

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»



международная молодежная
научно-практическая конференция

Magnitogorsk Rolling Practice

Материалы международной молодежной
научно-технической конференции

Под редакцией А.Г. Корчунова

Магнитогорск

*Итоги международной молодежной научно-технической конференции
«MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2024»*

Корчунов А.Г.

*Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова
e-mail:international@magtu.ru*

Настоящее издание содержит материалы трудов VIII международной молодежной научно-технической конференции **«Magnitogorsk Rolling Practice 2024»**, которая состоялась в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова в период с 04.06. по 07.06.2024 г.

В этом году молодежный форум, посвященный обсуждению фундаментальных и прикладных вопросов обработки металлов и сплавов давлением, был приурочен двум юбилеям: 90-летию университета и 95-летию г. Магнитогорска.

Насыщенная повестка конференции включала пленарные доклады известных ученых, работу в тематических секциях, посещение международной лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жиляева», ИЦ «Термодеформ-МГТУ», НИИ «Наносталей», индустриальный тур на промышленные предприятия города ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и ОАО «ММК-МЕТИЗ», семинар по QForm и экскурсию на горнолыжный центр на озере Банное.

В работе конференции приняли очное участие более 70 молодых ученых из 25 университетов, научно-исследовательских институтов, промышленных предприятий и инновационных компаний (рис.1).



Рис.1. Коллективное фотографирование участников конференции у монумента «Броневое бюро»

В качестве приглашенных спикеров на пленарном заседании выступили **Столяров В. В.**, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, **Шварц Д. Л.**, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, **Гладков Ю.А** ООО «КванторФорм», г. Москва, **Песин А.М.**, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

По результатам докладов молодых ученых определены номинанты, победитель и призеры конференции.

Обладателями номинации «**Старт в науку**» стали двое молодых ученых Уфимского университета науки и технологий **Флюр Нугаманов** и **Анастасия Хасанова**, а также **Никита Трубников**, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

Номинация «**Лучшее кроссдисциплинарное решение**» присуждена **Дмитрию Дёмину**, «Высшая школа экономики», г. Москва.

Номинации «**Лучшая инновационная разработка**» удостоен **Айбол Есболат**, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан. Номинацией «**Лучшее моделирование процессов ОМД**» был награжден **Андрей Парубок** Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Номинации «**Лучшая теоретическая проработка**» удостоены **Виктория Горбунова**, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск и **Наталья Бушуева**, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Номинация «**Лучшая практическая реализация**» была присуждена **Маргарите Морарь**, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод ММК-МЕТИЗ».

Номинацией «**Реализация приоритетных направлений промышленности**» награждены **Ганджина Худододова**, Уфимский университет науки и технологий и **Анна Барышникова**, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

Дипломом 3 степени награждены **Марина Ворошилова**, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск и **Олег Корольков**, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва.

Диплома 2 степени удостоены **Кирилл Горбунов**, Липецкий государственный технический университет и **Михаил Кищик**, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва.

Победителем конференции с вручением Диплома 1 степени был признан **Сергей Захаров**, ООО «Исследовательский центр ТМК», г. Челябинск.

Оргкомитет конференции выражает огромную благодарность всем участникам за персональный вклад в реализацию цели и задач конференции.

Уверены, что общение на полях конференции придаст импульс развитию и укреплению сотрудничества между молодыми учеными в области обработки металлов давлением, формированию новых научных коллективов, способных решать самые амбициозные задачи в современных условиях.

СЕКЦИЯ 1 – Фундаментальные проблемы обработки металлов давлением в контексте современных потребностей мировой промышленности

УДК 620.17:18

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ УМЗ ТИТАНА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЛОСКОЙ ПРОКАТКЕ

Столяров В.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

vlstol@mail.ru

Ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы показали свою эффективность в конструкционных и функциональных приложениях: в частности, титан и его сплавы в УМЗ-состоянии широко используются в медицине [1, 2]. С развитием методов получения объемных УМЗ-материалов, таких как РКУП [3], появилась практическая задача исследовать их способность к деформированию с целью получения из них длинномерных полуфабрикатов в виде труб, листов, прутков, проволоки.

Целью работы являлось сравнение деформируемости, структурной эволюции титана Grade 2 в УМЗ- и КЗ-состоянии в процессе плоской холодной прокатки. Пластины с КЗ (80мкм) и УМЗ (0.4 мкм) структурой (рис.1а, б) размерами 17×23×58 мм подвергались холодной прокатке со скоростью 10 см/с и обжатием 0,5 мм за проход до появления первых трещин.

Микротвердость измеряли методом Виккерса. Механические свойства КЗ и УМЗ титана определяли при растяжении образцов сечением 2×6 мм и длиной рабочей части 20 мм при комнатной температуре и скорости деформации $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Образцы вырезали из полосы, полученной прокаткой до $\varepsilon = 81\%$. Микроструктурные исследования были выполнены с помощью просвечивающего и сканирующего электронных микроскопов.

Исследования по обнаружению микро- и макротрещин показало, что деформируемость титана в УМЗ-состоянии выше ($\varepsilon = 88\%$), чем в КЗ-состоянии (77%).

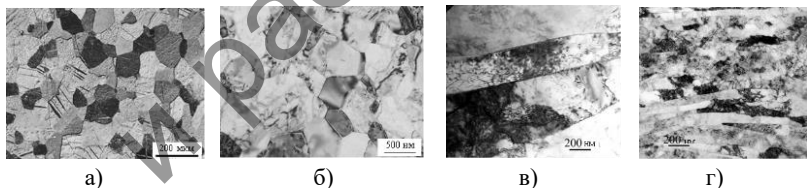


Рис.1- Микроструктура титана до (а, б) и после (в, г) прокатки $\varepsilon = 81\%$

Измельчение микроструктуры наблюдалось только в зонах локализации деформации и было крайне неоднородным. В УМЗ состоянии даже после прокатки до $\epsilon = 88\%$ трещины не наблюдались. Холодная прокатка титана до $\epsilon = 81\%$ способствовала упрочнению обоих состояний, при котором абсолютная разница в микротвердости и прочности сохранилась на том же уровне, что и до прокатки, а относительное удлинение уменьшилась более чем в два раза. Вместе с тем механизм упрочнения КЗ-титана преимущественно дислокационный, а в УМЗ титане он сопровождается дополнительным структурным измельчением.

Последующий отжиг при 450 и 700 °С привел к снижению микротвердости, которая для УМЗ состояния сохранялась более высокой. Холодная прокатка до $\epsilon = 88\%$ привела к появлению полос сдвига, размеры которых по толщине и длине существенно больше в КЗ-титане (рис.1в, г). Измельчение микроструктуры в КЗ-титане не наблюдается, несмотря на большую степень деформации. В то же время прокатка УМЗ-титана способствует дополнительному измельчению микроструктуры. При этом пластическая деформация существенно неоднородна и локализована преимущественно в полосах сдвига. Внутри полос сдвига плотность дислокаций намного выше, чем в прилегающих к ним областях.

Оказалось, что термическая стабильность холоднокатаного УМЗ титана в процессе кратковременного отжига при температурах 450 и 700 °С выше, чем КЗ титана. Несмотря на то, что для обоих состояний отжиг являлся рекристаллизационным (рис. 2), его кинетика была различной. В КЗ титане стадия образования центров рекристаллизации сменяется стадия роста зерен размером более 1 мкм (см. рис. 2 а). В то же время в УМЗ титане зафиксирована начальная стадия образования центров новых зерен размером менее 50 нм (см. рис. 2 б).



Рис. 2 - Микроструктура КЗ (а) и УМЗ титана (б) после прокатки до $\epsilon = 88\%$ кратковременного in-situ отжига при 700 °С (в, г)

Общей особенностью разрушения титана в различных структурных состояниях до и после холодной прокатки является вязкий интеркристаллитный чашечно-ямочный излом.

Список литературы

1. Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Raab G.I., Zharikov A.I., Valiev R.Z. Effect of initial microstructure on the microstructural evolution and mechanical properties of Ti during cold rolling // Mater. Sci.Eng A.- 2004. - V. 385. - P. 309-313.

2. Горячев Е.А., Крайнов В.И. Исследование деформируемости ультрамелкозернистого титана / Наука ЮУрГУ: Материалы 67-й науч. конф. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2015. С. 889–891. URL: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6142/16.pdf?sequence=1> .

3. Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Lowe T.C., Valiev R.Z. Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti // Mater. Sci. Eng. A. 2001. - V. 299. -1-2. P. 59–67.

УДК

100 ЛЕТ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ КАФЕДРЕ «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Шварц Д.Л., Логинов Ю.Н.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
d.l.shvartc@urfu.ru*

В истории создания Уральского Федерального университета металлургии занимают особое место: Урал известен большим количеством металлургических предприятий, буквально рассыпанных по территории региона. В связи с этим в 1923 году при Уральском политехническом институте была создана кафедра обработки металлов давлением под руководством профессора доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Головина Аким Филипповича. Он же считается основателем Уральской научной школы «Физика и механика обработки металлов давлением».

А.Ф. Головину как основателю Уральской научной школы по обработке металлов давлением принадлежит энергетическая трактовка и разработанные им кинематически возможные схемы течения металла для различных процессов прокатки иковки. В теории обработки металлов давлением известны формулы, носящие его имя. Метод «соответственной полосы», предложенный им для расчета калибровки прокатных валков, нашел широкое применение у заводских калибровщиков. В тяжелые годы Великой Отечественной войны сотрудниками кафедры выполнен ряд значимых работ для оборонной промышленности страны.

Большая роль в развитии научной школы принадлежит профессору И.Я. Тарновскому, в течение 21 года возглавлявшему кафедру. И.Я. Тарновский – создатель энергетических принципов механики сплошных сред и нового метода решения задач, основанного на применении вариационных принципов

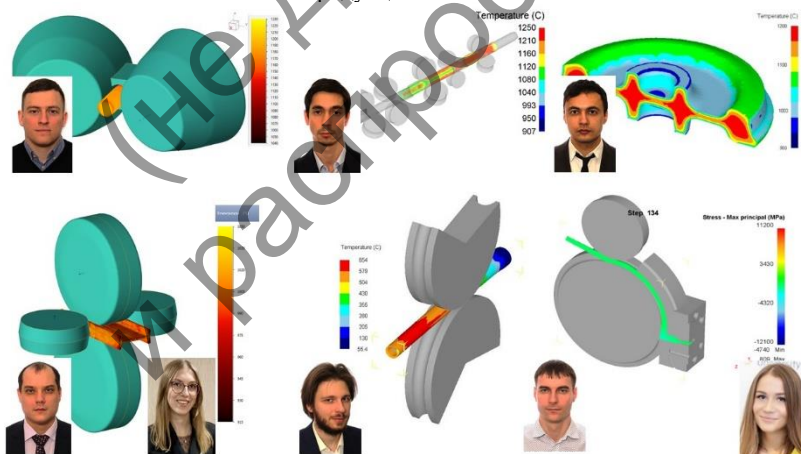
механики деформируемого тела. Он организовал проблемную лабораторию, подготовил 60 кандидатов и 6 докторов наук.

В дальнейшем указанный подход получил развитие в трудах заведующего кафедрой, а затем и члена-корреспондента РАН В.Л. Колмогорова, который кроме множества научных разработок большое внимание уделял созданию учебных пособий и учебников, разъяснявших новые научные принципы. Вместе с этим В.Л. Колмогоровым был предложен новый подход к математическому описанию процесса разрушения металлов.

В дальнейшем его ученик и последователь А.А. Богатов, он заведовал кафедрой обработки металлов давлением в течение 30 лет, применил предложенные принципы для описания ряда процессов обработки давлением и создал усовершенствованную модель разрушения. Им были созданы эффективные технологии прокатки и волочения труб, реализованные на заводах черной и цветной металлургии благодаря совместной работе аспирантов, научных сотрудников и работников самих предприятий.

На 60-ые – 80-ые годы пришелся пик развития кафедры, в этот период в ее составе было свыше 100 сотрудников.

С 2017 года кафедрой руководит доктор технических наук Шварц Данил Леонидович. Решением Ученого совета университета в марте 2019 года научной школе «Физика и механика обработки металлов давлением» присвоен статус Ведущей научной школы УрФУ. Научным руководителем школы является доктор технических наук Логинов Ю.Н. В 2014 году при кафедре создана молодежная научная лаборатория. Основные научные направления кафедры сегодня – это разработка научных основ создания новых функциональных материалов и изделий из них для машиностроения, приборостроения, транспорта, энергетических комплексов и АЭС, нефте- и газодобычи; анализ процессов пластической обработки металлов и сплавов с особыми реологическими свойствами; моделирование и прогнозирование показателей качества металлопродукции.



Сотрудники молодежной научной лаборатории «Обработка металлов давлением» (Павлов Д.А., Нухов Д.Ш., Салихьянов Д.Р., Непряхин С.О., Салихьянова Е.И., Постыляков А.Ю., Шимов Г.В., Бушуева Н.И.) активно применяют в научно-исследовательской деятельности цифровое моделирование процессов ОМД.

В образовательном процессе поддерживаются традиции кафедры, заложенные нашими Учителями. Кафедра осуществляет подготовку бакалавров и магистров по направлению – Металлургия.

Активное участие кафедра принимает в развитии, созданной в УрФУ, Уральской передовой инженерной школы. Сотрудниками кафедры разработана и подготовлена к реализации образовательная программа «Информационные системы и цифровые технологии в металлургии».

УДК

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ QFORM

**Гладков Ю.А.¹, Белугин В.С.¹, Стебунов С.А.¹, Мальцев П.А.¹,
Алимов И.С.¹**

¹ ООО «КванторФорм», г. Москва, Россия
gladyuri@qform3d.ru

В докладе рассмотрено применение программы QForm для моделирования процессов сортовой прокатки методом конечных элементов [2]. Специализированные модули программы учитывают особенности процесса прокатки, как для получения точного расчета (рис. 1), так и для упрощения задания исходных данных (рис. 2).

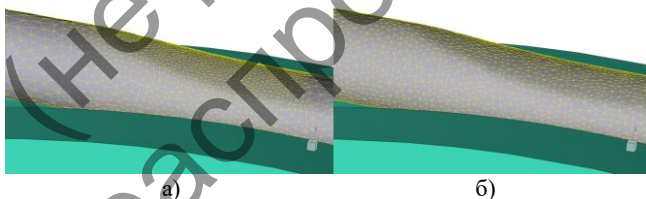


Рис. 1 – Метод двойной сетки для моделирования сортовой прокатки:
а) расчетная сетка; б) геометрическая сетка

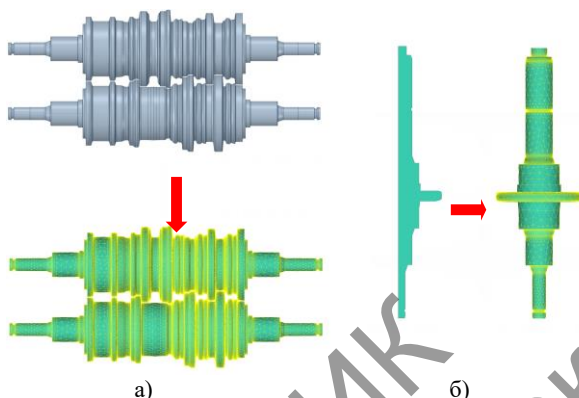


Рис. 2 – Импорт геометрии для создания КЭ-моделей валков в QForm:
а) 3D геометрия; б) 2D геометрия

Приведены результаты сравнения моделирования с экспериментами в реальных условиях (рис. 3), в которых отражена высокая сходимость по заполнению калибров, температурам проката и мощности приводов.

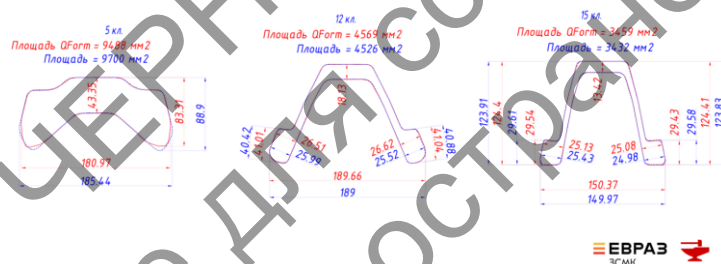


Рис. 3 – Экспериментальные и расчетные темплеты профиля шахтной стойки СВП27 на проходах 5, 12 и 15

Результаты моделирования могут быть немедленно проверены на соответствие параметрам заполнения калибров, скорости прокатки, температуры, силы прокатки, крутящего момента и других [1]. QForm позволяет интегрировать пользовательские программы на различных языках программирования. Так, в QForm интегрируется САПР Калибер, предназначенный для проектирования процессов прокатки, обеспечивая решение технологических задач при подготовке, отработке и практическом внедрении технологии сортовой прокатки.

Список литературы

1. Вусатовский З. Основы прокатки. Лейпциг : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1963.
2. Стебунов С., Биба Н., Власов А., Максимов А. Термически и механически связанное моделирование процессов обработки металлов [Текст] / С. Стебунов, Н. Биба, А. Власов, А. Максимов // 10-я Международная конференция по технологии пластической деформации, Ахен, Германия, 25-30 сентября 2011 г.

УДК 621.771.262

ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЯ НА УСИЛИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСЫ Р65

Белопипецкая Е.С., Соловьев В.Н.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
г.Липецк, Россия
e-mail belolipetskaya_es@mail.ru

Прокатка длинномерной рельсы Р65 осуществляется на рельсобалочном стане. В состав стана входят обжимные реверсивные клетки, непрерывная реверсивная универсальная группа «тандем» и отдельно стоящая универсальная калибровочная клетка. Прокатка в универсальной группе происходит за три прохода.

Во время третьего прохода в группе «тандем» наблюдается различие температур между передним и задним концом рельсы. Для выравнивания температуры по длине рельсы, предлагается использовать прокатку с ускорением в последнем проходе универсальной реверсивной группы клеток [1].

Во время моделирования процесса прокатки в программе QForm [2] проведена оценка влияния величины ускорения на усилие прокатки длинномерной рельсы Р65 в универсальных реверсивных клетках. Для сокращения времени расчета, моделирование проводилось не для 100 м рельсы, а только небольшого участка длиной 3 м. Для соответствия производственному режиму прокатки, моделирование проводилось по двум режимам: прокатка переднего конца (Голова) и прокатка заднего конца рельсы (Хвост). В данных режимах учитывалось время охлаждения переднего и заднего конца рельсы, до и после прокатки в универсальной реверсивной группе.

Проведено два расчета: прокатка с постоянной скоростью (П) и прокатка с ускорением (У). Прокатка с ускорением начинается в момент выхода переднего конца рельсы из непрерывной реверсивной группы, так как режим прокатки из-за этого не меняется, то в дальнейшем рассматриваться не будет.

Следовательно, основное сравнение проводилось по показателям прокатки заднего конца рельсы.

В таблице 1 представлены данные по усилию прокатки в непрерывной реверсивной группе по клетям. Оценка влияния ускорения на усилие прокатки проводилась по элементам сечения рельсы: голова, шейка, подошва.

Таблица 1 – Усилие по клетям

Усилие прокатки	УК1			ВК	УК2		
	Голова	Шейка	Подошва	Шейка	Голова	Шейка	Подошва
Рп, МП	0,381	0,614	0,462	0,501	0,534	0,893	0,816
Ру, МП	0,368	0,590	0,433	0,486	0,532	0,874	0,767
%	3,6	4,0	6,4	3,1	0,5	2,1	6,1

Во время моделирования прокатки рельсы с ускорением, сокращается время остывания заднего конца перед прокаткой. Благодаря этому заготовка имеет температуру больше, чем при прокатке с постоянной скоростью. Данная закономерность видна в таблице 1. Усилие, полученное при моделировании с постоянной скоростью Рп больше, чем усилие при моделировании прокатки рельсы с ускорением Ру на 6% в клетях УК 1 и УК2, и на 3% в клетях ВК.

Прокатка с ускорением позволяет выровнять температуру по длине раската. Температура на хвосте рельсы при прокатке с ускорением больше, чем при прокатке с постоянной скоростью. Это позволило снизить усилие на валках до 3-6%. Снижение усилия благоприятно для загрузки стана и износа валков.

Список литературы

1. RU 2776314 C1. Способ прокатки рельса (варианты).
2. Белопищевская Е.С. Соловьев В.Н. Прокатка длинномерной рельсы с ускорением: Труды XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2021». Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021, с. 248-255.
3. Шварц Д.Л. Разработка теоретических основ и обоснование основных технологических решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на универсальных рельсобалочных станах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.05. Екатеринбург: 2019.

УДК 669

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВАХ

Кищик М.С.¹, Кищик А.А., Котов А.Д.

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Сегодня большое внимание уделяется научным исследованиям, позволяющим улучшить комплекс свойств уже известных промышленных сплавов. Для получения высоких механических свойств необходимы методы уменьшения среднего размера зерна. Одним из наиболее популярных методов получения ультрамелкозернистой структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД), которая позволяет эффективно измельчать зерно путем накопления высокой степени деформации. Основным недостатком этих методов является невозможность получить крупные заготовки. Однако, всесторонняя ковка - вид деформационной обработки, который позволяет получать ультрамелкозернистую структуру в массивных заготовках без изменения исходной геометрии. Данный вид получения образцов является наиболее перспективным для внедрения в промышленное производство, так как реализуется на стандартных прессах. Основная идея процесса ВИК заключается в серии осадок на 40-60% в закрытой матрице с изменением оси деформации на 90° [1], что позволяет прорабатывать зоны застойной деформации [2].

Целью данной работы является анализ деформационного поведения и изучение особенностей формирования микроструктуры свинцовой латуни ЛС-59-1 в процессе всесторонней изотермическойковки с целью формирования основ улучшения её технологических характеристик.

В работе исследована многокомпонентная латунь ЛС59-1. Пластическую деформацию образцов методом всесторонней изотермическойковки проводили на универсальной испытательной машине УМЭ-10Т с максимальным усилием 10 тонн. Образцами для испытаний служили изготовленные на фрезерном и электроэрозионном станках параллелепипеды с рабочими размерами 18×9×9 мм. Для обеспечения постоянных размеров образцов во время осадки использовали специальные ограничители и штампы, позволяющие получать заведомо известные размеры образцов и контролировать степень деформации на каждом этапе. Была реализована схема, в результате которой форма и размеры образцов возвращались к исходным. Реализованная схема накапливала за одну осадку 0,8 истинной деформации и 2,4 за полный цикл смен осей деформации.

Микрозернистую структуру и распределение фаз анализировали в срединном поперечном слое после трех ($\sum \epsilon = 7,2$) и шести ($\sum \epsilon = 14,4$) циклов (рис. 1). Трение между образцом и штампом приводит к тому, что интенсивность деформации около бойков меньше номинального значения, в то время как в центральной части образца степень деформации превышает номинальное. Условно, степень деформации соответствует номинальному значению на высоте 1/3 и 2/3 от высоты образца, в связи с чем микроструктуру после разного количества циклов ВИК анализировали в срединном поперечном слое на всех образцах на высоте 1/3 высоты от поверхности образца.

Размер зерна, как в случае деформации при 500 °С, так и при 400 °С, с увеличением числа осадок сначала резко уменьшается, а затем меняется слабо вплоть до шести исследованных циклов (рис. 1а). Средний размер зерна при 500 °С уменьшается с $33,7 \pm 0,2,9$ мкм до $3,3 \pm 0,2$ мкм. В случае снижения температуры ВИК до 400 °С наблюдается более эффективное измельчение зеренной структуры. Средний размера зерна снижается до $2,2 \pm 0,1$ мкм.

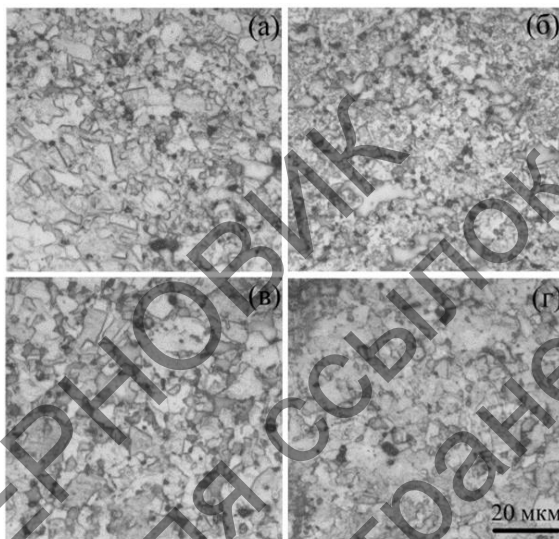


Рис. 1 – Микроструктура срединного слоя после трех (а,в) и шести(б,г) полных циклов при 400 °С (а,б) и 500 °С (в,г)

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-79-01080.

Список литературы

1. Langdon T.G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement // Acta Mater. Acta Materialia Inc., – 2013. – Vol. 61. – № 19. – P. 7035–7059.
2. Anna Dziubińska, Andrzej Gontarza, Karina Horzelskab P.P. The microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy aircraft brackets produced by a new forging technology // Procedia Manuf. 2. – 2015. – Vol. 2. – № February. – P. 337–341.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Байковский Ю.В.¹, Константинов И.Л.², Парубок А.В.³

*^{1,2,3} ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
Baykovskjy98@gmail.com*

С развитием автомобилестроения растет потребность в улучшении методов производства автомобильных деталей, в первую очередь колес. Ранние методы включали раскатку и штамповку стальной полосы с последующей сваркой, что обеспечивало массовое производство и относительно низкую стоимость продукции. Точность геометрии и балансировка дисков были, сравнительно, невысокими, однако, эксплуатационные свойства таких колес были достаточными. В последствии, с увеличением мощности автомобильных двигателей повысились и требования к остальным деталям, в том числе и к колесам [1].

В современных реалиях производства автомобильных дисков все чаще применяются алюминиевые сплавы, которые обеспечивают надежность, возможность получения сложных конфигураций дизайна спиц и, что не мало важно, такие колеса легче стальных аналогов на 20-30%. Перечень отечественных марок алюминиевых сплавов, которые наиболее популярны при производстве колес, представлен в таблице 1. В настоящее время, чаще всего применяются следующие технологии получения дисков из алюминиевых сплавов: литье под низким давлением, горячая объемная штамповка, раскатка, а также комбинация литейных и деформационных процессов [2].

Таблица 1 – Марки алюминиевых сплавов, применяемые в производстве дисков

Сплав	Химический элемент, % содержания масс.							
	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Zn	Пр.	Al
AK7	6-8	0.2-0.6	0.2-0.5	<1.5	<1.3	<0.5	<0.1	Ост.
AK12	10-13	<0.5	<0.1	<0.6	<1.5	<0.3	<0.2	Ост.
AD35	0.7-1.3	0.4-1.0	0.6-1.2	<0.1	<0.5	<0.2	<0.4	Ост.
ABE	0.45-0.6	-	0.4-0.6	<0.05	<0.7	<0.05	<0.1	Ост.

Получение дисков литьем под низким давлением, на данный момент, является наиболее распространенным способом, т.к. обеспечивает высокое качество изделия и отсутствие таких дефектов, как раковины и поры. При данной технологии отходы производства сравнительно малы, что значительно снижает затраты на производство единицы изделия, однако главный недостаток процесса литья заключается в том, что конечная продукция имеет ненаправленную кристаллическую структуру, из-за чего, для достижения нужного показателя прочности, необходимо увеличивать сечение колеса.

В целях экономии металла и обеспечения нужной механической прочности, все чаще применяются комбинированные методы производства колес. Повсеместно используются различные комбинации, однако, наибольшую популярность обрела технология, включающая в себя литьё под низким давлением с последующей раскаткой обода [3]. Такая методика обеспечивает получение эксплуатационных характеристик на уровне кованого диска, стоимость которого, лишь незначительно выше, чем у литого аналога.

Зачастую, при получении автомобильных колес совмещенным методом, в качестве материала используются деформируемые сплавы, которые имеют больший ресурс пластичности, но уступают литейным по сложности своей формы. При производстве дисков со сложной конфигурацией спиц рекомендуется использование литейных сплавов, которые не предназначены для последующей обработки давлением и имеют ограниченный запас пластичности, что, при комбинированной технологии получения автомобильных дисков, вызывает необходимость исследования реологических свойств используемого материала. Для определения реологии сплава следует провести комплекс испытаний на определение его деформационных характеристик, а для изучения формоизменения металла при обработке давлением, предварительно рекомендуется проведение компьютерного моделирования. Наиболее подходящими программными комплексами для задания необходимых граничных условий являются QForm (КванторФорм, Россия) и Deform (Scientific Forming Technologies Corporation, США) [4]. Определение зависимости напряжения текучести от суммарной степени деформации рекомендуется проводить на универсальном оборудовании для определения механических свойств и величин Gleeble, которое позволяет при минимальных затратах времени и материальных ресурсов получить информацию о поведении металла и изменении его механических свойств при процессах ОМД, сварки, литья и др.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013

Список литературы

1. ГОСТ 33544-2015. Автомобильные транспортные средства. Колеса дисковые. Технические требования и методы испытаний – Москва: Стандартинформ, 2017.
2. Богданова, Т. А. Разработка конкурентоспособной технологии литья автомобильных колес из силумина на основе алюминия А7: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Богданова Татьяна Александровна. – Красноярск, 2015. – 22 с.
3. Современные технологии изготовления дисков автомобильных колес / Т. А. Богданова, Н. Н. Довженко, Т. Р. Гильманшина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 226.
4. Evaluation of the manufacturability of aluminum alloy 1580 for sheet stamping by computer modeling / I. L. Konstantinov, S. B. Sidelnikov, P. O. Yuryev, Yu. V.

УДК 669.36:621.771.2

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ ВОСКОВОГО ПОКРЫТИЯ МЕДНОЙ КАТАНКИ НА ПРОЦЕСС ВОЛОЧЕНИЯ

Бушуева Н.И.¹, Логинов Ю.Н.¹

*¹Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
n.i.bushueva@urfu.ru*

Примерно половину медной катанки России производит предприятие «Уралэлектромедь». Катанка из меди марки М00 востребована в дальнейшем в волочильном производстве с целью получения проволоки электротехнического назначения. Для связывания вредных примесей в меди искусственно создают повышенное содержание кислорода, в результате электропроводность материала повышается [1]. Этим медь электрического назначения отличается от меди электронного назначения, где главным требованием является снижение препятствий для прохождения слаботочных сигналов.

Катанка марки М00 производится путем получения непрерывно литой заготовки прямоугольного сечения [2] с последующей сортовой прокаткой [3] до диаметра 8 мм. Наличие пластической деформации высокого уровня позволяет получать изотропную медь в отличие от анизотропной меди - так называемой литой катанки [3].

После прокатки катанку покрывают слоем воска для предохранения от окисления при последующей транспортировке на предприятия кабельной индустрии. В последующем будет применен процесс волочения для получения проволоки заданного диаметра. Обычно этот процесс осуществляется на волочильных многопроходных станах с применением жидкой смазки. В цветной металлургии большее внимание уделяют качеству поверхности продукта, поэтому смазку стараются наделить свойствами моющего вещества, позволяющего смывать налипшие на поверхность проволоки частицы, которые могут являться следствием износа калибров [4] либо другого инструмента, а сверх того, в смазке появляются частицы меди как продукт разрушения поверхности, возникшие, например, от закатов металла. Твердая смазка не подходит для выполнения функции моющего вещества.

При этом к моменту начала волочения на поверхности медной катанки оказываются два вещества: восковое покрытие и собственно слой смазки. Возникает вопрос о взаимодействии этих слоев. На первый взгляд оба вещества выполняют роль материалов, снижающих напряжения трения. Но параллельно в существующих технологиях существует такой подход, что смазка должна удерживаться поверхностью заготовки. Этого не происходит

при наличии воскового покрытия, которое обладает гидрофобными свойствами – оно не способно удержать жидкую смазку.

Выполнен промышленный эксперимент с различной подачей воскового покрытия на поверхность медной катанки. На (рис. 1) отражен временной график расхода покрытия: 0,15 л/мин и 0,4 л/мин.

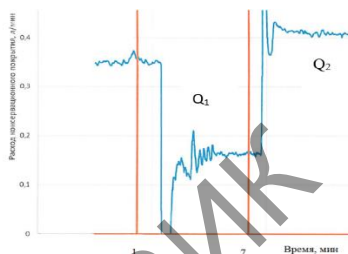


Рис. 1 – График расхода воскового покрытия на поверхность медной катанки на участках Q1 и Q2

Впоследствии, уже на волочильном стане отслежено изменение крутящего момента при прохождении участков с одним и вторым вариантом покрытия. Момент отслеживался мониторинговой системой стана в процентах от номинальной величины. График крутящих моментов представлен на (рис. 2).

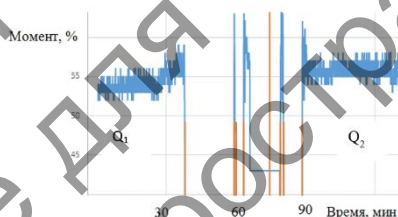


Рис. 2. – График крутящих моментов в первом проходе волочения при расходе воскового покрытия Q1 и Q2

На графике видно, что при переходе на большую толщину воскового покрытия момент увеличивается. Это можно объяснить тем, что воск экранировал действие смазки, при этом напряжения трения на поверхности инструмента увеличились, что привело к увеличению момента на тяговом шкиве.

Список литературы

1. Логинов Ю. Н. Медь и деформируемые медные сплавы. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 136 с.
2. Сулицин А. В., Мысик Р. К., Брусницын С. В. и др. Непрерывное литье меди. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ. 2016. – 374 с.

3. Логинов Ю. Н., Постыляков А. Ю., Инатович Ю. В. Сортовая прокатка меди. – Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 132 с.

4. Логинов Ю.Н., Зуев А.Ю. Формоизменение и сопротивление деформации анизотропной непрерывно-литой меди // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 32-37.

УДК 691.75

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА БИОДЕГРАДИРУЕМЫЙ СПЛАВ ZN-0.5AG-0.8AL

Нугаманов Ф.В.¹, Хафизова Э.Д.¹, Исламгалиев Р.К.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
nugamanovflyur@yandex.ru

В настоящее время остается открытым вопрос поиска биodeградируемых материалов со свойствами равными стальным и кобальтхромовым сплавам, применяемые в медицине для остеосинтеза. На протяжении нескольких последних лет научное сообщество исследовало биodeградируемые сплавы на основе цинка и магния, поскольку сплавы на основе этих металлов обладают уникальными свойствами, такими как, приемлемая скорость коррозии и нетоксичность. Данные материалы являются биосовместимыми с организмом человека и одновременно биорезорбируемыми, что является большим преимуществом, поскольку исключает необходимость повторной операции по удалению отслужившего имплантата. В недавних исследованиях было продемонстрировано, что повышение прочностных свойств в металлах и сплавах возможно путем измельчения зеренной структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД) ^[1].

В данной работе исследовался сплав Zn-0.5Ag-0.8Al, подвергнутый интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Деформация проводилась на установке СКРУДЖ-200 при комнатной температуре, с давлением 6 ГПа, скоростью 1 об/мин с числом оборотов 2 и 10.

ИПДК приводит к значительной трансформации зеренной структуры (рис.1) и повышению механических свойств. В работе рассмотрены механизмы формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, приводящие к изменению механических свойств.

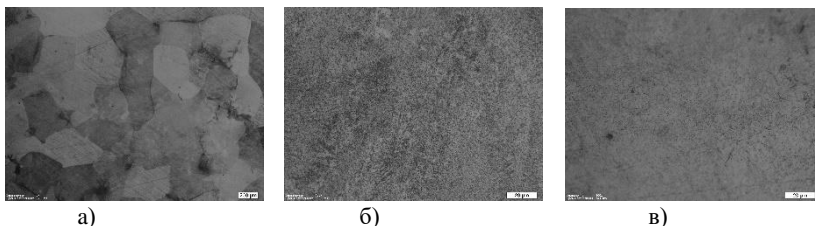


Рис 1. — а) Структура в исходном состоянии, б) Структура после ИПДК 2 оборота, в) Структура после ИПДК 10 оборотов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 21-53-46017 СТ_а «Исследования по изготвлению и аттестации новых ультрамелкозернистых биодеградируемых уретральных стентов».

Список литературы

1. Shiliang Chen, Tianming Du, Hanbing Zhang, Jing Qi, Yanping Zhang, Yongliang Mu, Aike Qiao, Methods for improving the properties of zinc for the application of biodegradable vascular stents, *Biomaterials Advances*, Volume 156, 2024, 213693, ISSN 2772-9508, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213693>.

УДК: 621.771

ДОСТОИНСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

**Песин И.А.¹, Пуставойтов Д.О.¹, Песин А.М.¹, Носов Л.В.¹,
Никитина М.А.¹, Цатуриц М.С.¹, Грачев Д.В.¹, Барышникова А.М.¹**

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Российская Федерация, Ипуа33392@bk.ru

Первые сведения об асимметричной прокатке датированы еще концом XIX века, первый патент был получен в 1942 г. В 60-е – 80-е годы XX века в СССР и за рубежом создаются научные школы, появляются первые прокатные станы асимметричной прокатки. Их основным достоинством видится снижение усилия прокатки и улучшение плоскостности. С 2000-х годов начинается второе рождение асимметричной прокатки. В Японии, Южной Корее, Китае, США, Германии и других странах появляются промышленные, промышленно-лабораторные и лабораторные станы с возможностью использования асимметричной прокатки [1-6]. В Магнитогорске в 2018 г. была создана лаборатория «Механика градиентных наноматериалов», которой в 2021 г. было присвоено имя ведущего ученого А.П. Жилиева (1959-2020), и запущен в

эксплуатацию уникальный промышленно-лабораторный стан 400 асимметричной прокатки. По такому важному параметру как отношение скоростей рабочих валков (от 1 до 10) он опережает ближайшие аналоги из США и Южной Кореи (от 1 до 5) в 2 раза [7]. Анализ литературных источников и многочисленные эксперименты на стане 400, показали, что при асимметричной прокатке могут возникать новые уникальные (в сравнении с традиционным процессом симметричной листовой прокатки) технологические эффекты: снижения усилия прокатки, снижения мощности прокатки, эффект равномерной (однородной) деформации по толщине, низкотемпературной динамической рекристаллизации, динамического деформационно-индуцированного фазового превращения, повышения технологической пластичности (деформируемости) обрабатываемых металлов и сплавов, повышения прочностных и пластических свойств обрабатываемых металлов и сплавов, деформационно-фрикционного разогрева и др [1-7].

Асимметричная прокатка, в некотором смысле, является парадоксальным методом деформации. На первый взгляд кажется, что асимметрия должна обязательно приводить к неравномерности деформации и, соответственно, разнородности по толщине обрабатываемых листов и полос. Однако неравномерность деформации по толщине, невозможность требуемой проработки центральных слоев и разнородность по толщине наблюдаются как раз в традиционных симметричных процессах прокатки. В свою очередь, асимметричная прокатка позволяет полностью прорабатывать толщину, включая центральные слои листов и полос, обеспечивать равномерную (однородную) деформацию по сечению и, соответственно, однородное распределение микроструктуры по толщине.

Асимметричное деформирование может применяться при горячей толстолистовой и широкополосной прокатках, холодной прокатке, крио прокатке, прокатке в многовалковых калибрах и др. различных металлов и их сплавов, а также при производстве слоистых материалов [7].

Следует отметить, что главной особенностью асимметричной прокатки является поворот очага деформации, вызванный крутящим моментом от противоположно направленных сил трения на контактах проката с верхним и нижним рабочими валками.

В качестве ограничений можно выделить следующие:

- момент на ведущем валке не должен быть выше допустимого;
- температура эмульсии не должна подниматься выше 150°C при холодной прокатке и др.

Список литературы

1. Песин, А. М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки / А. М. Песин // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2002. – № 1. – С. 107-113.
2. Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiązania / H. Dyzia, V. M. Salganik, A. M. Pesin, A. Kawalek. – Ченстохова: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2008. – 345 p.

3. Pesin, A. Finite element simulation of extremely high shear strain during a single-pass asymmetric warm rolling of Al-6.2Mg-0.7Mn alloy sheets / A. Pesin, D. Pustovoytov // International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, Hucisko, 17–22 сентября 2017 года. – Hucisko, 2017. – P. 1463-1468.

4. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / A. Pesin, D. Pustovoytov, A. Korchunov [et al.] // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2014. – No. 4(48). – P. 32-40.

5. Mathematical modelling of the stress-strain state in asymmetric flattening of metal band / A. Pesin, V. Salganik, E. Trahtengertz [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 125-126. – P. 689-694.

6. Mathematical modelling of the stress-strain state in asymmetric flattening of metal band / A. Pesin, V. Salganik, E. Trahtengertz [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 125-126. – P. 689-694.

7. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / Д. О. Пустовойтов, А. М. Песин, И. А. Песин [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 2(41). – С. 32-40.

УДК 669.245

ТВЕРДОФАЗНАЯ СВАРКА РАЗНОИМЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Галиева Э. В.¹, Классман Е. Ю.¹, Валитов В. А.^{1,2}, Габбасов Р. Р.^{1,3}

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

²Уфимский университет наук и технологий, Уфа, Россия

³Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,

Россия

galieva_elvina_v@mail.ru

В авиационной промышленности широкое применение находят жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС). Так, например, в авиационных двигателях, порядка 50% деталей изготавливаются из ЖНС. Сложный химический состав современных ЖНС, обеспечивающий достижение требуемых характеристик жаропрочных свойств за счет твердорастворного упрочнения и выделения внутризеренных когерентных частиц упрочняющих фаз, привел к существенному снижению их технологической пластичности, повышению трудоемкости при обработке, а также к снижению коэффициента использования металла [1]. По этой причине для изготовления биметаллических деталей из указанных сплавов целесообразно использовать эффект сверхпластичности. Так, одним из наиболее высокоперспективных способов получения соединений в твердом состоянии является сварка давлением в условиях сверхпластичности, которая позволяет соединять не только однородные, но и разнородные материалы [2].

Данная работа посвящена исследованию влияния термической обработки на микроструктуру и фазовый состав, а также свойств твердофазных соединений из разноимённых никелевых сплавов.

В качестве материалов для исследований были выбраны жаропрочный порошковый никелевый сплав ЭП741НП с предварительно подготовленной мелкозернистой структурой и литой интерметаллидный на основе Ni₃Al монокристаллический сплав ВКНА-25. Сварку давлением проводили на испытательной машине Shenck Trebel типа RMS100 в условиях сверхпластичности сплава ЭП741НП при температуре 1125 °С и начальной скорости деформации 10⁻⁴ с⁻¹. Термическая обработка включала в себя закалку и старение. Микроструктурные исследования, в том числе EBSD анализ, проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMH (TESCAN). Исследование распределения легирующих элементов проводилось посредством энергодисперсионного анализа на микроскопе Tescan VEGA 3SBH с EDX приставкой. Механические испытания на одноосное растяжение плоских образцов с размерами рабочей части 2x3x6 мм³ проводили при комнатной температуре при помощи испытательной машины Instron 5982.

По результатам исследований установлено, что в микроструктуре зоны твердофазного соединения выявляется линия, которая является границей раздела двух сплавов (Рисунок 1а, обозначенная белыми стрелками). Установлено, что в результате сварки давлением формируется диффузионная зона, ширина которой составляет 14-28 мкм. Хрупких частиц в зоне соединения не обнаружено, пористость не превышает 15%.

В результате сварки давлением и последующей термической обработки, полученных сварных образцов ВКНА-25//ЭП741НП, происходят микроструктурные изменения. Микроструктура сплава ЭП741НП становится крупнозернистой. В интерметаллидном сплаве на глубину 5-10 мкм от границы раздела двух сплавов, микроструктура становится идентичной микроструктуре сплава ЭП741НП, а далее наблюдается микроструктура характерная для сплава ВКНА-25. По данным энергодисперсионного анализа установлено, что происходит диффузия никеля и алюминия из сплава ВКНА-25 в сплав ЭП741НП. Ширина диффузионной зоны после термической обработки увеличилась ≈4 раза. Прочность сварных соединений при комнатной температуре после сварки давлением составила 1080 МПа, а после термической обработки увеличилась до 1200 МПа, в обоих случаях разрушение произошло по сплаву ВКНА-25.

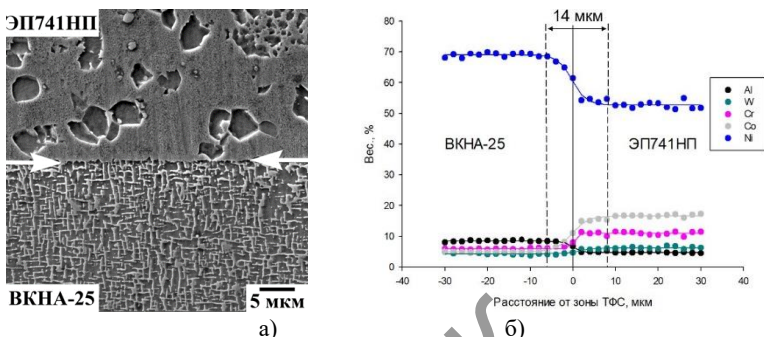


Рис. 1. - Твердофазное соединение ЭП741НП/VKNA-25: а) микроструктура зоны соединения после сварки давлением, б) энергодисперсионный анализ зоны соединения

Работа выполнена в рамках Гранта Республики Башкортостан молодым ученым (Грант РБ 2023-2024, соглашение №1 от 14 августа 2023 г.). Микроструктурные исследования осуществляли на оборудовании Центра Коллективного Пользования ИПСМ РАН.

Список литературы

1. Симс Ч. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. // Ч. Симс, Т. Столофф, В. Хагель; в 2-х кн. – пер. с англ. М. : Металлургия, 1995. - 568 с.
2. E.V. Galieva, R.Ya. Lutfullin, A. Kh. Akhunova, V. A. Valitov, S. V. Dmitriev Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys // Science and technology of welding and joining. - 2018. - V. 23. - No 7. - P. 612–618.

УДК

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДРОБИ НА ТЕХНОЛОГИЮ ПРОИЗВОДСТВА И КАЧЕСТВО КАЛИБРОВАННОГО ПРОКАТА

Морарь М.А.¹, Ясюкевич Н.С.¹, Столяров А.Ю.¹

¹ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия
morarmargarita969@gmail.com

На предприятии ОАО ММК-МЕТИЗ была проведена модернизация оборудования, в рамках которой произошла установка комбинированных линий волочения фирмы EJP. Впервые, в условиях предприятия, дробеметная

обработка была установлена в составе линии по производству металлопроката. Именно поэтому, особое внимание при разработке технологии производства было уделено исследованию дробеметной подготовки поверхности.

Особенности процесса волочения металла после дробеметной обработки связаны с состоянием поверхностного слоя, на которое оказывают влияние параметры дроби, и отсутствием традиционных операций по нанесению подмазочного слоя для улучшения захвата смазочных материалов и нагнетания их в очаг деформации при волочении [1].

В свою очередь это диктует необходимость проведения исследований влияния параметров дроби на технологию производства и качество калиброванного проката.

В работе проводились экспериментальные исследования шероховатости поверхности проката после применения дроби различной формы и размеров, проведен сравнительный анализ параметров дроби различных поставщиков, рассмотрено влияние скорости прохождения проката через дробеметную установку на шероховатость поверхности, подобран сбалансированный состав дроби.

По результатам проведенных исследований были подобраны параметры дроби: форма, размер, твердость и определены технологические параметры дробеметной очистки: сбалансированный состав рабочей смеси, объем и частота подаваемой дроби, контроль положения горячей точки.

Таким образом, контроль и управление параметрами дроби и процесса очистки, позволит повысить производительность дробеметной обработки поверхности на предприятии.

Список литературы

1. Стальная проволока: монография / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им.Г.И. Носова, 2011.- 689с.

УДК 691.75.191

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-0,8wt%Li

Хасанова А.Р.¹, Кулясова О.Б.¹, Аксенов Д.А.¹, Большаков Б.О.¹
¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, З.Валиди, 32
xasanova-0303@mail.ru

В последние годы цинк и его сплавы привлекли к себе внимание как класс коррозорируемых материалов благодаря их биосовместимости и коррозионной стойкости [1]. Недостатком чистого цинка является невысокая прочность. Вследствие этого целью настоящей работы являлось повышение

механических свойств биоразстворимого сплава Zn-0,8Li формированием ультрамелкозернистой структуры методом интенсивной пластической деформации [2].

Образцы Zn-0.8вес%Li (далее Zn-0.8Li) были подвергнуты пластической деформации прокаткой при температуре 300 °С на степень деформации 70%, а затем интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования по следующему режиму: по 2 прохода при температурах 300 °С, 250 °С, 200 °С, 150 °С. Общее количество проходов было равно 8. При равноканальном угловом прессовании (РКУП) использовали прокатанные образцы сечением 10x10 мм и длиной 100 мм.

Было установлено, что сплав Zn-0,8Li после гомогенизационного отжига при температуре 300 °С состоит из двух фаз: твердый раствор Zn (33,3%) и β -LiZn₄ (66,7%) (рис. 1а). Zn находится в эвтектике E-Zn+LiZn₄ (61,5%) и LiZn₄, как отдельная фаза, 38,5%.

В процессе прокатки структура трансформируется, происходит фазовое перераспределение (рис. 1б). В одной из фаз происходит формирование зеренной структуры с размером 10 мкм. Последующая деформация РКУП приводит к измельчению зеренной структуры до 2 мкм. (рис. 1в)

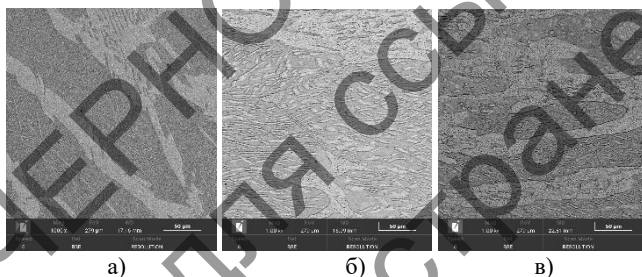


Рис. 1 – Оптические фотографии поверхности образца:

а) исходное состояние; б) после прокатки; в) после прокатки и РКУП

Исследования механических свойств показало, что в исходном состоянии сплава микротвердость составила 101 НV. После прокатки и РКУП 135 НV и 130 НV соответственно. Установлено, что в исходном состоянии образцы демонстрируют хрупкое разрушение, при котором невозможно определить пределы текучести и прочности. Тогда как после прокатки образцы показали пластичность 4% и предел текучести и предел прочности 484 и 541МПа соответственно. В результате трансформации структуры в процессе РКУП после прокатки пластичность образцов увеличилась до 17%, а предел текучести и предел прочности составили 420 и 512 МПа соответственно. Увеличение пластичности и снижение прочностных характеристик возможно связаны с проявлением сверхпластичности образцов.

Список литературы

1. Tapiero H., Tew K.D. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins // Biomed. Pharmacother. – 2003. – № 57. – P. 399–411.
2. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства/ Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

УДК 621.77

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВА Al-0.8(Ce,La)-0.2Zr-0.2Fe ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОВОЛОКИ С УЛУЧШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ

**Бернгардт В.А., Беспалов В.М., Ворошилов Д.С.,
Байковский Ю.В., Дармажапов Д.Б.**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация
Berngardt19@mail.ru

Повышение термостойкости, прочности и электропроводности проводниковой проволоки из алюминия является актуальной задачей для авиационной промышленности, электротехники и автомобилестроения [1].

Для достижения поставленной задачи с помощью компьютерного моделирования в Deform 3D и экспериментов установлены характер течения металла, деформационные, температурно-скоростные, энергосиловые параметры и свойства проволоки после: бесслитковой прокатки-прессования (БПП) до $\varnothing 5$ мм с температурой заливки 850°C , обжатием при прокатке 50%, и коэффициентом вытяжки 14.3; последующего волочения прутков до $\varnothing 4.5$ мм со скоростью 0.17 м/сек и обжатием 20%; ступенчатого отжига $300\text{--}400\text{--}450^\circ\text{C}$, 50 ч; завершающего волочения до $\varnothing 0.8$ мм с обжатием 97%. Результаты расчета параметров БПП, представлены на рис. 1.

а)

б)

в)

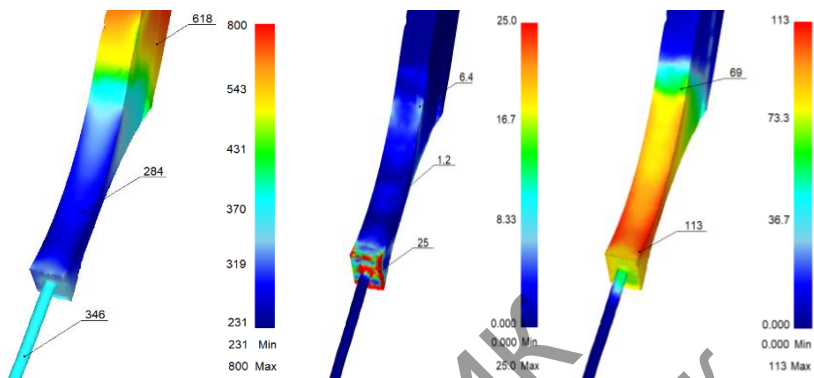


Рис. 1 – Параметры процесса БПП по модели: а) температура, °С; б) скорость деформации, с⁻¹; в) интенсивность напряжений, МПа

Характер течения металла в процессе БПП после расчета сетки Лагранжа в Deform 3D и металлографического анализа структуры строения зерна реального пресс-остатка показаны на рис. 2.

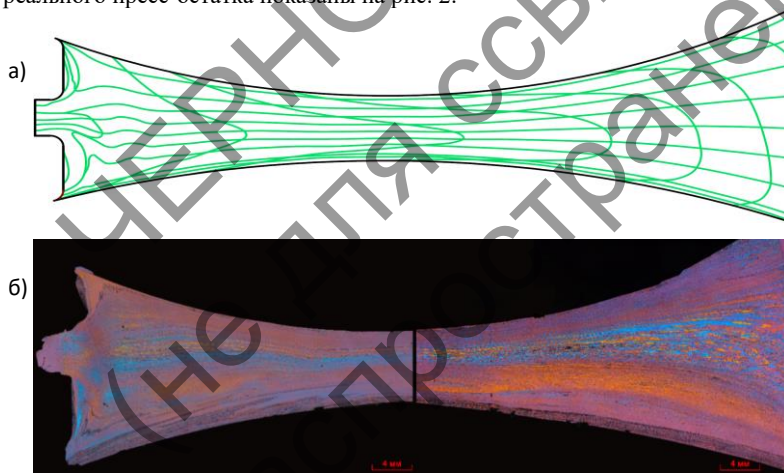


Рис. 2 – Характер течения металла в процессе БПП: а) расчетная сетка Лагранжа в Deform 3D; б) структура пресс-остатка

Свойства после всех этапов совмещенной обработки экспериментального сплава представлены в таблице.

Табл. – Свойства прутков и проволоки из экспериментального сплава

Вид обработки	d, мм	R _m , МПа	A, %	ρ, Ом·мм ² /м
БПП	5.0	136	29	0.0320

волочение	4.5	136	20	0.0318
ступенчатый отжиг	4.5	120	23	0.0283
волочение	0.8	200	2	0.0294
d – диаметр изделия				

Предложенный состав сплава и технология обработки обеспечивают хорошее сочетание предела прочности проволоки R_m – 200 МПа, относительного удлинения δ – 2% и удельного электрического сопротивления ρ – 0.0294 Ом·мм²/м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-79-00108, <https://rscf.ru/project/22-79-00108/>.

Список литературы

1. Bepalov V.M., Voroshilov D.S., Bergardt V.A., Sidelnikov S.B., Konstantinov I.L. and etc. Influence of the Parameters of Combined Processing and Drawing on the Structure and Properties of Conductor Semi-finished Products From Aluminum Alloys with Additives of Rare Earth and Transition Metals. *Metals and Materials International*. – 2024. – No 30(3). – P. 773-799. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01526-3>

УДК 621.77

ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/6061 ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКЕ

Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Могильных А.Е.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия
e-mail: fimapatonchik@inbox.ru

Современное развитие в области цветной металлургической промышленности вызывает необходимость решать задачи повышения качества готовой продукции. Улучшение механических свойств металлов и сплавов является неотъемлемым требованием при разработке новых технологических решений по обработке материалов. Стоит отметить, что методы интенсивной пластической деформации позволяют значительно улучшить прочность и твердость материалов с возможностью сохранения или даже повышения уровня пластичности. Особый интерес представляет собой аккумулярующая прокатка, которая в сочетании с кинематической асимметрией (изменением отношений скоростей рабочих валков) позволяет достичь одновременное увеличение перечисленных свойств [1, 2].

Исследование возможности регулирования механических свойств листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/6061 проводилось на

уникальной научной установке лабораторно-промышленном стане 400 асимметричной прокатки. Рассматриваемые алюминиевые сплавы широко применяются в автомобилестроении, авиационной и космической технике, электротехнике. Основные параметры процесса асимметричной аккумулярующей про-катки включали в себя: отношение скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 1...5$, максимальная скорость рабочих валков $V = 10$ об/мин, радиус рабочих валков $R = 170$ мм, толщина заготовок $h = 1...2$ мм, общая начальная толщина композита $h_0 = 3$ мм, начальная температура сплавов $t = 20...350$ °С, относительное обжатие $\varepsilon = 45...75$ %.

По результатам обработки выявлено повышение твёрдости, прочности и пластичности в диапазоне отношение скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 1,25...3,3$. Более высокое значение отношения скоростей рабочих валков характеризуется плавлением листового слоистого композита 5083/6061 в очаге деформации. В таблице 1 приведены результаты испытаний на растяжение полученных материалов после асимметричной аккумулярующей прокатки.

Таблица 1 – Свойства листового слоистого алюминиевого композита 5083/6061

Свойства	Отношение скоростей рабочих валков V_1/V_2		
	1,25	2,5	3,3
Временное сопротивление	273 МПа	295 МПа	320 МПа
Относительное удлинение	3 %	8 %	12 %

Благодарность. Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 23-79-30015)

Список литературы

1. Бирюкова О.Д. Исследование влияния асимметрии при аккумулярующей прокатке на свойства листовых слоистых алюминиевых композитов // Кайбышевские чтения: сборник материалов Третьей Международной школы-конференции молодых ученых. – Уфа, 2023. – Т. 1. – С. 19-20.

2. Песин А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 81-96.

УДК 669.717, 669.7.017

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ЛИСТОВ СПЛАВА AL-4%CU-2%MN-0.5%CA-0.2%ZR

Цыденов К.А.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

Новейшие разработки в автомобилестроении, стремительный рост городов, новые возможности использования алюминия в качестве замены меди в энергетике – эти и многие другие тенденции позволяют алюминию упрочнить свою лидирующую позицию как ключевого материала современности [1]. Поэтому повышение механических характеристик алюминиевых сплавов является важной задачей. У марочных сплавов существует серьезный недостаток, который заключается в их недостаточной жаропрочности. В ряде применений, в частности, для поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС), максимальный уровень рабочих температур является главным критерием, который определяет возможность длительной эксплуатации изделий. Примером марочных жаропрочных алюминиевых сплавов являются Ni-содержащие силумины, которые, как правило, используются для получения поршней ДВС [2]. В ряде случаев их используют для технологий, включающих деформационную обработку. Поршневые силумины, в частности, эвтектические АК12ММгН и АК12М2МгН – это сплавы с большой объемной долей фаз (прежде всего, Si- и Ni-содержащих), поэтому их пластичность мала ($\delta < 1\%$). Другим недостатком этих сплавов является то, что при температурах выше 250–300 °С они сильно разупрочняются.

В работах [3, 4] приведено обоснование принципиальной возможности создания высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов нового поколения на основе системы Al-Cu-Mn(Zr) с повышенной прочностью и термостойкостью (до 400 °С). Сплавы подобного состава не требуют гомогенизации и закалки, а упрочнение достигается за счет деформированной структуры, которая сохраняется даже после отжига при 400 °С, это объясняется наличием термически стабильных вторичных выделений Al_3Zr и $Al_{20}Cu_2Mn_3$, которые способствуют сдерживанию рекристаллизации [3, 4].

В данном исследовании литьем в графитовую изложницу были получены слитки размерами 10x40x180 двух сплавов: первый сплав Al-11Si-3Cu-1Ni-0,3Mn-0,5Mg (далее П-1), второй сплав 4%Cu–2%Mn–0,5Ca–0,2Zr (далее П-2). Сплав П-1 готовили на основе АК12пч, а П-2 на основе первичного алюминия А99. Медь и магний вводили в чистом виде, марганец, никель и цирконий в виде лигатуры Al–20% Mn, Al–20%Ni и Al–15%Zr соответственно.

Слитки экспериментальных сплавов были подвергнуты горячей прокатке при 450 °С до толщины 2 мм (степень обжатия 80%). Слиток сплава П-1 перед прокаткой термически обрабатывали по режиму: нагрев при 500±5 °С в течение 6 ч с последующим охлаждением на воздухе вне печи. Поскольку состав сплава П-2 спроектирован таким образом, чтобы исключить операции гомогенизации и закалки, исходный слиток сразу подвергался горячей прокатке. Лист сплава П-1 подвергали термообработке по режиму: нагрев при 500±5 °С в течение 1 ч с последующей закалкой в холодной воде и старением при 200±5 °С в течение 3 часов. Такая термообработка была направлена на получение максимального эффекта упрочнения за счет выделения при старении метастабильных выделений Cu- и Mg-содержащих фаз. Для оценки

термической стабильности горячекатаных листов проводили ступенчатый нагрев в интервале температур 250-400 °С, с шагом 50 °С и 3-часовой выдержкой на каждой ступени. Поскольку сплав П-2 не требует упрочняющей термообработки типа Т6, то горячекатаные листы этого сплава термически обрабатывали только с целью оценки термической стабильности. Механические испытания на разрыв производили при температуре 350°С на образцах, вырезанных из горячекатаных листов толщиной 2 мм после стабилизационного отжига 400°С 5 часов.

Структуры и свойства горячекатаных листов экспериментальных сплавов были изучены до и после отжигов. Установлено, что доэвтектический сплав Al4Cu2Mn0,5Ca0,25Zr (П-2) существенно превосходит эвтектический силумин (П-1) по механическим характеристиками при температуре 350°С. Также экспериментальный сплав П-2 не требует довольно технологически сложных операций гомогенизации и закалки, что сказывается на конечной стоимости и экологичности получаемого продукта. По совокупности полученных данных, предложенную композицию на базе системы Al–Cu–Mn–Ca–Zr можно считать перспективной для разработки на ее основе нового термостойкого сплава.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №20-19-00249-П

Список литературы

1. Bo L. et al. Evolution of iron-rich intermetallics and its effect on the mechanical properties of Al–Cu–Mn–Fe–Si alloys after thermal exposure and high-temperature tensile testing //Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – V. 23. – P. 2527-2541.
2. Белов Н. А. [и др.]. Поршневые силумины / Н. А. Белов, В. Д. Белов, С. В. Савченко, М. Е. Самошина, В. А. Чернов [и др.], под ред. Н. А. Белова, М.: Руда и металлы, 2011. 246 с. ISBN: 978-5-98191-059-3.
3. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K. et al. Simultaneous Increase of Electrical Conductivity and Hardness of Al–1.5 wt.% Mn Alloy by Addition of 1.5 wt.% Cu and 0.5 wt.% Zr // Metals. – 2019. – V. 9 – N 12. – P. 1246.
4. Belov N.A. et al. Comparative analysis of structure evolution and thermal stability of commercial AA2219 and model Al-2 wt%Mn-2 wt%Cu cold rolled alloys // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 864. P. 158823.

УДК 621.774

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ ИНСТРУМЕНТА СТАНА ХПТ ДЛЯ ПРОКАТИ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

Нухов Д.Ш.¹, Березин И.М.², Орехов П.В.³

¹ ООО «Гайд Системс», г. Екатеринбург,

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург:
e-mail: d.s.nukhov@urfu.ru

² ООО «Гайд Системс», г. Екатеринбург:
cto@guidesystems.ru

³ ООО «Гайд Системс», г. Екатеринбург

Для производства холоднодеформированных труб используется горячекатаная или горячепрессованная заготовка [1]. Известно, что разностенность горячедеформированных труб, особенно на концах, значительно превышает требования нормативных документов по точности толщины стенки для холоднодеформированных труб [2]. В связи с этим при холодной деформации необходимо обеспечить существенное снижение поперечной разностенности горячедеформированной заготовки, особенно на концевых участках [3-4]. Также необходимо исключить наведение продольной разностенности в процессе холодной деформации [5-6]. В многочисленных работах показано, что устранение разностенности исходной заготовки во многом определяется оптимальной калибровкой инструмента стана ХПТ [5-7].

Целью работы являлось произвести расчет калибровки ручья калибров и оправки стана ХПТ-2-55 для прокати труб по маршрутам $\text{Ø}65 \times 4 \text{ мм} - \text{Ø}54,85 \times 1,91 \text{ мм}$ и $\text{Ø}65 \times 4 \text{ мм} - \text{Ø}49,9 \times 1,91 \text{ мм}$ из алюминиевого сплава Д16. В качестве базовой методики расчета калибровки инструмента ХПТ была применена методика МИСиС.

В качестве базовой методики расчета калибровки инструмента ХПТ для прокати труб по маршрутам $\text{Ø}65 \times 4 \text{ мм} - \text{Ø}54,85 \times 1,91 \text{ мм}$ и $\text{Ø}65 \times 4 \text{ мм} - \text{Ø}49,9 \times 1,91 \text{ мм}$ из алюминиевого сплава Д16 (рис.2), целесообразно применять методику МИСиС, по следующим причинам:

- малая величина конусности оправки ($2\text{tg}\alpha = 0,005$);
- малая величина развалки калибра и более благоприятная схема напряженного состояния в поперечном сечении очага деформации;
- размеры труб относятся к категории тонкостенных: $D/S = 20 \dots 50$ [3];
- материал заготовки: алюминиевый сплав Д16 - цветной пластичный сплав, для которого рекомендовано применять методику МИСиС [2-4].

По результатам проведенных расчетов специалистами компании ООО «Гайд Системс», были подготовлены чертежи инструмента и изготовлены комплекты калибров и оправок (рис.1).



Рис.1 – Калибр (а) и оправка (б), построенные по результатам проведенных расчетов калибровки инструмента стана ХПТ-2-55 для прокатки труб из алюминиевого сплава Д16

Проверка технологических ограничений показала выполнение всех требований, в том числе требований по точности геометрии размеров с учетом допусков на наружный диаметр и толщину стенки. Перспективным направлением развития процесса ХПТ является совершенствование методики расчета инструмента по методике УралНИТИ, а именно постановка и решение оптимизационных задач с применением современных программных продуктов.

Список литературы

1. Кофф З.А., Соловейчик П.М, Адешин В.А. и др. Холодная прокатка труб. Свердловск: Государственное научно – техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 431с.
2. Шевакин Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Металлургиздат, 1963. 269 с.
3. Орлов Г. А. Холодная прокатка и волочение труб: учебное пособие / Г. А. Орлов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 188 с.
4. . Холодная прокатка труб: учебное пособие / Ю.Б. Чечулин, Л.А. Кондратов, Г.А. Орлов. М.: Металлургиздат, 2017. 332 с.
5. Pilipenko, S.V. Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, O.O. Bohdanov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 1. – С. 78–83. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>
6. Романцев Б.А. Трубное производство: учеб. / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М.Вавиликин, С.В. Самусев. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.
7. Пилипенко, С.В. Исследование точности определения обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации за двойной ход клетки станов ХПТ / С.В. Пилипенко // Сталь. – 2017. – №. 2. – С. 94–97.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЦЕПОЧКУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛИ МАРКИ 20X13

**Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Цатурянц М.С., Носов Л.В.,
Песин И.А. Барышникова А.М.**
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
maxtsat@gmail.com

Анализируя современное состояние рынка РФ, следует отметить, что в настоящее время до 90% нержавеющей стали поступает из-за рубежа, что создает серьезные проблемы в обеспечении промышленности этим важным стратегическим материалом. Сложности производства не позволяют поставить на поток производство стали в больших количествах. Для решения этой проблемы, необходимо искать новые методы обработки металла, которые могли бы эффективно справиться с производственными задачами. Одним из перспективных направлений в этой области является асимметричная прокатка [1].

В рамках проведенных исследований были изучены возможности холодной асимметричной прокатки с целью сокращения количества проходов для достижения требуемой толщины проката. Основным материалом для исследований были выбраны заготовки из нержавеющей стали размерами 120x51x2,82 мм марки "20X13". Эксперименты проводились на уникальном прокатном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилыева МГТУ им. Г. И. Носова». В ходе экспериментов были опробованы различные режимы асимметричной прокатки с разными скоростями верхнего и нижнего валков, а также комбинации симметричной и асимметричной прокатки.

Для сравнения был взят за основу режим листового проката стали с «Ашинского металлургического завода»: 3→2,6→2,2→2→1,8→1,7→ отжиг и травление → 1,7 → 1,4→1,2→1→0,9 → 0,8мм. Исследования показали, что с помощью асимметричной прокатки удалось сократить количество проходов с 10 до 5, а также убрать этапы термической обработки и травления, и достичь при этом необходимой толщины проката. Наилучший результат показал образец с комбинированием асимметричной и симметричной прокатки. Этот результат представляет собой значительный технологический прогресс и может иметь важное значение для увеличения внутреннего производства нержавеющей стали.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02041, <http://rscf.ru/project/22-49-02041/>

Список литературы

1. Песин, А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2020. – Т. 20. No 3. – с. 81-96.

2. Pustovoytov, D. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) rolling of light alloys: A Review / D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon// Metals 2021. – 11 (956). – p. 1-46.

УДК 669.717

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПЛИТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1Ч

Глинских П.И.^{1,2}, Замараева Ю.В.^{1,2}, Завалий Е.А.^{1,2}, Яковлев С.И.¹

¹ *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия*

² *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

³ *Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия*
e-mail GlinskihPI@kumw.ru

В настоящее время для получения высококачественных изделий из алюминиевых сплавов, в том числе жаропрочного сплава Ак4-1ч, осуществляют модернизацию основного оборудования для термической и механической обработки, а также уточнение и разработку технологических режимов изготовления полуфабрикатов [1-2].

Сплав Ак4-1ч обладает оптимальным комплексом механических, коррозионных и технологических свойств, а также ресурсных характеристик и применяется в авиастроении как основной конструкционный материал в виде листов, плит, поковок и штамповок, а также прессованных профилей для сверхзвуковой авиации [3].

В условиях ОАО «КУМЗ» из сплава Ак4-1ч в состоянии поставки Т1 (термообработанные на твердый раствор, правленные растяжением со степенью остаточной деформации 1,5-3,0%, искусственно состаренные по одноступенчатому режиму) изготавливают плиты толщиной от 11 до 100 мм. Производство данных плит регламентировано ОСТ 1 90117-83 [4]. Отметим, что согласно [4] на плитах толщиной свыше 40 мм механические свойства кроме долевого и поперечного направления определяются еще и в высотном. Одной из основных проблем производства плит толщиной свыше 40 мм является низкое значение относительного удлинения в высотном направлении.

С целью получения значений относительного удлинения в высотном направлении с повышенным запасом от требований нормативной документации осуществлена оптимизация параметров горячей прокатки плит толщиной свыше 40 мм.

Химический состав исследуемых плит представлен в таблице 1. Выбор химического состава сделан на основе работы [5].

Таблица 1 – Химический состав исследуемых плит, мас. %

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Ni	Другие элементы	Прочие элементы		Алюминий
								каждый	сумма	
0,15-0,25	0,9-1,2	1,9-2,7	1,3-1,8	Max 0,10	0,04-0,10	0,9-1,2	-	max 0,05	max 0,15	основа

В таблице 2 приведены параметры горячей прокатки до и после оптимизации для плит из сплава Ак4-1ч толщиной свыше 40 мм.

Таблица 2 – Параметры горячей прокатки до и после оптимизации для плит из сплава Ак4-1ч толщиной свыше 40 мм

Параметры горячей прокатки	Значение параметра до оптимизации	Значение параметра после оптимизации
Максимальное абсолютное обжатие за проход, мм	30-35	40-50
Увеличение относительное обжатия от прохода к проходу, %	1-2	2-5
Предварительная "прокладка" заготовок	Да	нет
Относительное обжатие на последнем проходе, %	20-25	25-40
Выдержка пауз между проходами	нет	не менее 15 секунд

Относительное удлинение в высотном направлении определено посредством испытания на растяжение образцов.

Установлено, что данная оптимизация параметров горячей прокатки позволила повысить значение относительного удлинения в высотном направлении плит толщиной свыше 40 мм на 31 %, что положительно сказывается на эксплуатационные свойства продукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Список литературы

1. Яковлев С.И., Завалий Е.А., Замаева Ю.В. Оптимизация технологии производства плит из алюминиевого сплава 7475 // Технология легких сплавов. – 2023. – № 4. – С.79–87.
2. Селиванов А.А., Антипов К.В., Асташкин А.И., Овсянников Б.В. Оптимизация режимов искусственного старения кованных и катаных полуфабрикатов из жаропрочного алюминиевого сплава Ак4-1ч // Труды ВИАМ. – 2018. – № 4(64). – С. 9–19.

3. Телешов В.В. Развитие конструкционных деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Cu и Al–Cu–Mg для длительной работы при повышенных температурах // Технология легких сплавов. – 2009. – №4. – С. 6–31.

4. ОСТ 1 90117-83. Плиты авиационные из алюминиевого сплава марки Ак4-1ч. 20 с.

5. Телешов В.В. Развитие технологии производства плит из жаропрочного деформируемого алюминиевого сплава Ак4-1. Часть 3. Влияние состава сплава и некоторых параметров технологии на механические свойства при растяжении и электрические характеристики полуфабрикатов // Технология легких сплавов. – 2015. – № 1. – С. 8–26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРЫВНОСТИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПО ЦЕМЕНТИТНОЙ СЕТКЕ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Рахметова Л.Х.¹, Токарева Н.В.², Кискович А.В.³

¹ лаборант-металлограф ЦКП,

ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, РФ

²начальник службы по контрольно-аналитической работе ЦКП,

ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, РФ

³и.о. инженера I категории лаборатории металлографии ЦКП,

ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, РФ

leysanka00@gmail.com

На протяжении долгих лет ОАО «ММК-МЕТИЗ» производит из высокоуглеродистых марок сталей такую продукцию, как канаты, пружины, арматура и т.д. Производство данных видов продукции представляет собой сложный технологический процесс с высоким расходным коэффициентом металла, поэтому металл должен соответствовать определенным требованиям, предъявляемым к его химическим и механическим свойствам, а так же его структурным составляющим [1].

В процессе производства мы столкнулись с массовой обрывностью металла, в связи с чем было начато подробное исследование образцов с мест обрывов, определение причин и предполагаемых этапов производства — которые послужили причиной дальнейшего разрушения металла [2].

Исследование включило в себя: визуальный анализ изломов, макроанализ, микроанализ, травление образцов в специальном растворе для выявления цементитной сетки (пикриновой кислоте).

Вследствие чего была установлена причина обрывности — наличие в структуре карбидной сетки (цементитной сетки). В результате исследования обрывности металла, причиной которой явилась цементитная сетка, выявили два типа образования сетки вторичного цементита: в зоне осевой ликвации [3] и по ликвационным полосам [4].

Образование цементитной сетки в зоне ликвации связано с

неоднородностью химического состава в целом или в отдельных ее частях, которая образовалась в результате разлива металла.

Список литературы

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учеб./ Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, 3-е изд. перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Завойчинская Э. Б. О теории усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии металлов с учетом структурных изменений // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2019. – № 2. – С. 29-34.
3. Кискович А.В., Токарева Н.В. Разработка методики оценки уровня цементитной сетки в высокоуглеродистой катанке
4. Глазунова Н. А., Роговцова О.В. Ликвационные полосы и трещины в непрерывнолитой заготовке и их влияние на качество горячедеформированной металлопродукции // Актуальные вопросы машиноведения. – 2021. – Т. 10. – С. 247-252.

УДК

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

Абуайяш А.М.¹, Нестеров К.М.¹, Исламгалиев Р.К.¹, Н.Лю²

¹ Уфимский университет науки и технологий / Уфа, Россия

² Национальный центр данных по коррозии и защите материалов, Институт передовых материалов и технологий, Университет науки и технологий

Пекина/ Пекин, Китай

e-mail adhamabuayash4@gmail.com, kmnesterov@mail.ru

Известно, что высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) обладают широким спектром повышенных свойств, таких как прочность, износостойкость и коррозионная стойкость. Вместе с тем их прочность и пластичность недостаточна для дальнейших применений.

Недавно были предложены эвтектические ВЭС [1,2], которые показали хорошие механические свойства в литом состоянии. Они могут быть использованы в морской среде и высокотемпературных условиях, для которых важна также стойкость к водородному охрупчиванию

В настоящей работе изучено влияние наводороживания на прочность и пластичность сплава $\text{Co}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{10}\text{Al}_{18}\text{Ni}_{30}\text{Mo}_2$ с помощью механических испытаний на растяжение. Механизмы водородного охрупчивания были изучены с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ).

Предварительное наводороживание привело к небольшому снижению предела прочности с 1240 МПа до 1010 МПа и ухудшению пластичности с 13% до 9% сплава при комнатной температуре, что подчеркивает его

чувствительность к водородному охрупчиванию. На поверхности разрушения образцов, подвергнутых наводороживанию, после механических испытаний на растяжение наблюдались хрупкие квазисколы причем границы раздела двух фаз были идентифицированы как очаги распространения трещин.

В образцах подвергнутых наводороживанию было выявлено два различных механизма распространения трещин: вдоль границы фаз ГЦК - ОЦК и внутри фазы ОЦК. При этом фаза ГЦК обладала более высокой плотностью геометрически необходимых дислокаций по сравнению с фазой ОЦК.

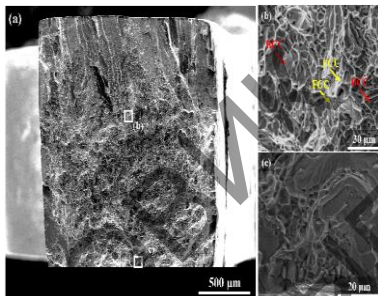


Рис. 1. Анализ поверхности разрушения наводороженного образца ВЭС после механических испытаний на растяжение

Список литературы

1. Y. Lu, Y. Dong, S. Guo, L. Jiang, H. Kang, T. Wang, B. Wen, Z. Wang, J. Jie, Z. Cao. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys, *Sci. Rep.* 4 (2014) 1-5.
2. Q.Zhao, H.Luo, Z.Yang, Z.Pan, Z.Wang, R.K.Islamgaliev, X.Li. Hydrogen induced cracking behavior of the dual-phase eutectic high entropy alloy. *International Journal of Hydrogen Energy.* 50 (2024) 134-147.

УДК 62-83.01:621.771

УЧЁТ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО СТАНА

**Бочкарев А.А., Корнилов Г.П., Песин А.М.,
Носов Л.В., Песин И.А., Пустовойтов Д.О.**
*ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им.
Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия
analogsynth@mail.ru*

Скоростную асимметрию при прокатке задают двумя способами:

1. Различными диаметрами прокатных валков (геометрическая асимметрия).
2. Различной скоростью приводных двигателей (кинематическая асимметрия).

Для исследования возможностей асимметричной прокатки в широком диапазоне второй способ кажется, на первый взгляд, безусловно, более эффективным и предпочтительным, поскольку позволяет задавать асимметрию в широких пределах, но её фактическое значение, как показывают результаты экспериментов, всегда отличается от заданного [1-2].

В настоящей работе сделана попытка показать и проанализировать исходные граничные условия, от которых зависит возможный допустимый диапазон изменения коэффициента асимметрии. Эти исследования помогут в дальнейшем более обоснованно задавать эту величину в заводских условиях, а также в расчетах на компьютерных моделях, например, в программном комплексе DEFORM, очень популярном в среде прокатчиков-теоретиков.

При выборе исходных условий и параметров прокатки выделим основные:

1. Обжатие.
2. Коэффициент асимметрии.
3. Условия смазки.
4. Температура заготовки.
5. Физико-механические свойства материала.

Как показала практика проведения экспериментальных исследований на действующем лабораторно-промышленном стане «400», величина обжатия в традиционном понимании $(h_0 - h_1)/h_0$ определяется толщиной исходной заготовки h_0 , раствором валков h , жёсткостью клетки и фактической асимметрией $K_{ас.ф.}$, которая отличается от заданной величины $K_{ас.з}$ из-за статической просадки скорости приводных электродвигателей. В случае их перегрузки просадка скорости может быть довольно существенной, а самое главное состоит в том, что при перегрузке ведущего двигателя его момент перестаёт изменяться. Можно констатировать, что при заданных технологических параметрах зафиксированное значение асимметрии является предельным и дальнейшее его увеличение не принесёт новых результатов.

Таким образом, при постоянстве трёх последних параметров, отмечаем факторы, которые следует в дальнейшем учитывать – это первоначальная толщина, раствор валков, задаваемая асимметрия и перегрузочная способность двигателей. Последнее замечание особенно актуально при работе ведущего привода в режиме ограничений, а ведомого – в генераторном режиме, что показано на примере экспериментальных зависимостей действующих значений токов двигателей $I_{дв}$ от фактического коэффициента асимметрии $K_{ас.ф}$ (рис. 1).

С учётом сказанного цель работы может быть сформулирована в поиске таких предельных значений технологических параметров при проведении экспериментов – толщина исходной заготовки, раствор валков, при которых наступает ограничение тока двигателей. Зафиксированные при этом скорости

верхнего n_v и нижнего n_n валков определяют фактические значения коэффициента асимметрии и относительного обжатия ε (рис. 2).

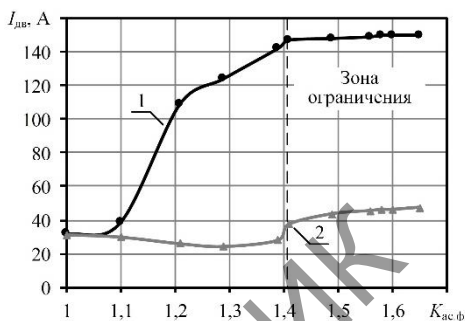


Рис. 1 – Зависимости действующих значений токов двигателей от коэффициента асимметрии:
1 – ведущий валок; 2 – ведомый валок

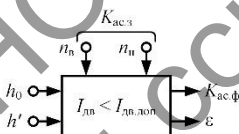


Рис. 2 – Определение ограничений коэффициента асимметрии и относительного обжатия

Список литературы

1. Моделирование электроприводов прокатных станов при асимметричной прокатке / Г.П. Корнилов, А.М. Песин, А.А. Бочкарев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 2. – С. 35-44. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-2-35-44.
2. Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей для исключения операций промежуточного отжига / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.И. Сверчков, Г.П. Корнилов // Черные металлы. – 2022. – № 11. – С. 28-35. – DOI 10.17580/chm.2022.11.03.

УДК 669.715

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЙ-ЛИТЦЕВОГО СПЛАВА В-1441 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, СТЕПЕНИ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Замараев В.А.¹, Замараева Ю.В.^{1,2}, Разинкин А.В.¹ Носов Л.В.³

¹ ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

Алюминиевые сплавы служат в качестве конструкционных материалов для авиационной техники. Успешно применяются ресурсные среднечугунные сплавы системы Al–Cu–Mg (Д16ч., 1163, 2324, 2524 и др.) [1].

В результате повышения эксплуатационных требований к конструкции воздушного судна возникла необходимость в создании и применении материалов, позволяющих производить изделия с повышенной весовой эффективностью. Последнее обеспечивается применением алюминий-литиевых сплавов, в частности, сплава В-1441. Отметим, что данный сплав создан на базе четверной системы Al-Cu-Mg-Li. Он является наиболее технологичным сплавом при горячей и холодной прокатке [2].

В связи с вышесказанным актуально исследование сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава В-1441 в зависимости от температуры, степени и скорости деформации. В рамках данной работы с целью построения данных зависимостей осуществлены испытания на сжатие и кручение.

На рис. 1 приведены результаты испытаний образцов из сплава В-1441 на сжатие при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 25 °С со скоростью деформации 1 с⁻¹ (рис. 1, а) и 5 с⁻¹ (рис. 1, б), а также результаты испытаний образцов на кручение при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 24 °С со скоростью деформации 1 с⁻¹ (рис. 1, в) и 5 с⁻¹ (рис. 1, г).

Для всех вариантов испытаний характерно закономерное и монотонное повышение напряжений течения с ростом скорости деформации и снижением температуры испытания. Кривые сопротивления деформации при испытании кручением стадийны: участок упрочнения не превышает 0,2 единиц, далее следует насыщение прочности с последующей протяженной стадией разупрочнения. При высоких скоростях деформации разупрочнение на кривых может быть частично объяснено деформационным разогревом. В отличие от испытаний на сжатие, при которых не наблюдается разупрочнение, последнее при кручении указывает на протекание процесса динамической рекристаллизации во время деформации.

Деформация до разрушения при кручении увеличивается с ростом температуры и понижается с ростом скорости деформации (рис. 1, в, г). Причем при комнатной температуре разрушение происходит почти без пластической деформации. Такое разрушение можно характеризовать как хрупкое, чувствительное к концентрации напряжений. Из-за этого разрушение при комнатной температуре при высоких скоростях деформации происходит в месте закрепления образца в захватах, а не на рабочей базе. Эта картина существенно отличается от результатов испытаний на сжатие, при которых разрушение не наблюдается, даже при комнатной температуре.

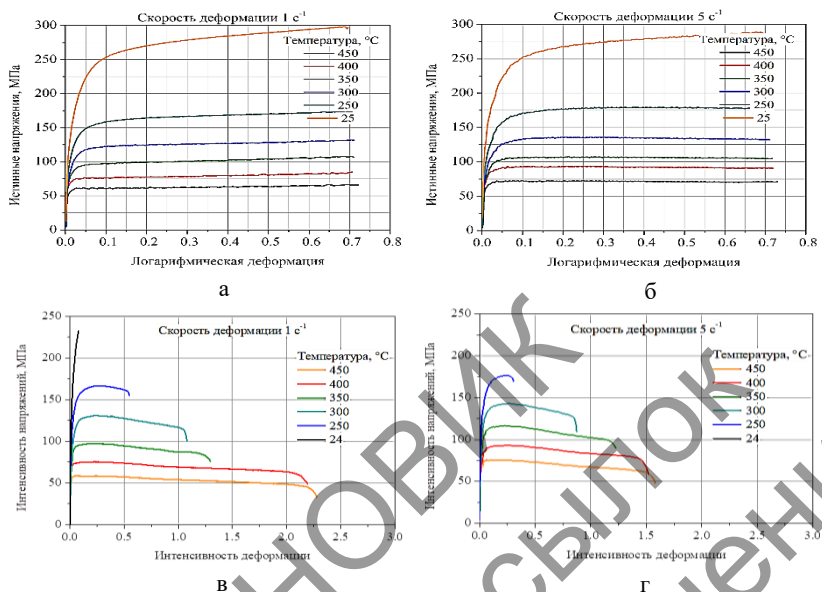


Рис. 1 – Результаты испытаний образцов из сплава 1441 на сжатие при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 25 °С со скоростью деформации 1 с⁻¹ (а) и 5 с⁻¹ (б); результаты испытаний образцов на кручение при температурах 450, 400, 350, 300, 250 и 24 °С со скоростью деформации 1 с⁻¹ (в) и 5 с⁻¹ (г)

Данные кривые добавлены в систему автоматического расчета режимов проката на стане горячей прокатки Кварто 4200 фирмы «DANIELI» в условиях ОАО «КУМЗ».

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Список литературы

- 1.Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. – М.: Наука, 2005. – 275 с.
- 2.Антипов В.В. Технологичный алюминийлитиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Металлург. – 2012. – № 5. – С.36–39.

УДК 621.778.014

ЭНЕРГОСИЛОВОЙ РАСЧЕТ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС

Быков В.А.¹, Лисовский Р.А.², Радионова Л.В.²

Полоса, тонкая лента и фольга из сплавов со специальными свойствами является одним из высокотехнологичных видов продукции с высокой добавленной стоимостью, которая в настоящее время востребована отечественной промышленностью в рамках импортозамещения. В связи с этим существует спрос на оборудование для ее производства. Проектирование прокатного оборудования требует определения энергосиловых параметров процесса. Для расчета усилия и момента прокатки, а также среднего удельного давления металла на валки нами была разработана математическая модель процесса прокатки полосы и проведена ее верификация на научно-исследовательском прокатном стане [1].

Как известно для расчета силовых параметров прокатки в разные годы ведущими прокатчиками – академиком А.И. Целиковым, С.И. Губкиным, А.А. Королевым и другими – было предложено достаточно большое количество методик.

В основу нашей математической модели была заложена формула А.И. Целикова для расчета среднего давления для холодной листовой прокатки [2]. Рассчитав среднее давление металла на валки, можно определить усилие прокатки и момент прокатки. Как известно, во всех формулах для расчета среднего давления металла на валки, имеются эмпирические коэффициенты, которые учитывают технологические факторы процесса и конструкционные особенности оборудования. Поэтому верификация математической модели прокатки и ее адаптация к реальному процессу является необходимым этапом этой работы.

Для проверки адекватности математического моделирования в лабораторных условиях нами была проведена экспериментальная прокатка полосы из заготовки 11,5x51,0x200,0 мм из свинца марки С1 (99,95% Pb) при комнатной температуре. Скорость прокатки составляла 0,11 м/с. Сопротивление деформации свинца 10 МПа, температура рекристаллизации - 33°C. Прокатный стан ДУО-130 оснащен системой сбора данных, которая позволяет измерять усилие прокатки посредством месдоз, т.е. прямым измерением, и момент прокатки, снимая сигнал с программируемого логического контроллера, т.е. косвенным методом [3]. Следовательно, сравниваются энергосиловые параметры, определенные тремя способами, а именно теоретическим или расчетным, прямым измерением тензометрическими датчиками и косвенным методом по нагрузке электродвигателя. Экспериментальные диаграммы усилия и момента прокатки для первого прохода приведены на рис.1. Результаты математического моделирования и экспериментальной прокатки показали высокую сходимость (табл.1).

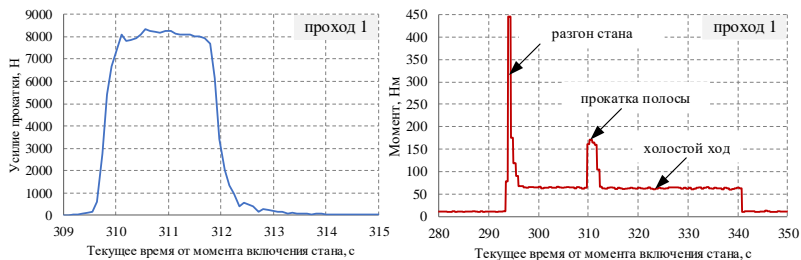


Рис. 1 – Экспериментальные кривые усилия и момента прокатки

Таблица
Расчетные и экспериментальные энергосиловые параметры прокатки полосы

Номер прохода	Толщина полосы до прокатки, мм	Толщина полосы после прокатки, мм	Среднее удельное давление металла на вальки, МПа	Расчетное усилие прокатки, Н	Момент прокатки расчет, Нм	Измеренное усилие прокатки, Н	Момент прокатки exper., Нм
1	11,50	9,10	12,5	8021	100	8000	100
2	9,10	7,10	12,7	7597	86	7700	85
3	7,10	5,15	14,5	8637	97	8500	95
4	5,15	3,15	16,2	9909	108	9800	105
5	3,15	2,15	17,9	7750	62	8000	60
6	2,15	1,20	25,3	10708	81	11000	80

Таким образом, применение верифицированной математической модели при проектировании прокатных станков и разработке технологических решений позволит исключить досадные ошибки в виде недостаточной или избыточной мощности оборудования.

Список литературы

1. Физическое моделирование при изучении студентами теории и технологии прокатки / Л. В. Радионова, Р. А. Лисовский, Д. В. Громов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 23-42. – DOI 10.14529/met230203. – EDN RGPZMK.
2. Румянцев, М. И. Теория прокатки / М. И. Румянцев, Д. И. Кинзин; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 188 с. – EDN XQPULB.
3. Учебно-исследовательский прокатный стан ДУО-130 / Л. В. Радионова, Р. А. Лисовский, С. Р. Фаизов [и др.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 61-66. – DOI 10.24892/RIJE/20230112. – EDN OSVHAE.

СООТНОШЕНИЕ МАШИННОГО ВРЕМЕНИ И ВРЕМЕНИ ПАУЗ ПРИ СЛЯБОВОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Исякаев К.Т.^{1,2}, Логинов Ю.Н.¹

¹ Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

² ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», г. Каменск-Уральский,
Россия

e-mail IsyakaevKT@kumz.ru

От энергосиловых параметров горячей прокатки алюминиевых сплавов зависят затраты на производство продукции [1], построение самого процесса обработки металла, а также свойства этой продукции [2]. Заготовительная прокатка начинается с обработки сляба, имеющего структуру литья [3].

Рассматриваются реальные условия прокатки слябовой заготовки из алюминиевого сплава АМг6 на одном из заводов. Напряженно-деформированное состояние в этом случае оценено в публикации [4]. Заготовка перед прокаткой имеет форму плиты толщиной 545 мм без замка Петрова, прокатка ведется в валках диаметром 1100 мм, температура начала прокатки 400°C. Рассматриваются проходы до достижения промежуточной толщины на входе в валки 145 мм. С помощью мониторинговой системы стана построен график изменения толщины проката по проходам (рис. 1). Здесь аргументом является номер измерения. Сами измерения осуществляются с частотой 0,1 с. Внешнее представление графика рис. 1 позволяет оценить интенсивность изменения толщины, то есть обжатий по проходам.

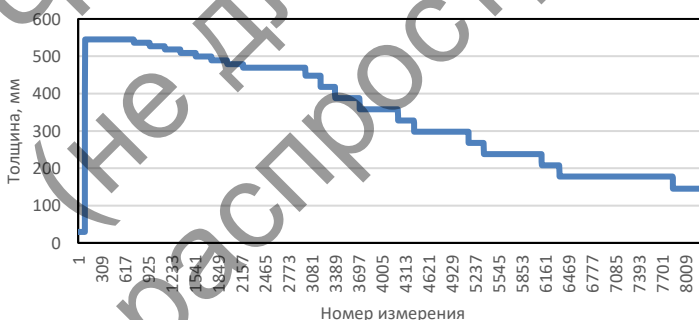


Рис. 1. Изменение толщины проката по проходам (на входе в валки)

На рис. 2 показано соотношение машинного времени и времени пауз за счет того, что приведены усилия прокатки в функции того же аргумента.

На первом этапе применяются малые обжатия, что объясняется интенсивной загрузкой привода и расположением слябовой заготовки с направлением литья ортогонально оси прокатки. В этом случае ширина проката оказывается большой и равна 4240 мм, и это приводит к большому значению усилия (рис. 2). После проведения кантовки в ортогональном направлении усилия снижаются, поскольку ширина теперь уменьшена до 1485 мм. Обжатия теперь могут быть увеличены.

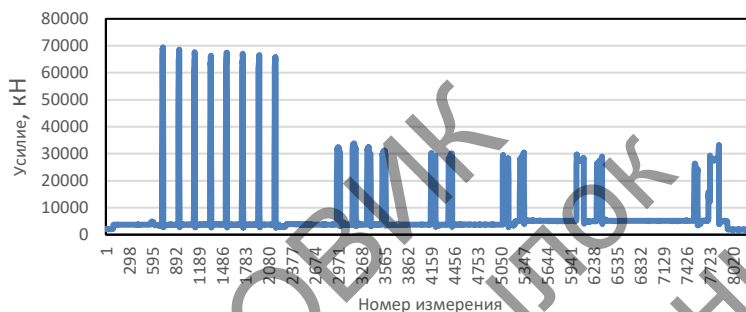


Рис. 2. Распределение усилий по проходам

Обращает на себя внимание то, что время пауз оказывается всегда больше машинного времени, что создает условия для прохождения наравне с динамической рекристаллизацией статической рекристаллизации. Будут ли эти процессы завершены к следующему проходу оказывается не очевидным [5] и могут являться предметом исследования

Список литературы

1. Логинов Ю.Н. Анализ энергозатрат при горячей прокатке листовых полуфабрикатов из алюминия // Производство проката. - 2005. - № 4. - С. 19-24.
2. Lobanov M.L., Loginov Y.N., Danilov S.V., Karabanov M.S., Golovin M.A. Effect of hot rolling rate on the structure and texture condition of plates of the Al – Si – Mg alloy system // Metal Science and Heat Treatment. - 2018. - V. 60. - Iss. 5-6. - P. 322-328.
3. Логинов Ю.Н., Середкина М.Ю. Исследование скоростного режима прокатки сляба из алюминиевого сплава с использованием МКЭ. Технология легких сплавов. 2015. № 3. С. 121-126.
4. Логинов Ю.Н., Непряхин С.О., Исякаев К.Т. Цифровое моделирование прокатки сляба из алюминиевого сплава с малым обжатием // Заготовительные производства в машиностроении. - 2023. - Т. 21. - № 3. - С. 128-131.
5. Логинов Ю.Н., Лобанов М.Л., Головин М.А. Модель описания деформации алюминиевых сплавов при их горячей прокатке с учетом

УДК 621.73

СВОЙСТВА БРИКЕТОВ ИЗ ОКСИДА МАГНИЯ

Клепче М.А.¹, Бабайлов Н.А.²

¹ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина / (филиал), Верхняя Салда, Россия

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail n.a.babaylov@urfu.ru

В настоящее время в России широко используются металлургические брикеты из отходов производства и мелкого рудного сырья.

В работе выполнено изучение механических свойств по ISO 13314 - 2011 Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals. Материал брикетов: оксид магния, который используется в металлургии при производстве стали и в огнеупорной промышленности.

Брикеты получены методом валкового брикетирования. Определены следующие механические свойства брикетов: плотность; ударная прочность (или прочность на сбрасывание) и прочность на сжатие.

В учебной лаборатории филиала УрФУ в г.Верхняя Салда проведены испытания брикетов на универсальной испытательной машине с максимальным усилием 50 кН. Испытания брикетов выполнены в соответствии ГОСТ 24765-81 «Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие». В работе определена поглощенная энергия разрушения брикета. Следует отметить, что стандартом ISO вводится понятие поглощенной энергии W при деформации – как площади под кривой в координатах «приложенное напряжение (или сила) – деформация» до достижения деформацией значения 50% (рис.1, а).

Для расчета поглощенной энергии выбираются кратные участки, допустим 10% (для представления результатов расчета в табличной форме). При интегрировании использован метод прямоугольников используемый для расчета площади плоских фигур в CAD системах.

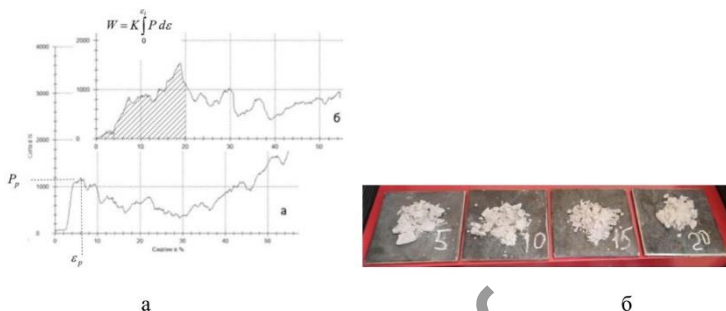


Рис. 1 – Типовые диаграммы разрушения брикета из оксида магния (а) и вид брикетов после раздавливания (б)

На рис.1, б приведены типовые образцы брикетов из оксида магния после раздавливания при различной скорости испытания.

Список литературы

1. Б.М. Равич. Брикетирование руд. М.: Недра, 2082, 183 с.
2. В.М. Авдохин. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 417 с.
3. Handbook of Powder Technology / Edited by A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville. Volume 11, P. 3-1390 (2007).
4. Polianski L. I., Babailov N. A., Loginov Yu. N., Pervukhina D. N. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. No. 040046.10.1063/1.4967103
5. Бабайлов Н.А. Полянский Л.И. Логинов Ю.Н. Брикетирование отсева металлургической извести и параметры, позволяющие повысить эффективность процесса // Металлург. – 2016. – С.32-35.

УДК 621.771.237.016.2

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С УРОВНЕМ ПРОЧНОСТИ НЕ МЕНЕЕ 950 МПА

Кузнецова А.С., Полецков П.П., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.,
Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Гулин А.Е.

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
allakuznetsova.mgtu@mail.ru

Создание новых сталей повышенной прочности и хладостойкости обусловлено необходимостью освоения и устойчивого развития Арктики.

С учетом изученных особенностей и принципов легирования сталей с пределом текучести более 950 МПа осуществлен выбор химических композиций сталей, потенциально способных обеспечить требуемую комбинацию свойств: $\sigma_t \geq 950$ МПа, $\sigma_B \geq 1200$ МПа, $\delta_5 \geq 10\%$, $HBW \geq 350$, $KCV^{-70} \geq 30$ Дж/см². По результатам поиска были определены две основные концепции легирования: 1) С-Мп-Мо и 2) С-Мп-Ni-Cu-Ti-Мо-В.

С целью эффективного управления свойствами сталей, выплавленных на базе выбранных систем легирования, изучены фазово-структурные превращения переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении. В результате для каждой химической композиции определены температурно-скоростные условия для получения мелкодисперсной бейнитно-мартенситной структуры, на основании которых разработаны режимы термической обработки.

В результате физического моделирования и имитации технологических процессов выплавки, непрерывной разливки, термомеханической и термической обработки изготовлены лабораторные образцы листового проката из сталей оригинального химического состава. По результатам контрольных механических испытаний в соответствии с ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 9012-59 получены первичные положительные результаты со следующими комбинациями свойств: $\sigma_t = 1110-1270$ МПа, $\sigma_B = 1320-1500$ МПа, $\delta_5 = 10,0-13,0\%$, $HBW = 380-429$, $KCV^{-70} = 30,6-50,3$ Дж/см².

С применением методов растровой и электронной микроскопии выявлено, что наилучший комплекс прочностных и вязкопластических характеристик достигается в стали после закалки в воду от температуры 860°C за счет формирования в стали преимущественно мелкодисперсной структуры речного мартенсита (до 85 %) и небольшой доли бейнита (до 15 %).

Данные исследований будут использованы для разработок рекомендаций по внедрению научно-практических результатов в условиях ведущих металлургических предприятий.

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-20018 от 20.04.2023, а также средств Минобрнауки Челябинской области (Соглашение № 588 от 29.06.2023г.), <https://rscf.ru/project/23-19-20018/>.

УДК 621.77.08

ОТЛАДКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Соболев Д.О.¹, Логинов Ю.Н.¹

¹Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail hfsdlk@mail.ru

Предыдущие исследования показали, что механические свойства проката из алюминиевых сплавов могут оказаться неоднородными по объему [1]. Измерение твердости может служить косвенным показателем уровня механических свойств изделия. Такой подход применяется, когда необходимо провести испытание в короткий срок без разрушения изделия и проведения лабораторных испытаний [2]. Измерение твердости в промышленных условиях производится при помощи переносных твердомеров статического или динамического действия. Соотношения между значениями твердости и пределом прочности металлов приведены в ГОСТ 22761-77.

В данной работе изучена методика измерений твердости тонколистового проката из алюминиевых сплавов при помощи портативного динамического твердомера ТКМ-359С. Диапазон контроля твердости по предустановленной дополнительной шкале для изделий из алюминиевых сплавов данного прибора составляет 30-160 НВ. В основу принципа действия твердомера заложен динамический метод контроля твердости, который заключается в определении скорости отскока твердосплавного индентора от поверхности контролируемого изделия. Скорость отскока определяется твердостью изделия. В качестве изделия использованы пластины толщиной 2 мм размерами 200x300 мм из сплавов 5005 в состоянии Н14 и 5083 в состоянии Н111. По данным электронного справочника свойств материалов Matweb, значение твердости для данных сплавов составляет 43 НВ для 5005 Н14, 77 НВ для 5083 Н111.

В отличие от стационарных твердомеров статического принципа действия, на результаты измерений используемым прибором влияют не только свойства металла при пластической деформации, но и другие физико-механические свойства. Также необходимо выполнение условий по минимальной толщине измеряемого изделия. При недостаточной толщине возможна существенная погрешность в измерениях по причине прогиба изделия в месте удара индентора. В случае, если толщина изделий менее 6 мм, производителем рекомендована методика притирки изделия к контрольной плите при помощи смазки ЦИАТИМ-221 по ГОСТ 9433-2021. Изделие необходимо плотно притереть к контрольной плите через слой смазки без воздушных прослоек, так чтобы изделие и плита образовали единую массу, при этом рекомендуется использовать плиту из материала, имеющего модуль упругости, близкий к модулю упругости контролируемого изделия.

В работе проведены измерения твердости по методике производителя прибора. Притирка производилась к гранитной контрольной плите для измерения неплоскостности, имеющей по результатам проверки отклонения от плоскостности менее 0,1 мм на длине 1500 мм. Произвести притирку к плите из алюминиевого сплава не представилось возможным по причине наличия неплоскостности плиты 0,6 мм на длине 1500 мм. Измерения проводились в произвольных точках на пластине. Для определения одного действительного значения проводились 7 измерений, при этом крайние минимальные и максимальные значения не учитывались, по остальным проводилось усреднение. Для каждой пластины проведено 35 измерений для получения 5

действительных значений. Результаты измерений: для сплава 5083 H111 48...87 НВ, для сплава 5005 H14 71-90 НВ.

В процессе измерений было выявлено, что пластина из сплава 5083 имеет неплоскостность 0,3 мм на участке 300 мм, что приводило к отставанию пластины от плиты. Этим объясняется наличие значения твердости 48 НВ в области, где пластина неплотно прилегала к плите. Фотографии процесса измерения приведены на рис.1.



Рис. 1. Фотографии процесса измерения твердости пластин:
а) по методике производителя, б) по альтернативной методике

Была опробована альтернативная методика для выполнения условия по минимальной толщине изделия. Пластины в количестве 4 шт. суммарной толщиной 8 мм были прижаты друг к другу и закреплены при помощи струбцин. В результате проведенных измерений выявлено, что нет возможности обеспечить отсутствие зазоров между пластинами по причине наличия неплоскостности у каждой из пластин, что вызывает ощутимый разброс данных. Дальнейшая работа будет направлена на усовершенствование методики.

Список литературы

1. Логинов Ю.Н., Соболев Д.О. Анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. - 2021. - № 8. - С. 83-88.
2. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Ерасов В.С., Ляхов А.А. Методы измерения твердости материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. -№ 1. – С. 101-117.

УДК 669.245

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И
МИКРОТВЕРДОСТЬ ТВЕРДОФАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ЭК61 И ЭП741НП**

Тагирова А. А.^{1,2}, Галиева Э.В.², Валитов В.А.^{1,2}, Классман Е.Ю.²

¹ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

*² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
azaliya_tagirova72@mail.ru*

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) широко применяются для изготовления различных деталей двигателей для аэрокосмической техники [1]. В настоящее время перспективным методом изготовления твердофазных соединений (ТФС) из ЖНС является сварка давлением (СД) в условиях сверхпластичности, которая позволяет получать качественные соединения и сохранять исходные свойства свариваемых металлов [2].

Цель работы – анализ влияния термической обработки на микроструктуру и микротвердость в зоне ТФС никелевых сплавов ЭК61 и ЭП741НП с различным типом упрочняющей фазы.

В качестве материалов для исследований были выбраны гранульный (порошковый) сплав ЭП741НП и деформируемый сплав ЭК61. В исходном состоянии сплав ЭП741НП имел крупнозернистую микроструктуру со средним размером зерен матричной γ -фазы 30–80 мкм, в теле зерен равномерно выделены дисперсные частицы γ -фазы. Сплав ЭК61 имел ультрамелкозернистую микроструктуру дуплексного типа [2] со средним размером зерен матричной γ -фазы и выделениями δ -фазы менее 1 мкм. СД осуществляли при температуре 850°C. После сварки была проведена термическая обработка (ТО), включавшая закалку при 980°C с последующим старением при 730°C. Измерения микротвердости проводили на приборе МНТ-10 Microhardness Tester. Индентирование проводилось с нагрузкой 100 гр. и временем выдержки 10 сек. Микротвердость измерялась как в основном материале, так и в зоне твердофазного соединения.

Установлено, что микроструктура сварных образцов в сочетании сплавов ЭК61/ЭП741НП по сравнению с исходным состоянием (перед сваркой) практически не изменилась. Результаты энерго-дисперсионного анализа (рис.1) показали, что в результате СД при температуре 850°C происходит изменение концентрации хрома (Cr) и кобальта (Co), что свидетельствует о формировании переходной зоны диффузионного взаимодействия. Ширина диффузионной зоны непосредственно после СД равна 28 мкм (рис.1 а), после сварки давлением и последующей термической обработки она немного увеличилась до 32 мкм (рис.1 б).

Результаты измерений микротвердости сплавов ЭК61 и ЭП741НП в исходном состоянии, после СД, а также после СД и последующей ТО представлены в Таблице 1. Микротвердость сплава ЭП741НП после СД уменьшилась, а в сплаве ЭК61 увеличилась. В области зоны ТФС микротвердость имеет промежуточное значение сплавов. Последующая ТО после СД привела к понижению микротвердости в зоне ТФС.

Прочность сварных соединений ЭК61//ЭП741НП при комнатной температуре составила 646 МПа, что составляет 0,43 от прочности сплава ЭК61.

Таблица 1 – Микротвердость сплавов ЭК61 и ЭП741НП: в исходном состоянии; после сварки давлением; после сварки давлением и последующей термической обработки

Состояние	Микротвердость, НВ		
	ЭК61	Зоны ТФС	ЭП741НП
Исходное состояние	390±23	-	564±35
После СД	413±17	481±16	540±29
После СД+ТО	203±7	436±25	483±16

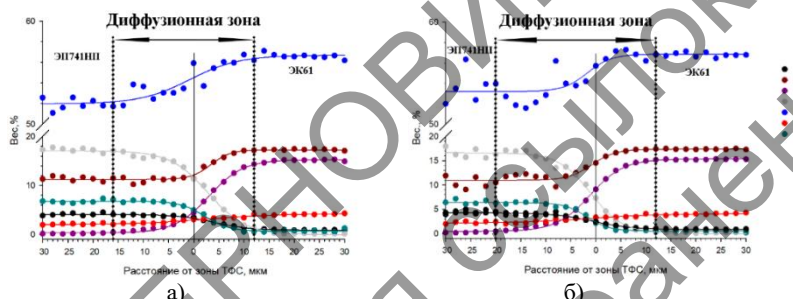


Рис. 1 – Распределение легирующих элементов в зоне ТФС сплавов ЭК61 и ЭП741НП: а) после СД; б) после СД и последующей ТО

Заключение

Метод сварки давлением в условиях низкотемпературной (850°С) сверхпластичности никелевого сплава ЭК61 эффективен для получения твердофазного соединения с гранульным сплавом ЭП741НП, имеющим другой тип упрочняющей фазы.

Список литературы

1. Симс Ч., Столофф Т., Хагель В. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / В 2-х кн.–Пер. с англ //М.: Металлургия. – 1995. – С. 384.
2. Галиева Э. В. и др. Твердофазная сварка разнородных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭК61 с различной геометрией поверхности соединения //Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – №. 4. – С. 507-512.
УДК 621.73

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ ПО ISO 13314-2011

Шишин Н.Н.¹, Бабайлов Н.А.²

¹ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина / (филиал), Верхняя Салда, Россия

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail n.a.babailov@urfu.ru

В настоящее время в России и за рубежом в металлургической отрасли широко используются методы окускования мелкодисперсных материалов с целью повышения эффективности производства.

В работе выполнено изучение прочностных свойств «сырых» брикетов (т.е. брикетов сразу после процесса брикетирования, без сушки и дальнейшего вылеживания на воздухе) и сухих брикетов. Исследуемые материалы брикетов: оксид магния, карбид кремния (используемые в металлургии при производстве стали для ее раскисления) и хлорид калия, используемый в сельскохозяйственном производстве в качестве удобрения.

Металлургические брикеты получены методом валкового брикетирования на брикет-прессах. Далее были определены следующие механические свойства полученных брикетов: плотность; ударная прочность (или прочность на сбрасывание) и прочность на сжатие. Определение прочностных характеристик выполнено по ГОСТ 21289-75 и ГОСТ 25471-82. В работе выполнено изучение механических свойств по ISO 13314 - 2011 Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals. На рис.1, а приведены типовые номограмма испытания брикетов из различных исследуемых материалах при скорости испытания 5 – 10 мм/мин.

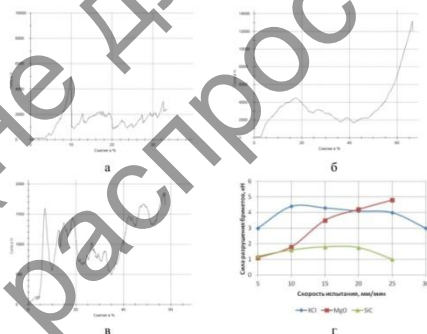


Рис.1 – Графики испытания брикетов при различной скорости испытания MgO – 15 мм/мин (а); KCl – 10 мм/мин (б); SiC – 10 мм/мин (в) и зависимость силы разрушения брикетов от скорости раздавливания (г)

В учебной лаборатории филиала УрФУ в г.Верхняя Салда проведены испытания брикетов на универсальной испытательной машине с

максимальным усилием 50 кН. Испытания брикетов выполнены в соответствии ГОСТ 24765-81 «Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие» и ISO 13314 - 2011. Размер исследуемых брикетов составлял 40x30x20 мм. Плотность брикетов получена в интервале значений: $2,3 \div 2,4 \text{ г/см}^3$.

Список литературы

1. Б.М. Равич. Брикетирование руд. М.: Недра, 2082, 183 с.
2. В.М. Авдохин. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 417 с.
3. Handbook of Powder Technology / Edited by A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville. Volume 11, P. 3-1390 (2007).
4. Polianski L. I., Babailov N. A., Loginov Yu. N., Pervukhina D. N. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. No. 040046.10.1063/1.4967103
5. Бабайлов Н.А. Полянский Л.И. Логинов Ю.Н. Брикетирование отсева металлургической извести и параметры, позволяющие повысить эффективность процесса // Металлург. – 2016. – С.32-35.

СЕКЦИЯ 2 – Моделирование и экспериментальные исследования процессов обработки давлением современных металлических материалов

УДК 621.98.043

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ МНОГОФАЗНЫХ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СООТНОШЕНИЯ ФАЗ

Лопатина Е.В., Полякова М.А., Трубицков Н.А.

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова,
Магнитогорск, Россия*

lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Материалы, представляющие многофазные системы, находят широкое применение для производства изделий различного назначения для различных отраслей промышленности: машиностроение, металлургия, приборостроение и др. Многофазные стали характеризуются хорошей пластичностью наряду с высокой прочностью и высокой степенью упрочнения на начальных стадиях деформации, что позволяет изготавливать различные изделия методом холодной пластической деформацией.

Сложность моделирования упругопластического поведения подобных сталей на этапах разработки технологии, прогнозирования их функциональных свойств и дальнейшего производства изделий из них обусловлено недостатком научной информации о протекании каждого производственного этапа.

При моделировании прокатки многофазных сталей следует учитывать прочностные характеристики всех предыдущих деформаций и температурных воздействий, начиная с момента производства, так как технологическая память многофазных сталей создает предпосылки перехода изначального изотропного состояния в анизотропное на заключительном этапе технологии [1]. Например, во время горячей прокатки в деформированном аустените протекает ряд высокотемпературных процессов, от которых, главным образом, зависит изменение структуры металла в линии прокатного стана и распределение фаз. От степени развития этих процессов (упрочнение, разупрочнение, возврат, рекристаллизация, выделение второй или нескольких фаз) во многом зависят структура и свойства готовой металлопродукции [2-3].

Существующие подходы моделирования и исследования процесса прокатки многофазных сталей не учитывают «наследственное» распределение фаз, которое влияет на конечные свойства материала. Следовательно, при холодной прокатке нужно контролировать распределение фаз от предыдущего технологического процесса для получения заданных свойств.

Исходя из вышесказанного, к особенностям моделирования процесса горячей прокатки многофазных сталей относится учет количественного распределения фаз на каждом технологическом этапе обработки. Также количественное соотношение фаз следует учитывать и при прогнозировании формирования конечных свойств металлоизделий, получаемых из многофазных сталей, и разработки новых материалов [4-7].

С этой точки зрения актуальным является вопрос разработки нового подхода, с помощью которого можно будет анализировать и исследовать фазовые и температурные превращения, а также напряженно-деформированное состояние многофазных сталей на каждом технологическом этапе. Новый подход должен иметь высокую производительность, обеспечивать точность расчетов и быть достаточно простым для пользователей различной квалификации.

Список литературы

1. Фалалеев А.П. Моделирование пластических деформаций двухфазных сталей кузовных элементов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. - №3. - С. 43-48.
2. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение – М.: Альянс, 2011. – 644 с.
3. Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б. Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2021. - Т.19. - №3. - С. 109–114.
4. Чикишев Д.Н., Голубчик Э.М., Тарасова К.А. Исследование влияния химического состава на механические свойства двухфазной стали НСТ780Х с целью экономного легирования // Сталь. - 2021. - № 12. - С. 46-47.
5. Чикишев Д.Н., Разгулин И.А. Оценивание осевой химической неоднородности цифровым и аналитическим методами // Моделирование и развитие процессов ОМД. - 2018. - № 25. - С. 11-15.
6. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н. Моделирование процесса прокатки сляба с осевой химической неоднородностью // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - 2017. - Т. 1. - С. 68-71.
7. Чикишев Д.Н. Совершенствование технологии производства высококачественного толстолистового проката из микрелегированных трубных сталей на основе применения методологии эффективной технологической компенсации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. - 2021. - Т. 21, - № 1. - С. 42-53.

УДК 621.777

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ЛИТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ МАГНИЯ

Парубок А.В.

Сибирский федеральный университет, г.Красноярск
andrej.parubok@yandex.ru

С использованием программных комплексов Autodesk Inventor и QForm 10 создана компьютерная модель (рис. 1) и выполнено конечно-элементное моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП) для получения прутков из магния марки Mg90. Проверка результатов моделирования проведена с использованием экспериментальных данных, полученных на установке совмещенной обработки СПП-200 (табл. 1) [1].

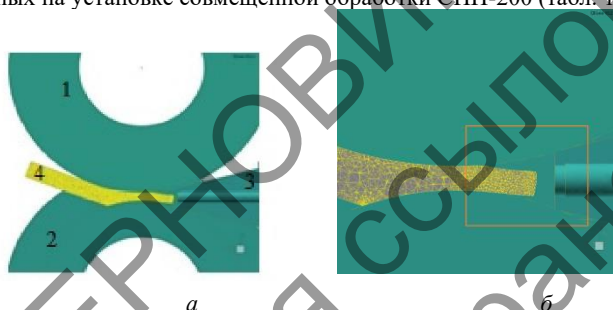


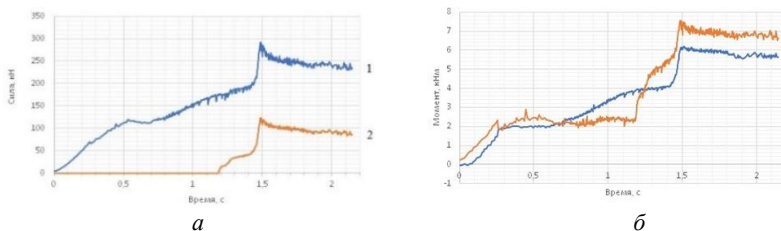
Рис. 1. Модель процесса СПП (а) и конечно-элементная сетка заготовки (б) для решения деформационной задачи: 1 – валок с выступом; 2 – валок с канавкой; 3 – матрица; 4-заготовка

Заготовкой являлся литой пруток квадратного сечения 14x14 мм из магния марки Mg90, который нагревался до 400°C и задавался в подогретые до температуры 100°C валки. При этом получали прессованные прутки диаметром 9 мм. Реологические свойства металла были заданы по справочным данным [2].

Таблица 1 – Основные параметры установки СПП-200

Диаметр валка с канавкой, мм	162
Диаметр валка с выступом, мм	107
Размеры калибра в минимальном сечении, мм	7x15
Мощность двигателя, кВт	19

По результатам моделирования были получены поля распределения температур, скоростей деформации и энергосиловых параметров процесса СПП. Графики изменения сил, действующих на валки и матрицу, и крутящих моментов на валках, приведены на рис. 2 и в табл. 2.



3
4

Рис. 2. Изменение по длине очага деформации сил (а), действующих на валки (1) и на матрицу (2), и моментов (б) на валке с канавкой (3) и валке с выступом (4)

Результаты моделирования процесса СПП для прутка диаметром 9 мм при температурах 370, 400 и 430°С приведен в табл. 2. При температуре 400°С сила, действующая на валки P_v , составляет 293 кН и превышает силу, действующую на матрицу P_m , равную 125 кН. Крутящие моменты различны на валках с канавкой M_1 и выступом M_2 (см. рис. 2 и табл. 2), причем крутящий момент на валке с канавкой в 1,2 раза выше, чем момент на валке с выступом.

Проверка адекватности построенной модели проведена путем физического моделирования процесса СПП для получения прутков диаметром 9 мм при температуре 400°С на установке совмещенной обработки СПП-200 с замером силовых параметров (см. табл. 2) тензометрическим методом с помощью месдоз, установленных под матрицей и нажимными винтами.

Таблица 2 – Энергосиловые параметры СПП для прутка диаметром 9 мм

Температура $T, ^\circ\text{C}$	$P_1, \text{кН}$	$P_2, \text{кН}$	$P_v, \text{кН}$	$P_m, \text{кН}$	$M_1, \text{кНм}$	$M_2, \text{кНм}$
370	208	129,8	337,8	147	8,5	6,9
400	185,8	115,9	<u>293</u> 312*	<u>125</u> 107*	7,5	6,1
430	161	100,5	<u>261,5</u> 274*	<u>117</u> 101*	6,6	5,3

* - экспериментальные данные

Таким образом, проведено моделирование процесса СПП и сравнение полученных данных с данными экспериментальных исследований, на основании чего сделан вывод о практической реализуемости этого процесса для получения прутков из литых заготовок магния и возможности использования виртуальной модели для оценки технологических параметров процесса.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. - М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.

2.Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Металлургия, 1983. 351 с.

УДК 621.774

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ СПЛАВА CO-28CR-6MO

Махмуд Алхаж Али А., Гамин Ю.В., Гизатулин Д.Ш.
 НИТУ «МИСИС», г. Москва, Россия
 e-mail: hajaliabdullah95@gmail.com

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) является эффективным способом обработки металлов давлением для получения прутков круглого сечения из различных металлов и сплавов [1]. Данный способ предлагается использовать для получения полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo, который применяется для изготовления имплантатов коленных и тазобедренных суставов, кортикальных винтов и др. [2].

Структура и свойства деформируемых сплавов системы Co-Cr-Mo в значительной степени зависят от температурно-скоростных условий прокатки. Процесс РСП относится к числу способов деформации, с интенсивным деформационным разогревом [3]. В связи с этим весьма актуальной задачей является прямое экспериментальное исследование температурных условий радиально-сдвиговой прокатки сплава Co-28Cr-6Mo в зависимости от основных технологических параметров.

В рамках эксперимента проводилась фиксация значений температуры прутка на входе и выходе из очага деформации с помощью инфракрасных пирометров. Прокатку выполняли на трехвалковом стане РСП МИСИС-100Т. Исходные заготовки из сплава Co-28Cr-6Mo диаметром 56-56,4 мм прокатывали до диаметра 40 мм с суммарным коэффициентом вытяжки $\mu_{\Sigma}=2,0$ по следующим режимам: первую заготовку прокатывали в 1 проход с частотой вращения валков $n=54$ об/мин; вторую заготовку прокатывали в 3 прохода с частотой вращения валков $n=18$ об/мин. Температура нагрева перед прокаткой $T_0=1195$ °C. Измеренные значения температуры в каждом проходе указаны в таблице 1.

Таблица 1. Измеренные значения температуры в каждом проходе

№ заготовки	D _{заг.} - D _{пр.} (мм)	На входе (°C)			На выходе (°C)			ΔT* (°C)
		T _{max}	T _{min}	T _{ср}	T _{max}	T _{min}	T _{ср}	
1	56,4-40,0	1161	1106	1140	1280	1250	1264	124
	56,0-48,6	1160	1131	1146	1192	1175	1186	40
2	48,6-45,2	1143	1137	1139	1132	1115	1125	-14
	45,2-40,0	1141	1100	1122	1150	1118	1128	6

ΔT^* - разница между средними значениями на выходе и на входе.

Прокатка в 1 проход с $\mu=2$ и $n=54$ об/мин приводит к интенсивному разогреву прутка на 124°C . При прокатке в 3 прохода с таким же суммарным коэффициентом вытяжки и $n=18$ об/мин интенсивность разогрева существенно снижается. В первом проходе разогрев составил 40°C , а в остальных проходах разогрев полностью компенсируется остыванием прутка.

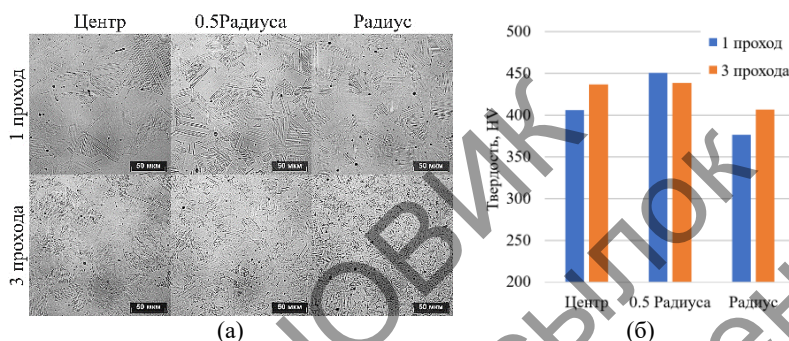


Рис. 1 – а) микроструктура по сечению прутка; б) Твердость образцов из сплава Co-28Cr-6Mo после РСП

Для полученных прутков диаметром 40 мм проведен анализ микроструктуры (Рис. 1а), а также измерена твердость в 3 зонах поперечного сечения прутка (Рис. 1б). Прокатка в 3 прохода повышает равномерность размера зерен и твердости поперечном сечении прутка. Средний размер зерна при РСП в один проход значительно выше, что связано с высокой температурой. Полученные данные показывают, что измерения температуры соответствуют полученной микроструктуре и твердости прутков. Результаты можно использовать для выбора температурно-деформационных режимов РСП сплава Co-Cr-Mo и создания цифровой модели, которая позволит повысить точность результатов моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00477, <https://rscf.ru/project/23-19-00477/>.

Список литературы

1. Galkin S.P., Gamin Yu.V., Aleshchenko A.S., Romantsev B.A. Modern development of elements of theory, technology and mini-mills of radial-shear rolling. *Chernye Metally*. Vol. 12. pp. 51-58. 10.17580/chm.2021.12.09.
2. Niinomi M., Nakai M., Hieda J. Development of new metallic alloys for biomedical applications // *Acta Biomaterialia*. – 2012. – Vol. 8. – №. 11. – P. 3888-3903.

3. Gamin Y., Akopyan T., Kin T., Galkin S., Aleshchenko A. Effect of radial-shear rolling on particle's morphology and mechanical properties of AA7075 alloy. *Materials Science and Technology*. 2023. Vol. 39. Issue15. pp. 2205-2216. <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2196471>.

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ПЛОСКОСТНОСТЬ ПОЛОС

Миянов А.Г.¹, Терентьев Д.В.¹, Платов С.И.¹,
¹ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия
e-mail: miyanovag@mail.ru

Основное направление работы – моделирование и исследование механизма образования дефектов плоскостности (волнистость, коробчатость) на холоднокатаном прокате из низкоуглеродистых марок стали, а также разработка научно-обоснованных мероприятий, направленных на снижение неплоскостности холоднокатаного проката.

Высокая конкуренция на рынке металлопроката и постоянное развитие секторов промышленности, использующих холоднокатаный прокат в качестве сырья, приводит к тому, что потребители выдвигают все более высокие требования к плоскостности не только листового, но и рулонного холоднокатаного проката [1, 2].

Считается [3, 4], что образование дефектов плоскостности обусловлено сочетанием воздействия ряда параметров, в числе которых можно выделить параметры горячекатаной полосы, состояние рабочих и опорных валков, технологические параметры прокатки и др. (рис. 1).



Рис. 1 – Параметры, влияющие на плоскость холоднокатаного проката

Все современные станы холодной прокатки, как правило, оснащены системами регулирования плоскости полосы, в реальном времени сравнивающей фактическую плоскость полосы с заданной кривой распределения планштности. Однако, в зависимости от поперечного сечения горячекатаного подката, условий деформации, параметров рабочих валков и др. параметров холодной прокатки, фактическая (измеренная) плоскость полосы будет значительно отличаться от заданной кривой распределения планштности, вследствие чего для производства холоднокатаного проката с повышенными требованиями к плоскости требуется корректировка заданной кривой распределения планштности, на которую, в свою очередь, будет ориентирована работа одновременно нескольких локальных систем управления отдельными устройствами и механизмами стана холодной прокатки (противоизгиб, осевая сдвигка, многозонное охлаждение, перекося рабочих валков и т.д.)

Обширные теоретические и экспериментальные исследования [1-5] механизма формирования плоскости в процессе холодной прокатки позволили выявить, что дефекты плоскости прокатываемых полос являются следствием неравномерного распределения коэффициентов вытяжки по ширине очага деформации. Однако степень влияния каждого из указанных на рисунке 1 факторов в неравномерное распределение коэффициентов вытяжки установлена недостаточно, поэтому моделирование и исследование механизма образования дефектов плоскости на холоднокатаном прокате является важной задачей, на которую будут направлены дальнейшие усилия.

Таким образом, моделирование механизма образования дефектов плоскости позволит улучшить качество холоднокатаного проката за счет

изменения параметров процесса прокатки, наиболее влияющих на указанный дефект.

Список литературы

1. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Улучшение плоскостности холоднокатаных стальных полос путем воздействия на нестабильные параметры технологии горячей и холодной прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 12. – С. 51-55.

2. Максимов Е.А. Экспериментальное исследование кинематического критерия плоскостности и условий образования дефектов формы полос при холодной прокатке // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2011. – № 2. – С. 39-43.

3. Бартхольдт Х., Копин Ф., Джелали М. Универсальная модель плоскостности для оптимизации процесса холодной прокатки // Черные металлы. – 2015. – № 3 (999). – С. 53-58.

4. Приходько И.Ю., Сафьян А.М., Куцин В.С. Совмещенное регулирование толщины, натяжения и плоскостности полос при холодной прокатке современными средствами регулирования с учетом скоростных характеристик исполнительных механизмов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 32 -35.

УДК 620.3

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БИОРАСТВОРИМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-1%Zn-0,06%Ca, ПОДВЕРГНУТОГО РКУИ – КОНФОРМ

Худододова Г.Д.¹, Кулясова О.Б.¹, Терегулова А.А.² Исламгалиев Р.К.¹

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: khudododova.gd@gmail.com

Известно, что биорастворимые сплавы на основе магния являются перспективными в качестве материала для изготовления медицинских имплантатов. Для повышения прочностных свойств магниевых сплавов используются методы легирования биосовместимыми и нетоксичными элементами, или методы измельчения зеренной структуры. Среди легирующих элементов наиболее часто исследуются Zn и Ca, которые присутствуют в организме человека и помогают регенерации костей [1,2]. Благодаря своей биорастворимости, применение имплантатов из сплавов Mg-Ca-Zn, снижает стресс пациента, устраняя необходимость повторной операции. Целью данного исследования является исследование механических свойств биорастворимого

сплава Mg-1%Zn-0,06%Ca (вес.%), после измельчения зеренной структуры методами редуцирования+РКУП с последующими РКУП-Конформ.

Исходные цилиндрические заготовки магниевое сплавы Mg-1%Zn-0,06%Ca были подвергнуты гомогенизационному отжигу при температуре 450°C для устранения дендритной ликвации. Далее образцы были деформированы методом редуцирования+РКУП при температуре 400°C. Далее деформированные образцы были подвергнуты дополнительной обработке методом РКУП-Конформ (2 прохода при температуре 300°C и 4 прохода при температуре 250°C). Для измерения микротвердости (HV) был выбран метод Виккерса, измерение проводили по диаметру образца на микротвердомере Emco-TestDurascan 50 с нагрузкой 0,1 Н и временем выдержки 10 с. Плоские образцы с размерами рабочей части 4×1×0,65 мм³ были испытаны на одноосное растяжение на испытательной машине Instron 5982 при комнатной температуре со скоростью нагружения 10⁻³ с⁻¹.

На рис. 1, а приведена диаграмма растяжения исследуемого сплава после редуцирования, редуцирования+РКУП и РКУП-Конформ. Сплав Mg-1%Zn-0,06%Ca в гомогенизированном состоянии обладает прочностью 150 МПа. В деформированном состоянии его прочность повысилась: после редуцирования до 198 МПа; после последующего РКУП до 225 МПа; после РКУП-Конформ при 300°C и 250°C до 200 МПа и 248 МПа, соответственно (рисунок 1а). Микротвердость исходного гомогенизированного образца составила 44 HV, после редуцирования+РКУП увеличилась до 54 HV, далее после дополнительного РКУП-Конформ при 300°C и 250°C увеличивалась до 61 HV и 68 HV, соответственно (рисунок 1б).

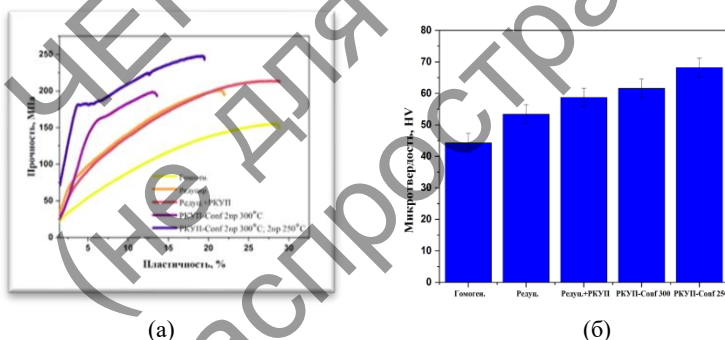


Рис. 1 – Прочностные свойства сплава Mg-1%Zn-0,06%Ca: (а) после испытаний на растяжение; (б) микротвердость

Список литературы

1. Luthringer B.J.C., Feयरabend F., Willumeit-Römer R. Magnesium-Based Implants: A Mini-Review. // Magnes. Res. 2014, 27, 142–154. DOI: 10.1684/mrh.2015.0375.

2. Witte F. The history of biodegradable magnesium implants: A review. // Acta Biomater. 2010, 6, 1680–1692. DOI: 10.1016/j.actbio.2010.02.0283.

УДК 621.777.01

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Калинина Н.А.^{1,2}, Швейкин В.П.², Салихьянова Е.И.², Путилова Е.А.²

¹ *Открытое Акционерное Общество «Каменск-Уральский металлургический завод», ул. Заводская, 5, Каменск-Уральский, Российская Федерация*

² *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация*
kalinina_na@mail.ru

Цель работы - подтверждение соответствия экспериментальных результатов прессования в лабораторных условиях производственному процессу по результатам численного моделирования и оценки микроструктуры.

Известно, что при прессовании прутков в выходном конце наблюдается слабдеформированная зона на величину до двух диаметров пресс-изделия [1]. Для подтверждения этого явления на лабораторной оснастке, а также для последующих поисков его устранения проведены лабораторные испытания на технологическом оборудовании ИМАШ УрО РАН. На первом этапе установлено влияние масштабного эффекта. Подобраны геометрические размеры заготовки и оснастки для испытаний в лабораторных условиях, при которых формируется слабдеформированная зона выходного конца идентичная получаемой в промышленных условиях ОАО «КУМЗ».

Оценка достоверности полученных результатов производилась по результатам металлографической оценки слабдеформированной зоны выходного конца и геометрических соотношений соответствующих зон по сечению заготовки и по длине. Моделирование процесса прессования прутка из алюминиевых сплавов выполнено методом конечных элементов в программном комплексе QForm.

На основе экспериментального прессования в лабораторных условиях и конечно-элементного моделирования первого и второго этапов прессования получены следующие результаты:

1. Температура по сечению заготовки распределяется неравномерно по направлению от матрицы к пуансону. При этом в условиях лабораторного прессования эффект усиливается. Для учёта выявленной особенности необходимо выполнить ряд технических решений, таких как дополнительная теплоизоляция, более высокая температура нагрева контейнера и матрицы.

2. Расчётные значения энергосиловых параметров прессования демонстрируют возможность реализации технологического процесса на используемом лабораторном оборудовании.

3. Экспериментальное сопоставление, выполненное на примере сплава АД33, показало, что по сечению образцов наблюдается разноструктурность: на периферии структура имеет более вытянутое строчечное строение, структурные составляющие имеют более измельченный вид. В случае выходного конца и основного тела пресс-изделия – различие заключается в том, что в материале основного тела пресс-изделия более равномерное распределение интерметаллидов и более мелкая структура, чем у выходного конца. Центральная часть имеет малодеформированное состояние, также различаются и размеры структурных составляющих.

По результатам сопоставления результатов лабораторного прессования с данными о строении слабдеформированной зоны выходного конца при прессовании в условиях ОАО «КУМЗ» установлено, что спроектированная оснастка для лабораторных условий прессования и подобранные технологические режимы позволили обеспечить особенности формирования структуры прессованных заготовок идентичной структуре, получаемой в промышленных условиях. Таким образом, учтён масштабный фактор для проведения опытно-экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Логинов Ю.Н., Разинкин А.В., Шимов Г.В., Мальцева Т.В., Бушуева Н.И., Дымшакова Е.Г., Калинина Н.А. Структурное состояние и деформации заготовки из алюминиевого сплава в начальной стадии прессования. Известия вузов. Цветная металлургия. 2023;29(2):29–37. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-29-37>

УДК

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ УМЗ СТАЛИ ЭИ-961Ш ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Хайбулина Н.А.¹, Ганеев А.В.¹, Фрик А.А.¹, Никитина М.А.¹,
Исламгалиев Р.К.¹

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
nkhaibulinaw@yandex.ru

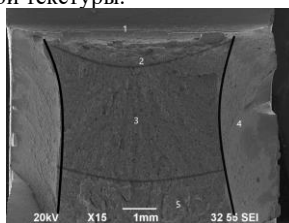
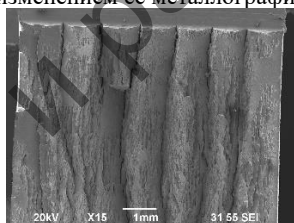
Сталь марки ЭИ-961Ш, является типичным представителем жаропрочных хромоникелевых сталей ферритно-мартенситного класса, которые используются для производства деталей, способных работать длительное время (10 000—100 000 часов) при высоких температурах (до 600°C). Цель данной работы — определение хрупко вязкого перехода (ХВП), влияние деформационных и термических обработок на ударную вязкость стали ЭИ-961Ш и структуру излома после удара, при проведении испытаний в интервале температур от криогенных до 120°C.

Основной жаропрочных сталей являются твёрдые растворы или перенасыщенные растворы, способные к дополнительному упрочнению вследствие дисперсионного твердения. Измельчение зернистой структуры стали способствует повышению свойств стали. Стоит отметить, что высоколегированные мартенситные стали содержат большое количество карбидных частиц и мартенситную фазу, которые усложняют процесс формирования нужной структуры стали методами деформации. Известно, что в стали после прохода равноканального углового прессования (РКУП) при комнатной температуре, происходит измельчение исходных пластин мартенсита, внутри которых происходит формирование дислокационных сеток и увеличение плотности дислокаций, и карбидные частицы приобретают равноосную форму [1].

Для проведения исследований и определения ХВП использована методика [2]. Структура излома образца при температуре ХВП была анализирована на растровом электронном микроскопе без предварительной обработки излома образца. Данных об определении ХВП и ударной вязкости жаропрочных сталей немного, поэтому для сравнения была взята сталь 10X10K3B2MФБР [3], в которой при снижении температуры испытания расширяется зона нестабильного распространения трещины и уменьшается доля зоны стабильного распространения трещины и боковых губ.

Для проведения испытаний были взяты образцы с концентратом вида V (Шарпи) в соответствие с ГОСТом 9454-78.

Анализ фрактографии поверхностей изломов стали ЭИ-961Ш при температурах ХВП показал, что прокат и РКУП приводят к формированию текстуры (рис. 1 (а, б)). Последующая термическая обработка (перезакалка) приводит к ослаблению влияния направления текстуры при изломе (рис. 1 (в, г)), что способствует большему сопротивлению стали к разрушению при динамической нагрузке. При холодном прокате (ХП) со степенью обжатия 50% $\sim -10^{\circ}\text{C}$ ($KCV = 265,3 \text{ кДж/м}^2$), при ХП с последующей термической обработкой (перезакалка) $\sim -10^{\circ}\text{C}$ ($KCV = 657,7 \text{ кДж/м}^2$), при РКУП $\sim +20^{\circ}\text{C}$ ($KCV = 688,9 \text{ кДж/м}^2$), при РКУП с последующей перезакалкой $\sim -20^{\circ}\text{C}$ ($KCV = 549,7 \text{ кДж/м}^2$). Сравнение ударной вязкости проводилось при комнатной температуре ($+20^{\circ}\text{C}$). Результаты показали, что ХП с дальнейшей перезакалкой повышает значение ударной вязкости в 3 раза по сравнению с ХП. Равноканальное угловое прессование с последующей перезакалкой повысило значение в 1,3 раза по сравнению с РКУП. Ударная вязкость стали ЭИ-961Ш повышается после проведения деформационных и термических обработок, это связано с изменением ее металлографической текстуры.



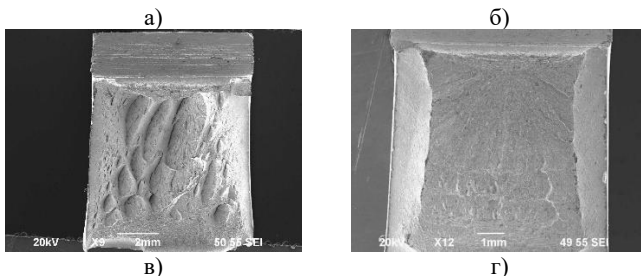


Рис. 1 – Изломы образцов при температуре ХВП: а) прокат, б) прокат+перезакалка, в) РКУП, г) РКУП+перезакалка

Работа выполнена в рамках проекта РНФ N 22-19-00445а.

Список литературы

1. Yang, G. Enhancement of mechanical properties of heat-resistant martensitic steel processed by equal channel angular pressing / G. Yang, C. X. Huang, C. Wang et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – Vol.515. – P.199–206.
2. Клевцов Г.В. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных П 84 металлических материалов: учебное пособие / [Г. В. Клевцов и др.]: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 111с. ISBN.
3. Мишнев Р. В. Структура и механические свойства перспективной теплотехнической стали 10X10K3B2MФБР. – 2018. 167–182с.

УДК

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ САПР КАЛИБЕР

Белугин В.С.¹, Гладков Ю.А.¹, Стебунов С.А.¹, Мальцев П.А.¹,
Алимов И.С.¹

¹ ООО «КванторФорм», г. Москва, Россия
belugin@qform3d.ru

В докладе рассмотрено применение новой системы САПР Калибер для автоматизированного проектирования калибров сортовой прокатки. Программа существенно ускоряет разработку технологии прокатки новых профилей и улучшение существующих процессов. Система тесно интегрируется с программой КЭ-моделирования QForm для автоматической подготовки моделирования и верификации разработанного технологического процесса. Программное обеспечение Калибер основано на передовых аналитических методах и эмпирических правилах проектирования калибров

прокатных валков и обеспечивает высокоточное и быстрое проектирование для следующих типов калибров и клетей (рис. 1):

- ящичные калибры с различными конфигурациями ручьев,
- круглые/овальные калибры и их модификации,
- квадратные/ромбические и их модификации,
- закрытые/открытые калибры для прокатки угловых профилей, двутавровых балок, тавров, швеллеров,
- универсальные калибры для прокатки различных профилей.

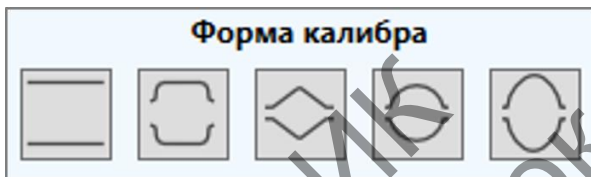


Рис. 1 – Формы калибров сортового проката в САПР Калибер

В представленной работе рассматриваются различные аспекты проектирования калибров по проходам в интеграции с разработкой методики моделирования, которые практически применимы к разработке, анализу и совершенствованию технологии прокатки в кратчайшие сроки.

В докладе рассмотрено проектирование по ходу прокатки и против хода прокатки. Последний способ реализован с помощью функционала «Универсальный параметрический калибр» (рис. 2), в котором пользователь строит геометрию чистового профиля из набора элементов – линейных и фланцевых. Промежуточные переходные формы от чистового профиля до принятого лидерного профиля строятся автоматически на основе распределения коэффициентов деформаций в элементах по проходам против хода прокатки [1,2]. Такой способ позволяет выполнять калибровку различных типов профилей: балки, уголки, швеллера, рельсы и другие.

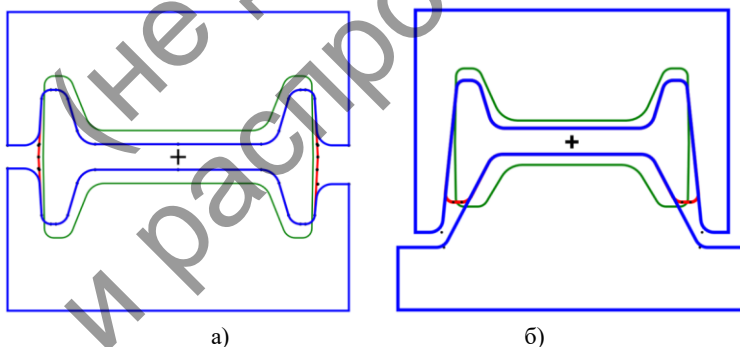


Рис. 1 – К методике проектирования в «Универсальном параметрическом калибре» на примере двутавровой балки 14Б2 против хода прокатки:

- а) Открытый балочный калибр; б) Закрытый балочный калибр

САПР Калибер предназначен для автоматизированного проектирования калибровок, интегрированного с конечно-элементным моделированием в QForm в полной 3D постановке. Система проектирования позволяет: создавать новые, хранить и модифицировать существующие калибры; оценивать температуры проката, скоростные и энергосиловые параметры прокатки; подготавливать необходимую технологическую документацию: чертежи калибров и валков, схемы прокатки; автоматически подготавливать проект для моделирование в QForm.

Список литературы

1. Бахгинов Б.П., Штернов М.М. Калибровка прокатных валков. Москва: Металлургия, 1953.
2. Вусатовский З. Основы прокатки. Лейпциг : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1963.

УДК 669.715

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО ТЕРМИЧЕСКИ НЕУПРОЧНЯЕМОГО СКАНДИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА 1545К

**Никитина М.А., Песин А.М., Локотунина Н.М., Песин И.А.,
Барышникова А.М.**

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ

Скандий является эффективной добавкой для алюминиевых сплавов 5XXX и 7XXX серии с целью повышения механических свойств. Скандий, при правильной проведенной гомогенизации, образует с алюминием дисперсоиды Al_3Sc , которые повышают предел текучести сплава за счет дисперсионного упрочнения. Наиболее эффективно введение скандия с цирконием, так как по мимо Al_3Sc образуются дисперсоиды $Al_3(ScZr)$. При добавке циркония в $Al - Sc$ -сплавы размер выделяющихся упрочняющих частиц уменьшается, а количество их увеличивается[1]. Механизм положительного действия циркония заключается в том, что цирконий растворяется в соединении Al_3Sc , замещая часть атомов скандия, при этом частицы $Al_3(Sc, Zr)$ обладают таким же сильным упрочняющим и антирекристаллизационным действием, как и частицы Al_3Sc [2].

Учеными АО «Композит» и ОАО «ВИЛС» был разработан деформационный термически неупрочняемый свариваемый алюминиевый сплав системы алюминий-магний-скандий 1545К. Сплав 1545К содержит скандий 0,17-0,27% и цирконий 0,05-0,12[3].

В данной работе рассмотрено влияние асимметричной прокатки на микроструктуру катаных полуфабрикатов из сплава 1545К. Асимметричный вид прокатки позволяет получить более мелкодисперсную структуру, чем классический вид прокатки за счет того, что при асимметричной прокатке в металле одновременно возникают высокие деформации сжатия и сдвига за счет противоположно направленных сил контактного трения, действующих на заготовку одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями. Сдвиговые деформации при этом характеризуются тангенсом макроскопического угла наклона слоев металла в вертикальной плоскости. В следствии чего в большинстве материалов происходит динамическая рекристаллизация.

В данной работе исследование проводилось в Лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П.Жилева, имеющей в своём составе уникальный прокатный стан ДУО 400. Прокатка проводилась по классической симметричной технологии и по предлагаемой асимметричной технологии. Прокатка разделялась на горячую и холодную прокатку. Прокатку заготовки проводили по классической горячей технологии до толщины 16 мм. Заготовку толщиной 16 мм, разрезали на 3 части. Первую часть докатывали методом горячей симметричной прокаткой до толщины 6 мм, с последующей холодной прокаткой до 2 мм. Две последующие докатывали методом горячей асимметричной прокаткой до толщины 6 мм, одну с коэффициентом асимметрии 1,6 другую 1,5. Далее каждую заготовку разрезали на 2 части и каждую часть так же докатывали методом асимметричной прокатки до толщины 2 мм.

Наибольшее влияние на микроструктуру асимметричная прокатка оказала при горячей прокатке. Микроструктура после горячей прокатки без асимметрии и с асимметрией 1,5 и 1,6 представлена на рисунке 1.



а

б

в

Рисунок 1 - Микроструктура сплава 1545К после горячей прокатки
А - без асимметрии; Б – асимметрия 1,5; В – асимметрия 1.6

С увеличением асимметрии прокатки зерно измельчается. Однако остаётся деформированным, что свидетельствует об отсутствии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>

Список литературы

1. Рохлин, Л. Л. Исследование распада пересыщенного твердого раствора в сплавах Al - Sc - Zr при различном соотношении скандия и циркония / Л. Л. Рохлин, Н. Р. Бочвар, Н. П. Леонова // Перспективные материалы. – 2011. – № 3. – С. 88-92.
2. Исследование и разработка алюминиевого сплава с повышенной электропроводимостью на основе системы Al-Sc-Zr / Н. Г. Байдин, Ю. А. Филатов, Л. А. Снегирева [и др.] // Технология легких сплавов. – 2017. – № 2. – С. 12-15.
3. Патент № 2343218 С1 Российская Федерация, МПК С22С 21/08, криогенный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2007112718/02 : заявл. 06.04.2007 : опубл. 10.01.2009 / Ю. А. Филатов, В. И. Елагин, В. В. Захаров [и др.] ;

УДК 004.896

ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ

Брайко Д.А.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия
braykoda@yandex.ru*

Для достижения требуемых свойств стали используются методы термомеханической обработки с последующим непрерывным охлаждением, что приводит к специфической эволюции микроструктуры посредством фазового превращения. Начало и конец фазового превращения могут быть отображены в виде кривых на термокинетических диаграммах распада аустенита (ТКД). Наиболее важным фактором, влияющим на распад аустенита, является химический состав стали и применяемая траектория охлаждения (в данной работе рассматривается только линейная).

Начало и конец фазовых превращений, а также объемную долю структурных составляющих рассчитывают на основе обработки результатов дилатометрических исследований. На современном металлургическом производстве изготавливаются десятки марок сталей, химический состав которых может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от требований потребителя и экономических соображений. Целесообразно избежать высоких затрат на проведение экспериментов для вновь разрабатываемых химических составов созданием цифрового инструмента, использующего имеющиеся экспериментальные данные и современные методы машинного обучения.

Отобрано более 50 достоверных источников (атласы, научные статьи, диссертации), в которых аккумулированы данные о структурных превращениях в легированных углеродистых и низкоуглеродистых сталях (страны: Россия, СССР, Великобритания, Германия, США, Франция). Для обучения модели требуются данные о значениях температуры, при которых начинается или заканчивается фазовое превращение в зависимости от времени. В источниках требуемые данные извлекли из ТКД. Ввиду отсутствия табличной формы и аналитических зависимостей ТКД оцифровывали с помощью приложения, находящегося в открытом доступе. Удалось оцифровать более 300 диаграмм.

Полученные оцифровкой данные были приведены к требуемому для обучения модели виду с помощью программы, написанной на Python. Суть работы программы заключается в интерполяции исходных данных, а затем – в поиске точек пересечения траекторий охлаждения с кривыми фазовых превращений. Результатом работы программы стали табличные данные: температура аустенизации, скорость охлаждения температуры начала и конца фазовых превращений.

В качестве модели использовался градиентный бустинг над деревьями (библиотека «catboost»). Идея состояла в том, чтобы обучить регрессионную модель на известных данных (скорость охлаждения/время, температура аустенизации, химический состав) отдельно для каждого фазового превращения предсказывать как температуру начала, так и его конца. Метрики на тестовой выборке: RMSE = 13 °C; MAE = 20 °C.

Для удобного взаимодействия пользователя и моделей машинного обучения разработано web-приложение. Приложение развернуто на сервере и включает пользовательский интерфейс и предварительно обученные модели. Пользователь, взаимодействуя с интерфейсом, может указать химический состав, увидеть результаты работы приложения (ТКД) и вывести их в файл.

Исследования проводились в рамках программы стратегического академического лидерства Российской Федерации «Приоритет-2030», направленной на поддержку программ развития образовательных организаций высшего образования, научного проекта ПРИОР/СН/НУ/22/СП5/26 «Создание инновационных цифровых инструментов для применения прикладного искусственного интеллекта и продвинутого статистического анализа больших данных в технологических процессах производства металлургической продукции».

УДК 621.77.04

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ АРМАТУРЫ В ХОДЕ ПРОЦЕССА COLD STRETCHING

Шекшеев М.А.¹, Константинов Д.В.¹, Огнева Е.М.¹

В силу специфики сквозных технологий производства арматуры с точки зрения обеспечения режимов нагрева и деформирования при одновременном сохранении производительности промышленных процессов, обеспечение устойчивости механических (в особенности, пластических) характеристик становится актуальной задачей, имеющей целый ряд возможных решений [1]. Первым возможным вариантом решения является варьирование химического состава стали за счет вызывающих деформационное старение азота, кислорода, водорода и углерода. Однако подобные изменения не всегда реализуемы и контролируемы в производственной практике. Вторым вариантом решения является широко используемый за рубежом способ Cold Stretching (или SBR: Stretching, Bending with Rebending). Данная технология предназначена для изготовления арматурного свариваемого проката периодического профиля класса прочности 500 из горячекатаной арматуры по комплексу механических характеристик близким к классу А400. В частности, один из лидеров по производству данного проката в Европе - немецкая фирма BSW-Badische Stahlwerke GmbH [2] производит арматуру именно таким способом. Эффективность способа также отмечается в работах специалистов Белорусского металлургического завода [3-4]. В России максимальная публикационная активность по процессу Cold Stretching с обоснованием его внедрения принадлежит сотрудникам ассоциации “Железобетон”, ОАО “НИЦ “Строительство”, ФГБОУ ВО “МГТУ им. Г.И. Носова”. Суть процесса заключается в протяжке арматуры через систему неприводных роликов, формирующих в металле равномерное растяжение со знакопеременным изгибом без образования локализации деформации [5]. Уникальность и простота данного способа значительно снижает затраты на производство, т.к. за счет малых степеней деформации происходит снижение затрат на трение, что влечет снижение энергетических затрат, кроме этого, снижается нагрев в процессе, что исключает применение сложных и дорогостоящих систем охлаждения. Основным моментом, препятствующим масштабированию данной технологии, остается отсутствие единых расчетных закономерностей для выбора параметров процесса и управления свойствами готовой продукции [1]. В частности, малоизученным остаётся вопрос изучения напряженно-деформированного состояния периодического профиля арматуры в ходе обработки.

Цель представляемой работы заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния арматуры с одним из самых востребованных у потребителей двухсторонним профилем на основе компьютерного конечно-элементного моделирования.

Проведенное конечно-элементное моделирование процесса stretching–bending–rebending (cold stretching) подтвердило теоретическую эффективность данной операции для деформирования арматуры с малыми степенями при

одновременном сохранении корректной геометрии профиля. Представленные особенности напряженно-деформированного состояния арматуры на различных стадиях процесса позволяют судить о потенциальной применимости процесса для широкого диапазона диаметров арматуры и различных форм двухстороннего профиля. При этом последующие исследования должны быть направлены также на изучение поведения более сложных форм профиля как, например, широко применяемый трехсторонний и учет мезо- и микроструктуры применяемых сталей. При относительной простоте технического исполнения установки от компании DEM также особый интерес представляет возможная вариативность параметров и управление ими при изготовлении аналогичного оборудования в рамках импортозамещающих стратегий современных метизных производств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-10046, <https://rscf.ru/project/23-29-10046/> и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (Соглашение от 29.06.2023г. № 588).

Библиографический список

1. Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. Оценка возможности внедрения технологии Cold Stretching для повышения качества холоднодеформированного арматурного проката класса 500 в условиях ОАО «ММК-Метиз» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 10. С. 1028-1034. EDN: XJBUHU
2. Badische Stahlwerke GmbH [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bsw-kehl.de/bsw-de/index.php>.
3. Ахметов Т.А., Редькова И.Н., Локтионова Л.В. Современные тенденции в развитии технологии производства холоднодеформированной арматурной стали // Литьё и металлургия. 2014. № 2 (75). С. 65-67. EDN: ТКТАЕН
4. Ахметов Т.А. Особенности производства холоднодеформированной арматурной стали класса B500A по стандарту ONORM B 4707:2010 // Литьё и металлургия. 2013. № 3 (72). С. 176-178.
5. Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. Конечно-элементное моделирование процесса COLD STRETCHING для оценки возможности изготовления холоднодеформированной арматуры класса 500 в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 21-26. EDN: PJDWUR

УДК 519.71 : 621.771.2

ПОДХОД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МНОГОФАЗНЫХ СТАЛЕЙ

Трубников Н.А., Лопатина Е.В., Полякова М.А.

Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия
nik.trubnikov.2001@mail.ru

Одним из перспективных направлений развития современного материаловедения является разработка научных основ создания новых композиций стали.

Особый интерес представляют многофазные стали, например, сверхнизкоуглеродистые (DP, IF, HSLA и др.), TRIP и TWIP стали. Это обусловлено их уникальными свойствами, которые обусловлены специфическим химическим составом, который определяет протекающие в стали фазовые превращения при различных видах деформационного и термического воздействий. Вследствие этого, данный класс материалов активно используется в машиностроении, строительных элементах и армирующих конструкциях сложной формы [1]. В работах [2, 3] были описаны достоинства данного вида стали для автомобилестроения вследствие их хорошей пластичности, коррозионной и радиационной стойкости. Однако, несмотря на активные исследования в области обработки давлением многофазных сталей, в этой области остается еще много нерешенных вопросов. Отсутствие большого массива статистических данных об особенностях структуро- и свойствообразования данных сталей при деформационной обработке в значительной степени усложняет разработку рациональных режимов операций технологических процессов, таких как прокатка, волочение, экструзия и др.

Как известно, проектирование любого технологического процесса основано на построении математических моделей, адекватно описывающих происходящие с обрабатываемым материалом изменения [4-7]. При этом свойства материала задаются, как правило, в виде известных численных значений соответствующих механических свойств. Однако, при обработке давлением материалов с гетерогенной структурой необходимо учитывать их фазовый состав, когда каждая фаза может быть рассмотрена как мягкая и твердая составляющая на основании ее прочностных и пластических свойств [8]. В данной работе для гетерогенной среды простейшего состава авторы формулируют условие пластичности или прочности в следующем виде:

$$f(\sigma_{ij}^T, \varepsilon_{ij}^T, a^T, m^T, \alpha^T, \sigma_{ij}^M, \varepsilon_{ij}^M, a^M, m^M, \alpha^M) = 0,$$

где σ_{ij} – компоненты напряжений; ε_{ij} – компоненты деформаций; a , m – показатели упрочнения; T , M – индексы принадлежности твердой и мягкой составляющей, соответственно; $\alpha^T(\alpha^M)$ – характеристика объемной доли составляющей.

Развивая данное направление теоретических исследований, это можно использовать как основу для определения внешней нагрузки в области

конечных пластических деформаций, которая распределяется между фазами пропорционально их способности упрочнения. Тогда процесс пластической деформации можно разделить на отдельные фазы, начиная от деформации одной, наиболее мягкой, фазы и заканчивая деформацией всей многофазной композиции в целом. При этом для определения деформирующего напряжения необходимо учитывать соотношения фаз, а также их пределы текучести, модули упрочнения и степени изменения объемной доли каждой фазы в процессе пластической деформации.

Таким образом, использование такого подхода открывает широкие перспективы для решения ряда практических задач по проектированию режимов обработки давлением сталей различного фазового состава.

Список литературы

1. Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б. Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2021. - Т.19. - №3. - С. 109–114.

2. Galan J., Samek L. Advanced high strength steels for automotive industry // Revista de Metalurgia. - 2012. - № 48. - pp. 118–131.

3. Kawalla R., Waengler S. Advanced high strength steels for automotive industry // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2008. – №8. – pp. 103-117.

4. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2017. - Т. 15. - №1. - С. 45-55.

5. Чикишев Д.Н., Голубчик Э.М., Тарасова К.А. Исследование влияния химического состава на механические свойства двухфазной стали НСТ780Х с целью экономного легирования // Сталь. - 2021. - № 12. - С. 46-47.

6. Чикишев Д.Н., Разгулин И.А. Оценивание осевой химической неоднородности цифровым и аналитическим методами // Моделирование и развитие процессов ОМД. - 2018. - № 25. - С. 11-15.

7. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н. Моделирование процесса прокатки сляба с осевой химической неоднородностью // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - 2017. - Т. 1. - С. 68-71.

8. Коковихин Ю.И., Никулин А.В. Особенности пластических деформаций гетерогенных сред // Теория и практика процессов обработки композиционных и сплошных материалов. - Магнитогорск: Издание МГМИ, 1993. - С. 32-35.

УДК 620.193.28

РАЗЛИЧИЕ В МЕТОДЕ ПРОВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ ZN-FE-MG

Абрахманова Э.Д.¹, Хафизова Э.Д., Поленок М.В.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
¹elmira.abdr2019@mail.ru

В поиске новых материалов для имплантатов научное сообщество обратило внимание на биodeградируемые материалы на основе цинка, способные растворяться в организме человека, что позволит уменьшить нагрузку на организм, вызванную повторной операцией по снятию имплантата. Легированием и деформационной обработкой можно повысить прочностные свойства цинковых сплавов [1], а изделия, сделанные из биodeградируемого материала, должны разрушаться с определенной скоростью для обеспечения нужного временного интервала для восстановления организма. Важным вопросом для каждого исследователя является выбор метода определения скорости коррозии (резорбции) для биометаллического материала. Гравиметрический метод (весовой анализ) является одним из самых простых методов, основанный на точном измерении массы вещества. При определении скорости коррозии гравиметрическим методом выбор коррозионной среды, температуры окружающей среды, времени выдержки образца в коррозионной среде играют существенную роль, что влияет на результаты исследований.

В настоящей работе изучено влияние прерывистой и длительной выдержки образцов в коррозионной среде при определении скорости коррозии гравиметрическим методом в цинковых сплавах системы Zn-xFe-xMg в исходном состоянии и после интенсивной пластической деформации кручением. Деформация проводилась на установке СКРУДЖ-200 при комнатной температуре, с давлением 6 ГПа, скоростью 1 об/мин с числом оборотов 1, 5 и 10. Микроструктурные исследования проводились на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV. Скорость коррозии была рассчитана гравиметрическим методом, испытания на погружение проводились в растворе Рингера при температуре 38°C. Первый метод включал в себя очистку от продуктов коррозии и взвешивание образцов каждые 48 часов. Второй метод заключался в постоянной замене раствора для поддержания pH=7, однако очистка и взвешивание производились только по истечению испытательного срока.

Результаты после прерывистой и длительной выдержки отличаются в 3–5 раза. В ходе непрерывных испытаний металл разрушился гораздо сильнее, о чем свидетельствует наличие большого количества продуктов коррозии на поверхности металла, а также более глубокие ямы. ИПДК приводит к увеличению скорости коррозии, а также способствует её более равномерному протеканию в результате фазового превращения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Уфимского университета науки и технологий (№ 075- 03-2024-123/1) молодежной исследовательской лаборатории “Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях”.

Список литературы

2. Shiliang Chen, Tianming Du, Hanbing Zhang, Jing Qi, Yanping Zhang, Yongliang Mu, Aike Qiao, Methods for improving the properties of zinc for the application of biodegradable vascular stents, *Biomaterials Advances*, Volume 156, 2024, 213693, ISSN 2772-9508, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213693>.

УДК 621.771

Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей

**Песин А.М.¹, Пустовойтов Д.О.¹, Локотунина Н.М.¹, Песин И.А.¹,
Барышникова А.М.¹, Сверчков А.И.¹**

¹ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия
e-mail leshka-sverhc@rambler.ru

Основное направление работы – экспериментальное моделирование и исследование возможности применения технологии асимметричной прокатки при производстве ленты из высокоуглеродистых марок стали.

Одним из перспективных нетрадиционных способов улучшения физико-механических свойств, точности геометрических размеров полос, а также снижения энергосиловых параметров процесса прокатки является скоростная асимметрия рабочих валков [1-3]. С уменьшением толщины лент и полос эффект снижения усилия возрастает [4]. Прокатка с различными окружными скоростями рабочих валков, когда оба валка приводятся в движение двумя независимыми двигателями, является наиболее подходящим способом реализации технологии асимметричной прокатки. Обширные теоретические и экспериментальные исследования [1-9] процессов асимметричной прокатки позволили выявить положительные стороны скоростной асимметрии, заключающиеся, прежде всего, в возможности значительного снижения усилия прокатки, упругих деформаций клетки, повышения обжимной способности клетки, возможности получения более тонких полос по сравнению с обычным процессом прокатки. Механика процесса асимметричной прокатки основана на задании дополнительных сдвиговых деформаций в прокатываемом металле. В отличие от симметричного процесса в очаге деформации при асимметричной прокатке возникает зона сдвиговой деформации, т.е. зона, в

которой силы контактного трения со стороны ведущего (вращающегося с большей скоростью) и ведомого (вращающегося с меньшей скоростью) валков направлены в противоположные стороны [10]. Асимметричная прокатка за счет рассогласования скоростей рабочих валков может быть также использована для измельчения зерна, улучшения текстуры и механических свойств различных металлов и сплавов

Результаты экспериментов в лаборатории МГТУ показали, что имеется принципиальная возможность реализации прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей (или аналогов).

Оптическая и электронная микроскопия показали отсутствие несплошностей, микротрещин и микроразрывов, как на поверхности, так и в микроструктуре материала всех исследуемых образцов (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Асимметрия 1.1 увеличение x300

Таким образом, асимметричная прокатка за счет рассогласования скоростей рабочих валков может быть использована для снижения усилий прокатки, повышения обжимной способности клетей и, как следствие, получения более тонкой ленты. Целью данной работы является экспериментальное опробование и сравнительный анализ энергосиловых параметров процессов симметричной и асимметричной прокатки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02041, <https://rscf.ru/project/22-49-02041>

Список литературы

5. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. – Магнитогорск, 2013. – 128 с
6. Песин, А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки / А.М.

Песин // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2002. – № 1. – С. 107–113.

7. Межгосударственные стандарты. ГОСТ 2283-79 «Лента холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали».
8. G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev and T.R. Khramshin, Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatij [Modeling of electrotechnical complexes of metallurgical enterprises], Magnitogorsk: NMSTU Publ., 2014.

УДК 621.77.09

НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ ПРАВИЛЬНОЙ РАСТЯЖНОЙ МАШИНЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Завалий Е.А.^{1,2}, Логинов Ю.Н.¹, Соболев Д.О.¹

¹ *Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*

² *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», г. Каменск-Уральский, Россия*

e-mail zavaliyeva@gmail.com

Растяжные машины для правки плоского проката применяются не так часто, как роликовые правильные машины. Их сфера применения - это относительно короткие плиты или толстые листы в титановой или алюминиевой промышленности. Последние варианты исполнения таких машин снабжаются системами мониторинга, что может привлечь внимание исследователей свойств деформируемых материалов, причем измерять эти свойства можно, не прибегая к изготовлению образцов [1]. Вместе с тем, поскольку испытанию здесь подлежит крупный объект, то выявляются неравномерности его свойств по объему [2], что часто обусловлено неоднородным распределением деформаций при прокатке [3].

В данной работе изучены показания мониторинга растяжной машины при правке плит и толстых листов из алюминиевого сплава В95. Аналогом такого сплава по стандарту ASTM является сплав 7075 системы Al – Zn – Mg – Cu. В соответствии с данными электронного справочника Matweb сплав в отожженном состоянии обладает следующими прочностными свойствами (не менее): временное сопротивление 228 МПа, условный предел текучести 103 МПа. Свойства сплава могут резко меняться при применении закалки и искусственного старения. В соответствии с ГОСТ 17232-99 на плиты из алюминия и алюминиевых сплавов свойства в термобработанном состоянии окажутся (не менее): временное сопротивление 470...490 МПа, условный предел текучести 390...410 МПа.

Обработаны результаты данных по растяжению заготовок толщиной 25,5...61 мм, шириной 1270...1930 мм и длиной 5700...14200 мм. Результаты отражены на графиках рис. 1 в виде зависимости максимального напряжения растяжения от относительного перемещения активного захвата машины.

Последняя величина является суммой относительных упругих деформаций самой машины и заготовки, а также пластической деформации заготовки. Это значение отнесено к длине заготовки. Во всяком случае напряжение соответствует пластической области формоизменения. Поэтому оно заведомо выше условного предела текучести материала.

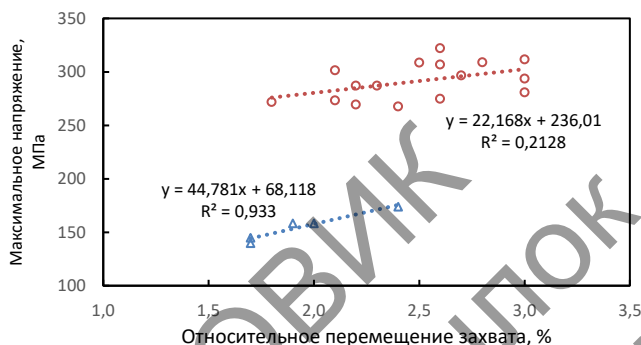


Рис. 1 – Графики нагружения правильно-растяжной машины при обработке сплава В95, точки – опытные данные

На диаграмме верхнее облако точек относится к закаленному состоянию, а нижнее облако к горячекатаному состоянию. Скорее всего, оно соответствует состоянию отжига. Действительно, в справочнике [3] для отожженного состояния сплава В95 приводятся значения сопротивления деформации, близкие к значениям на графике, а для закаленного состояния напряжения оказываются выше. Они не достигают значений, требуемых стандартами в качестве прочностных характеристик, потому что сплав на этой стадии не подвергнут старению.

Естественным является рост напряжений на графиках в функции от относительного перемещения активного захвата, потому что материал при правке упрочняется. Обращает на себя внимание, что нижняя зависимость имеет малый расцвет данных, а верхняя зависимость отличается большей дисперсией, о чем говорит и пониженное значение величины достоверности аппроксимации R^2 . Это можно объяснить тем, что при горячей прокатке созданы условия для более равномерного прохождения процессов рекристаллизации. В то же время закалка заготовок, имеющих разные размеры, может приводить к различной по объему скорости охлаждения, что мешает стабильности процесса фиксации фаз.

Список литературы

1. Соболев Д.О., Логинов Ю.Н. Мониторинг работы растяжной машины для правки полос из алюминиевых сплавов // Magnitogorsk rolling practice.

Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 102–103.

2. Логинов Ю.Н., Соболев Д.О. Анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. – 2021. – № 8. – С. 83–88.

3. Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: Справочное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 344 с.

УДК 621.778

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО КАРТИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Афанасьева В.В.¹, Пивоварова К.Г.², Тагирова В.М.¹

¹ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия

²МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

victoria.afanasjeva@mail.ru

Металлические изделия (метизы) являются традиционным и пользующимся постоянным спросом на рынке видом продукции. Основными потребителями метизов являются строительная индустрия, железнодорожная отрасль, машиностроение, автомобилестроение, черная металлургия, то есть отрасли, определяющие развитие экономики страны.

Технологический процесс метизного производства представляет собой сложную систему, характеризующуюся многостадийностью и физической разнородностью входящих в нее подсистем, между которыми существуют множество очевидных и не очевидных связей. В таких системах принятие решений по управлению качеством продукции сопряжено с анализом и обработкой значительного объема разнородной информации. Необходимость правильно интерпретировать информацию усложняется из-за возникающей неопределенности данных на различных иерархических уровнях технологической системы. Принятие решений в условиях возрастающей сложности и размерности систем метизного производства приводит к ошибкам, нарушению технологии производства и, в конечном счете, несоответствию продукции по качеству. Кроме того, у специалистов предприятия, занятых в обслуживании одного и того же процесса есть свои уникальные знания и опыт, которыми могут не обладать их коллеги. Подобные знания называются «неявными». Концентрация «неявных знаний» в разных местах приводит к потерям информации, времени, качества и смыслов при взаимодействии специалистов и структурных подразделений между собой.

Одним из активно развивающихся направлений, которое применяется для визуализации явных и неявных связей в сложных производственных системах, является концептуальное картирование. Данный подход, основанный на экспертных знаниях, позволяет описать причинно-

следственную неопределенность технологической системы и с помощью концептуальной карты сделать «неявные знания» доступными любому заинтересованному персоналу для успешного решения задач по управлению качеством продукции.

Вышеизложенное определяет актуальность применения концептуального картирования при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов метизного производства, обеспечивающих заданный уровень потребительских свойств готовых металлических изделий.

В настоящей работе с применением концептуального картирования исследовали технологию производства шайб пружинных 10 ОТ по ГОСТ 6402 из стали марки 65Г диаметром трапеции 3,5 мм. Были проанализированы и отображены на карте качественные связи между всеми этапами технологического процесса от исходной заготовки до готовой продукции. Полученные результаты позволили разработать комплекс мероприятий по совершенствованию технологического процесса производства пружинных шайб на базе существующего оборудования ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Список литературы

1. T.B. Ladinig, G. Vastag. Mapping quality linkages based on tacit knowledge // International Journal of Production Economics. 2021. Vol. 233, 108006.
2. A Summary of Literature Pertaining to the Use of Concept Mapping Techniques and Technologies for Education and Performance Support / J.W. Coffey, M.J. Carnot, P.J. Feltovich, J. Feltovich, R.R. Hoffman, A.J. Cañas, J.D. Novak // Technical Report submitted to the US Navy Chief of Naval Education and Training. Pensacola, FL: Institute for Human and Machine Cognition. 2003. <http://cmap.ihmc.us/Publications>.
3. J.D. Novak, A.J. Cañas. Theoretical Origins of Concept Maps, How to Construct Them, and Uses in Education // Reflecting Education. 2007. Vol. 3, No. 1. Pp. 29-42.

УДК 621.774

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРВИЧНОГО ЗАХВАТА ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ ЗАГОТОВКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОКАТЫВАЕМЫХ ГИЛЬЗ

Халезов А.О.¹, Нухов Д.Ш.¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
e-mail: alekssanja633@mail.ru, d.s.nukhov@urfu.ru

Прошивка сплошной заготовки на станах винтовой прокатки позволяет получать гильзу высокого качества как по структуре, так и по точности геометрии, что дает возможность применять гильзу в качестве заготовки для получения высококачественных труб на различных типах трубопрокатных агрегатах (ТПА) [1-2]. В цехе №1 АО “Северский трубный завод” (АО “СТЗ”) применяется современная линия ТПА с непрерывным станом FQM. Для стабильной работы агрегата большое значение имеет получение гильзы с высокой точностью по диаметру и толщине стенки [3-4]. Перспективным направлением развития процесса винтовой прошивки является повышение точности прокатываемых гильз за счет создания наиболее оптимальных условий деформации и обеспечения стабильности первичного захвата заготовки [5-6]. С этой целью были разработаны усовершенствованные калибровки валка и линейки прошивного стана фирмы “ЭЗТМ” в линии ТПА со станом FQM [7].

Предложенный вариант конструкции валка работает следующим образом:

Задаваемая заготовка 1 (рис. 1а), заходящая в валки прошивного стана 4, проходит через расположенный с торца бочки валка, по ходу прошивки, направляющий участок длиной L_1 с углом α_2 , параллельным оси прокатки при установке валков. Заготовка центрируется на радиусных гребнях правого и левого валков прошивного стана, находящихся на одинаковом расстоянии от оси прокатки и составляющем половину диаметра нагретой заготовки, и переходит на входной конус валка длиной L_2 с углом α_1 , для первичного захвата перед оправкой 3. Выполненные радиусные гребни удерживают заготовку точно по оси прокатки, тем самым обеспечивая стабильный захват и центровку заготовки без вскрытия внутренней полости.

Построение профиля линейки производится следующим образом:

На входном конусе линеек (рис. 1б), строится участок, отвечающий за удержание металла заготовки в конусе прошивки в виде выпуклого радиуса R_1 . Высота выполненного профиля находится в горизонтальной плоскости ниже уровня точки пережима линеек. Выполненный участок заканчивается переходом в вогнутый профиль радиусом R_2 плавно совмещающий его с входным конусом линейки, тем самым обеспечивая некую степень свободы для исключения роста температур линеек и снижения нагрузки на двигатели валков прошивного стана.

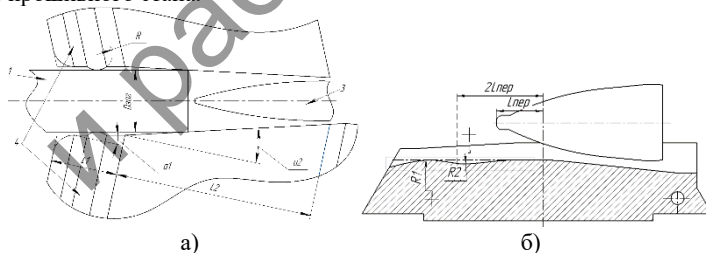


Рис. 1 – Измененный профиль вала и линейки прошивного стана:
а) гребень вала; б) гребень линейки (выпуклый радиус)

При применении валков прошивного стана ЭЗТМ опытной калибровки входного конуса не выявлено изменение энергосиловых параметров прокатки гильз на прошивном стане ЭЗТМ. Применяемая калибровка имеет характерный износ рабочей поверхности, стойкость валков соответствует его обычной стойкости, задаваемая в валки заготовка заходит точно по оси, процесс проходит плавно, винтовая нарезка отсутствует.

При применении линеек прошивного стана с опытной калибровкой входного конуса не выявлено изменение энергосиловых параметров прокатки гильз на прошивном стане ЭЗТМ. Успешная работа линеек, где задействован входной профильный участок, обеспечивающий центрирование заготовки по оси прокатки. Гильза, прокатанная с использованием опытных линеек, имеет ровную поверхность и минимальную разностенность.

По результатам проведенной работы установлено, что изменение входного участка валков и линеек позволило:

- уменьшить потери металла из-за дефекта «плена внутренняя прокатная» при прокате труб из НЛЗ Ø360 мм с 0,65% до 0,39%, и при прокате труб НЛЗ Ø290 мм с 0,26% до 0,16%;

- уменьшить потери металла из-за дефекта «кривизны» при прокате труб из НЛЗ Ø360 мм с 0,71% до 0,38%, и при прокате труб НЛЗ Ø290 мм с 0,38% до 0,08%;

- уменьшить потери металла из-за дефекта «отклонение по стенке» при прокате труб из НЛЗ Ø360 мм с 0,20% до 0,12%, и при прокате труб НЛЗ Ø290 мм с 0,21% до 0,10%.

Список литературы

1. Потапов И.Н. Теория трубного производства. – М.: Металлургия; 1991. – 424с.
2. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия; 1972. – 591 с.
3. Осадчий В.Я. Производство и качество стальных труб: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МГУПИ; 2012. – 370.
4. Богатов А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство УрФУ; 2017. – 164 с.
5. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N. Microstructure and hardness of hollow tube shells at piercing in two-high screw rolling mill with different plugs. Materials. 2022; (6).
6. Павлова М.А., Звонарев Д.Ю., Ахмеров Д.А. Исследование влияния точности настройки осей центрователей прошивного стана на разнотолщинность гильз с использованием QFORM. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2021; (4): 56-62.

7. Панасенко О.А., Халезов А.О., Нухов Д.Ш. Исследование эффективности изменения калибровки входного конуса валков и линеек прошивного стана с грибовидными валками с помощью компьютерного моделирования. Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2024;67(1):106-111.

УДК 669.2

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦИНКА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Глебов Л.А.¹, Громов Д.В.², Радионова Л.В.²

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия

glebovla@susu.ru

Для разработки новых и совершенствования существующих процессов формоизменения цинка необходимо знать не только его механические свойства, но и закономерности деформационного поведения при различных температурах. QForm является отечественным программным комплексом который получил широкое распространение как инструмент для моделирования процессов обработки металлов давлением [1]. В библиотеке материалов этого пакета цинк не представлен, не дал положительных результатов и поиск его реологических свойств в литературе и информационных ресурсах сети Интернет.

При формулировании требований к условиям проведения исследований деформационного поведения цинка важными параметрами являются температура и скорость деформации. Температурный диапазон исследований определяется исходя из особенностей цинка. Он имеет гексагональную плотно упакованную решетку (ГПУ) и температуру плавления 419,58°C. При комнатной температуре цинк в литом состоянии малопластичен, а при 100-150°C становится пластичным и может подвергаться обработке давлением – прокатке, прессованию, штамповке и глубокой вытяжке. С повышением температуры от 200 до 250°C вновь становится хрупким. Технологичность цинка в процессе обработки давлением зависит от его чистоты. Примеси, даже незначительные, резко увеличивают хрупкость и твердость цинка. Из встречающихся примесей в цинке (Fe, Pb, Cd, Sn и др.) наибольшее влияние на рекристаллизацию оказывает железо. В присутствии тысячных долей процента железа цинк рекристаллизуется при комнатной температуре. Цинк, содержащий 0,01% Fe, рекристаллизуется только при температуре 70-100°C. Цинк с железом образует твердый раствор (η), однако растворимость последнего в цинке ничтожна (около 0,01%). При содержании 0,2 % Fe цинк становится хрупким, и его обработка затрудняется.

Диапазон скоростей деформации зависит от процесса обработки металлов давлением, геометрических размеров обрабатываемого металла, скоростных условий. Ранее нами с помощью численных экспериментов были исследованы скорости деформации при волочении [2] и экструзии [3] проволоки, а также при осадке [4].

В связи с вышесказанным нами был спланирован и проведен эксперимент по физическому моделированию одноосного сжатия цинка марки Ц0 (99,975 % Zn) на модуле Hydrowedge физического симулятора Gleeble-3800 при температурах 24, 120 и 220 °С со скоростями деформации 0,1; 1,0; 10 и 100 с⁻¹. В процессе осадки цилиндров диаметром 10 мм и длиной 15 мм деформация фиксировалась датчиком продольной деформации, а температура контролировалась термопарой, приваренной к поверхности образцов. Для построения экспериментальных кривых деформации цинка в координатах «истинные деформации (ϵ) – истинные напряжения (σ)» (рис. 1) испытания по каждому режиму деформации проводились трижды, после чего значения усреднялись. Полученные зависимости внесены в библиотеку программного комплекса QForm.

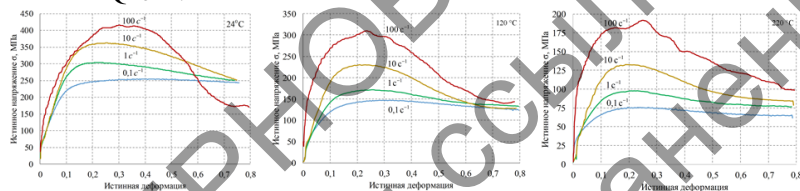


Рис. 1 – Экспериментальные кривые деформации цинка Ц0 при одноосном сжатии

Таким образом, в результате физического моделирования получены зависимости деформационного поведения цинка марки Ц0 (99,975 % Zn), которые могут быть использованы при компьютерном моделировании процессов обработки металлов давлением в скоростном диапазоне от 0,1 до 100 с⁻¹.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10179 (Разработка научных и технологических основ получения проволоки из специальных сплавов для аддитивного производства).

Список литературы

1. Гладков, Ю. А. Моделирование прессования алюминиевых профилей в новой версии программы Qform Extrusion VX: совместная деформационная задача / Ю. А. Гладков, С. С. Каневский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 11. – С. 41-48. – EDN XIMOKR.
2. Радионова, Л. В. Исследование влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки в монолитных волокнах / Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского

государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 66-75. – DOI 10.14529/met220306. – EDN GRNHPV.

3. Анализ влияния технологических параметров на скорость деформации при экструзии проволоки / Л. В. Радионова, Д. В. Громов, Р. А. Лисовский [и др.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 54-59. – DOI 10.24892/RIIE/20230411. – EDN NFEORR.

4. Численное исследование напряженно-деформированного состояния сплава АМГ6 при свободной осадке / Л. В. Радионова, Р. А. Лисовский, Д. В. Громов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 58-72. – DOI 10.14529/met230405. – EDN HLSSTK.

УДК 620.1.051 + 669-122.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАШИНЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Пилипенко С.В.¹, Штемпель О.П.¹, Вигерина Т.В.¹, Анисимов В.С.¹

*¹ Полоцкий государственный университета имени Евфросинии Полоцкой
Новополоцк, Беларусь
44-08@mail.ru*

В ходе подбора наиболее эффективной смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), или необходимости точного определения величины коэффициента трения при холодной прокатке листов, труб и пр., возникает необходимость в методе экспериментального определения величины коэффициента трения, точного и со стабильными, многократно повторяемыми условиями трениями [1-3].

Авторами, разработан метод для определения величины коэффициента трения при холодной прокатке особотонких полос из углеродистых сталей с использования универсальной машины трения, типа MMW-1A (УПТ). В этом методе, из материала рабочих валков изготавливаются кольцевидный образец (рис. 1). Данный образец является частью пары трения, второй вторым компонентом которой случит отрезок полосы. В узле трения УМТ (рис. 2) организовывается полужидкостное трение.

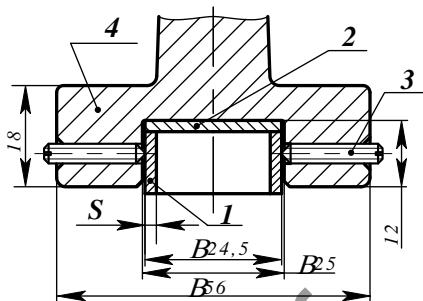


Рис. 1 – Оправки машины трения, с зажатой в ней парой трения: 1 – образец для пары трения, который изготавливается из материала рабочих валков; 2 – опорная шайба; 3 – шпильки зажатия и центровки; 4 – оправка УМТ; S – толщина стенки образца

В ходе экспериментов оптимизированно конструкцию образца по толщине его стенки, так как данный параметр оказывал влияние на стабильность показаний величины коэффициента трения, регистрируемых УМТ. Произведен ряд замеров величины коэффициент трения между образцом стали валков (60С2ХФА) и образцом полосы из малоуглеродистой стали (08пс, ГОСТ 1050). Результаты исследований показали среднюю величину коэффициента трения в $f_{cp} = 0,038$. В качестве смазки применялся образец синтетической СОЖ: Quaker 2185, отобранный на реверсивном прокатном стане RCM-1250, ООО «Металлопрокатная компания» (г. Миоры, Республика Беларусь).



Рис. 1 – Внешний вид машины трения: 1 – место установки узла трения УМТ

Данные результатов экспериментов коррелировались как со справочными данными, так и с данными других экспериментов, проведенных в подобных условиях трения [1-2, 4]. В данный момент ведется дальнейшая оптимизация

передоленного метода определения величины коэффициента трения при холодной прокатке. Изучается возможность его применения для определения коэффициента трения в других методах обработки металлов давлением.

Список литературы

1. Г.С. Никитин, Теория непрерывной продольной прокатки. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана. – 2009. – 399 с.
2. Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. Theory and Technology of Sheet Rolling: Numerical Analysis and Applications. – London: CRS Press. – 2019. – 506 с.
3. Пилипенко, С.В. Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. – 2022. – 288 с.
4. Грудев А.Г., Зимберг Ю.В., Тилик В.Г. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справ. – М.: Металлургия. – 1982. – 356 с.

УДК 621.774.353

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Павлов Д.А

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия
e-mail: d.a.pavlov@urfu.ru*

Процесс винтовой прошивки применяется на трубопрокатных агрегатах для прошивки сплошных заготовок в гильзу, которая в дальнейшем подвергается раскатке и горячей отделке с целью получения горячекатаных труб. На современных прошивных станах применяют бочковидные, чашевидные и грибовидные валки [1-4]. Температура нагрева заготовки перед процессом прошивки зависит от марки стали, а также от деформационного разогрева металла заготовки в процессе прокатки [4]. Известно, что при чрезмерном нагреве заготовки возможно возникновение пережога металла, что приводит к резкому снижению пластичности металла и появлению дефектов на поверхности гильз в процессе прошивки. В этой связи актуальной задачей является исследование деформационного разогрева металла заготовки при винтовой прошивке на станах с различными типами валков.

Работа посвящена исследованию температуры заготовки в процессе винтовой прошивки заготовки при использовании бочковидных, чашевидных и грибовидных валков. Исследование выполнено с использованием программы QForm 10.2.4. Диаметр заготовки составлял 150 мм. Материал заготовки – сталь 30ХГСА. Исходная температура заготовки составляла 1200 С°. Для всех

моделей диаметр бочки валков принимался равным 910 мм, длина бочки – 630 мм. Диаметр и длина оправки составляли соответственно 110 мм и 260 мм. Диаметр и толщина стенки гильзы соответственно принимались равными 160,8 мм и 22 мм. Во всех задачах углы подачи были равны 12°. Для процессов прошивки с использованием грибовидных и чашевидных валков угол раскатки составлял 16,5°. В ходе компьютерного моделирования производилось измерение максимальной температуры заготовки в процессе прошивки.

На рис. 1 представлена диаграмма, показывающая значения максимальной температуры заготовки при прошивке с использованием бочковидных, чашевидных и грибовидных валков. Из рис. 1 видно, что при использовании бочковидных валков наблюдается наибольший разогрев заготовки ($T_{\max} = 1247$ С°), на чашевидных валках получен промежуточный вариант ($T_{\max} = 1237$ С°), а наименьший разогрев имеет место при использовании грибовидных валков ($T_{\max} = 1229$ С°).



Рис.1 – Значения максимальной температуры заготовки при прошивке с использованием бочковидных, чашевидных и грибовидных валков

На основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что для выбранных настроек и калибровки инструмента наибольший деформационный разогрев заготовки происходит при прокатке в бочковидных валках, на чашевидных валках получен промежуточный вариант, а наименьший разогрев имеет место при использовании грибовидных валков.

Список литературы

1. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1983. – 270 с.
2. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / А.Ф. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. - Москва: Металлургия, 1972.
3. Данченко В.Н. Технология трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самсуев. - Москва: Интермет Инжиниринг, 2002.
4. Романцев Б.А. Трубное производство: Учебник для вузов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самсуев. – 2-е изд., испр. и доп. Москва: Изд. Дом МИСиС, 2011.

УДК 621.774.38

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРЕССОВАНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ БУРИЛЬНОЙ ТРУБЫ С ПРОТЕКТОРОМ

Замараева Ю.В.^{1,2}, Сумин А.В.¹, Логинов Ю.Н.^{2,3}, Разинкин А.В.¹

¹ *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия*

² *Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

³ *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*
e-mail suminav@kumz.ru

В настоящее время актуально применение алюминиевых сплавов для изготовления легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) [1]. Основными достоинствами ЛБТ являются низкий удельный вес, высокая удельная прочность, низкий модуль упругости и сдвига, высокая демпфирующая способность и повышенные коррозионные свойства [2].

Прессование ЛБТ с внутренними концевыми и наружным протекторным утолщением (ЛБТВК) производится посредством подвижной иглы переменного сечения.

Одной из проблем производства ЛБТВК из сплава Д16Т в условиях ОАО «КУМЗ» является образование дефекта типа «штриховые расслоения» [3] в зоне формирования протекторного утолщения. По результатам ультразвукового контроля труб, отпрессованных по классической технологической схеме ОАО «КУМЗ», из 100% труб партии по «штриховым расслоениям» в протекторном утолщении забраковано 10%.

В программном комплексе DEFORM выполнено моделирование процесса прессования ЛБТВК по классической технологической схеме ОАО «КУМЗ». Заданы параметры прессования, характерные для реального процесса. Постановка задачи осесимметричная. Следует отметить, что на рис. будет рассматриваться только верхняя половина очага деформации (ОД).

Известно, что одной из причин возникновения расслоений являются условия деформации [4-5]. Поэтому на рис. 1, а рассмотрено распределение

скорости деформации в ОД при прессовании протектора согласно классической технологической схеме. На данном рис. также показано положение позиций прессового инструмента, исходной заготовки и отпрессованной трубы.

Выявлено, что значения скорости деформации в ОД при прессовании протектора имеют достаточно высокие значения. Данное неблагоприятное деформированное состояние может влиять на повышенное образование «штриховых расслоений» в протекторном утолщении ЛБТВК в условиях реального производства. Поэтому принято решение выполнить второй вариант моделирования, где понизить скорость движения пуансона относительно классической технологии на 0,5 м/с. На рис. 1, б рассмотрено распределение скорости деформации в ОД при прессовании протектора согласно второму варианту моделирования. Следует указать, что в данном случае положение позиций прессового инструмента, исходной заготовки и отпрессованной трубы соответствует первому варианту моделирования.

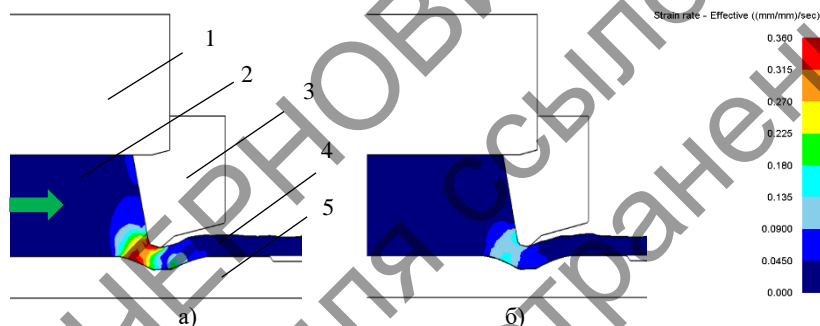


Рис. 1 – Распределение скорости деформации в ОД при прессовании протектора согласно классической технологической схеме (а): 1 – контейнер, 2 – исходная заготовка, 3 – матрица, 4 – отпрессованная труба, 5 – игла, направление движения пресс-шайбы показано зеленой стрелкой (сама пресс-шайба не показана); и второму варианту моделирования (б)

Видно, что во втором варианте решения максимумы скорости деформации в ОД сохранили свое местоположение относительно первого варианта моделирования, однако понижение скорости движения пуансона на 0,5 м/с привело к понижению скорости деформации в ОД на 50%.

По результатам ультразвукового контроля ЛБТВК, отпрессованных при пониженной скорости движения пуансона, выявлено снижение процента брака по дефекту «штриховые расслоения» в 2,1 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что понижение скорости движения пуансона на 0,5 м/с способствует формированию однородной макроструктуры и уменьшению количества дефектов типа «штриховые расслоения».

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Список литературы

2. Прохоров С. Алюминий возвращается // Нефть России. – 2011. – № 6. – С. 76–77.
2. Сапунжи В.В. Эффективность применения алюминиевых бурильных труб при бурении скважин на нефть и газ // Бурение и нефть. – 2012. – № 6-7. – С.48–52.
3. Ерманок М.З., Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 248 с.
4. Андреев А.Д. Взаимосвязь расслоений с разрушением металла при деформации // Технология легких сплавов. – 1972. – № 1. – С. 22–23.
5. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 156 с.

УДК 621.77.01

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАНАЛА МАТРИЦЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Длинный А.В.¹, Постыляков А.Ю.¹

¹Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
andrei.dlinnyi@urfu.me

Для прессового производства актуальной является задача повышения качественных показателей продукции, зависящих от правильности проектирования матричной оснастки и задания режимов осуществления процесса [1-3]. Одной из широко распространенных проблем является неравномерность течения металла, приводящая к появлению дефектов формы, в частности – искривления профиля [4-6]. Значительная разность скоростей истечения отдельных элементов также может приводить к появлению разрывов. Целью работы является выработка стратегии выравнивания скоростей истечения частей толстостенного профиля на основе результатов моделирования процесса методом конечных элементов в системе QForm.

Исходная заготовка представляет собой цилиндр диаметром 275 мм, длиной 684 мм. Модели инструмента включают в себя цилиндрическую внутреннюю втулку контейнера диаметром 280 мм, радиальную матрицу с радиусом скрутки заходной части канала 20 мм и пресс-шайбу.

Температура заготовки из сплава ВТ6 составляет 1050 °С, температура матрицы – 300 °С, контейнера и пресс-шайбы – 400 °С, граничные условия

трения и теплопередачи соответствуют использованию стеклоэмали. Скорость прессования равна 50 мм/с.

По результатам моделирования установлено, что при прессовании через матрицу с равномерным радиусом скругления профиль выходит из канала матрицы криволинейно (рис. 1, а) из-за неравномерной скорости течения, перепад которой достигает 250 мм/с.

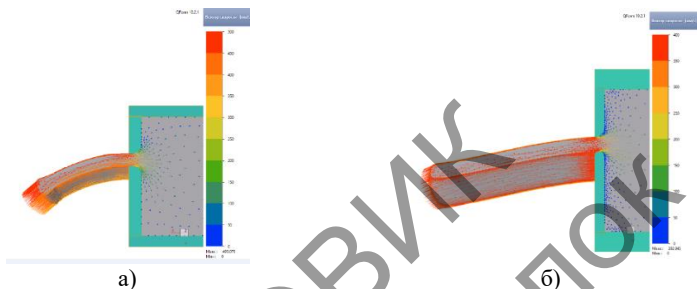


Рис. 1 – Результаты моделирования при прессовании через матрицу: а) с постоянным скруглением заходной части; б) с переменным скруглением

Попытка использовать для выравнивания калибрующий поясok оказалась неудачной из-за массивности фланцев, поэтому для создания большей тормозящей силы скругление заходной части канала было выполнено переменным (рис.2): радиус по верхней кромке равен исходному, а в нижней части уменьшен до 6 мм.

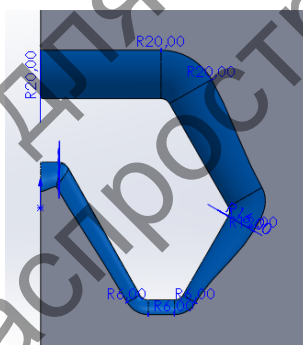


Рис. 2 – Радиусы скруглений канала матрицы с переменным скруглением

Это позволило притормозить течение верхней части профиля при ускорении течения нижней части (рис. 1, б), что снизило разность их скоростей на выходе из канала более чем вдвое и привело к значительному уменьшению искривления профиля.

Список литературы

1. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 563 с.
2. Петров А.П. Проектирование матрицы для прессования профилей из алюминиевых сплавов с интенсивными сдвиговыми деформациями / А.П. Петров, В.В. Еремеев, А.В. Беспалов // Технология легких сплавов. – 2008. – № 4. – С. 65 – 70.
3. Сидняев Н.И. Методика определения толщины пояска матрицы калибрующего канала при горячем прессовании / Н.И. Сидняев, А.А. Федотов // Тепловые процессы в технике. – 2017. – Т. 9. – № 2, С. 85 – 94.
4. Любанова А.Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом CONFORM // А.Ш. Любанова, Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, А.Ю. Зиборов / Металлы. – 2010. – № 2. – С. 28–33.
5. Flitta I. and T. Sheppard. Material flow during the extrusion of simple and complex cross-sections using FEM // Materials Science and Technology. – 2005. – V. 21. – № 6. – P. 648 – 656. <https://doi.org/10.1179/174328405X43045>
6. Qamar S.Z. Effect of Shape Complexity on Ram Pressure and Metal Flow in Aluminum Extrusion / S.Z. Qamar, J.C. Chekotu, S.B. Qamar // JOM. – 2019. – V. 71, 4378–4392 <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03748-6>

УДК 621.7.01

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРЕССОВАНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРУТКА ИЗ СПЛАВА Д16 ПРИ МНОГОКАНАЛЬНОМ ПРЕССОВАНИИ

Замараева Ю.В.^{1,2}, Дымшакова Е.Г.¹, Логинов Ю.Н.^{2,3}, Разинкин А.В.¹

¹ ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

² Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
e-mail DymshakovaEG@kumz.ru

В настоящее время многоканальное прессование металлических материалов достаточно распространено в производственной практике [1]. Данный процесс часто подвергался анализу, в том числе методом конечных элементов [2].

С целью оценки степени деформации в поперечном сечении прутков при прессовании через четыре канала матрицы и возможности увеличения скорости прессования в производственных условиях в программном модуле DEFORM 3D осуществлено моделирование процесса прессования прутков диаметром 40 мм со скоростью прессования 0,06 и 0,09 м/мин. В качестве

материала для исследования использовался сплав Д16. Граничные условия задач максимальным образом приближены к производственным показателям.

Начальное положение слитка в контейнере для обоих вариантов процесса прессования показано на рис. 1, а. Схема размещения каналов матрицы и прутков для оценки степени деформации (зона А) – рис. 1, б. Распределение степени деформации в поперечном сечении прутка в стационарной стадии процесса прессования со скоростью прессования 0,06 и 0,09 м/мин показано на рис. 1, в, г, соответственно.

Выявлено, что при прессовании со скоростью прессования 0,06 м/мин разница степени деформации наружного слоя прутка, расположенного ближе к центру матрицы, и наружного слоя, удаленного от центра матрицы, составляет 25 %, а при прессовании со скоростью прессования 0,09 м/мин эта разница составляет 14 %. Таким образом, в последнем случае можно ожидать более равномерное распределение свойств в поперечном сечении прутков.

Оценка распределения степени деформации при прессовании со скоростью прессования 0,06 и 0,09 м/мин даст возможность предположить, что с увеличением скорости прессования прочностные свойства прутков понижаются, а пластические – повышаются. Аналогичное явление наблюдали авторы работы [3]. На первый взгляд это противоречит существующим представлениям об упрочнении металлов и сплавов. Действительно, кривые упрочнения обычно выглядят как монотонно возрастающие функции сопротивления деформации в зависимости от скорости деформации. Однако в случае деформации алюминиевых сплавов как материалов с высокой энергией дефекта упаковки процессы рекристаллизации заторможены, что позволяет выйти вперед процессам полигонизации и возврата [4]. В результате при отсутствии рекристаллизации металл может сохранять уровень нагартовки, полученный в ходе деформации при повышенной температуре. Этим свойством часто пользуются для создания прочных алюминиевых сплавов.

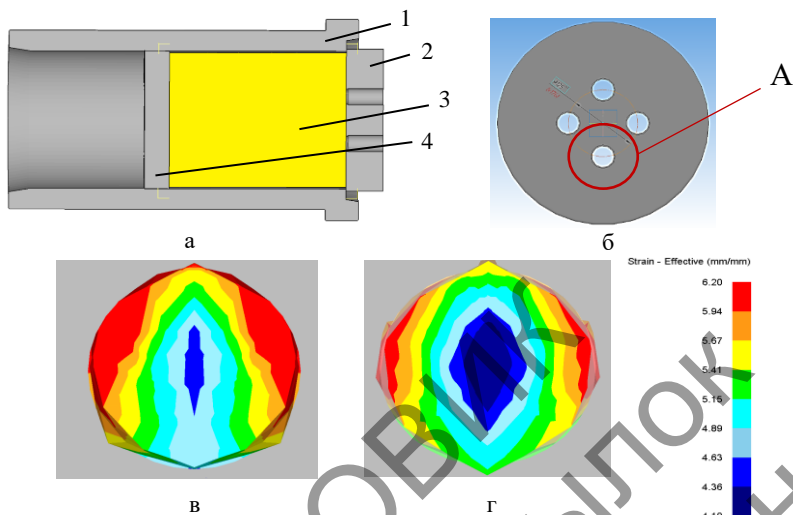


Рис. 1 – Начальное положение слитка в контейнере: 1 – контейнер, 2 – матрица, 3 – заготовка, 4 – пресс-штемпель (а); схема размещения каналов матрицы и пруток для оценки степени деформации (зона А) (б); распределение степени деформации в поперечном сечении прутка в стационарной стадии прессования при скорости прессования 0,06 (в) и 0,09 м/мин (г)

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Список литературы

1. Пасхалов А.С. Оценка возможности интенсификации многоканального прессования с использованием активного действия сил трения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 8. – С. 29–34.
2. Chen F.K., Chuang W.C., Torng S. Finite element analysis of multi-hole extrusion of aluminum-alloy tubes // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 201. Iss. 1-3. – P. 150–155.
3. Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Насонов И.А. Сравнение вариантов многоканального прессования прутков из сплава В95 // Технология легких сплавов. – 2021. – № 1. – С. 68–72.
4. Liu L.H., Chen J.H., Fan T.W., Liu Z.R., Zhang Y., Yuan D.W. The possibilities to lower the stacking fault energies of aluminum materials investigated by first-principles energy calculations // Computational Materials Science. – 2015. – Vol. 108. Part A. – P. 136–146.

УДК 621.73

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУСФЕРЫ МЕТОДОМ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Ишмуратов А.Ш.¹, Логинов Ю.Н.¹, Файфер И.Н.¹

¹ Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail ishmuratov.14@mail.ru

По определению шаром называется тело, которое состоит из всех точек пространства, находящихся на расстоянии не больше данного от данной точки. Шары производятся методами либо винтовой прокатки, либо объемной штамповки [1]. Поверхность шара называется сферой, то есть сфера не имеет толщины. Однако в промышленности сферами обычно называют тонкостенные оболочки, имея в виду, что толщина стенки сферы достаточно мала. Изготовить сферу достаточно трудно, потому что доступа инструмента к внутренней поверхности заготовки не удастся получить. В редких случаях сферу можно изготовить, прикладывая к внутренней поверхности давление газа или жидкости [2]. По существу, тонкостенную оболочку выдувают, как воздушный шар. При этом стенка сферы находится в состоянии трехосного всестороннего растяжения. Известно, что пластичность металла в этом состоянии оказывается чрезвычайно низкой. Поэтому такой метод обработки может быть применен и применяется для материалов, обладающих эффектом сверхпластичности, и в соответствующих условиях обработки.

Сферу технологически удобнее изготовить из полусфер, соединяя их тем или иным способом. Иногда полусфера является самостоятельным изделием и не требует соединения с другой полусферой. Поскольку полусфера часто представляет собой тонкостенное изделие, то считается удобным изготавливать его из листового материала методом глубокой вытяжки, подобно тому, как изготавливают тонкостенные стаканы [3]. Однако на этом пути имеются препятствия. Одно из них – это образование фестонов [4], с которыми приходится бороться применением специальных инструментов – прижимов. Другой недостаток – наличие локальных утонений стенки, из-за чего прочность участков детали оказывается различной [5].

Изготовление полусфер возможно не листовой, а объемной штамповкой. В этом случае локальные утонения становятся невозможными. Однако энергосиловые параметры процесса могут оказаться значительными, особенно для случая деформации прочных материалов и изделий с тонкой стенкой. В данной работе сделана попытка промоделировать процесс объемной штамповки полусферы на примере модельного материала – свинца, при этом стенка детали выбрана достаточно толстой. Постановка задачи включала описание геометрии заготовки и инструмента, свойств материала и граничных условий. Использовали программный модуль РАПИД-2D, реализующий метод конечных элементов и разработанный в Уральском Федеральном университете. Модуль используется на ряде заводов, в том числе для расчета процессов кузнечно-штамповочного производства. На рис. 1, а отображено распределение степени деформации сдвига D . Видно, что по внутреннему

контуру деформации оказываются выше, чем по внешнему контуру, то есть проявляется неравномерность параметра по толщине детали. На рис. 1, б отображено распределение показателя напряженного состояния как отношения среднего нормального напряжения к интенсивности касательных напряжений. Здесь видно, что проявляется неравномерность другого вида – по тангенциальной координате. В центре оказывается наиболее благоприятное напряженное состояние с преобладанием сжимающих напряжений, что резко отличает процесс объемной штамповки от процесса листовой штамповки. На периферии показатель приближается к нулю. Соответственно окажутся различными пластические свойства металла.

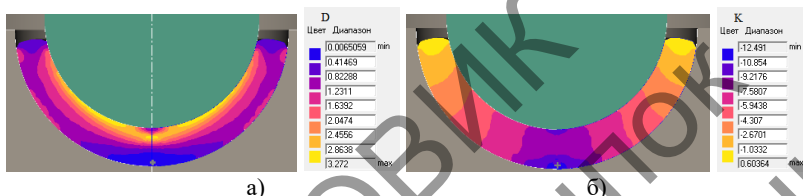


Рис. 1 – Распределение степени деформации сдвига D (а) и показателя напряженного состояния K (б) по профилю полусферы

Список литературы

1. Loginov Y.N., Zamaraeva Y.V., Puzyrev S.S. Influence of billet geometry on the deformed state of a steel ball during hot stamping // *Steel in Translation*. – 2023. – V. 53(6) – P. 549–553.
2. Олимпиева Н.В., Тулупова О.П., Сайтова Э.Р. и др. Компьютерное моделирование сверхпластической формовки полусферы из титанового сплава Ti-6Al-4V // *Информационные технологии. Проблемы и решения*. - 2020. - № 4 (13). - С. 119-125.
3. Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Студенок Г.И. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2006. - № 3. – С. 26-28.
4. Логинов Ю.Н., Котов В.В., Замаева Ю.В. Последовательность формоизменения металла в операции глубокой вытяжки тонкостенной заготовки с отверстием // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. - 2018. - № 7. - С. 35-38.
5. Файфер И.Н., Логинов Ю.Н. Цифровое моделирование многопереходной глубокой вытяжки полусферической детали при различных условиях трения // *Заготовительные производства в машиностроении*. - 2023. - Т. 21. - № 10. - С. 448-453.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ СБОРНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ****Бирюкова О.Д., Матвеев С.В., Песина С.А., Пивоварова К.Г.,
Могильных А.Е., Сверчков А.И.***Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия*

В связи с постоянно ужесточающимися требованиями авиакосмической, строительной, медицинской и других отраслей промышленности инженеры-материаловеды ищут способы улучшить свойства материалов, изменяя их химический и фазовый состав. Одной из стратегий достижения высоких механических характеристик при проектировании материалов является применение самозаклинивающихся структур. Самозаклинивающиеся структуры – это сборные многослойные конструкции, структурная целостность которых достигается за счет взаимосвязанной геометрии блоков, а также за счет контактных и фрикционных взаимодействий, которые развиваются на их границах. Они могут состоять из кубов, тетраэдров, октаэдров и других объемных тел. Одним из направлений создания новых видов самозаклинивающихся структур является использование усеченных платоновых тел [1-3].

Целью настоящей работы является изучение механического поведения (рис. 1), ее структурной устойчивости и характеристик энергопоглощения.

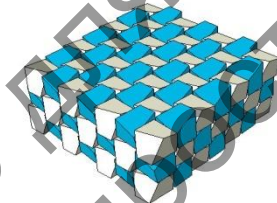


Рис. 1 – Модель сборной многослойной конструкции из усеченных кубических элементов

С помощью разработанной конечно-элементной 3D-модели изучены механические характеристики сборной многослойной конструкции. В качестве материалов для элементов сборки были выбраны сталь 45 и алюминиевый сплав АМг3. Проведено параметрическое исследование влияния коэффициента трения на реакцию сборки при высокоскоростном ударном нагружении трехслойной самозаклинивающейся структуры из усеченных кубов. Построены диаграммы ударного нагружения сборки при различных значениях коэффициента трения. Исследована структура сборки и распределение напряжений Мизеса на различных этапах деформации.

Получены зависимости пиковой нагрузки, начальной жесткости и поглощаемой энергии от коэффициента трения.

Основные результаты исследования:

1. Пиковая нагрузка, начальная жесткость и поглощаемая энергия линейно зависят от коэффициента трения между элементами сборки.

2. Кривые упругой деформации сборки из стали 45 для $\mu=0,2$ и $\mu=0,3$ имеют участок локального снижения нагрузки, что связано с вторичным заклиниванием элементов сборки после начала их скольжения.

3. С ростом коэффициента трения напряжения распределяются более равномерно, что позволяет сборке дольше сохранять несущую способность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> и финансовой поддержки Челябинской области

Список литературы

1. Пат. 2813412 Российская Федерация. Сборная многослойная конструкция для использования в качестве деталей оборудования и элементов строительства / А.Я. Белов, К.Г. Пивоварова, Н.М. Локотунина и др.; № 2023132438; заявл. 08.12.2023; опубл. 12.02.2024.

2. Пат. 2813410 Российская Федерация. Антивибрационная подложка / А.Я. Белов, Н.М. Локотунина, К.Г. Пивоварова и др.; № 2023132439; заявл. 08.12.2023; опубл. 12.02.2024.

3. Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М. Исследование напряженного состояния многослойных самозаклинивающихся структур из кубических элементов на основе конечно-элементного моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22. – № 1. – С. 156-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-156-165>.

УДК 621.771

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЛЯБА НА РАСХОД МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Кун А.С., Белолипецкая Е.С., Соловьев В.Н.

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
г.Липецк, Россия
e-mail.sasha.kun@bk.ru*

На выходе установки непрерывной разливки стали непрерывный слиток разделяют на мерные слябы с помощью двух газокислородных резаков. Резаки располагаются перпендикулярно продольной оси сляба и перемещаются навстречу друг другу. В некоторых случаях резаки движутся не в одной плоскости, в связи с этим образуется уступ на торцевой поверхности сляба.

Сляб прокатывается на непрерывном стане, состоящем из двух групп клетей, разделенных промежуточным рольгангом. Первая группа клетей – черновая, вторая – чистовая. Во время прокатки передний и задний конец раската после черновой группы клетей принимают форму «языка». Перед чистовой группой клетей установлены ножницы для обрезки переднего и заднего концов раската. Переднему концу придается шевронный вид для снижения динамических нагрузок при захвате валками, а задний конец – прямой формы [1].

Уступ торцевой поверхности сляба при деформации на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки должен сохраняться, что увеличит величину «языка» раската.

Цель работы – оценка возможности увеличения расхода металла из-за уступа на торцевой поверхности сляба.

Моделирование изменения формы концов раската при прокатке в черновой группе клетей [2] выполнено с использованием Программы моделирования технологических процессов обработки металлов давлением (QForm). В качестве объекта моделирования использовали стан горячей прокатки 2000.

В расчете в качестве материала сляба принята сталь марки 10, для которой имеются сведения в базе данных QForm. Материал валков – сталь X12MF. Температура валков – 70 °С. Диаметр валков принят равным 1200 мм. При моделировании учитывали время охлаждения сляба на участке транспортирования от печей до группы клетей, между клетями и во время пауз при реверсивной прокатке.

Приняты следующие геометрические размеры «ровного» сляба правильной прямоугольной в плане формы: толщина – 250 мм, ширина – 1220 мм. У сляба «с уступом» на торцевых поверхностях создали выступы в виде ступеньки величиной 30 мм (рисунок).

Проведено моделирование прокатки переднего и заднего концов раската из двух заготовок разной геометрической формы. Расчетные формы концов раската сохраняют дефекты формы сляба. Выступающие участки увеличивают обрезаемую часть раската. На рисунке показаны предполагаемые линии обрезки. Для упрощения расчетов шевронную форму переднего конца раската заменили на прямую.

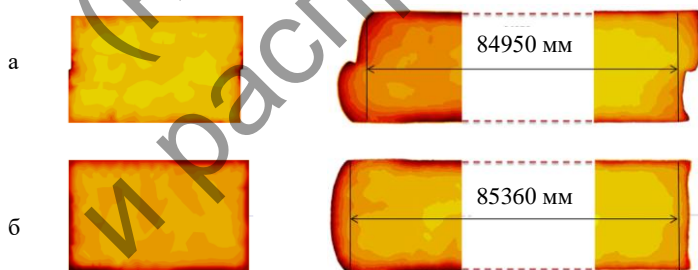


Рисунок – Форма концов раската после прокатки:

а – сляб с уступом, б – ровный сляб.

После обрезки концов длина раската из сляба с уступом составит 84950 мм, а из ровного сляба – 85360 мм, что на 410 мм больше. Расчетное увеличение длины обрези из-за наличия ступеньки составляет 106,5 мм. Объем «лишней» части обрези составит 0,00466 м³. Соответственно, если принять плотность стали равной 7,8 т/м³, то масса обрезаемой части, образовавшейся из-за ступеньки, составит 36,34 кг. Примем среднюю массу горячекатаного рулона равную 25 т. Соответственно расход металла увеличится на 1,45 кг/т.

Объем производства НШСГП составляет около 6,5 млн. т в год [3]. Действительное количество слябов со ступенькой не известно. Если принять, что только 1 % слябов выходит со ступенькой, то объем слябов со ступенькой составит 65000 т. Увеличение расхода металла в обречь составит 94,25 т/г.

Данное предположение можно проверить в условиях действующего производства. Для этого необходимо определить количество слябов со ступенькой, величину ступеньки и после прокатки сравнить величину полученной на стане обрези.

Вывод

Математическое моделирование позволило подтвердить предположение об увеличении расхода металла при прокатке в случае образования уступа на торцевой поверхности сляба. Определено примерное увеличение расхода металла. Полученные результаты могут быть проверены в условиях промышленного производства.

Список литературы

1. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
2. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / Под ред. А. В. Власова. – М: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.
3. В 2020 году произведено более 6,5 млн. тонн проката [электронный ресурс]: Режим доступа: <https://metallobazy.ru/news/1255>.

УДК

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРОРАБОТАННОЙ ЗОНЫ В ОТПРЕССОВАННОМ ПРУТКЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Салихянова Е.И.^{1,2}, Калинина Н.А.^{1,3}, Каманцев И.С.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

³ Открытое Акционерное Общество «Каменск-Уральский металлургический завод», г. Каменск-Уральский, Россия
ustinova1694@gmail.com

При конечно-элементном моделировании процессов ОМД особо остро встает вопрос учета масштабного фактора. Данный вопрос относится ко всем процессам ОМД, связанным с изменением рабочего сечения и особенностями теплового режима обрабатываемого металла. Так как процесс прессования не является исключением, основная цель работы заключалась в необходимости обеспечить формирование непроработанной зоны выходного конца прутка при прессовании в лабораторных условиях идентичным промышленной технологии, с учетом влияния масштабного фактора и граничных условий.

Общеизвестно, что при прессовании прутков в выходном конце формируется непроработанная зона, распространяющаяся, примерно, на два диаметра готового изделия. При прессовании крупногабаритных прутков из алюминиевых сплавов Д16 и АД33 на базе ОАО «КУМЗ» такой дефект также присутствует. Для подтверждения этого явления и дальнейших поисков его устранения проведены лабораторные испытания на базе ИМАШ УрО РАН.

Определение размеров заготовки и оснастки для прессования в лабораторных условиях выполнено путем конечно-элементного трехмерного моделирования очага деформации в программном комплексе QForm.

Чтобы полученные в лабораторных условиях результаты можно было с достаточной достоверностью интерпретировать на заводские, рассчитаны коэффициенты вытяжек на первом и втором переходах прессования. Так на первом переходе значения коэффициента вытяжки составляют 4,65 и 4,41 для заводского и лабораторного прессования, соответственно. Из рис. 1 видно, что результат для обоих случаев прессования аналогичен: в выходном конце отчетливо наблюдается непроработанная зона распространяющаяся, примерно, на длину двух диаметров. Для сплава АД33 получен аналогичный результат. Для второго перехода расчетные коэффициенты вытяжки составили 23,7 для заводского и 4,0 для лабораторного моделирования. Такой разброс значений объясняется следующими факторами: первый – необходимостью получения требуемой структуры прутка (первое граничное условие); второй – ограничениями, связанными с энергосиловыми параметрами лабораторного оборудования (второе граничное условие). На рис. 2 видны аналогичные результаты при лабораторном и заводском моделировании прессования. Как видно, при корректном подборе внешних факторов результат закономерности формирования непроработанной зоны аналогичен.

В результате конечно-элементного моделирования установлены размеры оснастки и заготовки для лабораторных испытаний, позволяющие обеспечивать особенности формирования структуры отпрессованных прутков аналогичные промышленным условиям.

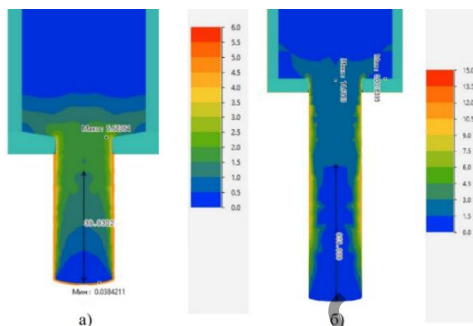


Рис. 1 – Формирование непроработанной зоны при прессовании прутка из сплава Д16 на первом переходе: а) в лабораторных условиях ИМАШ УрО РАН; б) в заводских условиях ОАО «КУМЗ»

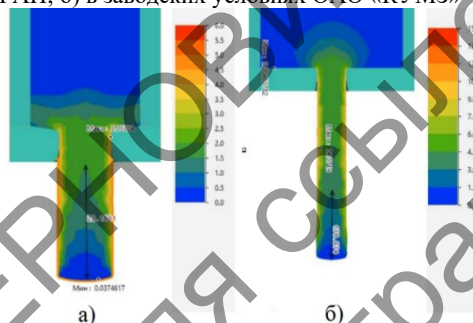


Рис. 2 – Формирование непроработанной зоны при прессовании прутка из сплава Д16 на втором переходе: а) в лабораторных условиях ИМАШ УрО РАН; б) в заводских условиях ОАО «КУМЗ»

Список литературы

1. Логинов Ю.Н., Разинкин А.В., Шимов Г.В., Мальцева Т.В., Бушуева Н.И., Дымшакова Е.Г., Калинина Н.А. Структурное состояние и деформации заготовки из алюминиевого сплава в начальной стадии прессования. Известия вузов. Цветная металлургия. –2023. № 29(2). – С. 29–37.

УДК 621.77.019

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УТЯЖИНЫ ТИПА «РЫБИЙ ХВОСТ» ПРИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ РАСКАТКЕ КОЛЕЦ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ QFORM

Тарасов И.С.^{1,2}, Постыляков А.Ю.¹

¹ Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

² ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия

e-mail: TI-28-095-K@yandex.ru

При изготовлении самого простого кольца с прямоугольным сечением методом радиально-осевой раскатки происходит сложное перемещение материала, которое приводит к специфической погрешности сечения кольца – образуется так называемый «рыбий хвост» (рис.1) [1].

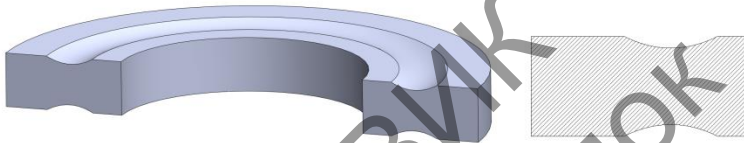


Рис. 1 – Дефект поперечного сечения кольца типа «рыбий хвост»

Для того, чтобы избежать возникновения подобного дефекта, при расчете размеров кольцевой заготовки необходимо пользоваться методом Китона [2], но в производственных условиях не всегда есть возможность раскатать такую заготовку в кольцо на имеющемся оборудовании. Спрогнозировать указанный дефект при использовании нестандартной заготовки можно с помощью моделирования в программе Qform.

В работе представлены результаты моделирования кольца типа «диск» из титанового сплава ВТ6 с целью проверки возможного образования утяжины по торцу кольца. Для рассматриваемого кольца были построены графики кривой раскатки и скорости роста диаметра (рис. 2).

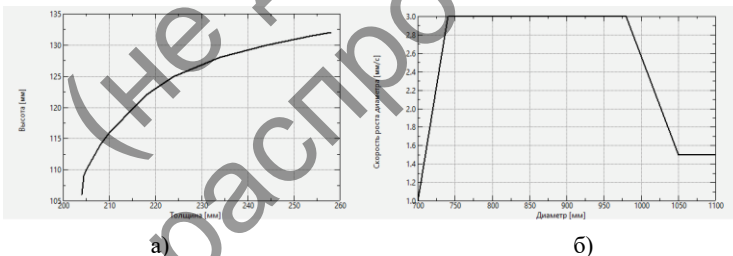


Рис. 2 – Графики: а) кривой раскатки; б) скорости роста диаметра

Видно (рис.3), что деформация неоднородна по сечению кольца, но даже с учетом этого при моделировании образования утяжины по торцу удалось избежать, что подтвердилось при фактической раскатке на кольцераскатном стане при использованных параметрах моделирования (рис.4).

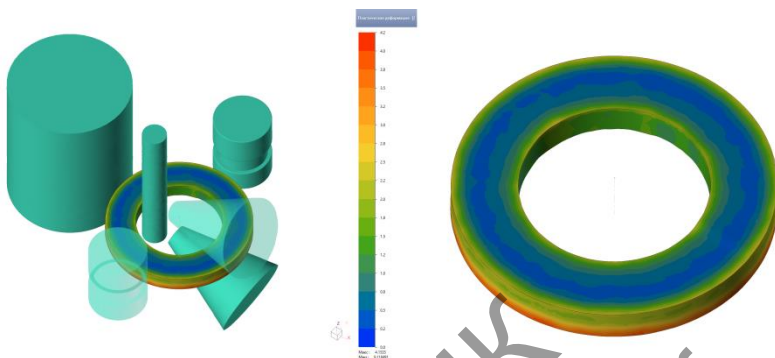


Рис. 3 – Пластическая деформация кольца при моделировании



Рис. 4 – Результат моделирования и фактической раскатки

Список литературы

1. Антонюк В.Е. Кольцеракатка в производстве деталей машиностроения / В.Е. Антонюк, П.А. Витязь, П.А. Пархомчик и др. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 188 с.
2. ASM Metals Handbook, Vol. 14: Forming and Forging / Edited by S.L. Semiatin. – Ohio: ASM International, 1988.– 978 p.

УДК 621.77

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ХОЛОДНОЙ АСИММЕРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

Рааб Г.И.¹, Утяшев Ф.З.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия.

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
e-mail: giraab@mail.ru

В последнее время холодная листовая асимметричная прокатка, как инструмент активного влияния на технологичность деформационной обработки, измельчение структуры и, соответственно, повышение механических свойств проката, находится в области активного внимания материаловедов и металлургов передовых стран мира [1,2]. Особенностью процесса является реализация в очаге деформации схемы сдвига и возможность накопления большой деформации даже после одного прохода, что важно для эффективного измельчения исходной структуры (рис. 1).

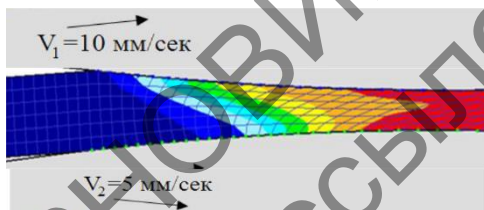


Рис.1. - Картина формы очага деформации и деформированного состояния при холодной прокатке сплава Д16 с коэффициентом асимметрии равного 2.

В работе, представлена методика, определяющая связь критериев очага деформации с размером формирующихся фрагментов структуры после холодной деформации [3,4]. Показан пример использования данной методики для оценки размеров структурных элементов после холодной асимметричной прокатки чистых металлов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ (соглашение № 23-79-30015)

Список литературы

1. Sui, FL., Wang, X., Li, CS. et al. FE Analysis on Shear Deformation for Asymmetrically Hot-Rolled High-Manganese Steel Strip. J. of Materi Eng and Perform – 2016 – № 25, p. 4885–4893.
2. Pustovoytov D.O., Pesin A.M. and Tandon P. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review // Metals. – 2021 – 11(6):956
3. Утяшев Ф.З, Рааб. Г.И. Влияние очага деформации на измельчение структуры в металлах // ФММ. – 2007. – Т. 6. – С. 605-617
4. Zhilyaev A.P., Pshenichnyuk A.I., Utyashev F.Z., Raab G.I. Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials, 2nd edition. Woodhead Publishing, Duxford, 2020. – 440 P.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПРОХОДНОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ СПДАВА AISI2024

Рааб А.Г.¹, Рааб Г.И.², Песин А.М.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия.

²Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия.
e-mail: agraab@mail.ru

В настоящее время разработка металлических материалов с ультрамелкозернистой структурой или наноматериалов является одним из важных направлений научно-технического прогресса по всему миру. Один из перспективных путей получения таких материалов заключается в применении методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Наиболее перспективным высокопроизводительным методом для производства металлических материалов является процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основанный на создании специальной асимметрии за счет расхождения окружных скоростей валков [1,2]. В работе проведено исследование трех маршрутов прокатки с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D. В качестве материала исследования использовался алюминий AISI2024, который является прямым аналогом российской марки Д16. Маршруты обработки включали по два прохода прокатки: традиционную (симметричную) прокатку (СП), асимметричную прокатку (АП) и асимметричную прокатку с переворотом заготовки на 180 градусов (АП180). Исходные данные для моделирования: начальная толщина полосы $H_0 = 6$ мм, ширина 50 мм, диаметр рабочих валков $D_1 = D_2 = 350$ мм, степень деформации за проход $e = 50\%$, деформируемый материал AISI 2024 из базы материалов DEFORM 3D, температура деформируемого материала 20°C, коэффициент трения на контактах с валками $\mu = 0,29$ - по Кудону, угловая скорость первого прохода при симметричной схеме $\omega_{12} = 1,15$ рад/с, а для второго прохода $\omega_{12} = 2,3$ рад/с. При асимметричной прокатке первый проход $\omega_1 = 1,15$ рад/с, $\omega_2 = 0,57$; второй проход рад/с и $\omega_1 = 2,3$ рад/с, $\omega_2 = 1,15$ рад/с.

По результатам моделирования проведен анализ трансформации линий Лагранжа в очаге деформации, кинетики изменения величин интенсивности деформации в продольном и поперечном сечении заготовки после деформации, тепловой эффект деформации. Сделаны выводы о степени однородности деформированного состояния и теплового поля прокатанных образцов после первого и второго прохода.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ (соглашение № 23-79-30015)

Список литературы

1. Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Свердлик М.К. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае симметричной тонколистовой прокатки // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2013. – №1 (41).

2. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е. АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА ЛИСТОВ И ЛЕНТ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. – 2020. – №3.

УДК 621.778.07

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ STRETCHING-BENDING WITH REBENDING НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов Д.В.¹, Шекшеев М.А.¹, Олейник Д.Г.¹

¹*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
const_dimon@mail.ru*

Стальная арматура периодического профиля класса А500 благодаря высокому комплексу механических свойств широко используется в строительстве при армировании железобетонных конструкций. Согласно ГОСТ 34028-2016 для арматуры класса А500 условный предел текучести должен быть не менее 500 Н/мм², временное сопротивление разрыву не менее 600 Н/мм², отношение временного сопротивления разрыву к условному пределу текучести должно составлять не менее 1,05, относительное удлинение не менее 14%, полное относительное удлинение при максимальной нагрузке A_{gt} не менее 2,5%.

В последние годы в России и за рубежом для производства такой арматуры развивается технология, основанная на способе одновременного растяжения и знакопеременного изгиба горячекатаного арматурного проката близкого по механическим свойствам к классу А400. Способ реализуется путем протягивания арматуры в специальных роликовых устройствах со степенью холодной пластической деформации 3–8% [1,2]. За рубежом данный способ получил название stretching-bending with rebending (SBR) и используется ведущими лидерами мирового рынка производства арматуры [3]. Эффективность способа связана с его простотой и снижением издержек на производство.

Полученные в рамках действующего производства ОАО «ММК-Метиз» количественные показатели механических свойств арматуры периодического профиля класса А400 после знакопеременного изгиба с растяжением демонстрируют высокий технологический потенциал данного процесса по повышению ключевых нормируемых свойств. Посредством довольно простой в реализации и производительной технологии становится возможным повышение класса арматуры до А500 без серьезных капитальных вложений. Однако для достижения устойчивой результативности SBR процесса прогнозирование режимов обработки должно строиться с учетом не только геометрии профиля обрабатываемой арматуры, но и с вниманием к технологической наследственности в виде микроструктурной неоднородности. Компьютерное мультимасштабное моделирование наглядно продемонстрировало, что свойствообразующие параметры напряженно-деформированного состояния стали могут значительно изменяться из-за квазислоистого характера микроструктуры исходной заготовки, приводя к различного рода локализациям деформаций на микроуровне металла. Получаемая в таком случае неоднородность деформации на микроуровне суммируется с неравномерностью деформированного состояния на макроуровне из-за специфики геометрии периодического профиля. Вместе с этим, в перспективе требующими более глубоких исследований остаются также вопросы прогнозирования и распределения остаточных напряжений в обработанной SBR методом арматуре, а также напряженно-деформированного состояния арматуры с профилями, применяемыми за рубежом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-29-10046 от 20.04.2023, <https://rscf.ru/project/23-29-10046/>) и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (соглашение № 588 от 29.06.2023).

Список литературы

1. Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Харитонов Вик.А. Обработка бунтовой арматурной стали по схеме “растяжение - знакопеременный изгиб” (теория, технология, оборудование) // *Металлург.* - 2010. - № 4. - С. - 78-83.
2. Ахметов Т.А., Редькова И.Н., Локтионова Л.В. Современные тенденции в развитии технологии производства холоднодеформированной арматурной стали // *Литьё и металлургия.* – 2014. – № 2 (75). – С. 65-67.
3. Badische Stahlwerke GmbH: [Электронный ресурс]. URL: <https://bsw-kehl.de/en/products/>. (Дата обращения: 30.11.2023).

УДК 621.983.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ

В процессе изготовления осесимметричных деталей методами листовой штамповки возможно появление различных дефектов, таких как изменение геометрии и упругое пружинение детали после вытяжки [1], образование гофр, разнотолщинность и утонение на готовой детали [2]. В тоже время особенности технологических операций изготовления листового проката и деталей подобной формы сопровождаются накоплением или перераспределением остаточных напряжений [3]. Такие напряжения могут приводить как к негативным, так и благоприятным последствиям в процессе эксплуатации изделий [4, 5]. Появление остаточных напряжений может приводить к местным дефектам в виде гофр, короблению деталей, а также к развитию трещин. Это требует отдельной оценки уровня остаточных напряжений и их учёт в процессе производства и эксплуатации. Изменение уровня остаточных напряжений возможно корректировкой технологии изготовления и режимов обработки.

Для предсказания распределения полей остаточных напряжений, в программном комплексе «Qform» (ООО «КванторФорм» © 1991–2024) проведено цифровое моделирование первого перехода вытяжки детали типа «Полусфера».

Контактные граничные условия для всех инструментов выбирали из стандартной базы данных QFORM в виде назначения коэффициента трения по Леванову: 0,2 – медное покрытие и машинное масло. Задачу решали в 3D-постановке, для ускорения расчётов моделировали вытяжку сегмента 1/4 заготовки. Материал заготовки – высокопрочная сталь ВЛ-1Д (32Х2ГСНМА) в соответствии с ТУ 14-1-4461-88, заготовка под штамповку имеет форму диска диаметром Ø906 мм толщиной 6 мм, температура процесса равна 20 °С. Привод пресса гидравлический, номинальным усилием 50 МН, скорость перемещения инструмента 10 мм/с. Аналог такой задачи рассматривался в статье [6].

После первого перехода вытяжки цилиндрическая заготовка имеет диаметр 609 мм, высота стенок — 175 мм. Положение инструментов показано на рис. 1, а. По итогам компьютерного моделирования получено распределение полей остаточных напряжений. На рис. 1,б приведено распределение средних остаточных напряжений, а на рис. 1, в – цветовая масштабная шкала.

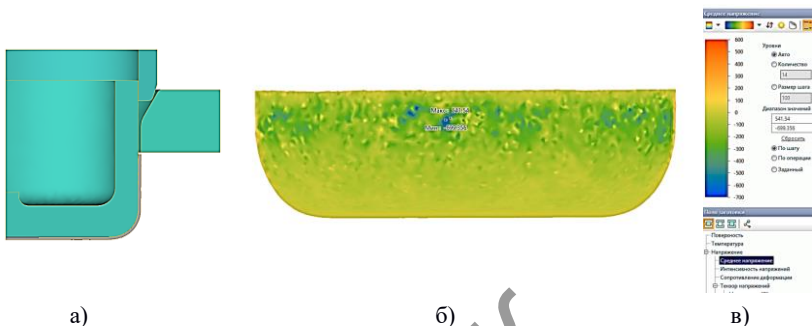


Рис. 1 – Сборка штампового инструмента (а), распределение средних напряжений после снятия нагрузки в конце 1 перехода (б) и шкала параметра (в)

После первого перехода уровень максимальных сжимающих напряжений составляет -699 МПа, растягивающих $+541$ МПа. Максимальные значения полей напряжений локализуются на небольшом расстоянии от края заготовки и могут привести к образованию трещин, что подтверждается практикой обработки. Высокий уровень остаточных напряжений, сопоставимый с пределом прочности материала, требует изменения технологии изготовления и введения дополнительной операции термообработки.

Список литературы

1. Liu W., Liu H.S., Xing Z.W., Cao K.L. Study on process parameters and springback rule for stamping of high strength steel sheet // Material Science and Technology. – 2010. - V. 18. – No. 6. – P. 758–761.
2. Демин В. А., Рыжкова А. А. Влияние формы заготовки на коэффициент вытяжки цилиндрических деталей // Заготовительные производства в машиностроении. - 2016. - №11. - С.30-34
3. Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Троцтов А.В. и др. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках // Достижения в теории и практике трубного производства. - 2004. – С. 87-97.
4. Новиков И. Н. Теория термической обработки металлов. - М.: Металлургия, 1978. - 392 с.
5. Кудрявцев И. В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. - М.: ВИНТИ, 1957. - 17 с.
6. Файфер И.Н., Логинцов Ю.Н. Цифровое моделирование многопереходной глубокой вытяжки полусферической детали при различных условиях трения // Заготовительные производства в машиностроении. - 2023. - Т. 21. - № 10. - С. 448-453.

СЕКЦИЯ 3 – Инновационные технологии и материалы обработки металлов давлением

УДК 621.778

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА Al-1%РЗМ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ- ПРЕССОВАНИЯ

Дурнопьянов А.В., Ворошилов Д.С., Беспалов В.М., Бернгардт В.А.,
Бермещев Т.В., Климов Д.М., Ашмарин А.О
Сибирский федеральный университет, Красноярск, РФ
a.durnopyanov@yandex.ru

Алюминиевые сплавы с различным содержанием церия имеют широкую область применения. В группу редкоземельных металлов (РЗМ) входят 14 элементов – лантаноидов, а также скандий, иттрий, церий и лантан. РЗМ остро востребованы в современных высокотехнологичных отраслях промышленности. Без них сегодня не мыслимо развитие современных ЭВМ, средств связи и коммуникаций, лазерной техники, оптических систем, низко температурных проводников, многих видов оборонной техники и т.п. На сегодняшний день ведутся активные разработки по получению полуфабрикатов из сплавов системы Al-Ce-La в виде проволоки, прутков и катанки [1].

Для исследований использовали литую заготовку сечением 14×14 мм из сплава Al-1%РЗМ, полученную литьем в изложницу (рис. 1, а). Для проверки исследуемых режимов деформирования были проведены экспериментальные исследования на установке СПП-200 (рис. 1, б) [2], изготовленной на базе прокатного стана ДУО 200 по ранее разработанной методике. Были получены прутки Ø 5 и 9 мм при температурах 480 и 550 °С, при скорости вращения валков 4 и 8 об/мин. Механические свойства определяли на оборудовании Walter + Bai AG LFM 400 кН и LFM 20 кН (Walter + Bai AG, Швейцария) в соответствии с ГОСТ 1497-84. Химический состав исследуемого сплава приведен в табл. 1.

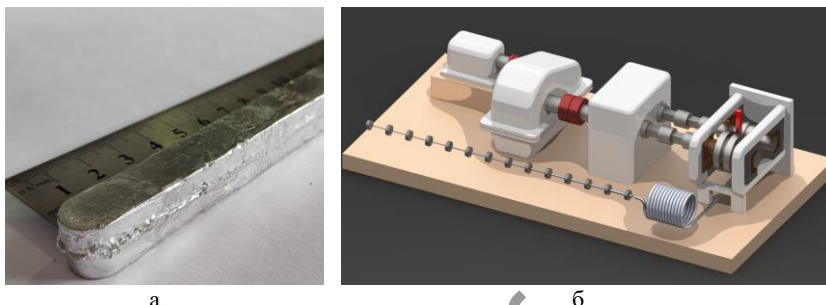


Рис. 1 – Оборудование для получения прутков из сплава Al-1%PЗМ:
а) литая заготовка сечением 14×14 мм; б) установка СПП-200

Таблица 1 – Химический состав исследуемого сплава

Сплав	Содержание, %					
	Al	Содержание PЗМ, масс. %	Ni	Fe	B	Ti
Al-1%PЗМ	Ост.	0,5	0,02	0,15	0,001	0,001

Удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76.

Усилие на матрице и валках регистрировалось тензометрической аппаратурой с помощью кольцевого дозатора. В качестве основного регистрирующего оборудования использовалась универсальная тензометрическая станция ZET 017-T8 с датчиками силы CWW-50tf и CWW-100tf с максимально допустимым усилием сжатия 500 кН и 1 МН.

При выполнении данной работы были сделаны выводы и получены следующие основные результаты.

1. Проведены экспериментальные исследования по реализации процесса СПП для сплава системы Al-1%PЗМ из заготовки, полученной литьем в изложницу, при варьировании температуры обработки, скорости и коэффициента вытяжки.

2. Проведен анализ энергетических параметров процесса СПП. Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП при скорости вращения валков 4 об/мин и 287 кН при 8 об/мин. Усилия на матрице не превышают 206 кН при скорости вращения валков 4 об/мин и 176 кН при 8 об/мин.

3. Проведены экспериментальные исследования по изучению механических свойств и электросопротивления прутков и проволоки, полученных методами СПП и последующим волочением. Временное сопротивление у прутков составляет $\sigma_b = 112-125$ МПа, а относительное удлинение $\delta = 26-34\%$.

4. Значения электросопротивления для проволоки $\varnothing 2$ мм из заготовки размерами 14×14 мм $\rho = 0,0294-0,0306$ Ом·мм²/м. $\sigma_b = 180-214$ МПа, $\delta = 2-6\%$ в

нагартованном состоянии. При волочении прутков с \varnothing 9 и 5 мм до \varnothing 2 мм не потребовалось ни одного промежуточного отжига.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00028, <https://rscf.ru/project/23-29-00028/>.

Список литературы

1. Voroshilov D.S., Sidelnikov S.B., Bepalov V.M., Sokolov R.E., Bermeshev T.V., Bergardt V.A., Lezhnev S.N., Durnopyanov A.V., Kovaleva A.A., Konstantinov I.L., Novikova O.S., Motkov M.M., Combined rolling-extrusion of various billets from the Al-Ce-La alloy for electrical wire production. *Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, 2024, 131(9-10), 4699–4725.

2. С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров, Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

УДК

СТРУКТУРА СПЛАВА СИСТЕМЫ СО-СР-МО ПОСЛЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ

Кли Т.Ю., Гамин Ю.В., Кулешова Н.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия
tatianakin@mail.ru*

Разработка отечественной технологии производства деформированных полуфабрикатов из сплава системы Со-Сг-Мо представляется важной исследовательской задачей в силу востребованности заготовок из данного сплава в медицине и долгое время ввозимых из зарубежа. Ранее в работе [1] показана принципиальная возможность применения технологии радиально-сдвиговой прокатки (РСП) для получения прутков малых диаметров из сплава системы Со-Сг-Мо.

Известно, что значительный вклад в конечные характеристики полуфабриката вносит качество исходной заготовки, а именно ее структура, наличие включений, дефектов в виде пористости и др., устранение которых не всегда возможно только за счет применения термической обработки. Кроме этого, обеспечение требуемого качества исходной заготовки обусловлено высокой стоимостью литейных процессов.

Для решения вышеуказанных проблем в технологический процесс изготовления прутков из сплава системы Со-Сг-Мо с применением технологии РСП введена операция предварительной изотермическойковки. Слиток

диаметром 75 мм, полученный вакуумно-индукционной выплавкой, после гомогенизационного отжига (рис.1а) деформировали до заготовки диаметром 55 мм. Изотермическая ковка проводилась на прессе с подогревом рабочих бойков до 950 °С и последующей закалкой в воду. Выбор режимов деформации выполнен с учетом результатов моделирования процесса и особенностей формирования фазового состава, в том числе температуры фазового перехода в данном сплаве [2, 3]. На рис. 1б показана микроструктура ковальной заготовки в закаленном состоянии. Далее проведена РСП ковальной заготовки до диаметра 32 мм. На рис. 1в показана микроструктура прутка после РСП.

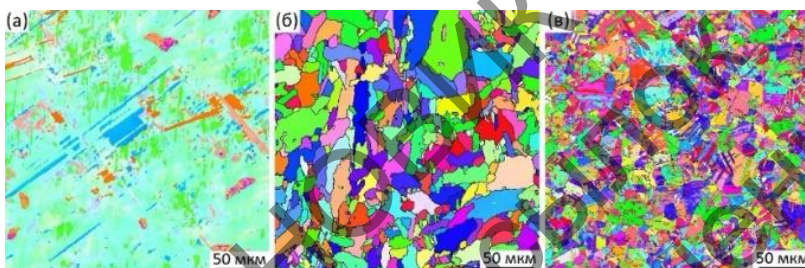


Рис. 1 – Микроструктура сплава системы Co-Cr-Mo (центр) в литом состоянии после гомогенизации (а), послековки (б) и последующей РСП (в)

После гомогенизационного отжига слиток имеет крупнозернистую грубую структуру и микропоры осевой зоны размером 10-20 мкм. Согласно полученным результатам, предварительная деформационная обработка исходной заготовки обеспечивает проработку литой структуры, позволяет устранить остаточную пористость осевой зоны и сформировать равномерную структуру по сечению заготовки. Кроме этого, в процессе изотермическойковки повышается технологическая пластичность сплава, что оказывает положительное влияние на деформационные параметры последующего процесса РСП, что, в свою очередь, обеспечивает изготовление конечной продукции (прутков) с мелкозернистой структурой при отсутствии как поверхностных, так и внутренних дефектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00477, <https://rscf.ru/project/23-19-00477/>

Список литературы

1. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кин Т.Ю., Костин С.А. Экспериментальное опробование радиально-сдвиговой прокатки для получения деформированного сплава системы Co-Cr-Mo // Черные металлы. – 2023. – №9. – С. 47-53.

2. K. Yamanaka, M. Mori, A. Chiba. Mechanical properties of as-forged Ni-free Co-29Cr-6Mo alloys with ultrafine-grained microstructure // Materials Science and Engineering: A. – 2011. - Vol. 528. – Issue 18. – pp. 5961-5966. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.027>

3. Gamin Y.V., Skugorev A.V., Karashaev M.M, Kin, T.Y., Galkin S.P., Mahmoud Alhaj Ali, A. Cheverikin V.V. Analysis of Microstructure Evolution of Co-Cr-Mo Alloy during Isothermal Forging // Metals – 2023. – 13(9), 1583. <https://doi.org/10.3390/met13091583>

УДК 621.771.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ В РЕЛЬЕФНЫХ ВАЛКАХ МЕДНОГО СПЛАВА М1

Есболат А.Б.¹, Панин Е.А.¹, Арбуз А.С.²

¹ *Карагандинский Индустриальный Университет, Темиртау, Казахстан*

² *Назарбаев Университет, Астана, Казахстан*

esbolat.a@mail.ru

Асимметричная прокатка является одним из наиболее перспективных направлений прокатного производства. Использование фактора асимметрии при прокатке позволяет существенно повысить уровень проработки металла за 1 проход, а также придать обрабатываемому материалу повышенный уровень механических свойств. Асимметрия при прокатке может быть создана целенаправленно рассогласованием окружных скоростей валков при использовании индивидуальных двигателей, разницы в диаметрах валков, использования валка без привода (холостого хода), а также различными значениями коэффициента трения на валках.

Большой вклад в развитие асимметричной прокатки внесла научная школа А. Песина, в ходе исследований была создана промышленная установка в виде стана асимметричной холодной прокатки. Данный стан позволяет прокатывать стальные образцы с обжатием 75-80% за один проход. В результате получается ультрамелкозернистая структура материала. В результате проведенных исследований удалось достигнуть градиента между верхней и нижней поверхностями листа, который составил около 25%, что позволило получить одновременно пластичный и прочный металл, при этом удалось снизить усилие прокатки в 2-4 раза по сравнению с обычной симметричной прокаткой [1].

Разрабатываемый процесс интенсивной пластической деформации, представляющий собой комбинацию прокатки в рельефных валках с наложением фактора асимметрии, хорошо зарекомендовал себя на теоретическом этапе исследований. Так, в работах [2-3] были изучены различные параметры процесса при использовании кинематической и

геометрической асимметрии. Также в работе [4] были рассмотрены энергосиловые параметры данной схемы деформирования.

С целью апробации разработанной технологии, а также проверки данных об изменении формы, полученных с помощью компьютерного моделирования, был проведен лабораторный эксперимент на медной заготовке. Геометрические параметры заготовки и валков были полностью идентичны в ходе моделирования и эксперимента, была выбрана заготовка толщиной 10 мм и шириной 150 мм. Скорость вращения валков и зазоры между гладкими валками также соответствовали значениям, принятым при моделировании медной заготовки.

Лабораторный эксперимент проводился в соответствии с разработанной технологией деформирования – после прокатки в рельефных валках заготовка выравнивалась в гладких валках. При этом зазор на втором этапе выравнивания (3-й проход) был равен толщине заготовки, а на первом этапе выравнивания зазор был установлен равным половине разницы в высоте заготовки до и после прокатки в рельефных валках. Ранее было выявлено, что высота заготовки после первого прохода увеличивается на 75-80% [4]. Согласно этому принципу, зазор во втором проходе был равен 14 мм. После прокатки в рельефных валках и последующих двух этапов выравнивания заготовка приобрела форму, показанную на рисунке 1.



Рис. 1 – Сравнение формы медной заготовки при моделировании и эксперименте: а – после прокатки в рельефных валках; б - после 1-го этапа выравнивания; с - после 2-го этапа выравнивания

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14869080).

Список литературы

1. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Chukin M.V. Investigation of the features of the formation of the structure of steel 08Yu during asymmetric rolling on a new mill 400 // Chernye Metally. – 2022. - Vol. 2022. - Iss. 10. - P. 39–44.

2. Esbolat A., Panin E., Arbuz A., Lezhnev S., Krupenkin I., Erpalov M. Concepts analysis of asymmetry factor implementation during rolling in relief rolls // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. - Vol. 57. - Iss. 6. - P. 1243-1250.

3. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Tymchenko A.A., Esbolat A.B. Improvement of the deformation technology in relief rolls by asymmetric rolling realization // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information. – 2021. - Vol. 77. - Iss. 4. - P. 445-454.

4. Esbolat A., Panin E., Arbuz A., Kuis D., Naizabekov A., Lezhnev S., Yerzhanov A., Krupenkin I., A Tolkushkin., Kawalek A., Voroshilov D. Investigation of force parameters during rolling in relief rolls // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2023. - Vol. 58. - Iss. 5. - P. 961-968.

УДК 621.774.72

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОМЕДИЦИНСКОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА MG-1%ZN-0,06%CA

Волкова Е.П., Худододова Г.Д., Боткин А.В.

*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
Ervolkova@mail.ru*

В настоящее время активно ведутся исследования в создании биоразлагаемых и биосовместимых материалов из магниевых сплавов для применения в медицине [1]. Биомедицинские материалы на основе магния являются приоритетным направлением исследования, так как при очень хорошей биосовместимостью, способны постепенно резорбировать, и при этом обеспечивать заданный уровень механических характеристик в течении всего периода остеосинтеза [2]. Основной сложностью в их использовании является труднодеформируемость, что в свою очередь требует их обработку при более высоких температурах, а это ведет к динамической перекристаллизации и препятствует измельчению зерен [3]. Поэтому очень важную роль играет предварительная операция термомеханической обработки, которая позволит в дальнейшем проводить интенсивную пластическую деформацию при более низких температурах и приведёт к получению более однородной и мелкозернистой структуры, что значительно повышает механические свойства магниевых сплавов [4,5].

В настоящей работе на основе данных компьютерного моделирования в программном комплексе Deform 3D и принципов физической мезомеханики установлено, что предварительная деформация заготовок редуцированием в режиме повышенных температур и низких скоростей деформации значительно

повышает деформационную способность сплава, позволяет провести РКУП обработку при относительно низких температурах. При такой предварительной термомеханической обработке образуется поверхностный слой (толщиной приблизительно 2 мм) с высоким уровнем накопленной степени деформации (от 2 до 5.5) и благоприятной структурой, обеспечивающей увеличение деформируемости заготовки при последующем РКУП прессовании.

Так же путем физического эксперимента установлено, что применение редуцирования в качестве предварительной операции увеличивает деформируемость заготовок при РКУП при относительно низких температурах (150°С...300°С). В ходе экспериментальных работ получены цельные неразрушенные заготовки после редуцирования и РКУП, у которых исследовали механические свойства методами измерения микротвердости и испытаний на растяжение. Комбинированная обработка значительно повысила механические свойства магниевого сплава - микротвердость с 46.6 до 58.7 HV, предел прочности с 144 до 233 МПа.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 24-43-20015. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ».

Список литературы

1. Medeiros M.P., Lopes D.R., Kawasaki M., Langdon T.G., Figueiredo R.B. An Overview on the Effect of Severe Plastic Deformation on the Performance of Magnesium for Biomedical Applications // Materials. – 2023. – V. 16. – P. 2401.
2. Zhao D., Witte F., Lu F., Wang J., Li J., Qin L. Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective // Biomaterials. – 2017. – V. 112. – P. 287–302.
3. Ion S.E., Humphreys F.J., White S.H. Dynamic recrystallisation and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium // Acta Metall. – 1982. – V.30. – P. 1909–1919.
4. Horita Z., Matsubara K., Makii K., Langdon T.G. A two-step processing route for achieving a superplastic forming capability in dilute magnesium alloys // Scr. Mater. – 2002. – V. 47. – P. 255–260.
5. Orlov D., Raab G., Lamark T.T., Popov M., Estrin Y. Improvement of mechanical properties of magnesium alloy ZK60 by integrated extrusion and equal channel angular pressing // Acta Mater. – 2011 – V. 59. – P. 375–385.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ХОЛОДНОКАТАНОЙ ЛЕНТЫ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

НА ОСНОВЕ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ ПОДКАТА ПОВЫШЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Барышникова А.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Носов Л.В.,
Песин И.А.

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ,
anyabar1999@mail.ru

В настоящее время, все технологические изменения, происходящие в черной металлургии, направлены, в первую очередь на увеличение производительности, сокращение производственных затрат и повышение качественных характеристик продукции. Экспериментальные исследования возможности увеличения толщины горячекатаного подката при производстве ленты из низкоуглеродистых марок сталей проводили на уникальном лабораторно-промышленном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилиева МГТУ им. Г. И. Носова» [1]. Данный стан по своим техническим характеристикам является единственным в мире и ему был присвоен статус уникальной научной установки. При производстве ленты из стали 08пс толщиной 1 мм возможно увеличить толщину горячекатаного подката на 30–45%. При этом следует отметить, что механические свойства микроструктура стали 08пс после прокатки в асимметричном режиме значительно не изменились в сравнении с симметричным режимом прокатки. Аналогичные исследования были проведены для стали 20. При производстве ленты из стали 20 толщиной 2 мм возможно увеличить толщину горячекатаного подката на 30–40%. При этом механические свойства микроструктура стали 20 после прокатки в асимметричном режиме не изменились в значительной степени в сравнении с симметричным режимом прокатки (рис. 1).



Рис 1. – Микроструктура стали 20: а) после прокатки в симметричном режиме; б) после прокатки в асимметричном режиме

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

Список литературы

6. А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2020, Т. 20, Вып. 3, 81-96

УДК 621.774.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ ГИЛЬЗЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕХЛОВЫХ ШЕСТИГРАННЫХ ТРУБ

Захаров С.Е.

¹ ООО «ИЦ ТМК», г. Челябинск, Россия

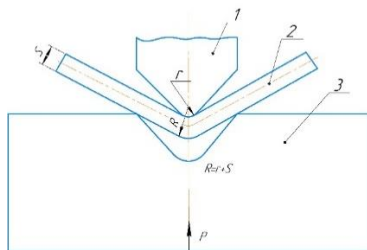
² ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия
e-mail: zaharov@rosniti.ru

Для хранения отработанного топлива атомных реакторов используются чехловые шестигранные трубы из стали марки ЧС-82 (04X14T3P1Ф). В настоящее время данные трубы производят по следующей технологии:

1. сверление сплошной заготовки;
2. пильгерная прокатка;
3. обточка и расточка прокатанной трубы;
4. профилирование крутой трубы в шестигранную.

Данная технология имеют существенный недостаток – значительнейший расходный коэффициент металла (РКМ). Одним из возможных путей снижения РКМ является использование центробежнолитой заготовки (гильзы). Однако, использование центробежнолитой заготовки (гильзы) без предварительной термической или термомеханической обработки может быть невозможным ввиду ее высокой хрупкости.

В данном докладе проведено комплексное исследование образцов, отобранных от центробежнолитой заготовки. Образцы подвергнуты различным видам обработки, в том числе: горячей деформации при различных температурах и степенях деформации, холодной деформации, термической обработке (отжиг; отжиг + закалка; отжиг + закалка + отпуск). Часть образцов для чистоты эксперимента часть образцов не подвергалась обработке, осталась в изначальном виде. По окончании различных видов обработки образцы подвергались физическому моделированию процесса профилирования шестигранной трубы (рис. 1). Оснастка и методика были специально разработаны для данного исследования



1 – верхний профилировочный боек; 2 – образец; 3 – нижний профилировочный боек; P – прикладываемое усилие пресса; r – внутренний радиус угла шестигранного калибра; S – толщина стенки.

Рисунок 1 – Схема физического моделирования процесса профилирования

В зависимости от вида реализованной термомеханической обработки часть образцов успешно прошли профилирование, некоторые разрушились. После профилирования образцы отправлены на исследование микроструктуры и механических свойств.

В докладе результаты исследования и их анализ, результаты промышленного опробования, обозначены перспективы применения центробежнолитых заготовок (гильз) при производстве чехловых шестигранных труб.

УДК 666.9-1

ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СДВОЕННОЙ ПРОКАТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТА ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рыскунова К.А.^{1,2}, Михайленко А.М.¹, Пузанов М.П.,³ Сацкий Д.Д.^{1,3}

¹ ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация

² ГАПОУ СО "Уральский политехнический колледж - МЦК"/ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

³ ПАО «НЛМК», Липецк, Российская Федерация
k.ryskunova@urpc.ru

Магнитомягкие материалы применяются в изделиях где необходимо при наименьших потерях энергии достигнуть высокой индукции при перемагничивании. От качества данного класса материалов во многом зависит эффективность работы широкого спектра изделий, начиная от бытовой техники и заканчивая радиоэлектроникой, космической техникой [1,2]. С точки зрения прокатного производства представляют интерес электротехнические стали системы Fe-Si, в которых параметры деформации играют основополагающую роль в процессе формирования текстурно-структурного состояния, определяющего основные физические свойства продукции [3]. Одним из перспективных направлений развития технологии и улучшения эксплуатационных свойств электротехнических сталей является

снижение толщины проката [4], что без значительных инвестиций в новое оборудование может быть достигнуто применением обработки сдвоенных по толщине рулонов с последующим их разделением. Как известно, применение сдвоенной (пакетной) прокатки при производстве фольг позволяет резко улучшить геометрические характеристики ленты, снизить энергозатраты на прокатку и повысить производительность агрегатов [5].

ПАО «НЛМК» является ведущим мировым производителем электротехнических сталей. Холодная прокатка производится на непрерывных станах с клетями системы кварто и на реверсивных станах, оборудованных как клетями кварто, так и 20-валковыми. В зависимости от марки стали в производственной цепочке задействованы различные агрегаты для термической обработки холоднокатаного проката и нанесения покрытий. Используемое в настоящее время прокатное оборудование рассчитано на производство электротехнических сталей с толщиной не более 0,23 мм с удовлетворительными геометрическими характеристиками. Освоение технологии производства электротехнических сталей в толщине 0,15-0,18 мм является перспективной задачей в условиях современного рынка и растущих требований к энергоэффективности.

Для оценки технологичности операции пакетной прокатки для электротехнических сталей проведена экспериментальная прокатка на лабораторном стане кварто образцов отожжённой электротехнической стали, отобранных из потока действующего производства ПАО «НЛМК». Образцы имели начальную толщину 0,96 мм и ширину 30 мм. Для сопоставления проводили стандартную и сдвоенную (пакетную) прокатку образцов до одинаковой конечной толщины образца. Прокатанные образцы подвергли заключительной термообработке по режимам аналогичным применяемым в действующем производстве. Измерение полученных магнитных свойств образцов проводили на аппарате Эпштейна в соответствии с требованиями [6]. В таблице 1 представлены результаты исследований.

Таблица 1. Сравнение магнитных характеристик экспериментальных образцов деформированных методом стандартной (1), сдвоенной (2) прокатки и допуск для попадания в марку (Н).

Толщина, мм			Магнитная индукция B_{800} , Тл			Удельные магнитные потери $P_{1,5/50}$, Вт/кг		
Н	1	2	Н	1	2	Н	1	2
-	0,100	0,100	-	1,37	1,35	-	2,43	2,56
0,23	0,115	0,115	1,82	1,37	1,37	0,80	2,43	2,47
0,27	0,135	0,135	1,70	1,44	1,67	1,15	2,04	1,32
0,30	0,150	0,150	1,68	1,46	1,82	1,19	1,89	0,82
0,50	0,250	0,250	-	1,71	1,85	2,45	1,03	0,81

По результатам исследований сделаны выводы.

1. Для образцов толщиной 0,15 и 0,25 мм полученных при сдвоенной прокатке получены удовлетворительные значения магнитной индукции (B_{800}) и удельных магнитных потерь ($P_{1,5/50}$) в сравнении с нормативными значениями для соответствующей стандартной (удвоенной) толщины.

2. Для образцов с толщиной менее 0,15 мм электромагнитные свойства резко хуже, что объясняется получением неоптимального текстурно-структурного состояния металла из-за чрезмерной степени суммарной деформации перед отжигом и повышенной плотности дислокаций.

3. Намечены пути дальнейших исследований по получению требуемых свойств на малых толщинах: оптимизация схемы деформации и отжига.

Список литературы

1. В. М. Фарбер, Н. В. Лежнин, В. А. Хотинев, и др. Конструкционные и функциональные материалы на металлической основе: учеб. пособие; под общ. ред. А. А. Попова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 252 с.

2. М. Л. Лобанов, А. А. Редикульцев, М. А. Зорина Металлофизика материалов для электромашиностроения: учеб. пособие; Мин-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 144 с.

3. Dorner D. Retention of the Goss orientation between microbands during cold rolling of an Fe3%Si single crystal / D. Dorner S. Zaefferer, D. Raabe / Acta mater. 2007. V.55. P. 2519-2530.

4. Xia Z. Developments in the production of grain-oriented electrical steel / Z. Xia, Y. Kang, Q. Wang // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. V. 254-255. P. 307-314.

5. Муравьёва И.Г. Технология прокатки бериллиевой фольги / И.Г. Муравьёва, С.Д. Капаева, Р. Габдысальк // Вестник ВКТУ. 2020. №2. С. 155-159.

6. ГОСТ 3282-2013 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2019. 10 с.

УДК 620.18

ВОЗМОЖНОСТИ СТРУКТУРНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТИТАНА МЕТОДОМ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ И ПРОКАТКИ С ТОКОМ

**Корольков О.Е.¹, Мисоченко А.А.¹, Песин А.М.,² Бирюкова О.Д.²,
Столяров В.В.¹**

¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, РФ*

² *Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, РФ
41zh1k@mail.ru*

Титан наиболее востребован в медицинской и других отраслях, и задача повышения прочности путем измельчения структуры является актуальной и практически значимой. Однако интенсивное измельчение структуры титана требует больших пластических деформаций, которые подчас сложно реализовать классическими методами ОМД. Перспективным методом видится асимметричная прокатка, позволяющая получать ультрамелкозернистые

(УМЗ) структуры в легких сплавах [1]. Другим перспективным методом является комбинация прокатки и импульсного электрического тока, позволяющая получать УМЗ состояние, в частности, в сплавах с памятью формы на основе TiNi, ВТ6 и др [2]. Однако применительно к чистому титану эти методы являются малоизученными. Целью настоящей работы является исследование возможностей структурного измельчения технически чистого титана методами асимметричной прокатки и прокатки с импульсным током.

Материалом исследования служил чистый титан марки Grade 4 в исходном крупнозернистом состоянии ($d=60$ мкм) в виде плоских заготовок размером $5 \times 10 \times 200$ мм и прутка диаметром 6 мм ($d=20$ мкм). Исходные плоские заготовки были обработаны методом асимметричной прокатки при соотношении скоростей валков $V_1/V_2 = 10/2$ при комнатной температуре за 1 проход до толщин (относительных обжатий) 1,2 мм (76%); 1,1 мм (78%) и 0,9 мм (82%). Прутки титана подвергались прокатке с одновременным введением импульсного тока (плотностью 50 А/мм², длительность импульса 100 мкс) до диаметра 2 мм. Полученные заготовки подвергали постдеформационному отжигу в диапазоне температур $450-550$ °С (1 час). Микроструктура исследовалась в оптическом микроскопе Dg Focal при увеличении 200-1000. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100г.

В продольном сечении после асимметричной прокатки (при относительном обжатии 82%) структура имеет полосовой характер с металлографической текстурой в направлении прокатки (рис. 1а), в поперечном сечении наблюдаются зерна с размером несколько микрон (рис.1б). Структура после отжига при 450 °С имеет аналогичный характер (рис.1в). Прокатка с током также приводит к интенсивному измельчению структуры до нескольких микрон в поперечном направлении (рис.1г) и сохранению полосовой структуры в продольном, которая исчезает при использовании отжигов при температурах выше 500 °С. Отметим, что при аналогичной прокатке без использования тока полосовая структура исчезает при меньших температурах отжига. По сравнению с исходным состоянием при использовании обоих методов наблюдается интенсивное измельчение, однако детальные оценки размеров зерен и влияние отжигов на структуру требуют более прецизионных методов и больших увеличений. Микротвердость повышается с увеличением степени деформации от 225 МПа в исходном состоянии до 280 МПа после асимметричной прокатки при относительном обжатии 82%. После прокатки с током микротвердость растет до 350 МПа по сравнению с 265 МПа в недеформированном состоянии.

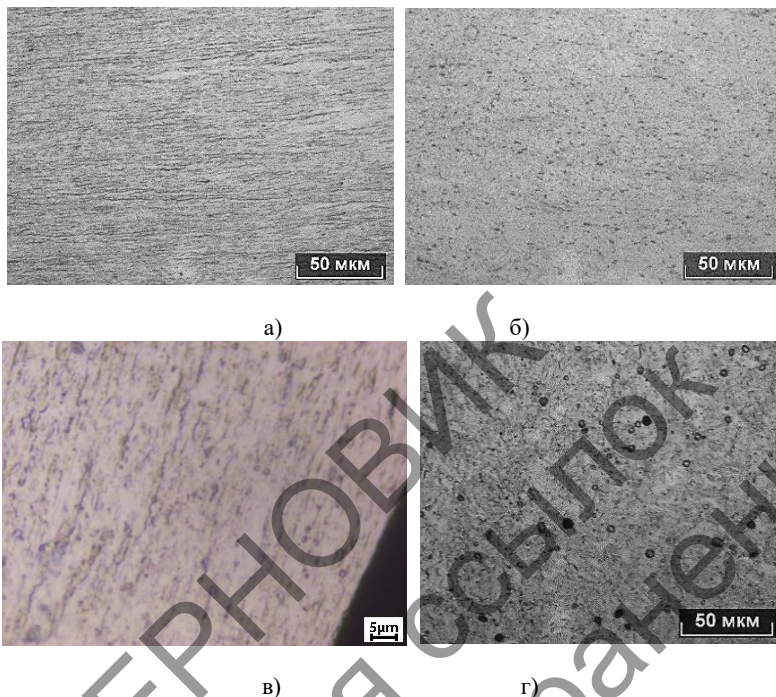


Рис. 1 – Микроструктура grade 4 в продольном (а) и поперечном (б, в, г) сечении после асимметричной прокатки при относительном обжатии 82% (а,б), АП после отжига при 450 С (в), после прокатки с током (г)

Список литературы

1. Pustovoytov, D., Pesin, A., Tandon, P. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review // Metals. – 2021. - №11. - 956.
2. Stolyarov, V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials. A Review // Materials. – 2023. - V.16. - No. 18. - 6270.

УДК 621.7.043

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1580

Ворошилова М.В., Байковский Ю.В., Черных О.Д., Кравченко С.В.

В современных условиях особую актуальность приобретают исследования, посвященные разработке и созданию новых технологий изготовления листоштампованных деталей, обеспечивающих надежность, долговечность и безопасность при эксплуатации целого ряда оборудования и образцов перспективной техники, включая ракетно-космическую. Материалы, используемые для производства таких изделий должны отличаться совокупностью исключительных свойств, а именно сочетанием малой плотности и высокой прочности, повышенной коррозионной стойкости и высокой технологичности при обработке металлов давлением, быть экономически рентабельными. Среди таких материалов выделяются сплавы системы Al-Mg, легированные редкоземельными металлами. Характеристики российского сплава 1580, входящего в состав данной группы, позволяют применять листовой прокат из него для получения различных изделий, например, в виде толстостенных обечаяк и тонкостенных сферических оболочек.

При изготовлении крупногабаритных обечаяк традиционными способами, например, раскаткой колец с помощью вальцев, имеется сложность в обеспечении точности размеров, а также низкая производительность. В работе представлен новый способ, позволяющий производить толстостенные обечайки различных размеров. В качестве заготовок предложено использовать плиты из сплава 1580 толщиной 22,5–35 мм. Гибка цилиндрических обечаяк из листовой заготовки проводится в универсально-сборном штампе [1], что повысит эффективность процесса за счет применения более совершенной конструкции штампа и расширит его технические возможности (рис. 1, а).

Гофрообразование является одним из часто встречающихся дефектов при вытяжке тонкостенных деталей полусферической формы. Причина этого в том, что в ходе деформации значительная часть поверхности заготовки остается не прижатой ни к матрице, ни к пуансону. В результате действия тангенциальных сил на поверхности изделия могут формироваться местные гофры, вытянутые в радиальном направлении. Следует отметить, что давление пуансона вначале операции передается только в центр заготовки. Это приводит к неравномерному утонению, что недопустимо для данных деталей. Для решения этой проблемы предложен способ производства тонкостенных сферических оболочек больших размеров с относительной толщиной менее 0,5 (рис. 1, б) [2]. В отличие от традиционных технологий получения сферических оболочек перед вытяжкой детали из листового проката толщиной 2 мм выполняют формовку кольцевых ребер в виде концентрических окружностей с помощью формовочного штампа. Суммарная площадь поверхности получаемых ребер должна составлять 70÷80 % от площади поверхности готовой детали за исключением площади фланцевой части заготовки.

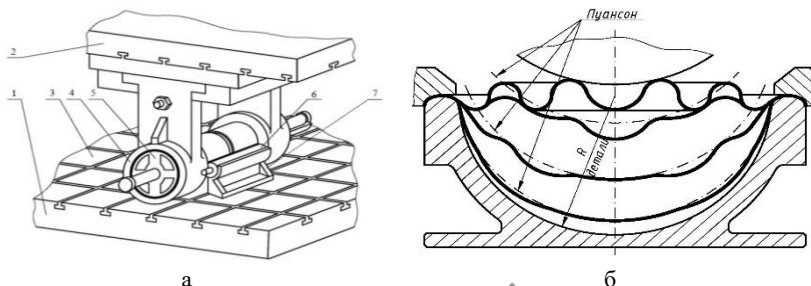


Рис. 1 – Способы получения листоштампованных изделий из сплава 1580:
 а) универсальный сборный штамп для изготовления обечаек: 1 – нижняя плита; 2 – верхняя плита; 3 – сборные блоки; 4 – пуансонодержатель; 5 – гибочный пуансон; 6 – ролик; 7 - матрица; б) Схема вытяжки кольцевых ребер при вытяжке

Данный метод получения тонкостенных сферических оболочек позволяет повысить эффективность процесса листовой штамповки и выхода годного металла за счет снижения количества брака при изготовлении тонкостенных сферических оболочек больших размеров.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Список литературы

1. Пат. 2 802 880 Российская федерация, МПК В21D 5/01, В21D 22/02 Штамп для получения цилиндрических обечаек гибкой / Сидельников С.Б., Бер В.И., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С., Константинов И.Л., Иванов Е.В., Белоконова И.Н., Кравченко С.В.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». - № 2022132500; заявл. 12.12.2022; опубл. 05.09.2023, Бюл. № 25.

2. Пат. 2791478 Российская федерация, МПК В21/D 51/08, В21D 22/02 Способ изготовления тонкостенных сферических оболочек / Бер В.И., Сидельников С.Б., Белоконова И.Н., Ворошилов Д.С., Константинов И.Л., Дурнопьянов А.В., Добровенко М.П., Ворошилова М.В.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». - № 2022105798; заявл. 24.06.2022; опубл. 09.03.2023, Бюл. №7.

УДК 621.771

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ НА КРИВИЗНУ И УСИЛИЕ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СТАЛИ

Горбунов К.С.,¹ Мазур И.П.^{1,2}

¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

² Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Для определения влияния скоростной асимметрии на энергосиловые параметры при прокатке по сравнению симметричным процессом, проведено компьютерное моделирование в программном комплексе «DEFORM-3D». Моделирование было выполнено для толщин $h_{01}=8$ и $h_{02}=2$ на $h_1=5,5$ и $h_2=1,4$, соответственно исследования проводились при обжатии $\varepsilon=30\%$. В обоих случаях температура прокатки полосы составляла $T=1000^\circ\text{C}$. Для испытаний диаметры рабочих валков составляли 300 мм и была принята постоянная скорость вращения верхнего рабочего валка $n=800$ об/мин. Диапазон изменения коэффициента асимметрии составил 1,00 - 1,15. В качестве материала для испытаний была выбрана стали повышенной прочности 17ГС по ГОСТу 19281-2014.

По результатам компьютерного моделирования в программном комплексе «DEFORM-3D» процесса горячей прокатки проведён сравнительный анализ влияния симметрии и асимметрии на усилие прокатки на рисунке 1-2.

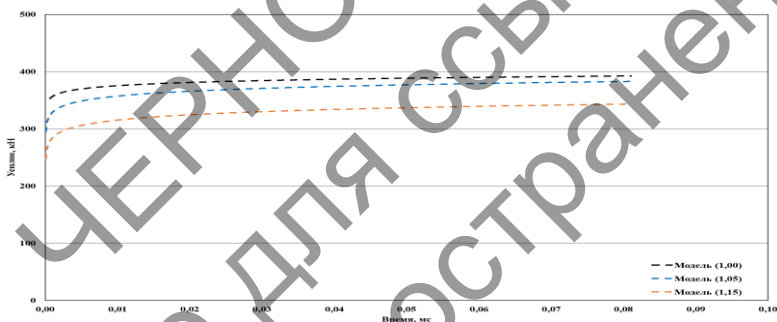


Рисунок 1 – Результаты компьютерного моделирования влияния симметрии и скоростной асимметрии на усилие прокатки с толщины $h_0=8$ на $h_1=5,5$ мм

Полученные результаты показывают снижение усилия прокатки с толщины $h_0=8$ мм на $h_1=5,5$ мм при введении скоростной асимметрий с коэффициентом $f_a=1,05$ и 1,15 по сравнению с симметричным способом $f_a=1,00$. При симметричной прокатке усилие прокатки составило 385 кН, а при скоростной асимметрий с коэффициентом $f_a=1,05$ был 375 кН и 1,15 328 кН (Рисунок 1).

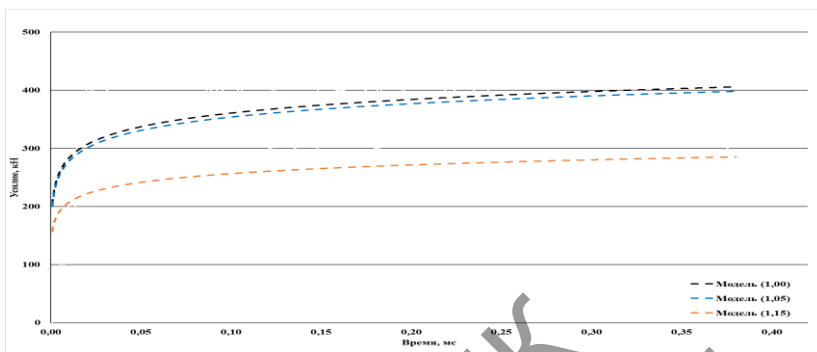


Рисунок 2 – Результаты компьютерного моделирования влияния симметрии и скоростной асимметрии на усилие прокатки с толщины $h_0 = 2$ на $h_1 = 1,4$ мм

При прокатке с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм введение скоростной асимметрий с коэффициентом $f_a = 1,05$ и $1,15$ так приводит к снижению усилия прокатки. При симметричной прокатке усилие прокатки составило 410 кН, а при скоростной асимметрии с коэффициентом $f_a = 1,05$ ровно 400 кН и $1,15$ ровно 295 кН (Рисунок 2).

Таким образом, использование скоростной асимметрии показало уменьшение усилия прокатки для стали марки 17ГС, снижение усилия прокатки при прокатке с толщины $h_0 = 8$ мм на $h_1 = 5,5$ мм составило 15%, а с $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм 25% по сравнению с симметричным процессом прокатки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-79-30015 (соглашение от 13.04.2023 года), <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>.

Библиографический список

1. А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, А. И. Сверчков, Г. П. Корнилов, Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей для исключения операций промежуточного отжига // Черные металлы. 2022 №11 С. 28-35
2. Pustovoytov D., Pesin A., Tandon P. Asymmetric (hot, warm, cold, cryo) rolling of light alloys: a review // Metals. 2021. 11(6):956. <https://doi.org/10.3390/met11060956>.
3. Кавалек А.А., Дья Х.И., Бахаев К.В., Горбунов К.С. Влияние коэффициента скоростной асимметрии на энергосиловые параметры и изгиб полосы // Черные металлы. 2021. № 10. С. 31-34.
4. К. С. Горбунов, И. С. Щеренкова, Ю. Н. Орехова, И. П. Мазур Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.

УДК 669.2

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ МУЛЬТИОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Комкова Д.А., Соколов А.Л., Кругликов Н.А., Афанасьев С.В., Волков А.Ю.

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, УрО РАН, Екатеринбург,
Россия
komkova_d@imp.uran.ru*

Благодаря малой плотности, высокой удельной жёсткости и низким коррозионным свойствам магниевые сплавы могут быть использованы в нефтеперерабатывающей промышленности [1]. Однако применение магния ограничено его малой пластичностью и плохой деформируемостью, что связано с особенностями строения гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решётки. Повышение пластичности и прочности возможно за счёт процессов легирования и использования методов меганпластической деформации (МПД). Среди МПД-методов стоит выделить мультиосевую деформацию (МОД), суть которой заключается в повторении процедуры осадки с изменением оси прилагаемой нагрузки [2]. Важными преимуществами метода являются малые скорости деформации и возможность постепенного понижения температуры обработки, что способствует измельчению зерна и повышает механические свойства. Кроме того, метод может быть использован для обработки массивных заготовок [3]. Исследований по обработке литейных магниевых сплавов методом МОД мало, что связано со сложностью деформирования хрупких материалов с крупным зерном, сильной анизотропией механических свойств из-за ярко выраженной текстуры, низким пределом текучести в литом состоянии и дефектами литья.

В работе изучено влияние МОД на механические свойства литейных магниевых сплавов: МЛ5 и МЛ10. Кроме того, для сравнения были взяты образцы деформируемого сплава МА2-1, которые также находились в литом состоянии. Из сплавов вырезали образцы прямоугольной формы высотой 70 мм (для МА2-1) и 90 мм (для МЛ5 и МЛ10). Деформацию осуществляли на гидравлическом прессе в три этапа с изменением направления осадки на 90° и с понижением температуры после каждого этапа. Деформация составляла ~ 30% при каждой осадке. Нагрев и деформация образцов проводились в печи, установленной в рабочем пространстве пресса, для отслеживания температуры образца использовалась термопара. Для сплава МА2-1 были выбраны следующие температуры осадки: 350 °С, 270 °С, 250 °С. Сплав МЛ5 осаживали при температурах: 350 °С, 300 °С, 270 °С. Для МЛ10

использовались: 370, 350, 320 °С. После каждого этапа деформации образцы закаливались в воде. Для испытаний на растяжение сплава в литом состоянии образцы вырезались из центральной части слитка с ориентацией 0° и 90° к направлению роста зерна. Деформированные образцы вырезались с ориентацией 0° и 90° относительно направления последнего этапа осадки. На каждое состояние испытывалось не менее 3 образцов при скорости 10^{-3} сек⁻¹.

В таблице 1 представлены результаты (предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и предел прочности (σ_B)) испытаний на растяжение образцов в литом и деформированном состояниях в зависимости от разной ориентации образцов.

Табл. 1 – Механические свойства магниевых сплавов до и после деформации

	Литой				Деформированный			
	0° (σ, МПа)		90° (σ, МПа)		0° (σ, МПа)		90° (σ, МПа)	
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B
МА2-1	45	164	54	165	65	226	60	216
МЛ5	39	160	59	142	45	133	54	134
МЛ10	54	134	65	153	67	154	65	165

Как следует из таблицы, в литом состоянии наблюдается анизотропия прочностных свойств для всех образцов всех сплавов. К примеру, в зависимости от направления оси слитка относительно направления растяжения, пределы текучести образцов отличаются на 20-50%, при этом их пределы прочности могут быть примерно равны (как для МА2-1) или отличаться (как для МЛ5).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предложенная схема термомеханической обработки привела к росту прочностных свойств только деформируемого сплава МА2-1. Обработка методом МОД литейных сплавов МЛ10 и МЛ5 не приводит к их упрочнению. Очевидно, что необходимо подобрать другие режимы деформации. Кроме того, здесь также может играть роль исходно мелкозернистая структура сплавов. В то же время, использование МОД позволяет сформировать в магниевых сплавах практически изотропное состояние: прочностные свойства не зависят от ориентации образца относительно направления приложения нагрузки (что особенно хорошо проявилось на сплавах МА2-1 и МЛ10).

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для разработки методов и режимов деформирования малопластичных материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» (№ 122021000032-5) и при поддержке молодёжного проекта ИФМ УрО РАН № м25-23

Список литературы

1. Sun J. et al. A review on magnesium alloys for application of degradable fracturing tools // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – V. 10. – №10. – P. 2649–2672.

2. Cai C. et al. Enhanced mechanical property of AZ31B magnesium alloy processed by multi-directional forging method // *Materials Characterization*. – 2017. – V. 131. – P. 72–77.

3. Dobatkin S. V. et al. Strength, corrosion resistance, and biocompatibility of ultrafine-grained Mg alloys after different modes of severe plastic deformation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 194. – № 1. – P. 012004 (1)–012004 (8).

УДК 621.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВАЛКОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 20X13

**Носов Л.В., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Локотунина Н.М., Грачев Д.В.,
Бахчев А.Д.**

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия
e-mail: nosov.leopold@yandex.ru*

В последние годы во многих зарубежных публикациях была показана возможность использования асимметричной прокатки для повышения эффективности процесса производства нержавеющей стали.

Нержавеющий прокат применяется в машиностроении, а также при производстве бытовой техники, электрооборудования, товаров народного потребления, сантехники, оборудования для пищевой промышленности.

В настоящее время, от 93% до 99% листового нержавеющей проката импортируется из-за рубежа. Это связано прежде всего с нехваткой собственного выпуска и потребность в продукте для реализации стратегических проектов. Особый интерес для решения этой проблемы представляет собой асимметричная прокатка.

В лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г.И. Носова" проводятся исследования новых эффектов асимметричной листовой прокатки, обеспечивающих повышение как пластических свойств металлов и сплавов, так и повышение их технологической пластичности [1].

Исследование состоит в определении влияния различных технологических параметров (коэффициента асимметрии, обжатия) процесса асимметричной холодной прокатки на энергосиловые параметры обработки нержавеющей стали марки 20X13.

Исследования показали, что с помощью асимметричной прокатки удалось существенно сократить количество проходов, достигнув требуемой толщины проката.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

Список литературы

1. Песин А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 81-96.

УДК 621.771.23 + 621.778.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ-ВОЛОЧЕНИЯ КОРОТКИХ ПОЛОС

Горбунова В.С.¹, Выдрин А.В.¹, Пелленен А.П.¹, Песин А.М.²

¹ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия
e-mail: vika.salkova6039@gmail.com

Несимметричная прокатка представляет собой прокатку металлических полос в валах прокатного стана, вращающихся с разными скоростями. Примем, что более скоростной валок является ведущим, а менее скоростной – ведомым.

Процесс прокатки в валах, имеющих разные окружные скорости, обеспечивает снижение усилия прокатки и облегчает межкристаллическое скольжение в очаге деформации, что приводит к возможности прокатывать более тонкие полосы [1].

В настоящее время существует ряд известных работ, посвященных теоретическому исследованию процессов несимметричной прокатки [2], [3]. Однако, при этом не были обнаружены исследования процесса прокатки-волочения коротких полос без продольных усилий, приложенных к концам полосы, в условиях жестко заданной кинематики. В связи с этим проведено теоретическое исследование несимметричного процесса прокатки коротких полос, нацеленное на изучение процесса, расчетная схема которого представлена на **рис. 1**.

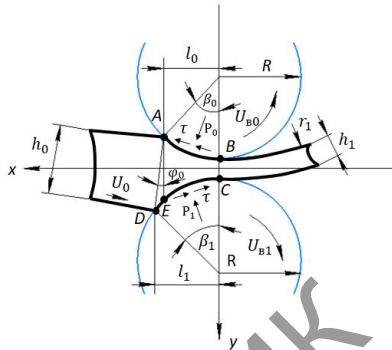


Рис. 1. Геометрический очаг деформации, с указанием действующих на него сил

Теоретическое исследование процесса выполнено на основе совместного рассмотрения условий равновесия проекций сил на оси Ox , Oy и условия баланса мощности. В ходе теоретического исследования были выведены, неизвестные ранее зависимости. В частности, зависимость (1), которая определяет условие осуществления процесса прокатки-волочения при отсутствии сторонних продольных усилий, приложенных к концам полосы при разных коэффициентах трения на контакте с валками.

$$\frac{1-f_0 \tan \frac{\beta_0}{2}}{f_0 + \tan \frac{\beta_0}{2}} = \frac{1+f_1 \tan \frac{\beta_1}{2}}{f_1 - \tan \frac{\beta_1}{2}} \quad (1)$$

где f_0 – коэффициент трения на ведомом валке;

f_1 – коэффициент трения на ведущем валке;

β_0 – угол захвата полосы ведомым валком;

β_1 – угол захвата полосы ведущим валком.

С учетом данной зависимости, получено модернизированное условие захвата полосы ($2tg\beta < f_1 + f_0$) при процессе прокатки-волочения (при $\varphi_0 = 0^\circ$) и выявлена область достижимости процесса.

В результате, при помощи разработанной математической модели для процесса прокатки-волочения коротких полос без продольных усилий и в условиях жестко заданной кинематики, установлена связь между давлением на ведущем и ведомом прокатных валках. Также, проведена проверка на выполнение условия захвата при различных соотношениях коэффициентов трения на контактных поверхностях между валками и полосой.

Список литературы

1. Песин А. М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова, А. Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, №3. – С. 81-96

2. Пелленен, А.П. Об использовании несимметричной прокатки для производства лент и полос / А.П. Пелленен // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20. - №1. – С. 87-93.

3. Салганик, В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения / В.М. Салганик, А.М. Песин. – М.:МИСиС, 1997. – 192 с.

УДК 539.4.014

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРУТКАХ КРУГЛЫХ СЕЧЕНИЙ ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

Дёмин Д.О.¹, Баринов А.Д.¹, Гребенкин И.А.¹
¹МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия
e-mail ddemin@hse.ru

Продолжая тему определения остаточных напряжений и накопленных деформаций с помощью методов машинного обучения, была исследована возможность их применения для определения компонент соответствующих тензорных величин. С этой целью был использован подготовленный датасет на основе результатов имитационного моделирования процесса волочения согласно работам [1-4]. В соответствии со схемой, представленной на Рис.1, была осуществлена подготовка моделей искусственных нейронных сетей (ИНС) и полиномиальной регрессии.

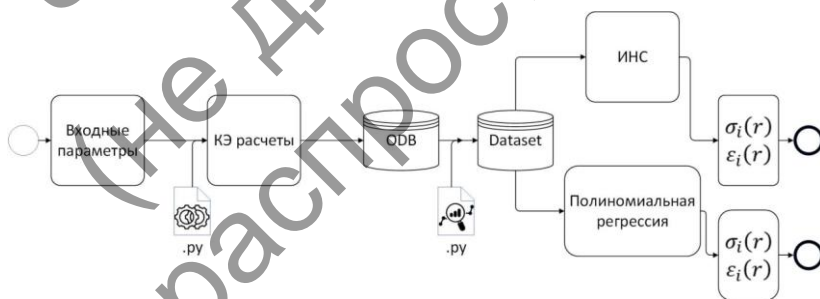


Рис. 1 – Схема подготовки ML моделей для определения остаточных напряжений и накопленных деформаций

В качестве вектора входных значений использовались следующие величины: обжатие (Q), коэффициент пропорциональности калибровочного участка (k), угол деформирующей зоны (α), коэффициент трения (μ),

обезразмеренный входной радиус (r). На выходе получается значение величины остаточного напряжения $\sigma_{ij}(r)$ или накопленной деформации $\varepsilon_{ij}(r)$.

Также для подготовки ИНС рассматривались различные значения таких параметров как: количество скрытых слоев – от 1 до 30, количество нейронов на слое – от 2 до 30, максимальное количество эпох обучения - 2000, шаг обучения – от 10^{-8} до 10^{-2} , оптимизатор – Адам[5], СГС, LBFGS[6].

Для оценки качества подготовленных моделей использовались различные метрики, такие как: MAE, MSE, R^2 , AIC, BIC и ряд других. Кроме того, были построены соответствующие карты для оценки чувствительности выбранных метрик.

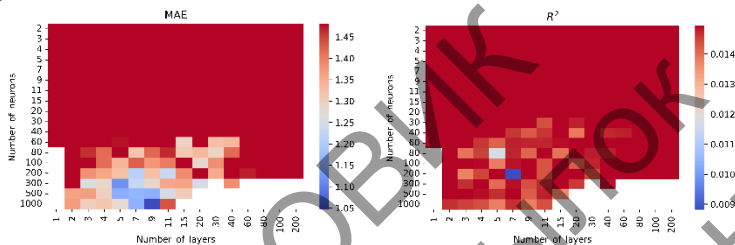


Рис.2 Карты значений ряда метрик для соответствующих конфигураций моделей

С помощью таких карт происходит процесс определения конечных конфигурации моделей, которые могут оказаться пригодными для построения прогнозов распределений компонент тензоров остаточных напряжений и накопленных деформаций. И, далее, эти конфигурации требуют дополнительной проверки на валидационном множестве.

Список литературы

1. С.А. Зайдес, Л.Г. Климова, С.А. Пронькина, Технологическое управлением остаточными напряжениями при охватывающем деформировании, Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, №1, 2006, 44-48 с.
2. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан, Влияние параметров процесса калибровки на изгибную жесткость стальных прутков. Часть 1. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 60, № 11, 2017, 870 – 876 с.
3. Surajit Kumar Paul, Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 48(3), 2013, 176-188p.
4. Demin D.O., Grebenkin I.A., Prediction of residual stress in round bars after drawing, Magnitogorsk Rolling Practice 2023: Proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference (Magnitogorsk, 30th May – 03d June,

2023). Ed. By A.G. Korchunov. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023, 20-21p.

5. Kingma, D.P., Ba, J., Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014

6. Moritz, P., Nishihara, R., Jordan, M., A linearly-convergent stochastic l-bfgs algorithm. In: Artificial Intelligence and Statistics, 2016, p. 249–258, PMLR

УДК 669.295

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT22 С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Классман Е.Ю.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
klassman@mail.ru*

Комплексно-легированный титановый сплав BT22 – наиболее высокопрочный титановый сплав, отличается максимальным эффектом упрочняющей термообработки (ТО) и поставляется главным образом в виде крупногабаритных прутков и поковок с крупнозернистой структурой, из которых изготавливают ответственные изделия авиакосмического назначения. Как правило, этот сплав используют в крупнозернистом состоянии и проблемными вопросами являются низкая технологическая пластичность и высокая нестабильность механических свойств материала в изделиях, преимущественно тонкостенных, снижающие его надежность в эксплуатации. Актуальность работы обусловлена необходимостью существенного повышения технологических свойств при формообразовании и обеспечения стабильно-высокой конструкционной прочности и надежности ответственных высоконагруженных конструкций авиакосмической и автомобильной техники, изготовленных из комплексно-легированного титанового сплава BT22.

Повышения прочности можно добиться не только посредством термической обработки, но также путем измельчения структуры. В настоящее время, в том числе за рубежом, наблюдается повышенный интерес к получению ультрамелкозернистых (УМЗ) и нанокристаллических структур методами интенсивной пластической деформации (ИПД) в материалах, ранее упрочняемых посредством термической обработки. Однако используемые в настоящее время способы измельчения структуры весьма трудоемки и затратны. С этой точки зрения применение изотермической прокатки в интервале температур низкотемпературной сверхпластичности выглядит наиболее приемлемым, так как при этом можно совместить процесс получения самого листа с подготовкой УМЗ структуры, не прибегая к дополнительным операциям обработки.

В результате прокатки в изотермических условиях при температурах ниже 600°C были получены листы сплава BT22 толщиной от 2,8 до 0,2 мм, с размером зерен до ~300 нм, обладающие пределом прочности ~ 1470 МПа,

относительным удлинением до разрушения $\sim 7\%$ при относительном сужении $\sim 20\text{...}25\%$, КСУ $\sim 0,55$ МДж/м². В полученном УМЗ сплаве ВТ22 низкотемпературная сверхпластичность (СП) реализуется при температуре 600°C ($m=0,45$), а первые признаки СП проявляются при температуре 550°C. Полученный листовой прокат успешно применен для получения деталей глубокой вытяжкой.

УДК 621.77

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУРУПА ПУТЕВОГО ЦП-54 НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Олейник Д.Г.¹, Базыков А.Р.¹, Столяров А.Ю.¹, Корчунов А.Г.²

¹ Открытое акционерное общество «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», г.Магнитогорск, Россия

² ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова, г.Магнитогорск, Россия
oleynik.dmitrii@yandex.ru

Путевой шуруп ЦП-54 представляет собой металлический стержень с резьбой и шестигранной головкой. Шуруп ЦП-54 применяется при строительстве железнодорожных путей, с целью крепления рельсов к железобетонной шпале. При сборке узла рельсового скрепления, шуруп путевой ввинчивается в отверстие в бетонной шпале, куда предварительно вставляется пластиковый дюбель (рис. 1).

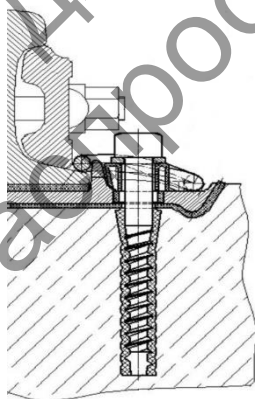


Рис. 1 – Шуруп путевой ЦП-54 в сборке с пластиковым дюбелем

В настоящее время известно две проблемы, связанные с качеством путевого шурупа:

- 1) Изломы путевого шурупа при эксплуатации на железнодорожных путях;
- 2) Путьевой шуруп не ввинчивается в пластиковый дюбель при монтаже.

Имеющиеся проблемы можно решить путем изменения конструкции и геометрии шурупа, что позволит повысить его эксплуатационные характеристики.

В рамках работы, для повышения эксплуатационных характеристик были проведены следующие мероприятия:

- анализ причин возникновения изломов путевых шурупов;
- разработка чертежа шурупа путевого модернизированной конструкции;
- изготовление шурупа новой конструкции в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» и дальнейшее проведение полигонных испытаний;
- анализ геометрических параметров шурупов путевых и пластикового дюбеля методом 3D-сканирования;
- разработка чертежей резьбонакатных роликов с измененной геометрией рабочей поверхности;
- проведение накатки резьбы путевых шурупов на опытных резьбонакатных роликах.

На основе выполненной работы, разработаны рекомендации по изготовлению перспективной конструкции и геометрии железнодорожных путевых шурупов, с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Проведение эксплуатационных испытаний шурупов путевых, изготовленных ОАО «ММК-МЕТИЗ» по чертежу «ММК-МЕТИЗ ЖД 65-2017»: отчет о проведении I-го этапа эксплуатационных испытаний шурупов производства ОАО «ММК-МЕТИЗ» / АО «ВНИИЖТ»; рук. М.И. Титаренко; исполн.: А.М. Калачев, С.М. Корнева, А.А. Савченко, Е.А. Смирнова, И.А. Готовцев. Москва, 2018. 36 с.

2. Новые виды конструкций железобетонного основания для стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг, Н.В. Рессина, С.П. Кузнецов, И.Н. Старухин // Транспорт Урала. 2016. № 4(51). С. 62—65.

3. Б.Э.Глюзберг. Требования к перспективным конструкциям инновационных стрелочных переводов. / Материалы Заседания научнотехнического совета открытого акционерного общества «Российские железные дороги» 2017г. С. 48-63.

УДК 691.75, 621.771

ПОИСК РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПРОКАТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО ЦИНКОВОГО СПЛАВА ZN-4AG-CU

Шайхисламов Д.Б.¹, Хафизова Э.Д.¹, Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Поленок М.В.¹

¹*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

²*Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия*

Shaihislamov08999.com@gmail.com

В настоящее время цинк демонстрирует высокий потенциал для применения в медицине, благодаря своей биосовместимости и коррозионной стойкости [1-2]. Однако прочностные характеристики чистого цинка не отвечают требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления имплантатов. Для решения данной задачи повышения прочностных свойств применяют легирование и/или различные деформационно-термические обработки. В большинстве исследований, посвященных биорезорбируемым цинковым сплавам, основным методом получения заготовок является горячая прокатка [3]. Однако деформационная обработка при высоких температурах снижает возможности для получения высокопрочного структурного состояния.

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния в очаге деформации заготовки из сплава Zn-4Ag-1Cu при прокатке в калибрах в условиях разных температурно-скоростных условий. Исследование проводилось с помощью метода конечных элементов с использованием программного продукта Deform-3D. Рассматривалась прокатка заготовки круглого сечения при скоростях равных 1,5 м/мин, 3 м/мин, 5 м/мин и температурах 20 °С, 100 °С, 150 °С, 200 °С. Начальный диаметр заготовки составлял 20 мм, конечный диаметр 15 мм, деформирование проводилось за 3 цикла. По результатам полученных данных был выбран рациональный температурно-скоростной режим и проведено физическое моделирование прокатки реального образца на прокатном стане HANKOOK M-TECH. В результате были получены лабораторные образцы с высокими прочностными характеристиками. Предел текучести и предел прочности составили 280±10 МПа и 295±10 МПа, соответственно.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Уфимского университета науки и технологий (№ 075- 03-2024-123/1) молодежной исследовательской лаборатории “Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях”.

Список литературы

1. Yang H., Jia B., Zhang Z., Qu X., Li G., Lin W., Zhu D., Dai K., Zheng Yu. Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications. Nature Communications. 2020. Vol. 11. No. 1. Article number 401.

- Jia B., Yang H., Han Yu., Zhang Z., Qu X., Zhuang Y., Wu Q., Zheng Yu., Dai K. In vitro and in vivo studies of Zn-Mn biodegradable metals designed for orthopedic applications. *Acta Biomaterialia*. 2020. Vol. 108. pp. 358–372.
- Z.Z. Shi, J. Yu, X.F. Liu, L.N. Wang, Fabrication and characterization of novel biodegradable Zn-Mn-Cu alloys, *J. Mater. Sci. Technol.* (2017).

УДК 621.771

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1461

Яковлев С.И.¹, Замаарсва Ю.В.^{1,2}, Разинкин А.В.¹

¹ *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия*

² *Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail YakovlevSI@kumz.ru*

В настоящее время алюминиевые сплавы применяются во многих отраслях промышленности, в частности в аэрокосмической отрасли, в связи с чем актуальна оптимизация технологий производства из них изделий [1].

Одной из задач развития аэрокосмической отрасли является снижение веса конструкций летательных аппаратов и ракетно-космической техники. С этой точки зрения представляют интерес алюминиевые сплавы, легированные литием, которые по сравнению с широко используемыми сплавами Д16, АК4-1, В95 и АМг6 имеют пониженную на 7-13% плотность при более высоких показателях модуля упругости [2].

Полуфабрикаты из алюминий-литиевых сплавов для конструкций летательных аппаратов часто изготавливают методом прокатки, однако производство таких полуфабрикатов ограничено вследствие низкой технологичности данных сплавов [3].

В настоящей работе рассматривается результат оптимизации технологии производства листов из алюминий-литиевого сплава В-1461.

Исследование проводили на двух партиях листов из сплава В-1461, полученных методом прокатки в условиях ОАО «КУМЗ» по классической технологической схеме. При этом оптимизируемым параметром назначен режим искусственного старения.

Режимы искусственного старения партии листов №1-2 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Режимы искусственного старения партии листов №1-2

Номер партии листов	Режим искусственного старения
1	I ступень: 130±5°С, выдержка 8 ч; II ступень: 160±5°С, выдержка 24 ч.

2	I ступень: 130±5°C, выдержка 20 ч; II ступень: 160±5°C, выдержка 16 ч.
---	---

Средние значения временного сопротивления разрыву, условного предела текучести и относительного удлинения материала партии листов №1-2 при испытании на растяжение для вариантов направления вырезки образцов L и LT представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний механических свойств партии листов №1-2

Номер партии листов	Направление вырезки образца относительно оси прокатки	Механические свойства		
		Среднее значение временного сопротивления разрыву, МПа (не менее 500 МПа, ТУ 1-804-436-2006)	Среднее значение условного предела текучести, МПа (не менее 450 МПа, ТУ 1-804-436-2006)	Среднее значение относительного удлинения, % (не менее 7 %, ТУ 1-804-436-2006)
1	L	515	487,5	8,55
	LT	510	477,5	10,9
2	L	555	520	9,4
	LT	540	505	10,2

В результате испытаний двух вариантов партий листов выявлено, что с позиции прочностных свойств исследуемые образцы оказались практически изотропны. При этом заметную анизотропию показало относительное удлинение образцов. В направлении L пластические свойства оказались на 8-22% ниже, чем в направлении LT. Отметим, что меньшую анизотропию в этом случае показали образцы партии листов № 2.

При сравнении временного сопротивления разрыву и условного предела текучести исследуемых образцов в направлении L и LT выявлено, что максимальные значения имеют образцы партии листов № 2.

Таким образом, анализ механических свойств образцов исследуемых партий листов позволил определить, что увеличение времени выдержки I ступени искусственного старения на 150% и его понижение на 33% на II ступени приводит к минимизации анизотропии механических свойств и достижению высоких их значений.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Список литературы

1. Яковлев С.И., Завалий Е.А., Замаева Ю.В. Оптимизация технологии производства плит из алюминиевого сплава 7475 // Технология легких сплавов. – 2023. – № 4. – С. 79–87.
2. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – №. 3. – С. 11–21.
3. Mizeraa J., Drivera J.H., Jezierskab E., Kurzydowski K.J. Studies of the relationship between the microstructure and anisotropy of the plastic properties of industrial aluminum-lithium alloys // Mater. Sci. Eng. A. – 1996. – Vol. 212. – No. 1. – P. 94–101.

УДК 669

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА СЛОИСТОГО АЛЮМИНЕВОГО КОМПОЗИТА “АМГ3/Д16/АМГ3” НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ ЕГО СЛОЕВ

Салихьянов Д.Р.^{1,2}, Мичуров Н.С.²

¹ *Институт новых материалов и технологий, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация*

² *Институт машиноведения, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация
d.r.salikhianov@urfu.ru*

Слоистые композиты из алюминиевых сплавов широко востребованы в авиа-космической и автомобильной промышленности благодаря возможности объединения в одном изделии таких разных свойств, как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, теплопроводность и др. [1]. В самолетостроении из алюминиевых сплавов изготавливаются силовые элементы, например, панели крыльев, обшивка фюзеляжа, стрингеры и др. При этом в качестве основы чаще всего используется алюминиевый сплав Д16, требующий в качестве плакирующего слоя коррозионностойкий материал. Для нужд авиа-промышленности и автопрома в ИМАШ УрО РАН был разработан и освоен технологический процесс производства листового слоистого композита “АМГ3/Д16/АМГ3” способом прокатки.

Прочность соединения слоев композита является одним из наиболее важных параметров технологии, определяющим успех промышленного освоения новой продукции. С целью исследования влияния технологических факторов производства на прочность соединения слоев, на всех этапах производства были изготовлены образцы для оценки прочности соединения. Первоначальные эксперименты включали в себя вариации образцов, по результатам которых удалось установить оптимальную форму образцов. На

втором этапе непосредственно исследовалось влияние таких технологических факторов, как: технология подготовки контактных поверхностей, обжатия, влияние термообработки. Итогом выполненных экспериментов стала оптимальная технология получения листового композита “АМГ3/Д16/АМГ3” с высоким уровнем прочности соединения и механических характеристик.

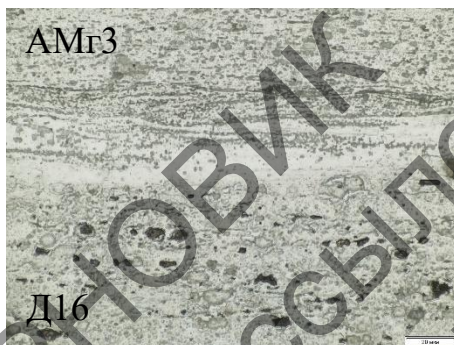


Рис. 1 – поперечный шлиф слоистого композита “АМГ3/Д16/АМГ3” в зоне соединения слоев

Список литературы

1. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation // *Comptes Rendus Mecanique*. – 2019. – Vol. 347. – № 8. – pp. 588-600.

УДК 669-1

ОСВОЕНИЕ ПРОКАТКИ ФОЛЬГИ ТОЛЩИНОЙ 0,290 ММ ИЗ СПЛАВА 3104 НА СТАНАХ АХЕНБАХ

Пахалуев И.А.¹, Шимов Г.В.²

¹ УрФУ, Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail megasplaw@mail.ru

В настоящее время алюминиевая фольга является крайне востребованной продукцией в промышленной, торговой и бытовой сфере. Ее получают методом холодной прокатки. АО "Уральская фольга" имеет в своем арсенале станы тонкой листовой прокатки Ахенбах. Фольгопрокатные станы Ахенбах производят пищевую, упаковочную и электротехническую фольгу. Система управления станом обеспечивает согласованную работу нескольких приводов постоянного тока: привод разматывателя, привод валков прокатной клетки и привода наматывателя; обеспечивается управление гидравлическими вспомогательными устройствами, системой смазки и охлаждения. Еще одной из особенностей станом является возможность пакетной прокатки двоярных полос [1].

Следует отметить, что на большинстве промышленных фольгопрокатных станом из-за упругих деформаций станины, валков, подушек, подшипников и других узлов и деталей стана получить фольгу толщиной менее 0,010 мм чрезвычайно трудно. Поэтому, если нужна более тонкая фольга, прибегают к ее сдваиванию, то есть накладыванию одной ленты на другую, с последующей прокаткой сдваивенной ленты. При этом упругие деформации узлов и деталей стана не увеличиваются, а обжатия растут, в результате чего удается вдвое уменьшить минимальную толщину фольги до 0,007-0,005 мм. Для получения фольги толщиной 0,005-0,010 мм, сдваивание производят при толщине 0,009-0,018 мм, а чтобы увеличить производительность прокатки фольгу сдваивают при большей толщине (до 0,03 мм) и затем прокатывают до 0,018 мм [2].

Лента из сплава 3104, позволит освоить рынок по производству потолочной рейки и стеновых панелей, которая до текущего момента выпускалась из сплава 3003. Данный сплав позволяет снизить затраты за счет исключения на стадии разливки первичного алюминия и замещение его на лом.

Было проведено комплексное исследования свойств нового сплава, его реологических параметров, проведены эксперименты по прокатке на толсто и тонколистовых станом. На рис. 1 приведена схема прокатки фольги 0,005-0,007 мм из сплава 3104, выполненной на прокатном станом Ахенбах.

исх. толщ.	%	1	%	2	%	3	%	4	%	5	%	6	%	7	%	8	%	9
8030	35,2	5200	36,5	3300	42,4	1900	36,8	1200	35,0	780	23,1	600	16,7	500	30,0	350	17,1	290
8030	35,2	5200	36,5	3300	42,4	1900	36,8	1200	35,0	780	25,6	580	31,0	400	27,5	290		

температурная обработка

Рис. 1 – Фактическая схема прокатки фольги толщиной 0,29 мм из сплава 3104 на станом Ахенбах (толщины приведены в мкм)

Как видно из рисунка, выход на заданную толщину реализован за 9 проходов с учетом 2-х промежуточных отжигов, при температурах 420 и 370 С⁰.

Итогом проделанной работы стала реализованная технология получения ленты, под потолочную рейку из сплава 3104. На рис. 2 приведены фотографии полученной продукции толщиной 0,35 мкм и 0,29 мкм

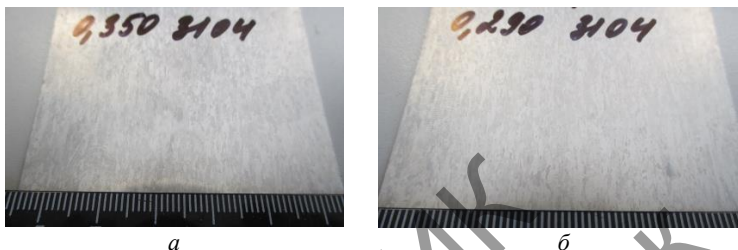


Рис. 2 – полученная фольга толщиной 0,35 мкм (а) и 0,29 мкм (б)

Одной из актуальных проблем, решение которой позволит интенсивнее внедрять ресурсосберегающие технологии по увеличению доли лома при разливке, является проблема повышенной цены на лом, что влияет на экономическую целесообразность рассматриваемых технологий.

Список литературы

1. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства : учеб. пособие / В. А. Лунев; С.-Петерб. гос. политехн. ун-т; А. И. Рудской. — Санкт-Петербург : Наука, 2008. — 527 с.
2. Райков Ю.Н., Кручер Г.Н. Алюминиевая фольга. Производство и применение. Москва, 2009. – 123 с.

УДК 671.22

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ ИЗ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Первухин А.Е.¹, Логинов Ю.Н.²

¹ АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов», г. Верхняя Пышма, Россия
e-mail: a.pervuhin@ezost.ru

² Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Трубы из драгоценных металлов и их сплавов нашли широкое применение в таких сферах, как приборостроение, электроника, медицина и ювелирное производство. Из-за высокой стоимости продукции требуется обеспечить

качество изделий, исключаящее наличие дефектов в виде трещин, плен, различных раковин и расслоений.

В большинстве случаев при производстве труб из сплавов систем платина-иридий, платина-родий и палладий-серебро используется технология получения сварных труб с помощью гибки листовых заготовок и последующей роботизированной сваркой. После сварки может наблюдаться неравномерная ширина сварного шва и образование небольшого выступа на внутренней поверхности, приводящего к повышению неоднородности деформации при операциях волочения. Кроме того, драгоценные металлы из указанных групп сплавов обладают высокой температурой плавления, что требует применения тиглей из жаростойких материалов. В процессе эксплуатации они могут разрушаться и попадать в расплав [1], приводя к образованию дефектов. Для производства труб из сварных заготовок важным требованием является отсутствие видимости шва. Это достигается за счет увеличения размеров заготовок. При этом увеличивается их масса, размер захваток и повышается общее время изготовления, что в итоге ведет к снижению экономических показателей.

При необходимости изготовления бесшовных труб применяемая технологическая схема включает операцииковки прутка, обточки и высверливания внутренней его части. Такая технология имеет низкую эффективность из-за крайне малого циклового выхода годного, невысокой производительности, высоких потерь драгметаллов при сверлении и переработке большого количества образующейся стружки. Условия сверления внутреннего диаметра являются крайне тяжелыми, требуется подвод СОЖ под высоким давлением для охлаждения инструмента и удаления стружки, использование специальных сверл и разверток. Однако даже эти мероприятия не позволяют всегда добиться удовлетворительного состояния внутренней поверхности. Здесь уже видно отличие от приемов обработки стальных труб. Сталь не обладает свойством налипания на инструмент, а платиновые сплавы обладают этим свойством при обработке даже в холодном состоянии, что ухудшает трибологические характеристики и крайне затрудняет их обработку [2].

Например, получаемые таким образом трубки из сплава Пли90-10 могут быть успешно протянуты до малых диаметров около $\varnothing 0,60$ мм и особо тонких стенок толщиной 0,03 мм. Но при изготовлении труб больших размеров возникают дефекты как внутри труб, так и снаружи, в т.ч. кольцевые дефекты, образованные резцами. Трубы из мягких металлов, таких как серебро, подвергаются скальпированию для удаления дефектов, но трубы из более прочных и вязких сплавов на основе платины, палладия или сплавов серебра с медью скальпировать не удастся [3].

На рис. 1 приведены наиболее часто обнаруживаемые дефекты при изготовлении труб.

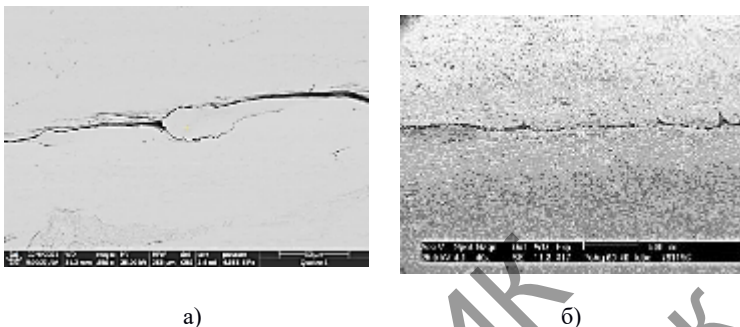


Рис. 1. – Дефекты в районе сварного шва в виде трещины на внутренней поверхности трубки (а) из сплава ПдСр60-40 и складки на наружной поверхности (б)

Для получения бесшовных труб из драгоценных металлов высокого качества, повышения производительности и экономических показателей производства требуется разработка другой технологии изготовления. Возможным вариантом заготовительной операции является горячее прессование на гидравлических прессах.

Список литературы

1. Loginov Yu.N., Babailov N.A., Pervukhin A.E. Evolution of surface defects in platinum alloy wire under drawing // AIP Conference Proceedings - 2017 – V. 1915. – P. 040032-1 – 040032-4.
2. Логинов Ю.Н., Студенок Г.И. Изучение трения при листовой прокатке платины и ее сплавов // Производство проката. - 2010. - № 7. - С. 14-16.
3. Логинов Ю.Н., Первухин А.Е. Скальпирование как операция для устранения дефектов сортового проката из благородных металлов // Производство проката – 2018 - № 4. – С. 32 – 40.

УДК 621.771.23

ПРОЯВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛОСКОГО ПРОКАТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Сизов А.Н., Логинов Ю.Н.

Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail alesha.sizov@bk.ru

В соответствии с ГОСТ 21427.1-83 одним из видов листового проката является сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная

тонколистовая. Сталь применяется для использования в магнитных цепях приборов, электрических машин и трансформаторов. Основное отличие требуемых стандартом физических свойств этой стали от обычных полуфабрикатов на основе железа в том, что регламентированы показатели удельных магнитных потерь и магнитной индукции при заданных уровнях напряженности постоянного магнитного поля. В связи с этим важным аспектом является анализ структурного и фазового состава стали на всех этапах ее обработки, включая горячую и холодную прокатки [1]. Более ранними исследованиями была выявлена анизотропия не только магнитных свойств, но и механических свойств [2]. Были сделаны также попытки привязать изменения в магнитных свойствах стали к проявлениям механической анизотропии [3].

Таким образом, влияние механической анизотропии, которая создается в том числе напряженно-деформированным состоянием полос при прокатке [4], распространяется на потребительские свойства.

В настоящее время наибольшее применение в механике деформируемого анизотропного тела имеет условие текучести Хилла. В отличие от условия текучести Мизеса, наиболее часто используемого для изотропных сред, оно формируется более сложным образом:

$$F(\sigma_{YY} - \sigma_{ZZ})^2 + G(\sigma_{ZZ} - \sigma_{XX})^2 + H(\sigma_{XX} - \sigma_{YY})^2 + 2L\sigma_{YZ}^2 + 2M\sigma_{ZX}^2 + 2N\sigma_{XY}^2 = 1,$$

где F, G, H, L, M, N – коэффициенты анизотропии, σ_{ij} ($i, j = X, Y, Z$) – компоненты девиатора напряжений.

Коэффициенты анизотропии можно определить по формулам:

$$F = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma_{iY}^2} + \frac{1}{\sigma_{iZ}^2} - \frac{1}{\sigma_{iX}^2} \right]; G = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma_{iZ}^2} + \frac{1}{\sigma_{iX}^2} - \frac{1}{\sigma_{iY}^2} \right]; H = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma_{iX}^2} + \frac{1}{\sigma_{iY}^2} - \frac{1}{\sigma_{iZ}^2} \right];$$

$$L = \frac{1}{2\sigma_{iZ}^2}; M = \frac{1}{2\sigma_{iX}^2}; N = \frac{1}{2\sigma_{iY}^2},$$

где σ'_{ij} ($i, j = X, Y, Z$) – напряжения начала пластической деформации материала в различных направлениях, их можно приравнять к условным пределам текучести.

В частных случаях возможно упростить последнюю систему уравнений [5].

Во многих случаях условие текучести Хилла уже вмонтировано в программные модули метода конечных элементов, с помощью которых рассчитывают формоизменение. Проблемой является нахождение констант F, G, H, L, M, N . Из-за их отсутствия многие задачи теории пластичности до сих пор не могут быть решены. Это же касается электротехнической анизотропной стали. Проблема состоит в том, что сама сталь как конечный продукт обработки имеет профиль тонкого листа. Этот лист можно было бы подвергнуть растяжению в разных направлениях. Но таких направлений наберется только два: в сторону длины листа и в сторону ширины листа. В третьем направлении размер окажется так мал, что вырезать образец на растяжение, не удастся. Если применить к этому направлению испытание не

на растяжение, а на сжатие, то диаграмму истинных напряжений (сопротивления деформации) получить удастся. Но поскольку материал по определению анизотропный, то становится не очевидным, что диаграммы испытаний на сжатие и на растяжение совпадут. Здесь под вопросом оказывается гипотеза единой кривой.

Направление дальнейших исследований может состоять в развитии методов испытаний, пригодных для выявления анизотропных свойств металла.

Список литературы

1. Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A., Rusakov G.M. Electrotechnical anisotropic steel. Part 1. History of development // Metal Science and Heat Treatment. 2011. V. 53. Iss 7-8. P. 326-332.
2. Loginov Yu.N. Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling of stripes from electrical steel. Chernye Metally. - 2018. - V. 10. - P. 22-26.
3. Shekhawat S. T. Magnetic properties in deformed grain oriented steel: on the role of strain hardening exponent and microstructural developments // ISIJ International. - 2012. - V. 52. - Iss. 11.- P. 2100-2108.
4. Логинов Ю.Н., Пузанов М.П., Соловей В.Д. Силовой и скоростной режимы холодной прокатки трансформаторной стали // Сталь. - 2017. - № 8. - С. 30-33.
5. Логинов Ю.Н., Соловей В.Д., Котов В.В. Преобразование условия текучести при деформации металлических материалов с ГПУ решеткой // Металлы. - 2010. - № 2. - С. 93-99.

УДК 620.193

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СТАЛИ CROFER 22 APU ДЛЯ ИНТЕРКОННЕКТОРОВ ТОТЭ

Солодянкин А.А.¹, Ерпалов М.В.^{1,2}, Чугунов П.А.^{1,2}

¹ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²УрФУ им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
mindfy@mail.ru

Твердоокисные топливные элементы (ТОТЭ) представляют собой устройства, преобразующие химическую энергию топлива непосредственно в электрическую без сгорания. Разделение анодного и катодного пространств соседних топливных ячеек, электрическое соединение между ними, а также распределение газов по их поверхности осуществляют с помощью интерконнекторов. Традиционным материалом для изготовления интерконнекторов являются ферритные нержавеющие стали. Материал

интерконнекторов должен обладать высокими коррозионной стойкостью, электро- и теплопроводностью [1 – 3].

В данной работе проведено изучение влияния условий коррозионных испытаний (температура, продолжительность, газовая атмосфера) на характеристики интерконнекторов ТОТЭ. Объектом исследования являлись два вида ферритных нержавеющей сталей: немецкая коммерческая сталь Crofer 22 APU и ее аналог, изготовленный в ИВТЭ УрО РАН.

Коррозионные испытания проводили при температуре 800°C в атмосферах влажного воздуха и чистого кислорода. Для формирования оксидной пленки на поверхности образцы предварительно обжигали при температуре 900°C в воздушной атмосфере. Для устранения влияния размера образцов результаты представляли в виде удельного прироста массы. Показано, что для обоих видов сплавов наблюдается незначительный прирост массы (менее 0,5 мг/см²) как в атмосфере влажного воздуха, так и в атмосфере чистого кислорода (рис. 1).

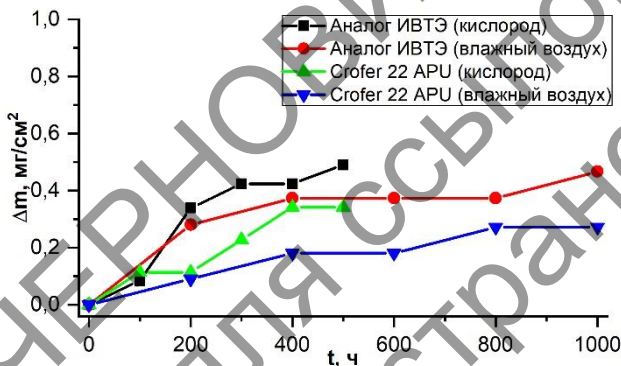


Рис. 1 – Результаты коррозионных испытаний

Измерение удельного сопротивления образцов до и после коррозионных испытаний проводили двухзондовым методом с использованием прецизионного параметрического анализатора Keysight B2901A (Keysight Technologies, США) при температуре 800°C в воздушной атмосфере. Установлено, что с увеличением времени коррозионных испытаний происходит рост удельного сопротивления сталей (рис. 2), что может негативно влиять на эксплуатационные свойства и длительность работы стека ТОТЭ. В то же время, образцы до коррозионных испытаний удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу интерконнектора — удельное сопротивление не превышает 0,1 Ом·см².

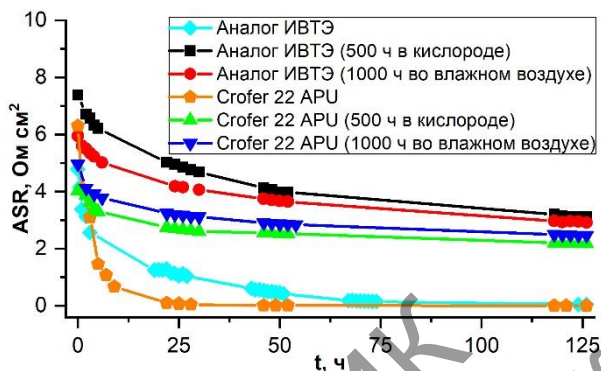


Рис. 2 – Результаты измерений удельного сопротивления до и после коррозионных испытаний

Кроме того, в работе была проведена серия экспериментов на образцах стали, изготовленной в ИВТЭ УрО РАН, после прокатки с различным относительным обжатием. Установлено, что пластическая деформация не оказывает существенного влияния на коррозионную стойкость материала. Однако, удельное сопротивление образцов, подвергнутых прокатке, оказалось примерно в десять раз выше, чем удельное сопротивление образцов без прокатки (около 1 Ом·см²).

Список литературы

1. Fergus, J.W. Metallic interconnects for solid oxide fuel cells / J.W. Fergus // Mater. Sci. Eng., A. – 2005. – V. 397. – P. 271–283.
2. Zhu, W.Z. Development of interconnect materials for solid oxide fuel cells / W.Z. Zhu, S.C. Deevi // Mater. Sci. Eng., A. – 2003. – V. 348. – P. 227–243.
3. Shaigan, N. A review of recent progress in coatings, surface modifications and alloy developments for solid oxide fuel cell ferritic stainless steel interconnects / N. Shaigan, W. Qu, D.G. Ivey, W. Chen // J. Power Sources. – 2010. – V. 195. – P. 1529–1542.

УДК 621.777

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОЧНОГО И ПРУТКОВОГО БЕССВИНЦОВОГО ПРИПОЯ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

Фаизов С.Р., Радионова Л.В.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

faizovsergey@gmail.com

Повышенное внимание, уделяемое в последние годы бессвинцовым припоям, вызвано ужесточением норм экологических стандартов. Низкотемпературный припой ПОИн-52 (52In-48Sn) является одним из перспективных сплавов для пайки чипов и микросхем. АО «Челябинский цинковый завод» основной производитель цинка в России, как побочный продукт производит индий и заинтересован в его глубокой переработке.

Традиционная схема производства припоя, включающая в себя прессование отлитых слитков и последующую их прокатку и волочение, требует большого парка оборудования и была признана экономически необоснованной. Физико-механические свойства сплава позволили предположить, что в данном случае более обоснованным и перспективным процессом изготовления прутков и проволоки может быть процесс экструзии.

Для определения энергосиловых параметров экструзии прутков диаметром до 15,0 мм и проволоки $\varnothing 2,0 \div 4,0$ мм была разработана математическая модель, которая позволила определить максимальные усилия прессования и сформулировать требования к гидравлическому прессу и технологической оснастке [1]. Поскольку температура плавления сплава 120 °С, а процесс экструзии проволоки $\varnothing 2,0$ мм реализуется с коэффициентом вытяжки 118,8, есть вероятность потери стабильности процесса из-за деформационного разогрева сплава и как следствие нагрева инструмента. Температурно-скоростные условия при полунепрерывной экструзии проволоки исследовались с пакете QForm [2]. При скорости прессования 3 мм/с в процессе экструзии проволоки $\varnothing 2,0$ мм из заготовки $\varnothing 20,0$ мм максимальная температура металла составляет 76 °С. Последовательное прессование четырех заготовок приводит к довышению максимальной температуры проволоки с 76 до 87 °С.

Для обеспечения универсальности технологической оснастки и возможности изготовления проволоки диаметром от 2,0 до 4,0 мм и прутков диаметром до 15,0 мм было спроектировано устройство для прямой экструзии (рис. 1).

Максимальное усилие, которое возникает в начальный момент экструзии согласно результатам математического моделирования, составляют 106 кН. Прочностной анализ оснастки [3], выполненный в программе SOLIDWORKS Simulation, выявил необходимость совершенствования конструкции пресс-штемпеля и применения стали для изготовления контейнера с прочностными свойствами не ниже, чем у марки 30ХМ.

При экспериментальных исследованиях по изготовлению прутков $\varnothing 15,0$ и $8,0$ мм, а также проволоки $\varnothing 2,0$ мм из сплава ПОИн-52 прямой экструзией, выявлено, что у прутков $\varnothing 8,0$ мм наблюдается поверхностный дефект «воздушные пузыри», который не зафиксирован на диаметрах 2,0 и 15,0 мм. Дополнительные исследования с помощью компьютерного моделирования позволили установить, что причиной образования «воздушных пузырей» является чрезмерный зазор между контейнером и заготовкой, который рекомендовано уменьшить до 0,5 мм [4].



Рис. 1 – Технологическая оснастка для экструзии:
а) прутков; б) проволоки

Таким образом, по разработанной технологии изготовлена опытная партия в количестве 150 кг пруткового припоя $\varnothing 8,0$ мм и 100 кг проволочного припоя $\varnothing 2,0$ мм с намоткой на катушки с массой припоя 100 ± 5 г для АО «ЧЦЗ».

Список литературы

1. Radionova, L. V. Mathematical Modelling of Low Temperature Solder Direct Extrusion / L. V. Radionova, S. R. Faizov, A. E. Sarafanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chelyabinsk, 22–24 сентября 2020 года. – Chelyabinsk, 2020. – P. 012107. – DOI 10.1088/1757-899X/969/1/012107. – EDN PLHQIF.
2. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л. В. Радионова, С. Р. Фаизов, Д. В. Громов, И. Н. Ермаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 30-38. – DOI 10.14529/met200404. – EDN BMAZKA.
3. Фаизов, С. Р. Моделирование и прочностной анализ при проектировании оснастки для прямого прессования легкоплавкого припоя / С. Р. Фаизов, Л. В. Радионова // Пром-Инжиниринг : труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 180-185. – EDN IWGN DU.
4. Фаизов, С. Р. Причины формирования и способы устранения воздушных пузырей на поверхности пруткового припоя, полученного прямой экструзией / С. Р. Фаизов, Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 38-46. – DOI 10.14529/met230105. – EDN RRRGOE.

