б. Масленникова / Пер. с польского. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1990. 192 с.
2. **Петраш Л.В.** Закалочные среды. М.-Л.: Машгиз, 1960. 106 с.
3. **Приходько В.С.** Охлаждающие среды для закалки. М.: Машиностроение, 1977. 32 с.
4. **Use** of the "TOSOL-K" quenching fluid for the bulk quenching of steels / V.I. Astashchenko, N.P. Ionkina, G.I. Yansen, I.E. Sorokin, M.G. Gedberg // Metal Science and Heat Treatment. 1982. Vol. 24. № 5—6. P. 377—380.
5. **Горюшин В.В., Шевченко С.Ю.** О применении полимерных закаленных сред в промышленности // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 6. С. 26—30.
6. **Хина М.Л., Васильков В.Ф., Кобзов И.С.** Закалочные среды на основе водорастворимых полимеров // Металловедение и термическая обработка металлов. 1978. № 8. С. 70—73.
7. **Толстоусов А.Б., Банных О.А.** Новая закалочная среда на основе водорастворимого полимера // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 2. С. 5—8.
8. **Астащенко В.И., Рудницкий Н.М., Устиловский С.Я.** Применение полимерных закалочных сред в автомобилестроении. М.: НИИНавтопром, 1984. 55 с.
9. **Шевченко С.Ю.** Сравнительная оценка технологических возможностей полимерных закалочных сред. Наука и образование: электрон. науч.-техн. журнал МВТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 3. С. 339—356.
10. **Astashchenko V.I., Zapadnova N.N., Mukhametzianova G.F.** Key concepts for production of high-quality parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 240. No. 1. 012007.
11. **Малинкина Е.И.** Образование трещин при термической обработке стальных изделий. М.: Машиностроение, 1965. 173 с.
12. **Гуляев А.Н., Якушев С.П.** Образование трещин при термической обработке // Станки и инструмент. 1961. № 8. С. 27—29.
13. **Пат. 1016377 РФ**, МКИ С21Д-1/60. Закалочная среда / В.В. Николаев, В.И. Астащенко, Г.И. Янцен и др. Опубл. 07.05.1983, Бюл. № 17.
14. **Астащенко В.И.** Технологические методы управления структурообразованием стали при производстве деталей машин / В.И. Астащенко, В.Г. Шибаков. М.: Academia, 2006. 328 с.



*Татьяна Владимировна Швеёва, канд. техн. наук,* asttv@mail.ru;
*Александр Моисеевич Песин, д-р техн. наук;*
*Денис Олегович Пустовойтов, канд. техн. наук*

УДК 62.23

**И.Г. Гун[1], А.Р. Вахитов[2], Е.И. Гун[1], Ю.В. Калмыков[1], В.В. Сальников[1]**
*( [1]АО НПО "БелМаг", г. Магнитогорск,*
*[2] Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)*

# Разработка конструкции и технологии производства внутренних рулевых наконечников автомобиля

*В России возросла потребность в локализации производства комплектующих широко распространенного реечного рулевого управления, в частности, внутренних рулевых наконечников боковых тяг рулевой трапеции. Задача локализации производства успешно решена в АО НПО "БелМаг", специализирующемся на проектировании и изготовлении компонентов подвески и рулевого управления легковых и малотоннажных автомобилей отечественного и зарубежного производства.*

**Ключевые слова:** внутренний рулевой наконечник; корпус; палец шаровой; вкладыш; компенсатор; функциональные требования; процесс опрессовки; система инструкций Development Book.

*In Russia the need has increased for the localization of the production for the widely used rack steering mechanism components, in particular, for the axial joints of the side arms of the steering linkage. The task of production localization is successfully solved in AO NPO "BelMag" specializing in the design and manufacture of suspension components and steering of passenger cars and light commercial vehicles of domestic and foreign production.*

**Keywords:** axial joint; housing; ball stud; insert; compensator; functional requirements; pressing process; Development Book.

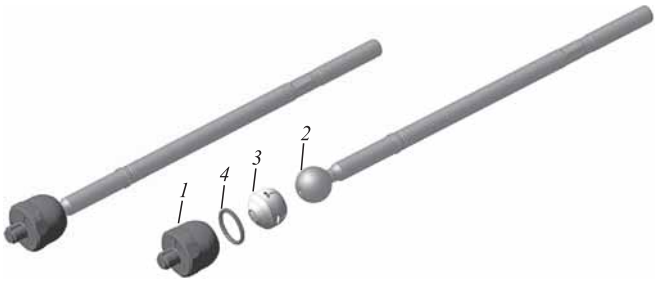
Широкое распространение среди конструкций рулевых механизмов легковых и малотоннажных автомобилей получил реечный рулевой механизм с возвратно-поступательным движением на выходе. Это обусловлено возможностью компактного размещения такого рулевого механизма в малом объеме за счет установки боковых поперечных тяг с шарнирами на концах с креплением к зубчатой рейке, что позволяет исключить применение маятникового рычага и средней тяги [1].

В связи с размещением новых производств легковых и малотоннажных автомобилей зарубежных производителей на территории РФ возросла потребность в локализации производства комплектующих изделий реечного рулевого управления, — в частности, внутренних рулевых наконечников боковых тяг рулевой трапеции (далее — внутренний рулевой наконечник).

Задача локализации производства внутренних рулевых наконечников, входящих в состав рулевого управления автомобилей ГАЗель Next, была решена в АО НПО "БелМаг" (г. Магнитогорск). Спроектирован внутренний рулевой наконечник и разработан технологический процесс его производства, изготовлены и испытаны прототипы наконечника, подготовлена вся необходимая конструкторская, технологическая и иная документация, предусмотренная общепринятой на рынке автомобильных компонентов процедурой APQP (Advanced product quality planning — перспективное планирование качества продукции), начаты поставки на завод компании Bosch, являющейся поставщиком 1-го уровня для автозавода "ГАЗ". Необходимо отметить, что внутренний рулевой наконечник является ответственным узлом рулевого управления, оказывающим существенное влияние на безопасность эксплуатации транспортных средств.

Общий вид внутреннего рулевого наконечника показан на рис. 1, *а*. Указанная конструкция защищена патентом на полезную модель [2].

Внутренний рулевой наконечник (рис. 1, *б*) состоит из корпуса *1*, установленного соосно с внутренней полостью корпуса, вкладыша *3* и компенсатора *4*, сжатого между корпусом и вкладышем. Вкладыш охватывает наружную сферическую поверхность пальца шарового *2* [2]. Внутренний рулевой наконечник — кинематическая пара класса III, обеспечивающая передачу управляющей силы от зубчатой рейки на поворотный кулак через наружный рулевой наконечник, обеспечивая поворот управляемых колес. При изменении положения поворотного кулака относительно зубчатой рейки шаровой палец отклоняется на необходимый угол качания. Ограничение трех поступательных степеней свобод происходит посред-




*а)* *б)*

**Рис. 1. Внутренний рулевой наконечник:**

*а* — общий вид внутреннего рулевого наконечника; *б* — комплектующие изделия: *1* — корпус; *2* — палец шаровой; *3* — вкладыш; *4* — компенсатор

ством формирования неразъемного соединения пластическим деформированием корпуса.

Цельноштампованный корпус *1* выполнен заодно с цилиндрическим хвостовиком с наружной резьбой. На поверхности цилиндрического хвостовика и плоской торцевой поверхности корпуса выполнены канавки. Эти конструктивные элементы необходимы для сообщения внутренних объемов каждого из двух защитных чехлов рулевого механизма с внутренним объемом полой рейки, осуществляя через полость рейки связь внутренних объемов чехлов между собой и таким образом, обеспечивая возможность выравнивания давления во внутренних объемах чехлов, что исключает дополнительное нагружение креплений защитных чехлов и уплотнений, приводящее к нарушению их герметичности [3]. На наружной поверхности корпуса расположен восьмигранный конструктивный элемент для захвата инструментом при сборке или ремонте рулевого механизма.

Палец шаровой *2* выполнен цельноштампованным с механически обработанной сферической поверхностью. Требуемый уровень шероховатости сферической поверхности шарового пальца, обеспечивающий плавность работы шарнира, достигнут применением методов поверхностного пластического деформирования (обкатки). На конце стержня пальца расположены наружная резьба и шестигранный конструктивный элемент для захвата инструментом при сборке или ремонте рулевого механизма, в центральной части стержня пальца — конструктивный элемент в виде канавок сложной формы для фиксации защитного чехла рейки. Стержень пальца имеет защитное коррозионно-стойкое покрытие, необходимое для работы в условиях воздействия внешней среды в непосредственной близости с колесными движителями автомобиля.

Вкладыш *3* выполнен из полимерного композиционного материала, характеризующегося высокими сопротивлением износу и антифрикционными свойствами [3]. Является по назначению подшипником скольжения.

Компенсатор *4* выполнен в виде резинового кольца из жесткого и упругого материала. Постоянное перемещение поверхности сферической головки пальца *2* относительно вкладыша *3* под нагрузкой в процессе работы шарнира приводит к износу внутренней поверхности вкладыша *3*. По мере износа вкладыша *3* (возможного появления зазоров между компонентами шарнира) сжатый и предварительно напряженный в процессе сборки упругий компенсатор *4* расширяется, компенсируя износ вкладыша *3* и предотвращая появление зазора в паре трения [2].

В процессе сборки во вкладыш *3* закладывается синтетическая консистентная смазка, рассчитанная на весь срок службы изделия.

Зарубежными производителями предъявлены новые для российского поставщика автокомпонентов требования к изделию. Предъявляемые требования условно можно разделить на две группы: требования к материалам корпусов и пальцев шаровых и функциональные требования к готовому изделию.

К первой группе относятся следующие требования:

1) *размер зерна аустенита*. Сталь для изготовления заготовок корпусов и пальцев шаровых должна иметь размер зерна аустенита 5 или меньше в соответствии со стандартом DIN EN ISO 643. Размер зерен важен, поскольку внутренний рулевой наконечник работает в условиях знакопеременных нагрузок, а рост зерна резко снижает ударную вязкость и повышает порог хладноломкости. Крупнозернистая сталь более склонна к возникновению закалочных трещин, деформации и короблению, а разнозернистость стали снижает конструкционную прочность и вызывает охрупчивание [4, 7, 8];

2) *ограничение по содержанию неметаллических включений*. Регламентировано содержание неметаллических включений в соответствии со стандартом DIN EN 10083-1. К неметаллическим включениям относятся оксиды, силикаты, сульфиды и нитриды. Превышение нормируемого количества включений и их завышенный размер негативно влияют на прочностные свойства стали, в частности, на ударную вязкость [7, 8];

3) *поверхностные и внутренние дефекты заготовок*. Заготовки пальцев шаровых и корпусов должны проходить 100%-ный контроль одним из предложенных методов: ультразвуковым или вихретоковым [9, 10];

4) *твердость материала заготовок в осевом сечении:* особым образом должны быть распределены значения твердости в осевом сечении заготовок пальца шарового и корпуса. Зоны в осевом сечении заготовок пальца и корпуса, в которых регламентированы определенные интервалы значений твердости, представлены на рис. 2 [7, 8].

Более высокие значения твердости должны быть в областях сечения, подверженных наиболее высокому нагружению (в точках *1—3* для пальца, *8* и *9* для корпуса).

Функциональные требования предъявляются к готовому изделию в состоянии поставки и после прохождения различных статических и циклических испытаний к отдельным комплектующим внутреннего рулевого наконечника и к изделию в сборе,

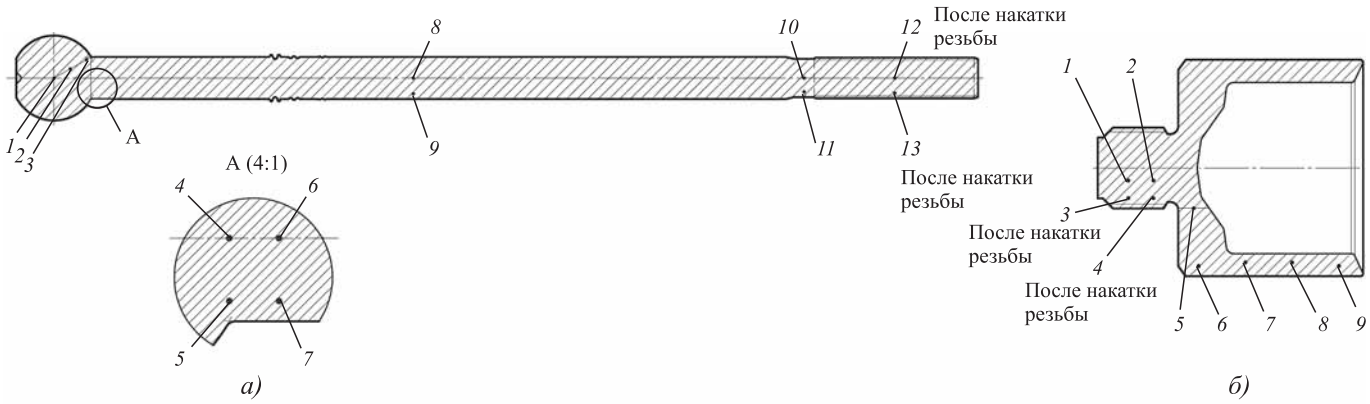



**Рис. 2. Зоны для измерения твердости в осевом сечении пальца шарового (*а*) и корпуса (*б*)**

а также к внутреннему рулевому наконечнику в составе боковой тяги рулевой трапеции, в составе рулевого управления автомобиля. Испытания на выполнение этих требований являются валидацией изделия. В случае невыполнения хотя бы одного требования требуются корректировка конструкции и повторные испытания.

Функциональные требования предъявляются к следующим характеристикам:

— прочность при статическом нагружении (сила вырыва пальца из корпуса, устойчивость тяги в сборе, прочность при растяжении тяги в сборе, прочность цилиндрического хвостовика корпуса);

— прочность при циклическом нагружении;

— эксплуатационные характеристики шарнира (момент сопротивления качанию пальца; момент страгивания при качании пальца; осевой зазор в шарнире; осевая жесткость шарнира);

— износостойкость шарнира при комбинации различных режимов движения, нагружения и условий окружающей среды.

Технологический процесс сборки наконечника состоит из двух технологических операций: подсборки и опрессовки. На первой операции компенсатор помещают на дно корпуса, затем на компенсатор размещают вкладыш. Далее внутрь вкладыша закладывается консистентная смазка, после чего во вкладыш устанавливают шаровой палец. За операцией подсборки следует операция опрессовки. Подсобранное изделие помещают в матрицу. Затем пуансон, перемещаясь в осевом направлении, воздействует на плоский торец корпуса, осуществляя его деформацию в матрице (рис. 3, *а*). На рис. 3, *б* показан результат опрессовки внутреннего рулевого наконечника.

Важным при проектировании технологического процесса является выбор технологических параметров опрессовки: реализуемая прессом сила, перемещение пуансона и геометрия матрицы. Указанные параметры были определены по результатам моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника с использованием метода *конечных элементов*

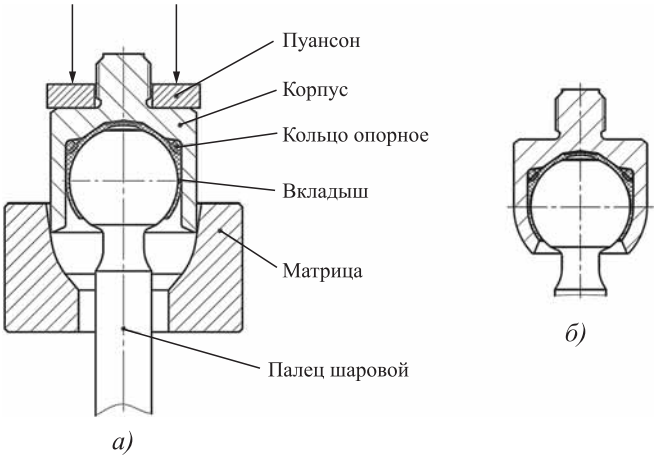



**Рис. 3. Вид изделия:**

*а* — подсобранное, перед опрессовкой; *б* — после опрессовки

(КЭ) при учете физической и геометрической нелинейностей [5, 6]. Расчетная схема и конечно-элементная сетка приведены на рис. 4.

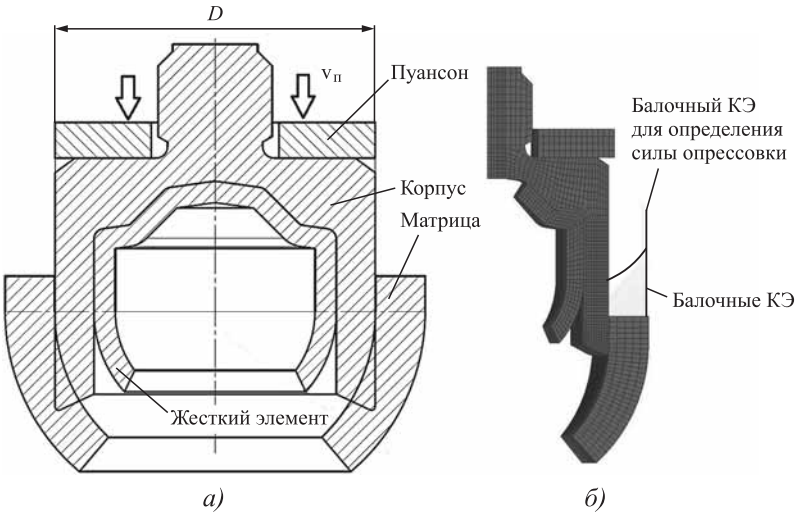



**Рис. 4. Модель процесса опрессовки:**

*а* — расчетная схема; *б* — конечно-элементная сетка

В модель введены балочные элементы для определения силы опрессовки. Геометрические параметры матрицы и перемещение пуансона подбирались итерационно. При заданном перемещении пуансона определялась расчетная сила опрессовки, как максимальное значение продольной силы, возникающей в вертикально ориентированном балочном элементе [5]. Картина деформации и напряженно-деформированное состояние корпуса показаны на рис. 5 (см. обложку).

График расчетной силы опрессовки в зависимости от перемещения пуансона и полученной экспериментальной кривой представлен на рис. 6. На заданном перемещении расчетная сила опрессовки составляет примерно 350 кН.

До опрессовки шарнира (в исходном состоянии) компенсатор выполнен с поперечным сечением в форме равнобедренного треугольника (рис. 7), большее основание которого представляет собой сектор окружности, а места сопряжения и вершина треугольника выполнены скругленными, причем вершина треугольной части поперечного сечения выполнена в направлении к оси кольца. Площадь поперечного сечения компенсатора не превышает площадь полости, образованной поверхностями корпуса и вкладыша. После опрессовки компенсатор упруго деформируется и выполняет свою функцию благодаря накопленной потенциальной энергии деформации [2].

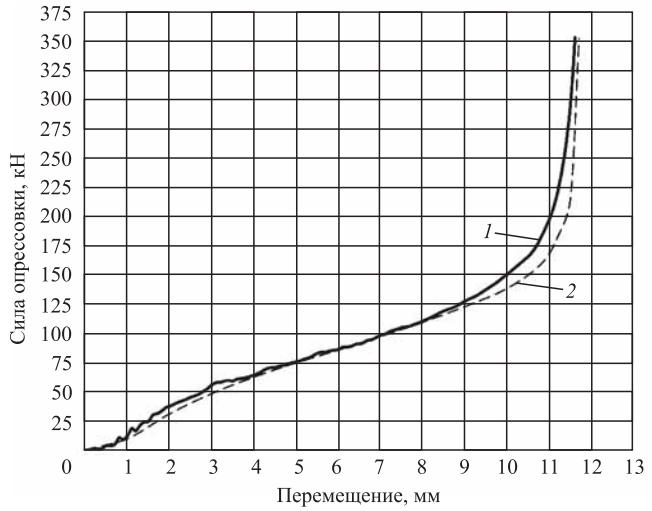



**Рис. 6. Расчетная (*1*) и экспериментальная (*2*) кривые опрессовки**

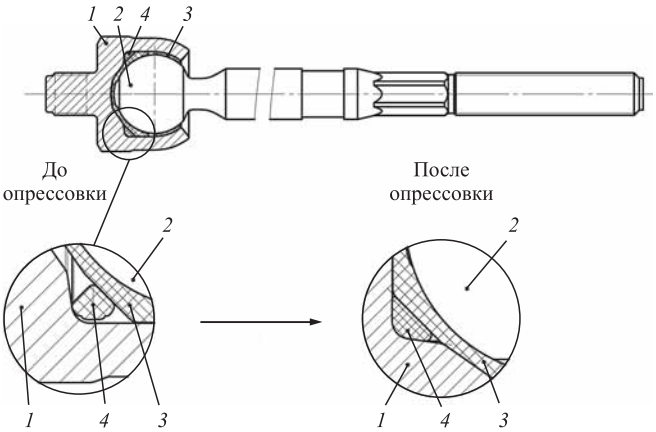



**Рис. 7. Состояние компенсатора до и после опрессовки:**
*1* — корпус; *2* — палец шаровой; *3* — вкладыш; *4* — компенсатор

Качество полученного неразъемного соединения оценивают на готовом изделии сразу же после операции опрессовки по указанным выше эксплуатационным характеристикам, значения которых должны находиться в приемлемых с точки зрения заказчика интервалах. Достижение необходимых интервалов значений эксплуатационных характеристик возможно при равномерном обжатии корпусом вкладыша при его деформировании.

Специалистами АО НПО "БелМаг" было сформулировано техническое задание для ведущего европейского производителя специализированного оборудования для проектирования и производства специализированной производственной линии для сборки внутренних рулевых наконечников. Производственная линия спроектирована, изготовлена, апробирована, доведена и успешно запущена в Российской Федерации.

Производственная линия для сборки (рис. 8, см. обложку) включает в себя станции для проведения операций подсборки, опрессовки, маркировки, а также станцию проверки эксплуатационных характеристик на готовом изделии (момента сопротивления качанию пальца, момента страгивания при качании пальца, осевого зазора и осевой жесткости шарнира).

По результатам проведенной работы в целях систематизации конструкторских компетенций, исключения конструкторских ошибок на этапе проектирования перспективных изделий и сокращения сроков проектирования новых изделий была разработана система инструкций Development Book, состоящая из следующих групп:

- инструкции группы I, описывающие общую последовательность выбора параметров компонентов изделия при проектировании;
- инструкции группы II, содержащие рекомендации по совместному выбору параметров компонентов, которые призваны обеспечить выполнение требований к изделию в сборе.
- инструкции группы III, содержащие рекомендации по разработке рабочих чертежей компонентов (простановка основных размеров и выбор их номинальных значений и допусков, указание допусков формы и расположения поверхностей, назначение параметра шероховатости поверхностей, минимального состава и содержания технических требований, материала, минимального набора специальных характеристик).

## Выводы

1. На основе анализа технических требований международных заказчиков разработана новая конструкция внутреннего рулевого наконечника для легковых и малотоннажных автомобилей.

2. С использованием численного моделирования методом конечных элементов определены технологические параметры процесса опрессовки при сборке внутреннего рулевого наконечника.

3. На основе полученных результатов моделирования разработана технология производства внутренних рулевых наконечников.

4. Разработанные новая конструкция и технология производства внутренних рулевых наконечников успешно внедрены в АО НПО "БелМаг" (г. Магнитогорск) с применением новой специализированной производственной линии для сборки, изготовленной в соответствии с разработанным техническим заданием.

5. В целях систематизации конструкторских компетенций, исключения конструкторских ошибок на этапе проектирования перспективных изделий и сокращения сроков проектирования новых изделий разработана система инструкций по разработке внутренних рулевых наконечников (Development Book).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Раймпель Й.** Шасси автомобиля: Рулевое управление / пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. А.А. Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.

2. **Шаровой** шарнир: пат. 185066 Рос. Федерация: МПК F16C 11/06 (2006.01) / И.Г. Гун, Ю.В. Калмыков, Е.И. Гун, В.И. Артюхин, А.Р. Вахитов; заявитель и патентообладатель АО НПО "БелМаг". № 2018105009; заявл. 09.02.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32. 9 с.

3. **Шаровой** шарнир рулевого управления: пат. 2501995 Рос. Федерация: МПК F16C 11/06 (2006.01); B62D 7/16 (2006.01) / И.Г. Гун, В.И. Артюхин, Е.И. Гун, Ю.В. Калмыков, В.В. Сальников, В.И. Куцепендик; заявитель и патентообладатель ЗАО НПО "БелМаг". № 2012129782/11; заявл. 13.07.2012; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. 7 с.

4. **Перспективы** производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин, Н.В. Копцева, Г.С. Гун // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 1. С. 39—44.

5. **Сальников В.В., Михайловский И.А., Гун И.Г.** Моделирование процесса разрушения шарового шарнира передней подвески автомобиля при осевом нагружении // Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 2 (67). С. 51—53.

6. **Расчетное** определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путем моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников, В.И. Куцепендик, Е.И. Гун. // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2 (85). С. 20—24.

7. **Создание** и развитие теории квалиметрии металлургии / Г.С. Гун, Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, И.Г. Гун, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 5. С. 67—69.

8. **Гун Г.С., Чукин М.В.** Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", 2006. 324 с.

9. **Стенд** для испытаний шаровых шарниров: пат. 2263889 Рос. Федерация: МПК G01M 13/00 (2000.01) / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, Ю.М. Ясаков, В.В. Лапчинский; заявитель и патентообладатель ЗАО НПО "БелМаг". № 2003137624/11; заявл. 29.12.2003; опубл. 10.11.2005, Бюл. № 16. 2 с.

10. **Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А. и др.** Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Металлургиздат, 2014. 276 с.



*Игорь Геннадьевич Гун, д-р техн. наук,*
goun@belmag.ru;
*Александр Рафаельевич Вахитов;*
*Евгений Игоревич Гун, канд. техн. наук;*
*Юрий Вячеславович Калмыков, канд. техн. наук;*
*Виталий Владимирович Сальников, канд. техн. наук*



ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.04.2019. Подписано в печать 30.05.2019. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.