

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»



Magnitogorsk materials week 2025

**Материалы научной школы и международной
молодежной конференции**

Под редакцией А.М. Песина

Магнитогорск
2026

Редколлегия:

Песин А.М., профессор каф. ОМД им. М.И. Бояршинова, зам. заведующего лабораторией «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Рааб Г.И., заведующий лабораторией «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Харитонов В.А., профессор каф. ОМД им. М.И. Бояршинова, г.н.с. лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Технический редактор

Бирюкова О.Д., ст. преподаватель каф. ТСиСА, с.н.с. лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Рецензенты:

Пустовойтов Д.О., доцент каф. ОМД им. М.И. Бояршинова, начальник отдела лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Корнилов Г.П., профессор каф. ЭПП, г.н.с. лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Magnitogorsk materials week 2025: материалы научной школы и международной молодежной конференции / под ред. А.М. Песина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2026. 121 с.

ISBN 978-5-9967-3606-5

Представлены тезисы по материалам докладов научной школы и международной молодежной конференции «Magnitogorsk materials week 2025», посвященной вопросам материаловедения, обработки металлов и сплавов давлением.

ISBN 978-5-9967-3606-5

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова, 2026

Пленарная секция

УДК 621.77

ЛАБОРАТОРИЯ «МЕХАНИКА ГРАДИЕНТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ИМ. А.П. ЖИЛЯЕВА»: НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОКАТКИ

**Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Рааб Г.И., Корнилов Г.П.,
Харитонов В.А., Локотунина Н.М., Песин И.А., Бирюкова О.Д.,
Могильных А.Е., Носов Л.В., Барышникова А.М.,
Сверчков А.И., Бочкарев А.А., Лукьянов Е.Д.**
*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
pesin@bk.ru*

Лаборатория была создана в 2018 г. в ходе реализации проекта по Мегагранту по Постановлению П220 Министерства науки и высшего образования. Главным достижением стало проектирование, изготовление и запуск в эксплуатацию нового стана 400 асимметричной прокатки. В 2023 г. стан был официально признан уникальной научной установкой. В 2023 г. коллектив Лаборатории выиграл грант РНФ для лабораторий мирового уровня. В 2025 г. была одержана победа в конкурсе мегагрантов РНФ с ведущим ученым из Китая Н. Ю. Было выполнено несколько других проектов по грантам РФФИ и РНФ, в том числе 2 российско-индийских проекта. В настоящее время в Лаборатории работает 30 человек. В ходе исследований были получены новые схемы симметричной и асимметричной холодной прокатки низко-, средне- и высокоуглеродистых сталей, нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов 1xxx, 2xxx, 5xxx, 6xxx и 7xxx серий. Показана возможность существенного повышения технологической пластичности металлов, что позволяет либо сократить число одного или нескольких технологических циклов «прокатка-отжиг», либо уменьшить толщину готового проката, либо увеличить толщину горячекатаного подката. При горячей прокатке низколегированной стали показана возможность из одной стали, например 09Г2С получать прокат 12 различных классов прочности без изменения химического состава. При этом класс прочности может быть увеличен вдвое. Начальником отдела компьютерного моделирования Лаборатории Д.О. Пустовойтовым подготовлена докторская диссертация. В настоящее время ведутся работы по уменьшению размера зерна горячекатанных прутков с помощью новых процессов объемного асимметричного деформирования.

В новом проекте по мегагранту РНФ ставятся амбициозные задачи получения уникальных свойств автомобильных и хладостойких сталей, титановых и высокоэнтропийных сплавов.

Исследование выполнено за счет Гранта РНФ №25-79-31018

ДИСПЕРСИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МЕЖФАЗНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ КАРБОНИТРИДОВ

Ящук С.В.¹, Масягин Я.А.¹, Быков А.В.²

¹ АО «Северсталь Менеджмент», Москва, Россия

² ПАО «Северсталь», Череповец, Россия

sv.uashchuk@severstal.com

Анализ мировых тенденций показывает растущий спрос и предложение высокотехнологичных материалов, способствующих снижению потребления металла и уменьшению затрат на продукцию и конструкции.

Повышение прочностных характеристик стали при одновременном сохранении её пластичности является сложной задачей. В большинстве случаев применение традиционных механизмов упрочнения стальных изделий сопровождается снижением пластичности. Оптимальное сочетание физических и механических свойств достигается за счет применения современных методов упрочнения стальных продуктов.

Повышение прочности ферритной стали осуществляется посредством микролегирования с использованием ниобия, ванадия и титана, а также с применением специальных режимов прокатки и термической обработки, повышающих их эффективность. Прочность свыше 600 МПа при значительном удлинении достигается в стали с ферритной структурой, характеризующейся размером зерна менее 5 мкм и высокой плотностью частиц избыточных фазы (примерно 5×10^{-4}). Формирование необходимой структуры происходит в межкритическом температурном диапазоне, при этом параметры обработки значительно варьируются в зависимости от конечного продукта.

Механизм формирования данного явления объясняется сегрегацией частиц избыточных фаз на границе межфазного перехода γ - α , где частицы карбидов образуются на плоских фасетках и лишь незначительно растут во время быстрого перемещения ступенек вдоль границ фасетов. На самой ступеньке, из-за её быстрого продвижения, карбид не успевает осадиться. С образованием каждой новой ступеньки формируется новая цепочка дисперсных карбидных частиц.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении возможности реализации механизма межфазного упрочнения в высокопрочных микролегированных сталях.

Объектом исследования являлись стали с различным содержанием микролегирующих (1:Nb0,07,V0,04;2:Nb0,07,Mo0,2;3:Ti0,1;Mo0,2;4:Ti0,08) и легирующих элементов (C-0,05 и Mn – 1,5-8 для всех вариантов)

Заготовки нагревались в камерной электрической печи сопротивления до 1250 ± 10 °С. Затем их подвергали двухступенчатой прокатке, в результате которой их толщина уменьшалась с 50 мм до 5 мм. После прокатки полосы

охлаждали с 800–850 °С до 600–650 °С при различных скоростях охлаждения от 10 до 35 °С/с..

Температура окончания прокатки составляет примерно от 850 до 885 °С, а температура смотки – от 540 до 651 °С. Для большинства экспериментов (сталей 1, 2 и 4) значения предела текучести находятся в диапазоне примерно 430–520 МПа, а предел прочности – около 514–608 МПа в обоих направлениях, при этом значение δ_5 находится в диапазоне низких-средних 20%.

Сталь варианта 3 демонстрирует значительно более высокие значения предела текучести (примерно 694/714 и 674/674 МПа соответственно) и предельной прочности (примерно 777/784 и 750/756 МПа) по сравнению с остальными вариантами. Это связано с реализацией механизма межфазного осаждения частиц карбонитрида титана и значительным увеличением вклада дисперсного упрочнения (см. рисунок 1).

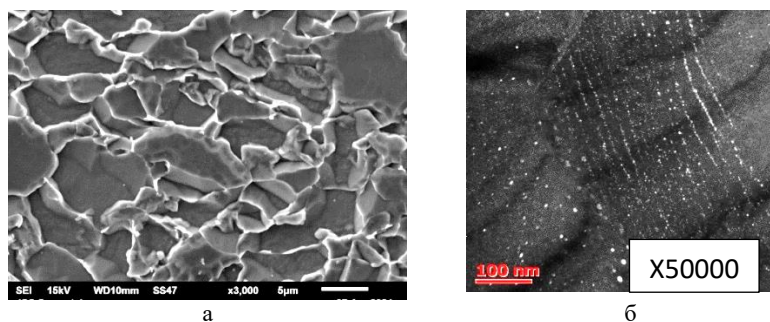


Рис. 1 – Микроструктура стали варианта 3: а – СЭМ x3000; б – ПЭМ x50000

Карбонитриды, полученные путем межфазного осаждения, как правило, характеризуются небольшим размером и равномерным распределением вдоль межфазных границ. Это обеспечивает эффективное торможение движению дислокаций, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению прочности стали при сохранении её пластичности. Кроме того, равномерное распределение усиливает эффект дисперсного упрочнения, что позволяет добиться сбалансированного набора механических свойств при минимизации негативного влияния на пластичность. Соответственно оптимизация технологических параметров — особенно тонкая настройка температуры смотки — может привести либо к усилению механизмов упрочнения (что дает более высокую прочность, но снижает удлинение), либо к снижению.

Исследование подчёркивает важнейшую роль микролегирования, в частности, комбинированного добавления титана и молибдена, в улучшении микроструктуры высокопрочных ферритных сталей. Оптимизация параметров обработки, таких как температура смотки, имеет решающее значение, поскольку обеспечивает точное формирование и распределение вторичных упрочняющих фаз, что в конечном итоге повышает прочность и долговечность материала.

КОМПОЗИТНЫЕ ПРОВОДНИКИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ, ТЕРМОСТОЙКОСТЬ

Мурашкин М.Ю., Медведев А.Е.

*Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия
murashkinmy@uust.ru; m.murashkin.70@gmail.com*

В последнее время наряду с развитием методов литья, модифицирования известных и создания новых проводниковых сплавов на основе алюминия, а также совершенствования режимов их обработки [1-3], активно изучается возможность создания композитных проводников (КП) [3-7]. Варьирование химическим составом сплавов, входящих в КП, методами и условиями обработки позволяет заметно расширить возможности управления их механическими свойствами, электропроводностью и термостойкостью [3, 6, 7].

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на создание высокопрочных и термостойких КП на основе сплавов таких систем как Al-Zr, Al-Mg-Zr и Al-Cu-Mn, где легирующие элементы образуют твердый раствор, а также на основе сплавов, где легирующие элементы имеют практически нулевую растворимость в алюминии – системы Al-Fe. В качестве материала сердечника КП использовали сплавы Al-0.4 мас.% Zr или Al-0.5 мас.% Fe, обладающие высокой электропроводностью, а оболочка выполнялась из высокопрочных сплавов Al-1.17 мас.% Mg-0.34 мас.% Zr, Al-2.0 мас.% Cu-1.7 мас.% Mn или Al-1.7 мас.% Fe. При производстве образцов КП в виде проволоки использовали термомеханическую обработку, включающую интенсивную пластическую деформацию методом равноканального углового прессования по схеме Конформ, а также деформацию холодным волочением.

Основываясь на полученных экспериментальных данных и расчетах, выполненных по правилу смеси (аддитивности), определены рациональные соотношения содержания в КП высокопрочных и электропроводящих алюминиевых сплавов. Установлено, что по уровню прочности и термостойкости композитная проволока может заметно превосходить широко используемую в электротехнике проволоку из сплавов 6000 серии системы Al-Mg-Si [1-3].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-19-00633, <https://rscf.ru/project/25-19-00633/>, № 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018>

Список литературы

1. Wang Y., Zhu L., Niu G., Mao J. Conductive Al alloys: the contradiction between strength and electrical conductivity // *Advanced Engineering Materials*. – 2021. – Vol. 23. – Issue 5. – P. 2001249.
2. Czerwinski F. Aluminum alloys for electrical engineering: a review // *Journal of Materials Science*. – 2024. – Vol. 59 – P. 14847–14892.

3. Murashkin M.Yu., Enikeev N.A., Sauvage X. Potency of severe plastic deformation processes for optimizing combinations of strength and electrical conductivity of lightweight Al-based conductor alloys // *Materials Transactions*. – 2023. – Vol. 64 – Issue 8. – P. 1833–1843.

4. Qi Y., Lapovok R., and Estrin Y. Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods processed by severe plastic deformation // *Journal of Materials Science*. – 2016 – Vol. 51. – P. 6860–6875

5. Lapovok R., Dubrovsky M., Kosinova A., Raab G. Effect of severe plastic deformation on the conductivity and strength of copper-clad aluminium conductors // *Metals* – 2019 – Vol. 9 – Issue 9 – P. 960.

6. Yang C., Masquellier N., Gandiolle C., and Sauvage X. Multifunctional properties of composition graded Al wires // *Scripta Materialia*. – 2020. – Vol. 189 – P. 21–24.

7. Medvedev A.E., Zhukova O.O., Khafizova E.D., Motkov M.M., and Murashkin M.Yu. Composite coaxial wire produced from electromagnetically cast Al–Fe alloys // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2024. – Vol. 65 – № 6 – P. 307–317.

УДК 669.715

АЛЮМИНИЕВО-КАЛЬЦИЕВЫЕ СПЛАВЫ: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Наумова Е.А., Белов Н.А.

*НИТУ «МИСИС», Москва, Россия
jan73@mail.ru*

Благодаря исследованиям А.А.Бочвара в тридцатые годы прошлого века известно, что наилучшими литейными свойствами обладают сплавы эвтектического состава [1]. Однако, в алюминиевой промышленности продолжают широко применяться сплавы эвтектического типа только на основе системы Al–Si (силумины). У этих сплавов много неоспоримых достоинств: превосходные литейные свойства, малая плотность, высокая коррозионная стойкость, низкая стоимость, но современная техника требует создания более прочных, пластичных и жаропрочных сплавов [2]. Поэтому за последние 10 лет было проведено значительное количество исследований других систем легирования: Al–Ni, Al–Ce, Al–Ca. Наибольший интерес представляют сплавы на основе системы Al–Ca, поскольку они имеют малую плотность, высокую коррозионную стойкость, низкую стоимость также, как и силумины. Но, кроме этого, у этих сплавов высокодисперсная структура в литом состоянии, не требующая модифицирования при выплавке, сплавы высокотехнологичны не только при литье, но и в процессе горячей и холодной деформации, имеют более высокие пластические характеристики [3].

На основе всестороннего исследования двойных и многокомпонентных сплавов, содержащих кальций в качестве основного легирующего компонента,

были созданы легкие коррозионностойкие сплавы, упрочняемые наночастицами типа Li_2 без использования операции закалки. Например, из сплава системы Al-Ca-Fe-Si-Zr-Sc в производственных условиях был получен качественный цилиндрический слиток диаметром 150 мм без литейных и структурных дефектов (Рис.1б). Этот материал имеет более низкую плотность и более высокую коррозионную стойкость, прочность и теплостойкость по сравнению с марочными силуминами АК9 и АК12. Сплав имеет многофазную высокодисперсную структуру, которая обеспечивает высокую деформационную технологичность – из него получали бездефектные прутки диаметром 9 мм методом радиально-сдвиговой прокатки, а из прутков получали проволоку до 0,26 мм в диаметре.

Высокопрочные алюминиево-кальциевые сплавы на основе системы Al-Ca-Zn-Mg в литом и деформированном состояниях после термической обработки имеют механические свойства, сопоставимые со сплавами 7xxx серии (предел прочности 450-600 МПа) (Рис.1 – (а)-заготовка поршня; (б)-микроструктура горячего проката (ГП)). Преимущества – высокие литейные свойства, хорошая свариваемость, высокая коррозионная стойкость. Также разработаны на базе этой системы сплавы, упрочняемые без использования закалки.

Алюминиево-кальциевые сплавы с добавками РЗМ (Ce, La), имеющие структуру «естественного композита» с высокой долей интерметаллидных фаз (более 40 масс.%), обладают превосходной деформационной пластичностью, высокими литейными свойствами и повышенной теплостойкостью.

За последние 5 лет была разработана группа заэвтектических алюминиево-кальциевых сплавов (системы Al-Ca-Mn-Ni(Ce)) для замены заэвтектических силуминов при производстве поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Эти сплавы характеризуются структурой, в которой первичные фазы компактной формы и малого размера (не более 25-30 мкм) равномерно распределены на фоне высокодисперсных многофазных эвтектик разного размерного уровня. Такие «естественные композиты» содержат более 40-45 масс.% интерметаллидов в структуре (Рис.1б). При этом, сплавы по литейным свойствам не уступают марочным силуминам, не нуждаются в модифицировании структуры и превосходно деформируются как в горячую, так и в холодную.

Новая группа алюминиевых сплавов, легированных кальцием, начинает применяться в промышленности такими предприятиями, как ОК РУСАЛ при получении чушек и фасонных отливок; на предприятии АО «Завод алюминиевых сплавов» при получении слитков; на предприятии ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» при получении слитков с использованием плавильно-литейного комплекса с электромагнитным кристаллизатором (ЭМК).

Задача сводится к выбору вида тока (постоянный, переменный, импульсный), его режимов (плотность, частота, скважность), способа введения тока в заготовку, поиска оптимальных режимов деформации (разовой и накопленной деформации, скорость деформации), выбор которых зависит от цели (получение НК структур, улучшение качества поверхности, подавление эффекта Ле-Шателье и др.).

Например, технология изготовления имплантатов из биомедицинского титана заключается в штамповке изгибом при температуре значительно ниже температуры рекристаллизации [1]. Импульсный ток амплитудной плотностью $j=10-100 \text{ А/мм}^2$, скважностью $Q=10-20$, длительностью импульса $\tau=100-1000$ мкс подводят к пуансону и матрице. В результате обеспечивается требуемое пластическое формообразование изделий из титановых полуфабрикатов без образования трещин.



Рис. 1 - Z –образный изгиб пластин-имплантатов из биомедицинского титана

Технология получения наноструктуры в сплавах с памятью формы TiNi заключается в прокатке прутка с импульсным током $j=100-120 \text{ А/мм}^2$, $\tau=100-150$ мкс, $Q=10$) при комнатной температуре [2]. Подвод тока осуществляется через один из валков и подающий стол. Метод позволяет получить размер зерна в интервале 60-100 нм (в зависимости от состава сплава).

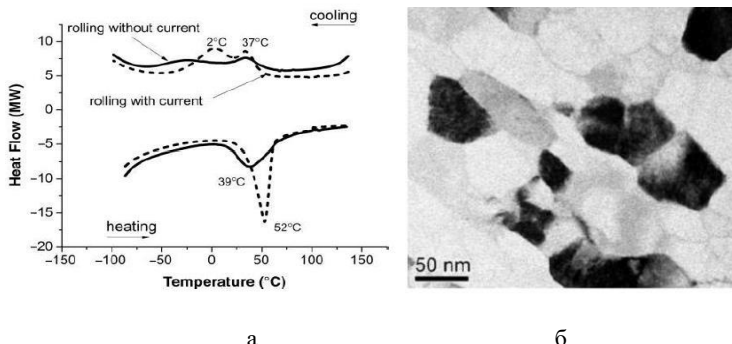


Рис. 2 - Влияние прокатки с током на мартенситные превращения (а) и микроструктуру (б) в сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$

Импульсный ток низкой скважности при режиме: $j= 200 \text{ А/мм}^2$, $\tau=1000$ мкс, может быть применен для подавления эффекта Портевена — Ле Шателье (скачкообразной деформации) в алюминиевых сплавах серии А5XXX.

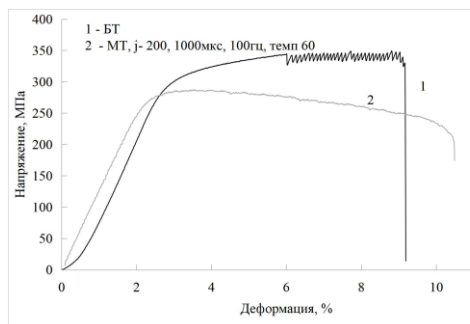


Рис. 3 - Деформационные кривые сплава АМгб при растяжении: 1- без тока; 2- с током $j=200 \text{ А/мм}^2$, $\tau=1 \text{ мс}$, $\nu=100 \text{ Гц}$

Список литературы

1. Корольков О.Е., Пахомов М.А., Столяров В.В. Способ электропластического формования деталей из титановых сплавов. Патент РФ №2781513, 2022.
2. Мисоченко А.А., Столяров В.В., Андреев В.А. Способ получения прутка из сплавов системы титан-никель с эффектом памяти формы. Патент РФ №2828806, 2024.

УДК 669-179

АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА - КАК ИНСТРУМЕНТ АКТИВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ

Рааб Г.И.

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

В последнее время активно развивались методы деформационного воздействия на металлические материалы с целью активного измельчения структуры вплоть до формирования ультрамелких и нанометрических размеров зерен и субзерен. В первую очередь к ним следует отнести методы интенсивной пластической деформации (ИПД), использующие большие разовые деформации при температурах ниже температуры рекристаллизации. Такие структурные состояния позволяли заметно, в 1,5-2 раза, повышать механические свойства металлов и сплавов, сохраняя их конструкционную привлекательность и применяемость. Известно, что большие деформации немонотонные и характеризуются сменой направления векторов главных напряжений и деформаций (закон Шмита) в процессе деформации, что интенсифицирует измельчение зерен. К тому же используется фактор внесенной немонотонно-

сти при многоразовой деформации за счет кантовки заготовок по специальным маршрутам. Следует отметить, что известные методы имеют ограничения по геометрическим размерам обрабатываемых заготовок. Так распространенные методы ИПД, такие как равноканальное угловое прессование (РКУП) и всесторонняя ковка, обеспечивают получение круглых и прямоугольных ультрамелкозернистых (УМЗ) заготовок с максимальными размерами в сечении около 200 мм и длиной порядка 500 мм. Для получения длинномерной продукции (прутки, проволока) с максимальным размером в сечении до 30 мм используют метод РКУП по схеме «Конформ» [1,2,3].

Асимметричную прокатку, в отличие от традиционной, также можно рассматривать как метод обладающий признаками ИПД. Давайте проанализируем - почему?

В первую очередь следует обратить внимание на возможность реализации больших разовых деформаций, которые обеспечиваются наличием в очаге деформации при АП зоны сдвига. Известно, что сдвиговая деформация менее затратная и способствует более активному измельчению исходной структуры. Вклад сдвиговой деформации может быть сопоставим с вкладом относительной деформацией обжатием и общая накопленная деформация за один проход, по сравнению с традиционной прокаткой, может возрастать даже в два раза и составлять величину истинных значений заметно более единицы.

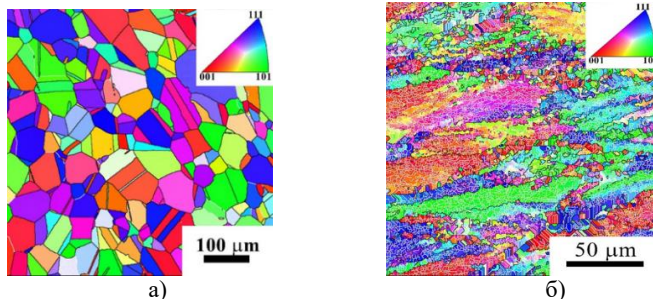
Другим важным фактором является возможность многопроходной АП в условиях внесенной немонотонности за счет кантовки и смены направления прокатки.

Эти два важных фактора позволяют активно управлять, как структурным, так и текстурным состоянием получаемой листовой продукции.

Немаловажным является также снижение силы при АП по сравнению с традиционной прокаткой при равном обжатии и температуре обработки, при этом интенсивность деформационного упрочнения и интенсивность трансформации структуры максимальны [4,5,6].

В этой связи, Асимметричную прокатку можно рассматривать как эффективный деформационный метод активной трансформации структуры вплоть до УМЗ состояний для совершенствования свойств существующего номенклатурного ряда листовой продукции.

В работе представлены примеры формирования асимметричной прокаткой новых структурных и текстурных состояний в листовых образцах и заготовках из металлических материалов и анализ влияния параметров обработки на этот процесс. Один из примеров эффективности АП см. ниже.



Карта разориентировок зерен (EBSD) сплава Cu-Sn - исходная (а) и после АП (б) (1 проход, коэффициент асимметрии – 2, средняя степень относительной деформации ~ 70%, температура прокатки – комнатная.)

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб; Акад. наук Республики Башкортостан, Отд-ние физ.-мат. и техн. наук. - Уфа: Гилем, 2013. - 375 с.
2. Alexander P. Zhilyaev, Anatoly I. Pshenichnyuk, Farid Z. Utyashev, Georgy I. Raab. Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials // ELSEVIER. 2020. 416 p.
3. Kim W.J., Wang J.Y., Choi S.O., Choi H.J., Sohn H.T. Synthesis of ultra high strength Al-Mg-Si alloy sheets by differential speed rolling // Materials Science and Engineering: A. 2009. V. 520. P. 23-28.
4. Segal, V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). Materials. 2018.11, P. 1175 — 1186. <https://doi.org/10.3390/ma11071175>.
5. D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon, Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review, Metals. 2021. 11. P. 956—977. <https://doi.org/10.3390/met11060956>.

Секция «Технологии и методы формирования свойств материалов и изделий»

УДК 621.77

НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ «МЕХАНИКА ГРАДИЕНТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ИМ. А.П. ЖИЛЯЕВА»

**Бирюкова О.Д., Песин И.А., Песин А.М., Рааб Г.И.,
Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е.**

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
fimapatisonchik@inbox.ru, ilya33392@bk.ru*

Лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» была образована в 2018 году с целью разработки наукоемких производственных технологий и опытно-экспериментального оборудования для создания новых градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических материалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений в авиационной, автомобильной, космической и других отраслях промышленности. В рамках лабораторного комплекса задействован стан асимметричной прокатки 400, который является единственным в мире по возможности варьирования отношения скоростей валков до высоких пределов. В связи с этим, данное оборудование признано уникальной научной установкой в 2021 году [1].

Номенклатура материалов, над которыми возможно работать в Лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» очень широка: стали (низко-, средне-, высокоуглеродистые, жаропрочные, жаростойкие, нержавеющие, высокопрочные и т.д.); цветные металлы и сплавы (медь, титан, алюминий, никель и т.д.). Основополагающие эффекты, которых удалось достичь в работе с уникальным оборудованием включают в себя:

1. Эффект уменьшения числа технологических операций и увеличения технологической пластичности при холодной и горячей деформации. Данный эффект наблюдается при прокатке алюминиевых сплавов, низко- и высокоуглеродистых, быстрорежущих и нержавеющих сталей. В данном случае возможно значительно сократить количество проходов или циклов при прокатке, например, с пяти до одного как при прокатке стали Р6М5 или с четырех до одного как при прокатке алюминиевого сплава Д16 с исключением промежуточных отжигов [2].

2. Эффект увеличения прочности при сохранении и/или увеличении пластичности без изменения химического состава. Данный эффект наблюдается при прокатке низкоуглеродистых сталей, например 09Г2С и 20, а также при обработке слоистых материалов из алюминиевых сплавов. Очевидно повышение как предела текучести, так и временного сопротивления в совокупности с

увеличением пластических характеристик, которое сопровождается измельчением зерна в структуре этих сплавов [3].

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Кука 160 / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, М. П. Барышников [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2021. – № 1(16). – С. 9-13.
2. 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.
3. Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О. Д. Бирюкова, Д. О. Пустовойтов, А. М. Песин, А. Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – № 2(37). – С. 38-46.

УДК 539.4.014

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОВОЛОКАХ КРУГЛЫХ СЕЧЕНИЙ ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

Дёмин Д.О., Гребенкин И.А.
МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия
e-mail ddemin@hse.ru

Для решения задачи регрессии, к которой, в частности, относится прогнозирование распределений остаточных напряжений в проволоках круглого сечения после процесса волочения, на сегодняшний день активно применяются различные методы машинного обучения. К ним относятся как, например, уже ставшие классическими: деревья решений (Decision Tree, DT), нейронные сети на базе многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron, MLP), так и набирающие в последнее время популярность модели градиентного бустинга (Gradient Boosting, GB) и, совсем новые, - сети Колмогорова-Арнольда (Kolmogorov–Arnold Network, KAN) [1,2]. Для составления набора данных для процесса обучения была проведена серия расчетов на базе метода конечных элементов для процесса волочения проволок из стали AISI 1020 [3].

Варьируемые параметры, которые также образуют вектор входных значений для всех рассматриваемых моделей, состоял из следующих величин: обжатия (Q), коэффициента пропорциональности калибровочного участка (k), угла деформирующей зоны (α), коэффициента трения (μ) и безразмерного

входной радиус (r), скорости волочения (v). При этом на выходе получаются значения величины главных остаточных напряжений $\sigma_i(r)$, где $i = 1, 2, 3$.

В результате процесса обучения и оптимизации гиперпараметров были подготовлены наборы моделей для каждого из методов, среди которых выбились те, что обеспечивают наименьшую ошибку по нескольким метрикам. В качестве метрик были рассмотрены RMSE, MSE, MAE и R^2 . В таблице 1 приведены значения соответствующих метрик для выбранных методов, которые дают прогнозы для компоненты главных остаточных напряжений σ_2 .

Таблица 1 – Значения метрик при прогнозировании компоненты главных остаточных напряжений σ_2 .

	DT	GB	MLP	KAN
RMSE	7.15	6.69	6.82	15.74
MSE	51.07	44.82	46.53	247.59
MAE	3.88	3.77	4.25	11.58
R^2	0.99	0.99	0.99	0.95

Исходя из результатов, представленных в таблице 1, можно сделать вывод, что наименьшая ошибка в получаемых прогнозах обеспечивается моделями на основе градиентного бустинга и нейронными сетями на базе многослойного перцептрона. Примеры прогнозов распределений искомых величин остаточных напряжений, получаемых подготовленными моделями, представлены на рис.1.

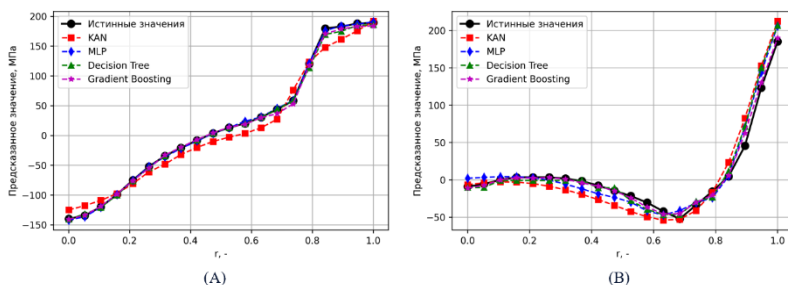


Рис. 1 Распределения главных остаточных напряжений (А) σ_1 при $Q = 5\%$, $k = 0.1$, $\alpha = 4^\circ$, $\mu = 0.025$, $v = 20$ м/мин (В) σ_2 при $Q = 1.5\%$, $k = 0$, $\alpha = 20^\circ$, $\mu = 0.100$, $v = 20$ м/мин

Как видно из рис. 1 в ряде случаев градиентный бустинг действительно может расхититься меньше с конечным результатом, чем прогнозы, полученные с помощью нейронных сетей. Модели на основе метода решающих деревьев, несмотря на представленные распределения не рекомендуются для дальнейшего использования, так как их склонность к переобучению в значительной степени снижает обобщающую предсказательную способность.

На основании результатов проведенного исследования можно сделать вывод, что наиболее эффективными методами машинного обучения для решения поставленной задачи являются метод градиентного бустинга и нейронные сети на базе многослойного перцептрона, которые потенциально можно использовать как инструменты для решения обратных задач, например - нахождения параметров технологического процесса, при которых достигается требуемый вид распределений остаточных напряжений или накопленных деформаций.

Список литературы

1. Liu Z. et al. Kan: Kolmogorov-arnold networks //arXiv preprint arXiv:2404.19756. – 2024.
2. Ji T., Hou Y., Zhang D. A comprehensive survey on kolmogorov arnold networks (kan) //arXiv preprint arXiv:2407.11075. – 2024.
3. Kui C. F. et al. The dynamic characteristics and constitutive model of 1020 steel //Emerging Materials Research. – 2017. – Т. 6. – №. 1. – С. 124-131.

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

**Лукьянов Е.Д., Харитонов В.А., Локотунина Н.М.,
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Усанов М.Ю., Песин И.А.**

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия edluku-
anov@png8.ru*

Одной из наиболее актуальных научно-технических и технологических проблем производства металлических длинномерных изделий является разработка ресурсосберегающих технологических процессов, обеспечивающих одновременное сочетание высокой прочности и пластичности металла. Традиционно такое сочетание свойств достигается с помощью одной или нескольких операций термической обработки, которые увеличивают производственный цикл и приводят к повышению затрат.

Другим перспективным способом получения улучшенных механических свойств металлов и сплавов является процесс динамической рекристаллизации. Одним из методов активизации и прохождения указанного процесса является асимметричная прокатка. Исследования в области асимметричной прокатки проводятся в МГТУ им. Г.И. Носова в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» с использованием стана 400 листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков. Высокий градиент деформации сдвига в сочетании с повышением температуры при асимметричной прокатке обеспечивает термомеханически активированное зародышеобра-

зование и прохождение динамической рекристаллизации с формированием в обрабатываемых металлах и сплавах градиентной структуры и улучшенных пластических свойств [1-3].

Среди многих реализуемых схем асимметричной прокатки выделяется скоростная асимметрия, создаваемая для регулирования процесса деформации. В отличие от других видов асимметрии она более эффективна и проста в реализации на практике.

В настоящее время применение асимметричной сортовой прокатки весьма ограничено, поэтому в работе выполнена оценка возможностей ее использования при прокатке в двухвалковых клетях с применением традиционных калибровок, а также при прокатке в клетях с четырехвалковыми косорасположенными калибрами [4].

Целью исследования на данном этапе являлось изучение влияния скоростной асимметрии валков на характеристики процесса деформации металла. В рамках исследования проведено сравнительное моделирование процесса симметричной и асимметричной прокатки в двухвалковых и в четырехвалковых калибрах.

Аналитические исследования показали, что с увеличением соотношения скоростей валков снижается усилие прокатки и повышается значение накопленной степени деформации по сечению заготовки. Более высокий уровень накопленной степени деформации отмечается в заготовке со стороны валка, имеющего большую скорость.

Результаты исследования доказывают эффективность использования асимметричной прокатки в двухвалковых и четырехвалковых калибрах по сравнению с симметричной. Использование процесса асимметричной прокатки позволит улучшить механические свойства металла за счет получения более мелкозернистой структуры.

Все вышесказанное говорит об эффективности скоростной асимметричной прокатки и целесообразности ее использования в сортовом производстве.

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

Список литературы

1. Песин А.М. Наноструктурирование металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации / А.М. Песин, А.П. Жилиев, Г.И. Рааб и др. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 259 с.
2. Песин А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия, — 2020. — № 3(20). — С. 81-96. — DOI: 10.14529/met200309.
3. Харитонов В.А. Скоростная асимметрия при холодной прокатке круглой заготовки в цилиндрических валках / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов, Н.М. Локотунина и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, — 2024. — № 4(22). — С. 89-97. — DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97.

4. Стеблянко В.Л. Исследование асимметричных случаев прокатки в четырехвалковых калибрах / В.Л. Стеблянко, В.А. Ткаченко, В.А. Мамкин и др. // Обработка металлов давлением: межвузовский сборник. Вып. 5. Свердловск: Изд-во УПИ им.С.М. Кирова, — 1978. С. 70 -77.

УДК 621.778

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПОДЪЕМНЫХ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Зайнуллин А.И., Харитонов В.А.

*ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия
azazabmk@mail.ru*

Подъемные стальные канаты, являясь массовым видом металлопродукции с глубокой степенью переработки и высокой добавленной стоимостью [1], находят в настоящее время широкое применение практически во всех стратегически важных отраслях экономики Российской Федерации. В этих отраслях, наряду с подъемными канатами отечественного производства, массово применяются и импортные канаты. Однако, в настоящее время, по причине действия санкций в отношении России, наблюдается значительное снижение их импорта. В этих условиях, одной из основных задач для предприятий метизного предела черной металлургии Российской Федерации является повышение конкурентоспособности производимых стальных канатов. При этом необходимо учитывать не только необходимость замены импортных канатов, применяющихся на различных производственных площадках отечественными, но и возможность конкуренции с ведущими производителями на мировом рынке.

Одним из эффективных способов повышения конкурентоспособности стальных канатов является разработка инновационных видов данного металлоизделия. В условиях предприятия ОАО «ММК-МЕТИЗ» в рамках данной концепции проведены аналитические и экспериментальные работы, в результате которых освоено производство многопрядного стального гибкого каната конструкции $1+5+5/5(1 \times 7(1+6)+5 \times 7(1+6)+5 \times 7(1+6)/5 \times 7(1+6))$, с повышенными эксплуатационными свойствами [2]. Данный канат способен заменить не только отечественные канаты, производимые согласно требованиям ГОСТ 3081-80, но и импортные канаты по EN 12385-4-2015, широко применяющиеся для оснастки различных грузоподъемных систем. Следует отметить и инновационный способ изготовления экспериментального каната, который позволяет снизить показатель себестоимости производства. При изготовлении экспериментального каната применялась канатобьющая машина сигарного типа, в то время как для производства стальных канатов подобной конструкции в мировой практике применяются специализированные канатобьющие машины корзиночного типа с числом кареток 16 и более или модульные системы канатобьющих машин корзиночного типа, работающих в тандеме.

Необходимо отметить и то, что в производстве высококачественных, конкурентоспособных стальных канатов одну из основных ролей играет качество канатной проволоки. В направлении повышения качества проволоки, составляющей конструкцию каната, на сегодняшний день, перспективным направлением является применение новых способов обработки металлов давлением. Одним из таких способов является модульно-комбинированное волочение проволоки [3], подразумевающее совмещение процессов асимметричной скоростной прокатки в 2-х и многовалковых калибрах и традиционного волочения в монолитных волокнах, что позволит повысить комплекс механических и пластических свойств канатной проволоки и стальных канатов.

Список литературы

1. Харитонов В.А. Применение калибрующего обжатия при производстве стальных канатов: монография / В.А. Харитонов, А.Б. Иванцов, Т.А. Лаптева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 102 с.
2. Пат. RU 2822146. МПК D07B 1/10 (2006/01). Канат стальной и способ его изготовления / Носков С.Е., Творогов Д.С., Басареев Р.З., Зайнуллин А.И., Юферова Ю.П. // Заявл. 28.05.2023; опубл. 02.07.2024. Бюл. №19.
3. Харитонов В.А. Модульно-комбинированное волочение проволоки: монография / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – 107 с.

УДК 62-83:621.771

СТАБИЛИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Бочкарев А.А., Корнилов Г.П.

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова
analogsynth@mail.ru*

Управляемая асимметричная прокатка на действующих станах осуществляется двумя основными способами – изменением скоростей приводных двигателей (скоростная асимметрия) и применением рабочих валков различного диаметра (геометрическая асимметрия). Рассогласование линейных скоростей ведущего V_1 и ведомого V_2 валков при этом определяется коэффициентом асимметрии K_{ac} :

$$K_{ac} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_1 R_1}{\omega_2 R_2}.$$

На прокатных станах с индивидуальным электроприводом наиболее предпочтительно использовать скоростную асимметрию ($\omega_1 \neq \omega_2$). Это объясняется, в первую очередь, широким диапазоном изменения величины K_{ac} . При

неравенстве радиусов валков ($R_1 \neq R_2$) значение K_{ac} остаётся неизменным во всех режимах работы, однако достижение величины $K_{ac} > 1,05 \dots 1,1$ на практике затруднено.

Проведение асимметричной прокатки с предельными рассогласованиями скоростей ($K_{ac} > 1,5$), требует, в том числе, поддержания установленной величины коэффициента асимметрии [1]. Искажение фактического значения K_{ac} возможно по следующим причинам:

1. Работа электропривода ведущего валка в режиме ограничения тока или момента.

2. Длительная работа электропривода ведомого валка в генераторном режиме.

3. Действие технологических систем автоматического регулирования (САР) (натяжения, толщины, геометрических размеров полосы) на регуляторы скорости электроприводов валков.

Следует отметить, что ограничения 1 и 2 являются жёсткими – их устранение без внесения существенных изменений в конструкцию и состав основного электрооборудования стана, как правило, невозможно. Влияние технологических систем автоматического регулирования на заданное рассогласование скоростей, напротив, устранимо. В этом случае целесообразно использование корректирующих устройств, действие которых на регуляторы скорости стабилизирует величину K_{ac} . Один из разработанных вариантов построения системы стабилизации коэффициента асимметрии показан на рис. 1. Данная система выполнена как САР по отклонению и состоит непосредственно из регулятора коэффициента асимметрии и блока вычисления коэффициента асимметрии. Регулятор асимметрии (РА) выполняется пропорционально-интегральным, что позволяет добиться астатического регулирования величины K_{ac} . В симметричном режиме, когда заданный коэффициент асимметрии $K_{ac,з}$ равен единице, РА выведен из работы; на входы регуляторов скорости поступают одинаковые сигналы заданий $\omega_3 = \omega_{1,3} = \omega_{2,3}$. При переходе в асимметричный режим с $K_{ac,з} > 1$ на выходе релейного элемента (РЭ) формируется логический сигнал «Асимметрия активна» $g_{ac} = 1$ – интегральная часть РА вводится в работу, а управляемый переключатель (УП) подаёт сигнал задания скорости с учётом $K_{ac,з}$ в САР электропривода ведомого валка. Ведущий валок при этом является базовым и вращается с неизменной скоростью.

Исследование предложенной САР коэффициента асимметрии выполнены на компьютерной модели главного электропривода лабораторно-промышленного стана «400» асимметричной прокатки. Полученные результаты подтверждают эффективность астатического регулирования рассогласования скоростей при широком диапазоне изменения возмущающих воздействий на входе регуляторов скорости электроприводов.

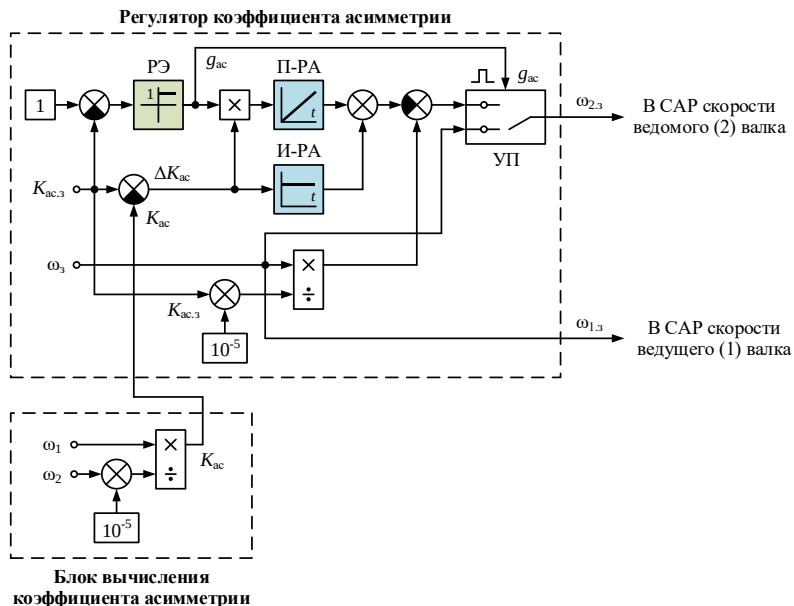


Рис. 1 – Структурная схема системы автоматического регулирования коэффициента асимметрии

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Limitations of Electric Drive and Local Control Systems in Asymmetric Rolling of Fine-Grained Steels / A.M. Pesin, G.P. Kornilov, A.A. Bochkarev, D.O. Pustovoytov // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Т. 2892, №. 1. – С. 012005. – DOI: 10.1088/1742-6596/2892/1/012005.

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AL–ZN–MG–CA–FE В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Черкасов С.О.^{1,2}, Белов Н.А.^{1,2}, Тимофеев В.Н.², Мотков М.М.²

¹ НИТУ МИСИС, кафедра обработки металлов давлением, Москва, Россия

² СФУ, кафедра электротехники и электротехнологии, Красноярск, Россия
ch3rkasov@gmail.com

Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg обладают ограниченной свариваемостью из-за горячеломкости. Для устранения этого недостатка ранее предложено легирование эвтектикообразующими элементами, в частности никелем и железом, что привело к созданию сплава AZ6NF, вошедшего в ГОСТ 4784-2019 [1]. Однако никель существенно снижает коррозионную стойкость. В качестве альтернативы никелю целесообразно использовать кальций, который в сочетании с железом образует эвтектические фазы (Al₁₀CaFe₂, (Al,Zn)₄Ca), уменьшающие горячеломкость и при этом не ухудшающие коррозионные свойства. По данным [2-3], добавки Ca и Fe сохраняют высокий эффект дисперсионного упрочнения.

Цель работы заключалась в исследовании возможности получения проволоки из экспериментального сплава АП-1: Zn ~7,5 %, Mg ~2,5 %, Ca ~0,8 %, Fe ~0,8 %, Zr ~0,2 %, Sc ~0,1 %, приготовленного методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), и оценки его структуры и свойств на всех стадиях деформационно-термической обработки (ДТО).

Заготовки Ø13 мм получены методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) при скорости охлаждения >10³ К/с. После гомогенизации (350 °С, 3 ч + 450 °С, 3 ч) заготовки подвергали прессованию методом Конформ (Ø3,7 мм, 400 °С), затем волочению до Ø1,2 мм с промежуточными отжигами. Исследовалась микроструктура (СЭМ), проводились микрорентгено-спектральный анализ (МРСА) и измерения твердости (HV) на всех этапах ДТО.

На рис. 1 представлена эволюция структуры сплава АП-1 при различных стадиях обработки. Исходная литая заготовка, полученная методом ЭМК, характеризуется равномерной доэвтектической структурой с мелкими дендритными ячейками (~5 мкм) и дисперсными включениями Ca- и Fe-содержащих фаз по границам. После гомогенизации (350 °С, 3 ч + 450 °С, 3 ч) структура стала более однородной за счет растворения значительной части Mg- и Zn-содержащих фаз в алюминиевой матрице. Прессованный прутки, полученный методом Конформ при 400 °С, отличается равномерным распределением глобулярных включений кальций- и железосодержащих фаз с характерным размером менее 1 мкм. В проволоке после волочения и промежуточных отжигов размер включений снижается до субмикронного уровня (<500 нм), что обеспечивает формирование мелкодисперсной, композитоподобной структуры.

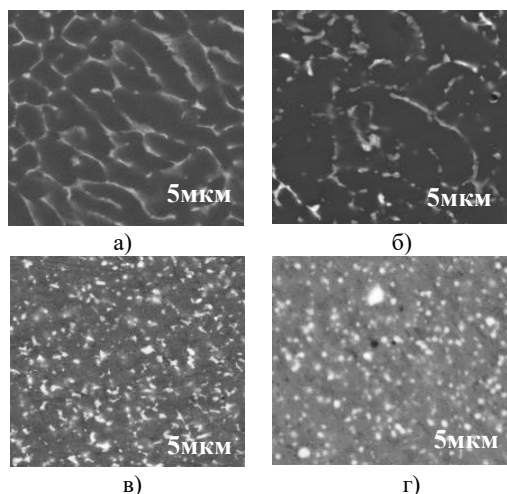


Рис. 1 – Структура образцов сплава АП1 в различных состояниях:
а – ЭМК прутков; б – ЭМК прутков после 350 °С, 3 ч +450 °С, 3 ч;
в – горячепрессованный пруток, полученный методом Конформ при 400°С;
г) проволока

Измерения твердости подтвердили, что структура прутка сохраняет высокую упрочняемость после термической обработки. На рис. 2 показана зависимость твердости горячепрессованного прутка от температуры старения. Максимальные значения (~170 НВ) достигаются при 150 °С.

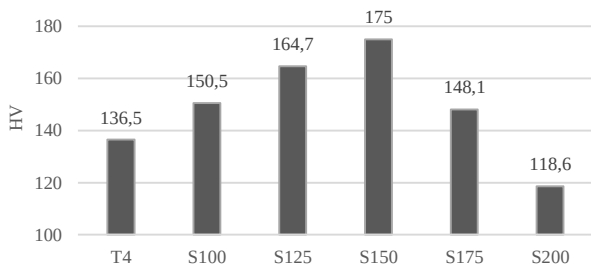


Рис. 2 – Зависимость твердости горячепрессованного прутка, полученного методом Конформ от режима термообработки

Таким образом, выбранная схема деформационно-термической обработки обеспечивает формирование дисперсной структуры, характеризующейся равномерным распределением глобулярных Ca-Fe фаз (<500 нм) позволяющей достичь как высокого упрочнения, так и сохранить достаточную пластичность,

что говорит о потенциале сплава АП-1 для получения из него сварочной проволоки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-19-00128-П (<https://rscf.ru/project/22-19-00128/>)

Список литературы

1. ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Москва: Стандартинформ, 2019-09-01
2. N.A.Belov, E.A.Naumova, T.K.Akopyan “Effect of calcium on structure, phase composition and hardening of Al-Zn-Mg alloys containing up to 12 wt.%Zn” Materials Research-Ibero-American Journal of Materials 2015 .- Vol. 18 , Issue 6 .- C. 1384 – 1391.
3. Е.А. Наумова, Н.А. Белов, М.А. Васина, В.В. Дорошенко «Обоснование выбора состава высокопрочного алюминиево-кальциевого сплава», Цветные металлы, 2019, №5, с.53-59.

УДК 217.778

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ

Мелихов Е.Д., Усанов М.Ю., Харитонов В.А., Мелихова Н.В.
*Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
barracuda_m@mail.ru*

Проволока из черных и цветных металлов и их сплавов широко применяется практически во всех отраслях отечественной и мировой экономик, как готовое изделие (арматурная проволока), так и в виде заготовки (канатная, пружинная и т.п.).

На показатели качества и стоимость проволоки, наряду с заготовкой (канатной), большое влияние оказывает применяемый способ технический процесс ее изготовления, в котором определяющую роль играет основная операция технологического процесса.

В массовом производстве проволоки сегодня основными операциями являются способы обработки металлов давлением (ОМД). Это прежде всего волочение в монолитных (роликовых) волоках, холодная (теплая) прокатка на специализированных прокатных станах с двух и многовалковыми калибрами, прессование. Используются также комбинированные процессы, в которых совмещаются два или более способов ОМД.

Выбор рационального способа ОМД определяется его механической схемой деформации, контактными и температурно-скоростными условиями, имеющийся инфраструктурой для его промышленного применения (оборудование, инструмент, технологические смазки и т.п.). Тысячелетняя практика производства проволоки сегодня на первое место поставила волочение в мо-

нолитных волоках. И это неоспоримо для проволоки диаметром 2,0 мм и меньше из хорошо деформируемых материалов. С увеличением диаметра проволоки и понижением ее деформируемости преимущества этого способа резко падают. Частично (для определенных диаметров) эти вопросы можно решить, используя современные методы математического моделирования способа волочения в монолитных волоках, а также применяя волочение в роликовых волоках и холодную сортовую прокатку. Но это, особенно последнее, как показывает накопленный опыт, кардинально меняет действующую структуру производства проволоки, значительно ее усложняя.

Схемы совмещения операций, построенные на принципе усиления достоинств и уменьшения недостатков применяемых способов ОМД позволяют повысить эффективность действующих и разработать инновационные технологические процессы изготовления проволоки. Однако при этом необходимо обеспечить максимально возможное использование существующих принципов, подходов и приемов в организации производства. Кроме того, при этом повышаются требования к проектированию технологий на основе применяемых современных методов исследования и конструирования оборудования, как лабораторного, так и промышленного.

С учетом этого, а также имеющегося опыта в проектировании и промышленной эксплуатации подобного оборудования, нами предложена схема, которая строится на принципах: чистовой инструмент - монолитная волока, основное технологичное оборудование - классическая многократная волочильная машина. Повышение эффективности достигается применением нового модуля: прокатный двухвалковый министан с индивидуальным регулируемым по скорости приводом валков - монолитная волока. Этот модуль позволяет реализовать асимметричную прокатку, прессование, волочение в объеме единого очага деформации, что дает возможность получать на действующем оборудовании проволоку высокой точности с ультрамелкодисперсной равномерной микроструктурой по сечению и благоприятным напряженным состоянием в ее объеме. При этом за счет уменьшения кратности волочения значительно сокращаются затраты на изготовление проволоки.

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

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Калинина Н.А.^{1,2}, Швейкин В.П.², Мальцева Т.В.¹, Пугачева Н.Б.², Ра-
зинкин А.В.¹, Каманцев И.С.²**

¹ АО «КУМЗ», г. Каменск-Уральский, Россия

² ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
Kalinina_NA@mail.ru

Целью работы является разработка рациональной универсальной технологии термомеханической обработки технологических отходов прессового производства алюминиевых сплавов, для последующего получения из них заготовок для прессования в технологической цепочке получения изделий из алюминиевых сплавов АД33 и Д16 в условиях АО «КУМЗ».

Актуальность тематики обусловлена важностью экологизации металлургического производства и минимизацией энергетических затрат.

Одним из основных способов получения длинномерных заготовок методом горячей пластической деформации алюминиевых сплавов на АО «КУМЗ» является процесс прессования. Оптимальную технологию прессования определяют следующие показатели: метод прессования, размеры слитка, температурный интервал, скорость прессования, форма каналов и их расположение на матрице, вид контактного трения, силовые параметры [1-9]. Чаще всего сплошные профили из алюминиевых сплавов получают горячим прессованием на горизонтальных гидравлических прессах с прямым и обратным истечением металла без технологической смазки в одно- и многоканальные матрицы. Основным методом получения прессовых заготовок на АО «КУМЗ» является прессование с прямым истечением металла.

В условиях предприятия производство крупногабаритных прутков производится на горизонтальном прессе усилием 120 МН из контейнера Ø800 мм с предварительным нагревом. Прессование производят прямым методом без применения смазки. Нагрев слитков перед прессованием производится в двухкамерных печах конвейерного типа. Далее выполняется обрезка технологических отходов (в т.ч. выходных концов) на ленточной или дисковой пиле. После этапа прессования выходные концы как технологические отходы направляются в переплав. В тоже время они могут быть направлены на термическую обработку для корректировки структуры и повторно отпрессованы.

Для оценки параметров микроструктуры и механических свойств пресс-изделий из алюминиевых сплавов АД33 и Д16 были проведены комплексные исследования выходных концов в зависимости от температуры отжига.

Рентгеноструктурный анализ образцов показал, что только в слитке сплава Д16 до прессования металл находится в изотропном, нетекстурованном состоянии. Для сплава Д16 после прессования и сплава АД33 во всех исследо-

ванных состояниях характерно наличие аксиальной кристаллографической текстуры разных типов.

По результатам ДСК исследований установлен возможный температурный режим термической обработки выходных концов прессовой заготовки для дальнейшего передела.

Опытным путем установлено, что наиболее оптимальной температурой для отжига выходных концов прессовых полуфабрикатов является температура 390°C при длительности выдержки, регламентированной технологическими инструкциями предприятия, исходя из марки сплава и поперечного сечения заготовки. Также показано, что данная температура приводит к формированию структуры прессованной заготовки выходного конца близкой к уровню исходного недеформированного материала, что позволяет выполнить последующий рециклинг материала исключая металлургический передел.

Результаты проведенных исследований показали, что целесообразно проведение промежуточного отжига выходных концов из исследованных сплавов АД33 и Д16 при температурах 380-400°C. Данные диапазоны применимы для обоих сплавов, что позволяет оптимизировать процессы термообработки за счет одновременного отжига исследованных типов сплавов, следовательно снизить экономические затраты на передел.

Таким образом, учитывая особенности производственного процесса АО «КУМЗ», разработаны технологические режимы промежуточного отжига выходных концов пресс-изделий для последующего прессования на меньший диаметр, с возможностью одновременной садки сплавов исследованных составов с целью экономии энергетических ресурсов.

Список литературы

1. Технология прессования профилей из легких сплавов: метод. указания / сост. В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, Е.В. Арышенский. - Самара: Изд-во СГАУ, 2012. 54 с.
2. Бережной В.Л., Щерба В.Н., Батулин А.И. Прессование с активным действием сил трения. – М.: Металлургия, 1988. – 296 с.
3. Гун Г.Я., Яковлев В.Н., Прудковский Б.А. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 362 с.
4. Корнилов В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов. – Красноярск, 1993. – 216 с.
5. Кузьменко В.А. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 108 с.
6. Райтбарг Л.Х. Производство прессованных профилей. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
7. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
8. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник. – М.: Металлургия, 1974. – 432 с.
9. И.А. Шур. Технологическое оборудование для прессования металла. – М.: Металлургия, 1994. – 96 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА 1407

Иванова А.О., Белов Н.А., Градобоев А.Ю.

Университет науки и технологий МИСиС, г. Москва, Россия

a.o.ivanova7@gmail.com

В настоящий момент представляет интерес усовершенствование технологий производства полуфабрикатов из известных алюминиевых сплавов с целью обеспечения требуемого уровня свойств. Общеизвестно, что в рамках одной марки сплава посредством изменения параметров технологии на каждом из этапов производства возможно получить широкий диапазон свойств, причем не только механических, но и коррозионных. Данная практика популярна зарубежом, где в стандартах на поставку полуфабрикатов для одной марки используется большое количество состояний поставки. Так в соответствии со стандартом EN 485-2 [1] листы из сплава 3003, например, могут поставляться в 13 разнообразных состояниях, при этом возможно получить прочность от 95 МПа до 210 МПа. В Российском стандарте ГОСТ 21631 [2] для сплава-аналога АМц предусмотрено только 4 состояния поставки с интервалом по пределу прочности от 90 МПа до 185 МПа.

Сплав 1407 является перспективной разработкой ОК РУСАЛ и в настоящее время серийно применен в конструкции вагонов-цистерн для перевозки высоко агрессивных грузов, таких как, например, концентрированная азотная кислота [3-4]. Сплав относится к системе Al-Mn. Сплавы данной системы обладают высокой коррозионной стойкостью, отличной свариваемостью, формуемостью, тепло- и электропроводностью. Однако уровень их прочностных свойств остается невысоким, что ограничивает их широкое применение. Увеличение прочности без потери коррозионной стойкости является перспективной задачей для разработчиков. Легирование редкими и редко-земельными металлами такими как Sc, Hf, Er, Y и т.д., является хорошо зарекомендовавшим себя способом повышения прочности алюминиевых сплавов без потери их пластичности и коррозионной стойкости [5-6]. Однако, как правило, стоимость указанных элементов оказывает существенное влияние на себестоимость производства и для сплавов типа АМц данное направление является бесперспективным. Причиной является тот факт, что уровень прочности, который возможно достигнуть после легирования сплава типа АМц, например, добавкой 0,1% скандия и, как следствие, удорожанием его на ~3000 \$/т, возможно получить на более дешевом сплаве типа АМг без использования дорогостоящего легирования.

В работе рассмотрено влияние режима гомогенизационного отжига слитков из сплава 1407 и технологии получения катаных полуфабрикатов с различной степенью нагартовки на механические и коррозионные свойства. Применение режимов гомогенизационного отжига, обеспечивающего равномерное

плотное выделение мелкодисперсных частиц вторичных фаз в процессе гетерогенизации, приводит к снижению стойкости полуфабрикатов к коррозии. Применение высокотемпературных режимов отжига приводит к крупным выделениям вторичных фаз, что негативно сказывается на эффективности упрочнения этими частицами.

В работе также показано, что с увеличением степени нагартовки листов происходит рост прочностных характеристик с одновременным снижением стойкости листов к коррозии. Применение технологий, предусматривающих в качестве завершающей операции после прокатки неполный отжиг полностью нагартованного материала, позволяет повысить стойкость сплава к коррозии. При этом уровень прочностных характеристик листов, полученных по двум технологиям, находится на одном уровне.

Список литературы

1. EN 485-2:2008. Aluminium and aluminium alloys – Sheet, strip and plate – Part 2: Mechanical properties. – Brussels: European committee for standardization, 2008
2. ГОСТ 21631-2023. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024
3. Иванова А.О., Рябов Д.К., Градобоев А.Ю., Никитина М.А., Шмаков В.Е., Ваганов А.В. Сравнительные исследования сварных соединений плит из сплава 1407ч, полученных методами сварки трения с перемешиванием и аргодуговой сварки//Сварка и Диагностика. – 2023. - №5. – С. 13-17
4. Иванова А.О., Манн В.Х., Крохин А.Ю., Вахромов Р.О., Рябов Д.К., Градобоев А.Ю., Гусев Д.В., Шуртаков А.К. Новый свариваемый коррозионностойкий алюминиевый сплав Р-1407//Сборник трудов конференции «Цветные металлы и минералы – 2019». – 2019. – С. 376-382
5. Long L., Pan Q.L., Li M.J., Ye J., Sun Y.Q., Wang W.Y., Luo Y.H., Li X.Y., Peng Z.W., Liu S.H. Study on microstructure and mechanical properties of 3003 alloys with scandium and copper addition//Vacuum – 2020. – Vol. 173. – 109112
6. Li Z., Zhang Z., Chen X.-G. Improvement in the mechanical properties and creep resistance of Al-Mn-Mg 3004 alloy with Sc and Zr addition//Materials Science and Engineering:A – 2018. – Vol. 729. – P. 196-207

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПОРНОГО ВИТКА И ОПОРЫ. ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРУЖИН

Ульянов С.А.^{1,2}

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

² *ООО «Уральский Пружинный Завод», г. Белорецк, Россия
Uljanov1998@yandex.ru*

В ходе серии экспериментов, проведенных на ООО «Уральский Пружинный Завод», и моделирования работы пружин различных конфигураций, имеющих шлифовку опорных витков, определена особенность взаимодействия опорного витка пружины с плоской опорной поверхностью. Формообразование опорных витков пружины производится на следующих технологических операциях: острение концов прутка (при необходимости), навивка пружины в горячем или холодном состоянии, шлифовка опорных витков пружины.

При отсутствии приложенной нагрузки пружина контактирует с чашкой всей шлифованной поверхностью. Однако, сотрудниками научно-исследовательского отдела ООО «Уральский Пружинный Завод» при анализе процесса обжатия пружины до рабочих высот зафиксировано, что часть шлифованного витка отходит от опоры и на поверхности образуются зазоры, достигающие 0,4 мм и более. Зазоры формируют на поверхности витка локализованные области контакта с опорой. Образованная система контактов опорного витка с плоской поверхностью чашки определяет напряженно-деформированное состояние в теле пружины, управление которым открывает возможность повышения циклической долговечности пружины.

Моделирование методом конечных элементов подтвердило экспериментальные данные о неполноте контактной поверхности между шлифованным витком и плоской чашкой. При обжатии пружины до рабочей нагрузки опорный виток контактирует с опорой тремя областями, площадь которых в среднем составляет 20-30 % от общей площади шлифованной поверхности. Области контакта определяют схему работы пружины, которая формирует картину напряженного состояния всей неконтактной части упругого элемента. Также области контакта своими центрами давления задают положение и перемещение линии действия силы (силовой оси) пружины при нагружении.

Область наиболее вероятного разрушения пружины по критерию величины максимальных касательных напряжений при испытаниях на циклическую долговечность лежит на внутренней поверхности рабочих витков. Причиной этого является наложение эпюры напряжений от действия сжимающего усилия Q и момента кручения $M_{кр}$ [1], что в сумме дает рост напряжений на внутренней поверхности витков пружины с одновременной разгрузкой их внешней поверхности. В зависимости от количества незашлифованных витков изменяется вероятность разрушения внутренней поверхности рабочих витков пружины. Наиболее выгодным вариантом является количество витков ($n_1 +$

0,3), где n_i – количество целых незашлифованных витков [2]. Снижение пиков максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$ в критических областях объема пружины за счет изготовления пружины с рациональным количеством витков в рабочей части определяет возможность получения повышенного уровня циклической долговечности.

Снижение максимумов касательных напряжений $\tau_{\max}$ по отношению к минимуму по внутренней поверхности пружины, при формировании оптимального количества незашлифованных витков, составляет: для 0,5 млн. циклов испытаний – до 14 %, для 6,0 млн. циклов испытаний – до 68 %. Соответственно, данная разница касательных напряжений критических зон составляет до 45 МПа [2], что для пружинных сталей является значимым снижением максимальных касательных напряжений, смещающим экспериментальные точки кривой Веллера [3].

Список литературы

1. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с., ил. – (Б-ка расчетчика).
2. Пат. 038686 РФ, МПК В21F 35/00, F16F 1/06, В61F 5/16. Пружина сжатия витая с повышенным уровнем циклической долговечности / Д.С. Лукманов, А.Б. Иванцов // Заявл. 27.03.2019; опубл. 05.10.2021.
3. ГОСТ 32208-2013 «Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Метод испытаний на циклическую долговечность»

УДК 67.017

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК SC НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЕМОСТЬ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА 5182

Градобоев А.Ю.¹, Иванова А.О.¹, Белов Н.А.¹, Никитина М.А.²

¹ Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Россия

² Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
agradoboev@mail.ru

Снижение массы автомобилей является приоритетной задачей в современной автомобилестроительной промышленности, направленной на улучшение экологической обстановки путем уменьшения выбросов CO₂. Одним из эффективных способов достижения этой цели является использование алюминиевых сплавов, обладающих высокой весовой эффективностью. Листы из сплава 5182 широко применяются для изготовления кузовных элементов методом глубокой вытяжки (BfW). Тем не менее, для дальнейшего повышения весовой эффективности конструкций необходима разработка сплавов с улучшенными механическими свойствами без снижения технологичности при обработке.

Добавки скандия (Sc) и циркония (Zr), особенно при совместном их введении, считаются наиболее перспективными для существенного упрочнения алюминиевых сплавов [1]. Наибольший эффект упрочнения от введения скандия достигается в алюминиевых сплавах 5XXX серии [2]. Максимальная растворимость скандия в алюминии 0,38 мас. % при 660 °C [3]. Однако высокая стоимость скандия ограничивает его широкое практическое применение [2]. В настоящей работе добавка Sc вводится в количестве не превышающем значение 0,02 мас.%, что позволяет добиться компенсации повышения стоимости за счет уменьшения массы полуфабриката из-за повышенной прочности.

Для целей исследований использовались сплавы на основе состава 5182 с варьированием содержания Mg (от 3 до 5 мас.%) и малыми добавками Sc в сочетании с Zr. Также были рассмотрены варианты с частичной заменой Sc на Ce и Y с целью снижения стоимости полуфабрикатов. Изготовленные методом полунепрерывного литья плоские слитки последовательно подвергали горячей и холодной прокатке до толщины 1,0 мм с различной степенью деформации (30%, 50%, 65%). Для снятия остаточных напряжений и повышения технологичности проводился отжиг с достижением полной рекристаллизации.

Механические испытания проводились на универсальной машине MTS Criterion 40 при комнатной температуре после прокатки и термообработки. Технологичность оценивалась с помощью теста Эриксона. Микроструктурный анализ осуществлялся посредством оптической микроскопии после электрохимического травления.

Малые добавки Sc и Zr приводят к значительному увеличению предела прочности и предела текучести сплавов относительно базового состава 5182 после прокатки с деформацией 50%. Снижение содержания Mg с 4,5% до 3% при наличии в сплаве добавок Sc и Zr не приводит к утрате прочностных характеристик, что свидетельствует о компенсирующем эффекте данных элементов. Напротив, попытка частичной замены Sc на Ce и Y не дала заметного повышения уровня свойств после прокатки, за исключением небольшого улучшения предела текучести при полном отжиге в случае с дополнительным легированием Ce.

Анализ технологичности при штамповке с использованием теста Эриксона показал, что добавки Sc, Zr и небольшое увеличение Mg не приводят к снижению формуемости относительно базового сплава 5182.

Изучение влияния степени деформации показало тенденцию к росту прочностных характеристик и изменению структуры зерен с увеличением степени прокатки. При 30% деформации структура содержит как удлиненные, так и округлые зерна; при 50% — структура становится волокнистой, а при 65% уменьшается толщина волокна. После отжига у сплавов с малыми добавками Sc наблюдается снижение предела прочности и предела текучести с увеличением деформации, в то время как у базового 5182 сплава прочность увеличивается.

Выводы:

1. Добавки Sc в количестве до 0,02 мас.% в сочетании с Zr эффективно повышают прочность (UTS и YS) алюминиевых сплавов серии 5XXX, компенсируя снижение содержания Mg относительно базового сплава 5182.

2. Использование Се и Y в качестве частичной замены Sc не улучшает механические свойства после прокатки, хотя добавки Се способствуют незначительному повышению предела текучести после отжига.

3. Увеличение Mg способствует значительному упрочнению после прокатки, но не оказывает существенного влияния на свойства после рекристаллизационного отжига.

4. Формуемость материала, оцененная тестом Эриксона, не снижается при введении Sc, Zr и повышении содержания Mg, что важно для применения в процессе глубокой вытяжки.

Полученные результаты демонстрируют потенциал введения малых добавок скандия в сочетании с добавками циркония для создания высокопрочных и технологичных сплавов 5XXX серии, способствующих снижению массы и повышению эксплуатационных характеристик автомобильных кузовных деталей.

Список литературы

1. Eskin D. The Scandium Story–Part II: Impact on Aluminum Alloys and Their Applications. *Light Metal Age*, 2020, 78(5):40-44.
2. Mann V., Krokhin A., Alabin A., et al. New Al-Mg-Sc Alloys for Ship-building and Marine Applications. *Light Metal Age*, 2019, 77(3):29–30,49.
3. Knipling K.E., Dunand D.C., Seidman D.N. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys – A review. *Zeitschrift für Metallkunde*, 2006, 97:246–265.

УДК 67.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СТАЛЕЙ 09Г2С И 10Х18Н10 ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Веселова В.Е., Каманцев И.С., Путилова Е.А.

*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского
отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия
le-ra@le-ra.ru*

Слоистые композиционные материалы (КМ) широко применяются для изготовления ответственных деталей машиностроения. Однако, при симметричной холодной прокатке (СП) слоистых КМ из сталей разного класса возникают некоторые сложности, связанные с несовместимостью механических и тепловых свойств материалов, необходимостью точного контроля технологического процесса и предотвращения дефектов, вызванных внутренними напряжениями и неравномерной деформацией. Асимметричная прокатка (АП) представляет собой технологически и экономически эффективный метод обработки КМ, при котором умышленно создаются асимметричные

условия за счет разной скорости или диаметра валков, данный подход позволяет уменьшить дефекты проката и улучшить механические свойства. Целью настоящей работы стало исследование влияния АП на микроструктуру и физико-механические свойства слоистого КМ из сталей различного класса [1, 2].

Материалом исследования послужил КМ, полученный горячей прокаткой из низкоуглеродистой стали 09Г2С и аустенитной стали 10Х18Н10. Схема сборки исходного КМ приведена на рис. 1. СП и АП образцов выполняли на стане ЦКБММ-35 «Дуо/кварто» в режиме ДУО, коэффициент асимметрии составил 1,16.

09Г2С
10Х18Н10
09Г2С
10Х18Н10
09Г2С

Рис.1 – Схема сборки КМ

При СП наблюдалось частичное расслоение композиционного материала, а также многочисленные поры диаметром до 1 мкм. Применение метода АП обеспечило более качественное соединение слоев и снижение пористости по сравнению с образцом после СП. Кроме того, АП способствует более равномерному измельчению зерен в слоях стали 09Г2С, в том числе в средних слоях пакета. В слоях аустенитной стали 10Х18Н10 формируется развитая субструктура с деформационными двойниками, при этом плотность двойников после АП возрастает.

СП и АП способствуют приросту прочности, при этом наибольшие значения достигаются после АП ($\sigma_{0,2} = 800$ МПа, $\sigma_B = 850$ МПа).

Таким образом, АП 5-слойного КМ 09Г2С-10Х18Н10 при степени асимметрии 1,16 способствует более равномерной деформации и росту механических свойств всего пакета по сравнению с СП.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМАШ УрО РАН № 12407500003-6 с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Pastuszak P. D., Muc A. Application of Composite Materials in Modern Constructions // Key Engineering Materials. 2013. V. 542. P. 119-129.
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. Т. 20, № 3. С. 81–96.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ БОЛТОВ С ФЛАНЦЕМ

Олейник Д.Г., Корчунов А.Г.

ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова, г.Магнитогорск, Россия
oleynik.dmitrii@yandex.ru

Изготавливаемые холодной объемной штамповкой из легированных марок стали повышенной прочности болты с фланцем классом прочности 10.9 в настоящее время широко применяются в автомобилестроении. Болты данной конструкции, способны предотвращать самоотвинчивание при вибрациях, возникающих в ходе эксплуатации, а также снижают металлоемкость и траты на крепежные изделия для узлов и конструкций автомобиля за счет наличия фланца под головкой в виде плоской шайбы [1-3]. Предприятием ОАО «ММК-МЕТИЗ» освоено производство данного вида изделий. Однако применение заготовки из стали 42CrMo4 при производстве болтов с фланцем актуализировало проблему долговечности технологического инструмента – при изготовлении болтов инструмент вследствие интенсивных нагрузок демонстрировал отказы, не достигая выработки назначенного ресурса.

Целью данной работы является повышение долговечности технологического инструмента для штамповки болтов с фланцем за счет выбора величины параметра посадки вставок пуансонов и матриц с натягом в корпус технологического инструмента. Предполагается, что рациональная величина параметра посадки с натягом позволит снизить напряжения в зоне максимальной нагрузки и повысить долговечность инструмента.

В работе проанализированы факторы, оказывающие влияние на долговечность технологического инструмента при штамповке, также проведен анализ влияния величины натяга при запрессовке вставок на напряженное состояние, возникающее в технологическом инструменте в ходе эксплуатации.

На основе полученных данных из литературных источников [4-5], проведено компьютерное моделирование процесса холодной объемной штамповки болтов с фланцем в программном комплексе Qform-3D, с различным параметром натяга вставок (0,1-0,6 мм). При анализе полученных картин напряженного состояния выявлена оптимальная величина натяга вставки (0,4 мм), при которой наблюдается снижение напряжений в технологическом инструменте, что потенциально может характеризовать повышение долговечности также. Значение данной величины натяга можно рекомендовать при изготовлении инструмента для штамповки болтов с фланцем в производстве.

Список литературы

1. Кадошников В.И., Решетникова Е.С., Решетников Л.В., Кочуков С.В. Совершенствование инструмента и математическое моделирование процесса формирования головок фланцевых болтов // Вестник МГТУ им. Носова. 2008. – №2. – С. 52-56.

2. Чукин В.В., Артюхин В.И. Рубин Г.Ш. и др. Проблема повышения качества крепежных изделий // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – №4. – С. 99-104.

3. Воробьев И.А., Овчинников С.В., Бунятян Г.В., Галиахметов Т.Ш., Кантинов Е.Ф., Благин Е.Г., Воробьев А.И. Крепежные изделия для современного машиностроения. Нижний Новгород: Издательство «МПК-сервис», 2016. 520 с.

4. Степанкин, И. Н. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы ее повышения / И. Н. Степанкин, В. М. Кенько. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 197 с.

5. M. Aygen, “Die stress and friction behaviour analysis in bolt farming,” M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2006

УДК 669.017.16

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ВЫСОКОМАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ДОБАВКАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Лапшов М.А.¹, Малкин К.А.², Рагазин А.А.³, Арышенский В.Ю.⁴,
Арышенский Е.В.⁵**

^{1,2,3,4} Самарский университет, г. Самара
^{1,2,3} АО «СМЗ», г. Самара

⁵ Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк

Malkin.kirill@samara-metallurg.ru

Алюминиевые сплавы, легированные магнием, в частности сплавы 5xxx серии, находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Особую роль в этой группе занимают деформируемые сплавы системы Al–Mg, дополнительно легированные переходными металлами (Sc, Zr, Mn и др.), что позволяет значительно улучшить их прочностные характеристики [2, 3]. Значительную роль в упрочнении алюминиевых сплавов влияет магний за счет выпадения вторичной фазы $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$, однако с увеличением его легирования в сплавы приводит к снижению пластичности, что существенно снижает его технологические свойства [4]. В настоящее время особо распространены алюминиевые сплавы серии 5xxx (01570, 1580) с содержанием магния 5-6,5 % дополнительно легированные переходными металлами, такими как скандий и цирконий. Самарскими учеными предложен сплав 1590 с содержанием магния 5,5%, который дополнительно легирован гафнием и эрбием.

Исследуемые сплавы относятся к системе Al–Mg с различным содержанием легирующих и модифицирующих элементов. Химический состав приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав образцов

Сплав	Массовая доля элементов, %								
	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Zr	Sc	Er*	Hf*
1587	0,05	0,08	0,41	4,5	0,21	-	-	-	-
1588	0,04	0,08	0,41	5,5	0,2	-	-	-	-
1589	0,04	0,07	0,41	4,57	0,21	0,1	0,14	0,1	0,05
1589-3	0,05	0,08	0,41	4,58	0,2	0,1	0,14	0,03	0,16
1589-4	0,05	0,08	0,41	4,53	0,21	0,1	0,14	0,1	0,1

Отливка слитков производилась путем наполнения расплава в стальной кокиль.

Для исследуемых сплавов проводили гомогенизацию по режиму 440 °С – 4 часа гомогенизацию слитков в муфельной электрической печи с последующим охлаждением в емкости с водой для фиксации пересыщенного твердого раствора. Прокат осуществлялся на лабораторном стане КВАРТО К220-75/300 при температурах 450°С, 550°С.

Для определения механических свойств в испытаниях исследуемых алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине (Zwick / Roell Z050) был осуществлён ряд испытаний на одноосное растяжение в соответствии с ISO 6892-1 при комнатной температуре.

Все исследуемые сплавы в холоднокатаном состоянии показывают практические одинаковые механические свойства, что говорит о высокой степени нагартовки после холодной прокатки. Однако после отжига холоднокатаной ленты при 370 °С, сплавы с добавками переходных металлов (1589, 1589-3, 1589-4) показывают лучшие механические свойства по сравнению со сплавами 1587, 1588, не легированный переходными металлами, за счет выделения наночастиц $Al_3(ScZrHf)$. При этом стоит отметить что сплав 1588 в котором содержание магния 5,5%, механические свойства выше, чем у сплава 1587 с содержанием магния 4,5 %, однако относительное удлинение выше, чем у всех исследуемых сплавов.

В заключении проведенного исследования видно, что модификация алюминиевых сплавов добавками переходных металлов повышает их прочность на 15-20% по сравнению со сплавом не легированным переходными металлами. Модификация алюминиевых сплавов без добавок переходных металлов повышает относительное удлинение на 20-30%. Содержание магния в количестве 4,5% не достаточно для получения максимальных механических свойств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00810-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

Список литературы

1. Hatch, J.E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy / John E. Hatch. – US.: ASM International, 1984. – 397 p.
2. Елагин, В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами / В.И.Елагин. – М.: Металлургия, 1975. – 248 с.

3. Яшин, В.В. Влияние скандия на микроструктуру сплава системы Al–Cu–Mn–Mg–Hf–Nb / В.В. Яшин, Е.В. Арышенский, А.М. Дриц, Ф.В. Гречников, А.А. Рагазин, В.Е. Баженов // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122. – № 10. – С. 1033–1041.

4. Витязь П. А. и др. Получение высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов типа АМг10 //Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – №. 4. – С. 7-16.

УДК 67.02

О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ВОЛОЧЕНИЯ КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ

Платов С.И.¹, Столяров А.Ю.², Тухветова Л.М.¹,

¹ *ФГБОУ ВО «МГТУ» им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия*

² *ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия*

luiza.tuhvetova@yandex.ru

Ключевые слова: калиброванная сталь, волочение, дробемет, дробеструйная очистка, поверхностная пластическая деформация, напряжённо-деформированное состояние.

Актуальность. Технологическому процессу изготовления калиброванного проката из горячекатаной заготовки способом волочения по сравнению с волочением проволоки, свойственны следующие особенности:

- неравномерность деформации ввиду малых относительных обжатий;
- неравномерность микроструктуры и механических свойств по сечению по причине проявления масштабного фактора;
- жёсткие условия трения на контактной поверхности между деформируемой заготовкой и технологическим инструментом;
- упругое последствие (подъём) металла на выходе из очага деформации;
- сложная форма очага деформации и, соответственно, волочильного инструмента при волочении проката шестигранного профиля.

Следует учесть, что при дробеструйной очистке происходит интенсивное поверхностное пластическое деформирование проката, поверхность после обработки дробью получается текстурированной, что обеспечивает лучший захват волочильной смазки. Данный факт следует учесть проектировании режимов волочения калиброванного проката и анализе его механических свойств.

Способ обработки металлических поверхностей дробью широко распространён при очистке поверхности от окалины, загрязнений [1,2]. При этом данный способ является способом поверхностного пластического деформирования, влияющим на характер напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв обрабатываемого материала, приводящий к возникновению

в этих слоях остаточных напряжений [3,4]. Применительно к технологии производства калиброванного проката, после дробеструйной обработки следует калибрующее волочение с упомянутыми выше особенностями (высокий очаг деформации, неблагоприятные условия трения, неравномерность деформации). Таким образом необходимо учесть влияние сжимающих остаточных напряжений и микротопографию поверхности, обусловленные дробеструйным наклёпом, в поверхностном слое на параметры процесса последующего волочения и долговечность технологического инструмента для повышения его эффективности.

Известно также, что дробеструйная обработка, изменяя напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя, влияет на эксплуатационные свойства всего изделия, увеличивая ресурс его службы. В нашем случае, вероятно, обработка поверхности горячекатаного проката перед волочением также благоприятно скажется на физико-механических свойствах готового калиброванного проката и изделий из него.

Таким образом возникает необходимость проведения исследований влияния предварительного поверхностного пластического деформирования горячекатаного проката на параметры процесса последующего калибрующего волочения с целью повышения его эффективности, а также влияния на свойства готового изделия.

Список литературы

1. Удаление окалины с поверхности горячекатаного проката перед волочением / Жуков Д.В., Статных И.Е. / Сталь, г Серов: ПАО «Надеждинский металлургический завод», 2021. С. 36-38.
2. Влияние режимов дробеметной обработки на очистку окалины с поверхности горячекатаного металлопроката / Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Мухаметдинова Н.П., Леонова Н.М. / Вестник МГТУ им Г.И. Носова, 2005. С. 21-23.
3. Учет остаточных напряжений при расчетах прочности элементов замковых соединений / Киселев И.А., Жуков Н.А., Васильев Б.Е., Селиванов А.Н. / Известие высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. С. 49-59.
4. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью / Лебеденко В.Г. / Вестник ДГТУ. 2008. С. 202-212.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА ПОСТАВЩИКА АВТОКОМПОНЕНТОВ

Воротников М.Ю., Смирнов А.В.

АО НПО БелМаг, Магнитогорск, Россия

vorotnikov@belmag.ru

Шаровый шарнир является неотъемлемой частью конструкции автомобилей, обеспечивающий подвижность жёстких соединений и позволяющий беспрепятственное перемещение ведущих колёс автомобиля. Выделяют две основные системы применения шаровых шарниров в автомобилестроении – это подвеска и рулевое управление.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949 – 2009 к шаровым шарнирам, как к продукции, устанавливаются требования по качеству, которые нацелены на повышение удовлетворённости клиентов. В связи с чем, производитель разрабатывает и применяет собственные технические требования конечного изделия [1]. Качество конечного изделия закладывается с начала концептуальной разработки, где формируются основные геометрические характеристики субкомпонентов и выбираются необходимые материалы. Исходя из утверждённых материалов и геометрических характеристик субкомпонентов, конечное изделие приобретает собственные параметры, где основными, применимыми для шаровых шарниров, можно выделить: функциональные и геометрические параметры, статическая прочность и устойчивость к усталости. Данные параметры можно отразить в виде количественных характеристик на примере наружного рулевого наконечника (рис.1).

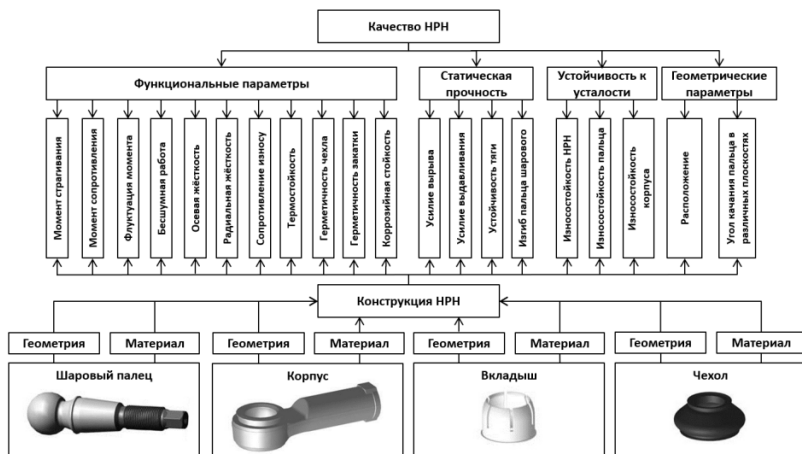


Рис. 1 – Основные параметры шарового шарнира

Можно заметить, что геометрические характеристики и материал субкомпонента напрямую влияют на параметры конечного изделия, соответственно, контроль качества субкомпонентов на соответствие конструкторской документации является одним из главных факторов, влияющих на параметры конечного изделия.

Для минимизации указанных рисков и обеспечения требуемого уровня качества конечного изделия, процессы контроля качества субкомпонентов должны быть интегрированы на ранних стадиях производственного цикла. Это предполагает не только визуальный осмотр и верификацию геометрических параметров с использованием специализированного измерительного оборудования, но и анализ микроструктуры материалов, оценку твердости, сопротивления коррозии и износостойкости [2].

Более того, статистический контроль процессов (SPC), применяемый к производству субкомпонентов, позволяет контролировать стабильность технологических операций, выявлять тенденции к отклонениям до их критического уровня и оперативно корректировать параметры производства. Внедрение методов неразрушающего контроля (ультразвуковой, рентгеновский) для выявления внутренних дефектов в критически важных субкомпонентах также является неотъемлемой частью комплексного подхода к обеспечению качества.

Таким образом, качество шарового шарнира во многом обеспечивается совокупностью свойств субкомпонента, а, с учётом того, что автомобилестроение предполагает массовый выпуск оригинальных изделий, требуется систематизация управления не только выбора конструкции, но и систематизация процессов выбора поставщика, разработки производственных процессов поставщика и одобрение потребителем.

Список литературы

1. Оценка необходимости разработки методики управления поставщиками / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, А. Р. Вахитов, А. В. Смирнов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2024. – Т. 15, № 1. – С. 50-53. – EDN BPDSWZ.
2. Воротников, М. Ю. Повышение качества продукции на основе применения различных методов проектирования / М. Ю. Воротников, Ф. А. Столяров, И. Г. Гун // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2025. – С. 243. – EDN Soudce.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА 1580, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ СХЕМАМ ПРОКАТКИ

Ворошилова М.В., Юрьев П.О., Дурнопыанов А.В.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
aniram1988@yandex.ru

В последнее время наблюдается большой интерес к исследованиям, направленным на повышение прочностных свойств сплавов системы алюминий-магний [1]. Примером такого сплава является российский сплав 1580, в котором содержание скандия составляет 0,05-0,14 % (мас.) [2]. При этом по прочностным свойствам сплав 1580 мало уступает сплаву 1570, в котором скандия в 2 раза больше, что делает сплав 1580 перспективным для последующего изготовления из него листов и тонкостенных изделий сферической формы [3, 4].

Исследования проводили в лабораториях Сибирского федерального университета (СФУ) на образцах сплава 1580 толщиной 6,0 мм, которые прокатывались с промежуточными отжигами до толщины 2,0 мм по двум схемам: продольная односторонняя (схема 1) и реверсивная по трем равным направлениям (схема 2). Далее исследовались механические свойства листов по трем направлениям (табл. 1).

Таблица 1 – Механические свойства образцов

Таблица 1. Механические свойства образцов					
Толщина, мм (состояние)	ε_s , %	Направление образца	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Схема 1 (продольная односторонняя)					
2,0 (отжиг 350°C, 3 ч)	66,67	Вдоль $\updownarrow$	379	275	7,7
		Поперёк $\leftrightarrow$	380	265	11,2
		Под углом 45°	339	235	18,9
Схема 2 (реверсивная по трем равным направлениям)					
2,0 (отжиг 350°C, 3 ч)	66,67	Вдоль $\updownarrow$	348	280	9,3
		Поперёк $\leftrightarrow$	396	339	5,6
		Под углом 45°	377	298	13,9

Листы, полученные по схеме 1 имеют более высокую пластичность в поперечном направлении. Однако при замере временного сопротивления в продольном направлении прокатки, более низкие прочностные характеристики наблюдаются после прокатки и отжига по схеме 2.

На следующем этапе проводили исследование микроструктуры полученных листов, с использованием светового микроскопа Observer.Alm, Carl Zeiss при увеличениях 100 крат. Изучение влияния процессов термической обработки на структуру осуществляли на образцах после нанесения оксидной пленки в режиме поляризованного света (рис. 1).

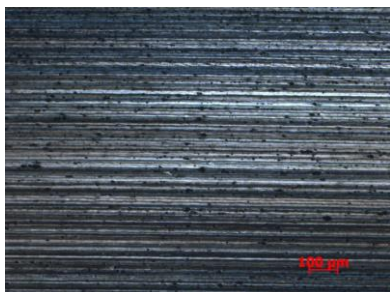


Схема 1

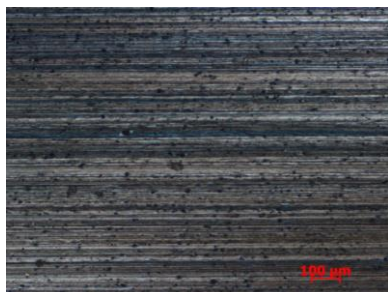


Схема 2

Рис. 1 – Микроструктура образцов толщиной 2,0 мм в поляризованном свете

Металлографические исследования показали, что структура образцов состоит из α -твердого раствора алюминия и избыточных фаз, преимущественно ориентированных по направлению деформации и вытянутых в строчки. С увеличением степени деформации наблюдается более плотное расположение фаз. Это связано с большим вытягиванием зерен в процессе прокатки. образцы характеризуются волокнистым строением, как в деформированном состоянии, так и после термической обработки. В отдельных волокнах зеренного строения образцов, полученных по схеме 2, заметны линии от предыдущего направления деформирования.

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

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Бер В.И., Лопатина Е.С., Ворошилова М.В. Разработка способа получения тонкостенных деталей сферической формы из алюминиевого сплава 1580 // Цветные металлы. – 2023. – № 7. – С. 83–89.
2. ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».
3. Sidelnikov S.B, Ber V.I., Lopatina E.S., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S., Baykovskiy Yu.V., Konstantinov I.L., Lezhnev S.N., Durnopyanov A.V., Galiev R.I., Belokonova I.N. Analysis of properties and deformation flow during production of thin-walled spherical parts from aluminum alloy 1580 // Applied Materials Today. – 2025. – V. 43. – 102642.
4. Sidelnikov S.B., Baranov V.N., Konstantinov I.L., Zenkin E.Yu., Lopatina E.S., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Yuryev P.O., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V., Belokonova I.N., Galiev R.I. Investigation of rolling modes, structure and properties of aluminum-magnesium alloy plates with a reduced scandium content // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – V. 121. – I. 1-2. – P. 1373–1384.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭИ698-ВД В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Луганенко Т.Д., Лавриненко В.Ю.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия
tlugan04@list.ru

Жаропрочные сплавы имеют широчайший диапазон применения во многих областях машиностроения. Так, например, сочетание высоких прочностных и эксплуатационных свойств жаропрочного никелевого сплава ЭИ698-ВД позволяет активно его использовать в авиа и ракетостроении. Высокие требования, предъявляемые к изделиям из данных материалов, заключаются в конкретных свойствах микро и макроструктур, а также в строго регламентируемых показателях прочности. Это показывает особую значимость исследований в области моделирования эволюции микро и макроструктур в процессе обработки подобных материалов давлением. Ведь, как правило, в виду отсутствия научно обоснованных температурно-скоростных режимов деформирования, изделия, хрестоматийно получаемые обработкой давлением, производятся посредством обработки резанием.

Для моделирования технологических процессов обработки давлением и прогнозирования размера зёрен, как основной характеристики микроструктуры, необходимы, во-первых, диаграмма деформирования сплава ЭИ698-ВД и, во-вторых, диаграмма рекристаллизации сплава [1]. Эти данные были получены после изотермической осадки цилиндрических образцов при постоянной скорости деформирования на специальной установке и анализа микроструктуры деформированных образцов (рис.1).

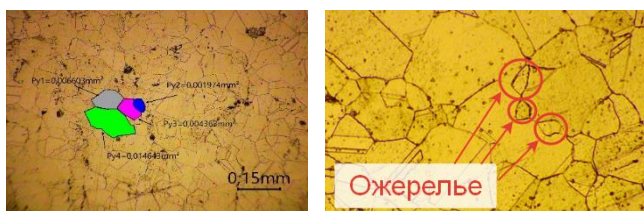


Рис.1 – Микроструктура деформированного сплава ЭИ698-ВД

По экспериментальным данным и оценке размеров зёрен были построены кривые деформирования сплава и диаграмма рекристаллизации (рис.2), аппроксимированные уравнениями (1) и (2), соответственно.

$$\sigma = k_1 \cdot \varepsilon^3 + k_2 \cdot \varepsilon^2 + k_3 \cdot \varepsilon + k_4 \quad (1)$$

$$G = k_5 - k_6 T + k_7 \varepsilon + k_8 T^2 - k_9 T \varepsilon - k_{10} \varepsilon^2 + k_{11} T^2 \varepsilon + k_{12} T \varepsilon^2 - k_{13} \varepsilon^3 \quad (2)$$

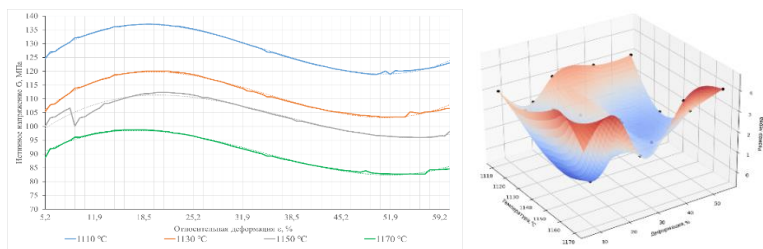


Рис.2 – Диаграммы деформирования и рекристаллизации сплава ЭИ698-ВД

Применяя полученные уравнения (1,2) в современных ПО для моделирования процессов обработки давлением (например, QForm), возможно осуществлять не только точные расчёты режимов обработки давлением, но и, зная распределение температуры и степени деформации по объёму заготовки, прогнозировать эволюцию микроструктуры (рис. 3) [2].

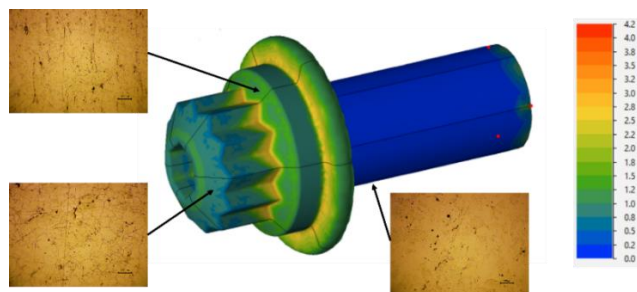


Рис. 3 – Моделирование эволюции микроструктуры при проектировании процесса высадки головки авиационного крепежа

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали/ ТомII/Основы термической обработки (справочник) – Москва «Металлургия» 1983. – 368с.
2. Чурюмов, А. Ю. Моделирование эволюции микроструктуры металлических материалов в процессе горячей пластической деформации и термической обработки / А. Ю. Чурюмов, А. В. Поздняков // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 11. – С. 1162-1186. – DOI 10.31857/S0015323020110030. – EDN LVRRGT.

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПРИВОДА КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАХВАТА И ПОДЪЕМА ЭЛЕКТРОДА

Шленкин С.А., Терентьев Д.В., Точилкин В.В.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
shlenkinsergei@mail.ru

Внедрение и развитие перспективных технических решений дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок электрошлакового переплава (ЭШП) – актуальная задача [1-5], которая определяет уровень выплавки электростали.

Определение рациональной схемы пневмосистемы оборудования для крепления электрода ДСП и ЭШП имеет важное значение [1]. Разработаны пневмо- и гидросхемы манипуляторов для зажима - разжима электрода и отдельные конструкции для металлургических машин [2-4]. Показано влияние параметров пневмо- и гидропривода на работу ДСП [3].

Механизм зажима – разжима электродов один из основных узлов ДСП. Пневмопривод зажима оснащается цилиндрами, которым присущи недостатки: цилиндры работают в зоне высоких температур со стороны электрода, подвижные элементы и уплотнения цилиндра нагреваются, что приводит к значительным утечкам воздуха; уплотнения в результате нагрева быстро выходят из строя, это приводит при работе ДСП и ЭШП к сбою рабочего цикла получения заданного количества жидкой стали [1, 2].

Эффективно использовать в качестве двигателя силовой пневматический элемент (ПЭ), а также включить в пневмосхему контур, обеспечивающий охлаждение ПЭ. Отсутствие подвижных уплотнений позволит обеспечить рациональную работу механизма зажима.

Предлагаемая схема использована при эксплуатации автоматизированной системы управления процессом плавки на ДСП и ЭШП.

Список литературы

1. Точилкин В.В., Платов С.И., Шленкин С.А., Челпин Д.С. Рационализация пневмосхемы механизма крепления электрода электропечи // Сталь. 2024. №. 11. С. 46 – 48.
2. Рудской А.И., Платов С.И., Терентьев Д.В., Точилкин В.В. Гидравлический привод литейно-прокатных комплексов: учебник . - СПб. : - ПОЛИТЕХ-ПРЕС, 2024. – 343 с.
3. Tochilkin V.V. Improved hydraulic drive for removal and installation of coke-oven doors // Coke and Chemistry. 2021. Vol. 64. No. 8. P. 377 – 318.
4. Tochilkin V.V., Boldyrev Z.A. Modernization of the hydraulic drive opening and closing the chure door for rail cars in coke-quenching systems // Coke and Chemistry. 2023. Vol. 66. No. 3. P. 130 – 134.
5. Tochilkin V.V., Terentiev D.V., Filatova O.A. Hydraulic Drive for Opening and Closing the Coke Discharge Doors of Quenching Cars // Coke and Chemistry. 2024. Vol. 67. No. 5. P. 309 - 313.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО СПОСОБА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД31

Бундин М.П., Сидельников С.Б., Парубок А.В., Лопатин В.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

mbundin@sfu-kras.ru

В работе на основании проведенных ранее исследований процесса бесслитковой прокатки-прессования (БПП) [1, 2] был предложен новый способ получения модифицирующих материалов в виде пресс-изделий из вторичных отходов алюминиевых сплавов (рис. 1, а) для их модифицирования, который может быть использован в металлургии цветных металлов и сплавов при производстве слитков и отливок из них. Аналогами служат способы совмещенного литья и прокатки-прессования [1], по которым расплав металла заливается в закрытый калибр вращающихся валков с высотой h_1 в минимальном сечении, а далее металл прокатывается, распрессовывается и выдавливается через матрицу в виде пресс-изделий заданной формы и размеров (рис. 1, б).

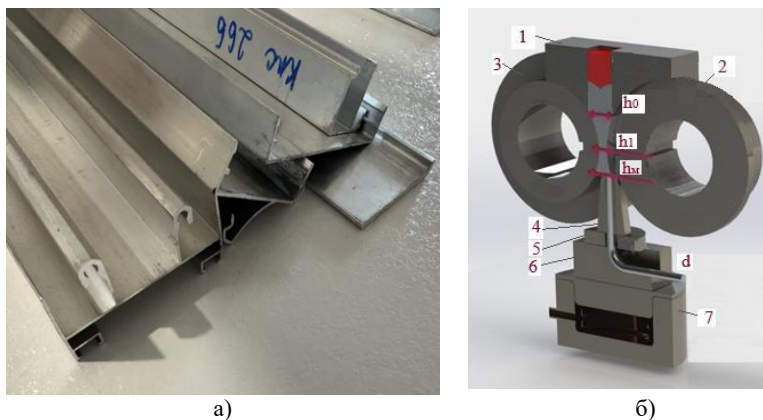


Рис. 1. Вид отходов и конструкции устройства для БПП:

а – обрест прессованных профилей; б – модель деформирующего узла БПП:

- 1 – заливочное устройство, 2 – валок с выступом; 3 – валок с канавкой;
- 4 – матрица; 5 – матрицедержатель; 6 – склиз; 7 – гидравлический прижим

Следует отметить, что использование для деформации процессов прокатки и прессования [1] дает новый синергетический эффект, связанный с преимуществами этих видов обработки металлов. Использование непрерывности процесса прокатки и больших степеней деформации за один цикл обработки при прессовании дает возможность при их совмещении существенно повысить

эффективность процесса обработки и применить непрерывные и совмещенные методы литья для получения исходной заготовки. Особенно это важно для обработки сплавов системы Al-Si-Mg, из которых на металлургических предприятиях, в том числе Красноярского края, изготавливают слитки и деформированные полуфабрикаты в значительных объемах. Таким сплавом является сплав АД31 (зарубежный аналог 6063), который легко подвергается обработке методами литья и пластической деформации. При этом в процессе прессования изделий (профилей, прутков, труб) из этого сплава на гидравлических прессах образуется значительное количество отходов в виде обрезки концов деформированных полуфабрикатов.

Целью данной работы является повышение эффективности процесса изготовления горячепрессованных прутков из алюминиевых сплавов с высоким уровнем механических свойств и модифицирующей способностью, в том числе с использования вторичных отходов из алюминиевых сплавов.

Поставленная цель достигается тем, что в способе получения модифицирующих прутков из алюминиевых сплавов, ускоренную кристаллизацию расплавленного металла на поверхности водоохлаждаемых валков совмещают с деформацией затвердевшей части заготовки в валках прокатного стана с обжатием при прокатке не менее 50 % и ее выдавливанием при прессовании через водоохлаждаемую матрицу с коэффициентом вытяжки не менее 10. Расплав металла из сплавов алюминия получают при температуре перегрева 770-850°C, выдерживают при этой температуре, проводят заливку расплава металла в валки, вращающиеся с окружной скоростью в диапазоне 4-14 об/мин, а распрессовку прокатанной заготовки ведут до достижения высоты зеркала матрицы, которая должна быть равной или более начальной высоты закристаллизованной в валках заготовки. При этом в качестве материала используют расплав вторичных отходов алюминиевых сплавов того химического состава, который соответствует химическому составу получаемых прутков.

На данный способ оформлена и подана в Роспатент заявка на изобретение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 24-29-20136.

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Терентьев Н.А., Ворошилов Д.С., Парубок А.В., Кузин Д.И. Исследование модифицирующей способности прутков из отходов сплава АД31, полученных методом бесслитковой прокатки-прессования // Металлург, 2024, № 9, с. 108-114.
2. Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И., Лопатин В.В. Моделирование и определение параметров установки совмещенного литья, прокатки и прессования для получения прутков из вторичных отходов алюминиевого сплава АД31 // Металлург, 2025, №5, с. 30-35.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНОКАТАНЫХ И ОТОЖЖЕННЫХ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА 1580 С ЧАСТИЧНОЙ ЗАМЕНОЙ Sc НА Er И Yb В ЕГО СОСТАВЕ

Юрьев П.О., Дурнопьянов А.В., Ворошилова М.В., Байковский Ю.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

pashka_urew@mail.ru

Сплавы системы Al-Mg на сегодняшний день достаточно известны в различных отраслях промышленности [1, 2]. Они обладают рядом ценных качеств, открывающие широкие возможности для их активного внедрения и применения в качестве листов, плит и листоштампованных деталей в таких областях, как ракетостроение, кораблестроение, автомобилестроение, авиастроение, нефтегазовый комплекс [3, 4]. Уже известно, что добавка скандия (Sc) в сплавы системы Al-Mg оказывает значительное влияние на увеличение их прочностных свойств. Среди уже известных данных сплавов выделяется сплав 1580 с содержанием Sc 0,05-0,14% (мас.). Однако Sc является дорогостоящим металлом, поэтому ведутся активные разработки по снижению стоимости сплава и замены Sc на эрбий (Er) и иттербий (Yb) [5]. Для дальнейших исследований Sc в сплаве 1580 был частично заменен на Er 0,09 масс.% и Yb 0,05 масс.% (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав сплава 1580 с добавками Er и Yb

Сплав	Содержание элементов, масс. %											
	Al	Mg	Sc	Zr	Fe	Zn	Cr	Ti	Si	Mn	Er	Yb
1580	Основа	5,02	0,05	0,14	0,24	0,07	0,16	0,02	0,11	0,58	0,09	0,05

Прокатку проводили с толщины 31 мм на толщину 5 мм [6]. Образцы для исследования механических свойств вырубались и подвергались тестам на растяжение на универсальной испытательной электромеханической машине LFM400kN согласно ГОСТ 1497-84. С целью изучения механических свойств (предел текучести $\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ) и варьирования режимов обработки образцы подвергались отжигу в течение 3 часов при температурах 250-400 °С.

При отжиге с температурой 250 °С значения $\sigma_{0,2}$ составили 318 МПа, а значения δ были 7%. Температура отжига в 400 °С оказала существенное влияние на механические свойства листовых полуфабрикатов из сплава 1580 с добавками Er и Yb. А именно: значение $\sigma_{0,2}$ уменьшилось и стало 270 МПа, а значение δ возросло почти в 2 раза и стало 12%. Данные значения механических свойств были сопоставлены со значениями уже известного сплава 1580, который содержит только Sc. Для сплава 1580 без добавления Er и Yb значения $\sigma_{0,2}$ составили 290 МПа и 260 МПа, а значения δ 11% и 14% соответственно. Изменения механических свойств находятся в пределах регламентируемых диапазонов.

Таким образом, можно сделать вывод, что возможна частичная замена дорогостоящего Sc на Er и Yb без значительного падения прочностных характеристик при сохранении приемлимого уровня пластичности с целью возможной дальнейшей обработки давлением.

На следующем этапе исследований планируется разработка режимов прокатки по различным схемам (продольная односторонняя и реверсивная по трем равным направлениям), а также применение плоской заготовки с использованием электромагнитного кристаллизатора.

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

Список литературы

1. ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».
2. Yuryev P.O., Baranov V.N., Orelkina T.A., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Murashkin M.Yu., Partyko E.G., Konstantinov I.L., Yanov V.V., Stepanenko N.A. Investigation the structure in cast and deformed states of aluminum alloy, economically alloyed with scandium and zirconium // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – V. 115. – I. 1. – P. 263–274.
3. Sidelnikov S.B., Ber V.I., Lopatina E.S., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S., Baykovskiy Yu.V., Konstantinov I.L., Lezhnev S.N., Durnopyanov A.V., Galiev R.I., Belokonova I.N. Analysis of properties and deformation flow during production of thin-walled spherical parts from aluminum alloy 1580 // Applied Materials Today. – 2025. – V. 43. – 102642.
4. Konstantinov I.L., Baykovskiy Y.V., Yuryev P.O., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Saparova A.S., Mansurov Yu.N., Partyko E.G., Bozhko D.N. Study of deformability during the rolling of aluminum alloy 1580 doped with small additions of erbium and ytterbium // Metallurgist. – 2025. V. 68. – P. 1231–1239.
5. Konstantinov I.L., Yuryev P.O., Baranov V.N., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Orelkina T.A., Voroshilova M.V., Murashkin M.Yu., Baykovskiy Yu.V., Partyko E.G., Stepanenko N.A., Mansurov Yu.N. Study the influence of scandium content and annealing regimes on the properties of alloys 1580 and 1581 // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2023. V. 6. – P. 15–24.
6. Sidelnikov S.B., Baranov V.N., Konstantinov I.L., Zenkin E.Yu., Lopatina E.S., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Yuryev P.O., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V., Belokonova I.N., Galiev R.I. Investigation of rolling modes, structure and properties of aluminum-magnesium alloy plates with a reduced scandium content // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – V. 121. – I. 1-2. – P. 1373–1384.

ВЛИЯНИЕ НАСЛЕДИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНСТРУМЕНТА НА РАДИАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Замараева 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
zamaraevajulia@yandex.ru*

Одним из видов прессовой продукции АО «Каменск-Уральский металлургический завод» («КУМЗ») являются прутки круглого поперечного сечения из алюминиевого сплава 6061. Известно, что пластичные алюминиевые сплавы склонны к образованию пресс-утяжины (воронки, полости) на заключительной стадии прессования [1].

Определение момента начала формирования и глубины залегания пресс-утяжины в пресс-изделии, в частности посредством метода конечных элементов [2, 3], может значительно повысить производительность процесса прессования. Поэтому актуально осуществлять прогноз образования пресс-утяжины.

В рамках работы в программном комплексе DEFORM-2D осуществлено моделирование трех осесимметричных неизоэтермических задач с различными температурами инструмента (табл. 1). Температура слитка при этом одинакова и задана равной 480°C.

Таблица 1 – Тепловые граничные условия

№ варианта решения задачи	Температура пресс-шайбы, °C	Температура инструмента, °C
1	380	Контейнер 460, матрица 380
2	Наследуется после цикла прессования варианта решения № 1	Наследуется после цикла прессования варианта решения № 1
3	Наследуется после двух циклов прессования варианта решения № 1	Наследуется после двух циклов прессования варианта решения № 1

Во всех вариантах слиток представлен в виде цилиндра диаметром 360 мм, длиной 510 мм. Диаметр контейнера 370 мм. Коэффициент вытяжки 11,3. В качестве материала слитка выбран алюминиевый сплав 6061.

Граничные условия движения инструментов во время процесса прессования заданы в виде перемещения пресс-штемπεля со скоростью 4,3 мм/с, при этом перемещение других инструментов равно 0.

Граничные условия трения на контактных поверхностях заданы законом Зибеля.

Известно, что радиальная скорость течения металла (V_r) на рабочей поверхности пресс-шайбы имеет влияние на формирование пресс-утяжины – с ее понижением пресс-утяжина образовывается позднее [4]. Принято решение

оценить распределение V_r на заключительной стадии в трех исследуемых вариантах процесса (рис. 1). Отметим, что толщина слоя металла в контейнере в этом случае принята равной 60 мм, что соответствует толщине пресс-остатка в производственных условиях «КУМЗ».

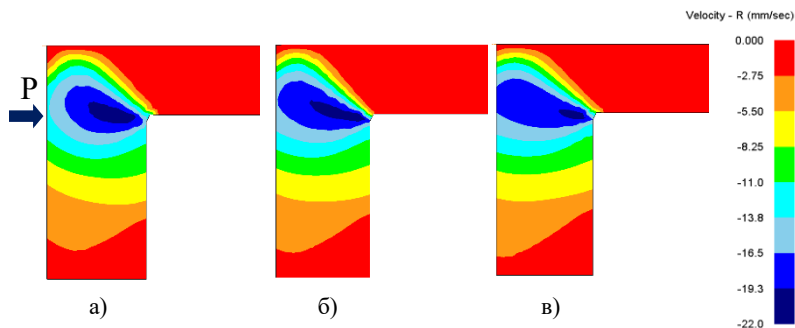


Рис. 1 – Радиальная скорость течения металла на заключительной стадии в варианте решения (стрелка показывает направление движения пуансона; прессовый инструмент не показан): а) № 1; б) № 2; в) № 3

В первом варианте решения максимальная V_r на поверхности пресс-шайбы равна 13,3 мм/с, во втором варианте – 16,3 мм/с (на 22,5% больше, чем в решении № 1), в третьем варианте – 17,5 мм/с (на 31,5% больше, чем в решении № 1, на 7,3% больше, чем в решении № 2). Таким образом, можно предположить более раннее образование пресс-утяжины от цикла к циклу прессования. Практической рекомендацией является повышение толщины пресс-остатка от цикла к циклу прессования во избежание попадания пресс-утяжины в пресс-изделие.

Список литературы

1. Разинкин А.В., Мальцева Т.В., Овсянников Б.В., Левина А.В. Типовые дефекты в слитках и полуфабрикатах из алюминиевых сплавов. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2023. – 142 с.
2. Balasundar I., Raghu T. Investigations on the extrusion defect – Axial hole or funnel // Materials and Design. – 2010. – Vol. 31. – P. 2994–3001.
3. Замахаева Ю.В., Разинкин А.В., Логинов Ю.Н. Условия образования пресс-утяжины при прессовании слитка из алюминиевого сплава // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – № 7. – С. 309–313.
4. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 447 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ, БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ И ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr-P3M-Fe

Бернгардт В.А., Беспалов В.М., Ворошилов Д.С., Покшиванов С.А.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация
 Berngardt19@mail.ru

Разработка и производство деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с повышенным уровнем термостойкости, применяемых в энергетике, электротехники, авиации и автомобильной промышленности, является актуальной задачей для предприятий кабельно-проводниковой продукции.

Для создания термостойких алюминиевых проводников наиболее эффективными добавками являются такие элементы как цирконий, церий и лантан [1]. В России известны проводниковые сплавы, отдельно легированные цирконием и P3M элементами, однако современные исследования направлены на создание низколегированных многокомпонентных сплавов, включающих два и более легирующих компонентов [2].

Целью работы является создание длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с комбинированным содержанием Zr, Ce, La и Fe с улучшенным комплексом механических свойств, термостойкости, и электропроводности, а также технологии их изготовления.

Объектом исследований являлись прутки Ø5,0 мм (сплавы №1-2), полученные методом бесслитковой прокатки-прессования (БПП) и сортовой прокат квадратного сечения 3,7×3,7 мм (сплавы №3-7) после холодной сортовой прокатки (ХСП) из алюминиевых сплавов с разным сочетанием Zr, Ce, La и Fe. Ступенчатый отжиг проводили по режиму 300+400+450°C, 50 ч.

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

Таблица 1 – Свойства прутков и сортового проката из экспериментальных сплавов

№ (шифр)	Сплав	σ _в , МПа		δ, %		ρ, Ом·мм ² /м	
		деф.	отжиг	деф	отжиг	деф	отжиг
1(26)	Al-0.7(Zr,Ce,La)-0.2Fe	146	88	29	32	0,0305	0,0304
2(27)	Al-1.0(Zr,Ce,La)-0.7Fe	144	90	31	35	0,0310	0,0303
3(42)	Al-1.0(Zr,Ce,La)-0.3Fe	189	105	1,9	27,5	0,0340	0,0288
4(45)	Al-0.7(Zr,Ce,La)-0.4Fe	174	98	2,3	22,8	0,0318	0,0287
5(46)	Al-0.3(Zr,Ce,La)-0.6Fe	184	108	4,1	20,4	0,0325	0,0288
6(47)	Al-0.6(Zr,Ce,La)-0.6Fe	177	111	1,8	19,8	0,0324	0,0287
7(48)	Al-1.5(Zr,Ce,La)-0.8Fe	195	135	2,3	23,2	0,0349	0,0297

Проведенные исследования показали, что прутки, изготовленные методом БПП имеют σ_B на уровне 146–144 МПа, δ в диапазоне 29–31% и ρ на уровне 0,0305–0,0310 Ом·мм²/м. Введение ступенчатого отжига с целью дальнейшего повышения термостойкости проводов за счет выделения дисперсных частиц Al₃Zr из твердого раствора, приводит к значительному падению σ_B на 36–40%.

Сортовой прокат обладает более высокими значениями σ_B 174–195 МПа в деформированном состоянии в сравнении с прутками БПП, но при этом имеет существенно более низкие значения δ на уровне 1,8–4,1% и более высокое ρ на уровне 0,0318–0,0340 Ом·мм²/м. Наибольшую прочность имеет сортовой прокат №3 и №7 с более высоким содержанием Zr, Ce, La, Fe. Введение ступенчатого отжига также приводит к падению σ_B на 31–44 % и значительному увеличению δ в 5–14 раз по сравнению с деформированным состоянием, ρ снижается до уровня 0,0287–0,0297 Ом·мм²/м.

Микроструктура прутка БПП из сплава №2 и сортового проката ХСП из сплава №7 схожая, состоит из пересыщенного цирконием α -твердого раствора и эвтектических многокомпонентных фаз Al(Ce,La)FeSi, вытянутых в направлении деформации, часть фаз образуют скопления (рис. 1).

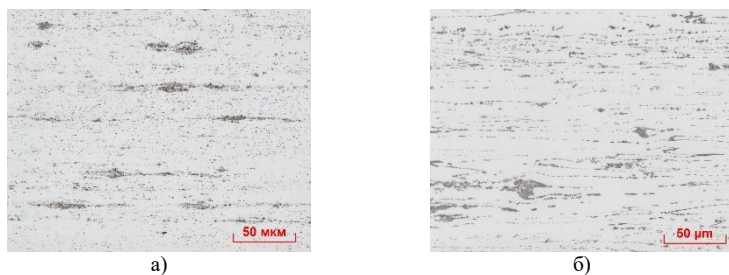


Рис.1 – Микроструктура сплава №2(а) и №7(б): а) прутки БПП; б) сортовой прокат ХСП

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

Список литературы

1. Bepalov V.M., Voroshilov D.S., Berngardt 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>
2. Bepalov, V.M., Sidelnikov, S.B., Berngardt, V.A. et al. Evaluation the influence of combined thermal-deformation treatment parameters on the physical and mechanical properties of long-length semi-finished conductive products from Al-REM-Zr alloy. Appl. Phys. A 131, 747 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08884->

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ НА СТАНЕ КPW-25

Богданов С.Н.
МИСИС, Москва, Россия
Bogdanich1991@mail.ru

В данной работе представлены результаты расчета калибровки и компьютерного моделирования в программе QForm для холоднокатанной трубы $\varnothing 14,8 \times 2,35 \rightarrow 9,16 \times 7,74$ мм из сплава циркония на трубопрокатном стане КPW-25.

Целью исследования является совершенствование калибровки рабочего инструмента и режимов деформации для холодной прокатки оболочечных труб из сплавов циркония для повышения эффективности производства.

Исследование

Параметры деформации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры деформации

Площадь поперечного сечения $F \text{ мм}^2$	Относительная деформация, %			Коэффициент вытяжки μ	Q ($\varepsilon_s / \varepsilon_D$)
	по стенке ε_s	по диаметру ε_D	суммарная ε_Σ		
19,1	69,36	32,05	79,18	4,8	2,16

Представлена диаграмма относительной деформации по сечениям (рис.1). Как видно из диаграммы, данная методика расчета позволяет получить снижение деформации до нуля к калибрующему участку, что позволит получить высокую точность прокатки. Данный подход обеспечивает равномерное распределение усилий прокатки по длине очага деформации [1].

Отношение деформации по стенке к деформации по среднему диаметру, Q-фактор, (по сечениям) находится в диапазоне от 0,128 до -0,037 к калибрующему участку. Для всех сечений соотношение должно быть больше 0, т.е. деформация по стенке должна быть больше обжатий по диаметру. Иначе возможно получение складок по внутренней поверхности [2].

Исходными данными для моделирования в QForm являются следующие: скорость n – 260 дв/х; подача m – 1,4 мм в Ет; поворот – 36,0° в Ет и 25,2° в Ат; межкалиберный зазор 0,05 мм; материал цирконий Э110; температура 20 С°.

Показано распределение пластической деформации (рис.2). Истинная деформация увеличивается по конусу деформации и на внешней поверхности трубы достигает максимальной величины 6,4. На внутренней поверхности трубы, в приконтактных с оправкой слоями, интенсивность деформации меньше и достигает своего максимального значения 5,0. Значение деформации 6,4 возникает на образовавшемся гребне прокатанной трубы. Т.е при обратном ходе клетки прокатанная труба деформируется в межкалиберный зазор, что

приводит к образованию гребня и в дальнейшем к разрыву трубы при прямом ходе клетки. При этом максимальное напряжение со знаком «+» составляет 294,1 МПа, при допустимом, с учетом разогрева трубы, 350 МПа.

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать вывод о необходимости изменения межкалиберного зазора до 0. Так же внести корректировки в калибровку для избежания складкообразования и повышению выхода годного.

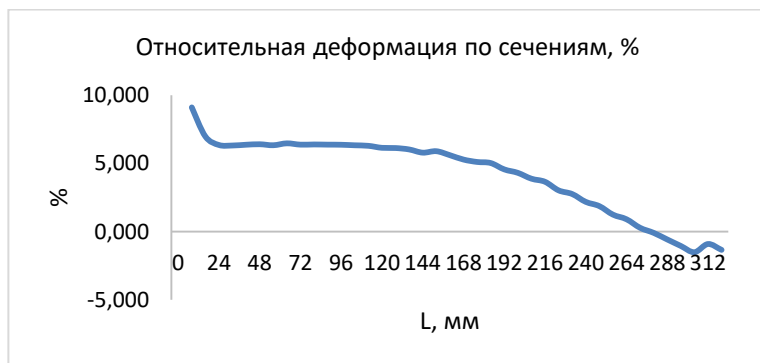


Рис.1 – Относительная деформация по сечениям

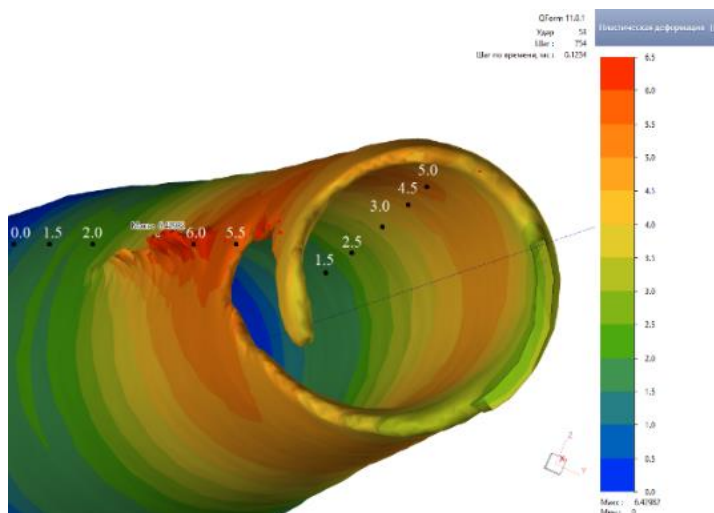


Рис. 2 - Поля пластической деформации в заготовке и прокатанной трубе в момент на пятьдесят третьем двойном ходе клетки

Список литературы

1. Заводчиков С.Ю. Металловедческие вопросы производства изделий из сплавов циркония / С.Ю. Заводчиков, Л.Б. Зуев, В.А. Котрехов. – Новосибирск: Наука, 2012. – 252 с.
2. Пилипенко С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q-фактора вдоль конуса деформации. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2019;(3):30-35.
3. Орлов Г. А. Основы теории прокатки и волочения труб : учебное пособие / Г. А. Орлов. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2016. – 204 с.

УДК 62-97/98

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАЛИБРА ДЛЯ ОБЖИМНОЙ КЛЕТИ 1300 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННОГО МЕТОДА ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Алимов И. С., Гладков Ю. А.

*ООО «КванторФорм», г. Москва, Россия
igor.alimov55031@mail.ru*

Одним из наиболее важных факторов при разработке технологических процессов сортовой прокатки является геометрия калиброванных валков. Каждый металлургический завод разрабатывает собственные эмпирические подходы к проектированию геометрии калибров. В настоящий момент на производстве не применяются автоматизированные алгоритмы расчета геометрии калиброванных валков, создание которых является актуальной задачей.

Работа посвящена созданию методики автоматизированного проектирования калибров сортовой прокатки. В основу взяты идеи и метод построения геометрии с помощью эквипотенциальных полей профессора Власова Ан.В., что используется в практике проектирования штамповой оснастки. Выполнена адаптация метода к условиям формоизменения при продольной сортовой прокатки.

Новый адаптированный к задачам сортовой прокатки метод проверен при проектировании предварительной формы калибра прокатки балки 40К2 для обжимной клетки 1300.

Эквипотенциальные поверхности для проектирования оснастки в процессах ОМД

Первое из известных применение метода эквипотенциальных поверхностей к решению задач моделирования течения металла при пластической деформации относится к 1968 году и принадлежит Г.Я.Гуну. В работе [1] им поставлена и решена задача калибровки инструмента при волочении профилей сложной формы.

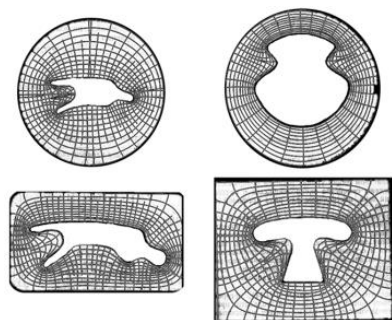


Рис. 1 - Семейство линий тока и эквипотенциалей при волочении

В работе Lee и соавторов [2] предложен метод применения эквипотенциальных линий для проектирования геометрии заготовки, используемой при штамповке дисков. Для определения формы заготовки создается электростатическое поле между проводниками, которые имитируют начальную заготовку и конечную поковку. Начальная форма заготовки увеличивается таким образом, чтобы охватить конечную форму. Затем к внутренней поверхности, соответствующей конечной форме, и внешней поверхности, представляющей начальную форму, прикладываются разные потенциалы (обычно 0 вольт для внутреннего и 1 вольт для внешнего проводника). Полученные эквипотенциальные поверхности впоследствии используются для проектирования предварительного ручья. Такой метод предполагает масштабирование эквипотенциальных линий, так как они описывают область, охватывающую конечную форму поковки.

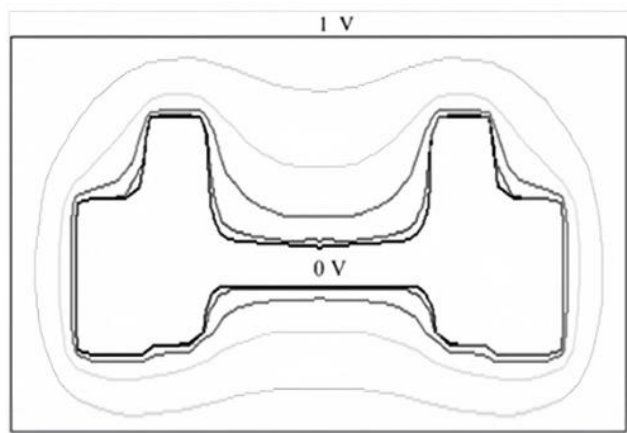


Рис. 2 - Эквипотенциальные линии между двумя заряженными проводниками, имеющими форму исходной заготовки (охватывающий внешний контур 1V) и конечной поковки (внутренний контур 0V)

Профессор Власов Ан.В. предложил заменить эквипотенциальные поверхности электростатического поля эквипотенциальными поверхностями стационарного температурного поля [3], поскольку расчет температурной и деформационной задачи возможно реализовать в рамках одного ПО QForm [4] для моделирования процессов деформирования металлических материалов. Такая замена возможна, поскольку пространственное распределение потенциалов стационарного температурного поля (температура) и электростатического поля (электрический потенциал) подчиняются одному и тому же уравнению Лапласа.

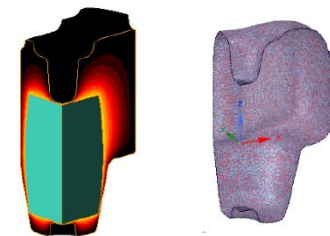


Рис.3 - Гравюра штампа, полученная изотермической поверхностью

Методика проектирования калибров, основанная на методе изотермических поверхностей

Для теплового расчета необходимо подготовить сборку, которая будет включать источник тепла и нагреваемое тело. Источником тепла является замкнутая геометрия базового калибра (известная геометрия калибра или профиля) в рамках данной задачи это геометрия калибра №2. Нагреваемое тело – масштабированная геометрия заготовки (рис.4).

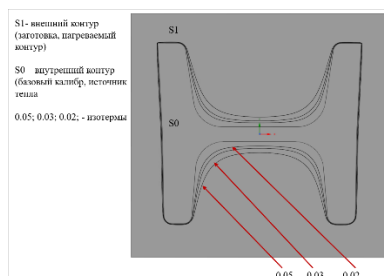


Рис.4 - Тепловая сборка

Алгоритм для получения предварительной геометрии калибра представлен ниже:

1. Выбор базового профиля (конечного контура): профиль выбирается по существующей калибровке, литературе, или аналогичным калибровкам. Геометрия базового калибра является источником тепла.

2. Определение исходного контура: внешний контур задаётся в виде геометрии масштабированной заготовки и является нагреваемым телом.

3. Формирование расчетной области: создается двумерная или упрощенная плоская геометрия, охватывающая оба контура: заготовки (нагреваемое тело) и базового калибра (источник тепла).

4. Построение изотерм: с использованием специальной программы решается задача стационарного температурного поля. Полученные изотермы соответствуют эквипотенциальным линиям между заготовкой и базовым профилем. Рекомендуемый диапазон уровней изотерм: 0.05–0.2.

5. Алгоритм корректировки ширины изотермы и анализ заполнения: в цикле выполняется правка ширины изотермы путем её масштабирования с целью учёта уширения профиля, характерного для сортовой прокатки. Проверка заполнения осуществляется в QForm. Программа выполняется автоматически с использованием API в ПО QForm.

7. Генерация геометрии предварительного калибра из изотермы: добавление геометрии буртов.

Результаты

С использованием разработанной методики, основанной на методе изотермических поверхностей по разработанному алгоритму подготовлена геометрия калибра 1 (рис.5) и итерационно подобран режим обжатий для этого калибра (рис.6). С помощью моделирования процесса прокатки в ПО QForm была проверена новая технология, поверхностных дефектов (согласно полю Gartfield (рис.7) и переполнения не выявлено.

Разработанный алгоритм является новым способом автоматизированного расчета промежуточных калибров, что может существенно сократить время разработки калибровок и обеспечить повышение качества технологии.

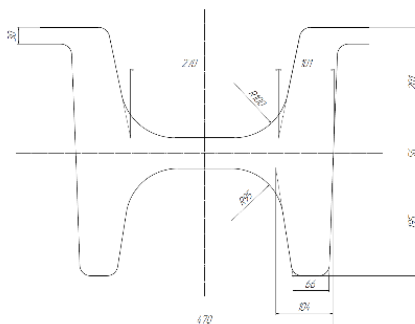


Рис.5 - Чертеж разработанного калибра №1

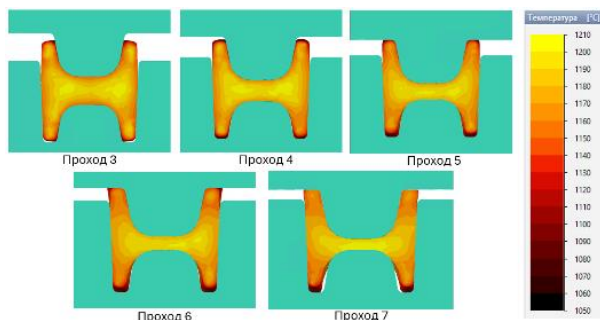


Рис.6 - Заполнение калибра №1 с полем Температуры

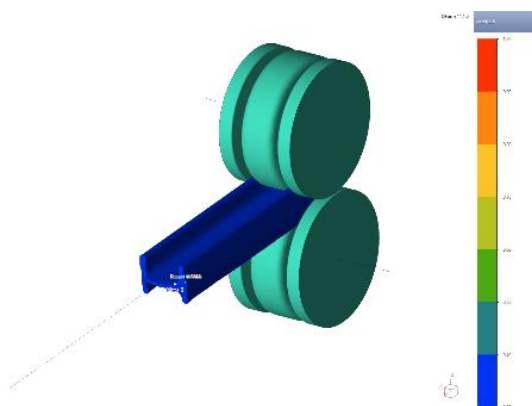


Рис.7 - Поле gartfield на последнем проходе

Список литературы

1. Гун Г.Я, Полухин П. И, Полухин, В. П, Прудковский Б. А., 1968 Пластическое формоизменение материалов
2. Lee S. R. et al. A new method of preform design in hot forging by using electric field theory //International Journal of Mechanical Sciences. – 2002. – Т. 44. – №. 4. – С. 773-792.
3. А.В. Власов, Д.В. Кривенко «Использование конечно-элементной тепловой модели для проектирования предварительных переходов процессов горячей объемной штамповки», Известия ТулГУ. Техническое науки. 2019 г. Вып.5.
4. www.qform3d.ru [Электронный ресурс] – М.: ООО «КванторФорм», 2025.– URL: www.qform3d.ru (дата обращения: 29.03.2025).

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ЗАГОТОВОК
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ 41Х1, 20Г2Р и 38ХГНМ**

Ушаков А.В., Лавриненко В.Ю.

*МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва, Россия
sasha_ushi@mail.ru*

Холодная объемная штамповка (ХОШ) является эффективным методом получения сложнопрофильных деталей. Одним из способов снижения энергосиловых параметров процесса является предварительный низкотемпературный нагрев заготовок (до 400 °С), что позволяет уменьшить силы деформирования и повысить стойкость инструмента. Методика экспериментального исследования Материалы: стали 41Х1, 20Г2Р, 38ХГНМ. Образцы: цилиндрические (по ГОСТ 25.503-97), испытания на сжатие при температурах 20; 200; 225; 250; 275; 300 °С. Скорости деформации: 0,01 и 0,1 с⁻¹. Использовано оборудование: универсальная испытательная машина УТС-Р-250-0,5 с системой температурных испытаний СТИ ТС 2-1200. По результатам испытаний построены кривые упрочнения и зависимости напряжения течения σ_s от температуры.

Основные результаты. 1. Сталь 41Х1: наибольшее снижение напряжения текучести – до 1,3...1,5 раза при нагреве 225...275 °С. 2. Сталь 20Г2Р: снижение напряжения текучести до 1,2...1,3 раза при нагреве 250...275 °С. 3. Сталь 38ХГНМ: снижение напряжения текучести до 1,3...1,4 раза при нагреве 225...250 °С. 4. Влияние скорости деформации в диапазоне 0,01...0,1 с⁻¹ несущественно.

Практическая значимость 1. Предварительный нагрев заготовок позволяет уменьшить силы деформирования и нагрузки на инструмент до 1,5–2 раз. 2. Стойкость инструмента при ХОШ может возрасти в 2–3 раза. 3. Полученные зависимости могут быть использованы при разработке режимов ХОШ сложнопрофильных деталей.

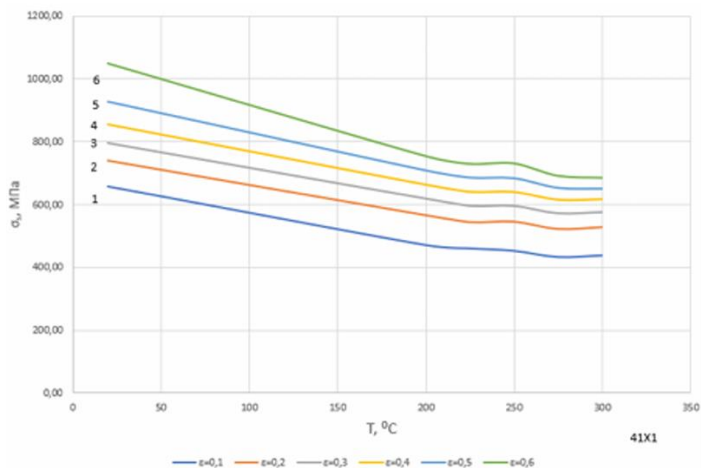


Рис.1 - Зависимости напряжения течения от температуры образцов из стали 41X1 при скорости деформации 0,01 с-1 при различных значениях степени деформации

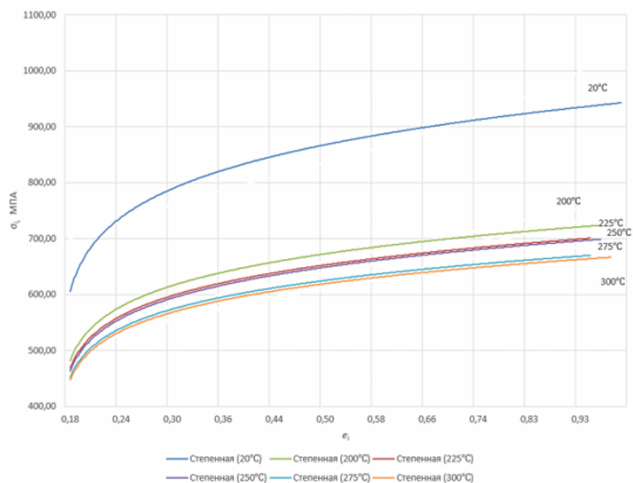


Рис.2 - Кривые упрочнения образцов из стали 41X1 при температурах деформирования 20; 200; 225;250; 275 и 300 °С и скорости деформации 0,1 с-1

Выводы

1. Установлены рациональные интервалы температур предварительного низкотемпературного нагрева сталей 41X1, 20Г2Р и 38ХГНМ.

2. Предварительный нагрев является эффективным технологическим приемом снижения энергосиловых параметров и повышения ресурса инструмента при ХОШ.

Список литературы

1. Лавриненко В.Ю., Ушаков А.В. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок на механические свойства сталей 41Х1, 20Г2Р и 38ХГНМ // Заготовительные производства в машиностроении. 2025 № 1.

2. Лавриненко В.Ю. Инновационные технологии кузнечно-штамповочного производства. Разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана // В сборнике: МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 137-140.

3. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Кирсанов А.С. Влияние низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию // Сталь. 2021. №12. С. 29-31.

4. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С., Габдулхаков И.И. Снижение сил деформирования и нагрузок на инструмент при холодной объемной штамповке сложнопрофильных деталей с использованием предварительного низкотемпературного нагрева заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20. № 1. С. 22-27.

УДК 669-1

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА АК7

Байковский Ю.В., Константинов И.Л., Богданов Е.В., Бернгардт В.А.
ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
baykovskiy98@gmail.com

Литейные алюминиевые сплавы, в частности сплав АК7, занимают важное место в современной промышленности благодаря своим уникальным физико-механическим показателям. Сплав АК7, согласно ГОСТ 1583-93, относится к литейным алюминиевым сплавам системы Al–Si–Mg и характеризуется высокой надежностью, что делает его востребованным для производства. Тем не менее, в условиях возрастающих требований к надежности и долговечности конструкций и изделий из данных сплавов требуется принятие мер для повышения эксплуатационных характеристик готовой продукции и оптимизации технологии производства, в связи с чем данное исследование следует считать актуальным.

Современные тенденции материаловедения направлены на создание материалов улучшенными механическими и технологическими характеристиками. Алюминиевый сплав АК7 обладает рядом преимуществ, включая высокую текучесть в расплавленном состоянии, минимальную усадку и хорошую обра-

бываемость, что обеспечивает его повсеместное использование во многих отраслях промышленности. Однако их деформационные свойства, особенно при высоких нагрузках и температурах, остаются недостаточно изученными. Проблемы, связанные с деформируемостью литейных алюминиевых сплавов, включают склонность к образованию трещин, низкую пластичность в литом состоянии и неравномерность структуры, что ограничивает их применение в условиях интенсивных механических воздействий [1]. Исследования в этой области направлены на разработку новых методов термической обработки, модифицирования и легирования, которые позволят улучшить структуру и свойства сплавов [2].

Несмотря на высокие литейные свойства, сплав АК7 характеризуется ограниченной пластичностью в литом состоянии, что создает трудности при механической обработке и эксплуатации под действием высоких нагрузок. Основные проблемы деформируемости связаны с неоднородностью структуры, наличием крупных кристаллов кремния и интерметаллидов, а также склонностью к образованию микротрещин при деформации [3]. В работах [4] отмечается, что деформация литейных алюминиевых сплавов часто сопровождается локальным развитием дислокаций, что приводит к снижению усталостной прочности. Кроме того, высокое содержание кремния в эвтектике способствует хрупкому разрушению, особенно при динамических нагрузках [5].

В связи с вышеизложенным материалом целью настоящего исследования является изучение структуры и деформационных свойств литейного сплава АК7 для разработки режимов производства автомобильных колес методом литья под низким давлением с последующей раскаткой обода. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- исследовать микроструктуру сплава АК7 в литом и термически обработанном состоянии;
- оценить влияние режимов термической обработки на деформационные свойства сплава;

В ходе исследования был проведен качественный и количественный анализ структуры сплава АК7, который показал, что предварительная термическая обработка (отжиг) перед раскаткой обода приводит к улучшению морфологии, уменьшению размеров и повышению показателя сферичности эвтектического кремния. Структурные изменения при термической обработке, рекомендуемой в работе, свидетельствуют о повышении технологической пластичности в процессе обработки металлов давлением.

Исследования структуры образцов из деформированного обода колеса после закалки и старения выявили наличие рекристаллизованных зерен, соответствующих стадии собирательной рекристаллизации. Процессы рекристаллизации, происходящие при закалке и старении, оказывают существенное влияние на уровень механических свойств дисков автомобильных колес.

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

Список литературы

1. Doty, H. and others (2025). Effect of the Casting Process on the Microstructure and Tensile Properties of Al-Si-Mg and Al-Cu-Mg-Based Alloys. *International Journal of Metalcasting*. 10.1007/s40962-025-01586-8.
2. Никитин К. В. и др. Наследственное влияние деформированных отходов на эффективность модифицирования сплавов систем Al-Si-Mg и Al-Mg // *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. – 2022. – №. 3. – С. 38-46.
3. Структурообразование литейных алюминиевых сплавов при литье под низким давлением / Т. А. Богданова, Н. Н. Довженко и др. ; Сибирский федеральный университет, 2015. – 162 с. – ISBN 978-5-7638-3189-4.
4. Ганиев И. Н., и др. Разработка литейного алюминиевого сплава, модифицированного стронцием, для литья автомобильных колес // *Известия Академии наук Республики Таджикистан*. – 2007. – №. 3. – С. 46-54.
5. Никаноров С. П. и др. Влияние скорости направленной кристаллизации и содержания кремния на структуру и прочность Al-Si-Cu-сплава // *Журнал технической физики*. – 2023. – Т. 93. – №. 4. – С. 554-561.

Секция «Деформационные процессы для формирования функциональных свойств и улучшения характеристик металлов»

УДК 621.777

ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ РАСТВОРИМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ MG-AL-ZN И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Парубок А.В., Сидельников С.Б.

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

Данная работа выполнена для реализации энергоэффективных методов получения прутков для изготовления шаров из растворимых магниевых сплавов с применением совмещенных методов термомеханической обработки [1].

Операция многостадийного гидроразрыва пласта является распространенным способом добычи нефти. Сегодня для активации муфт востребованным решением является применение растворимых шаров, которые позволяют значительно облегчить операцию гидроразрыва пласта и снизить затраты на ее реализацию [2]. Растворимые шары изготавливаются из систем магниевых и алюминиевых сплавов, например магниевого сплава системы Mg-Al-Zn с добавлением Cu и Ni, которые позволяют регулировать скорость растворения. Шары для гидроразрыва пласта должны обладать высокими прочностными свойствами и иметь гарантированное время растворения [3].

Магниевые шары преимущественно изготавливают литьем и последующей токарной обработкой, в результате чего возникает множество отходов, а необходимые высокие прочностные свойства приходится достигать корректировкой химического состава сплава [4]. Для эффективного получения продукции из растворимых магниевых сплавов целесообразно применять совмещенные методы обработки металлов давлением. Метод совмещенной прокатки-прессования (СПП) позволяет получать деформированные полуфабрикаты с высокими механическими характеристиками из магния и его сплавов [1].

Для оценки возможности получения деформированных полуфабрикатов из растворимого магниевых сплава, а также определению влияния процесса СПП на структуру и свойства, были проведены экспериментальные исследования. На лабораторной установке СПП 200 [1] осуществляли прессование слитков квадратного сечения со стороной $13,5 \pm 0,3$ мм из магниевого растворимого сплава. Слитки нагревали до температуры 400 °С и затем задавали в прокатные валки, вращающиеся с частотой 4 об/мин. В результате получали прутки круглого сечения 7 мм.

Далее проводили анализ структуры и свойств слитков и деформированных прутков. Исследования микроструктуры проводились на микроскопе фирмы CARL ZEISS Axio Observer A1m при увеличении 50 и 200 крат. Для определения механических свойств проводили испытание на разрыв литых и деформированных полуфабрикатов на универсальной машине LFM400. Временное сопротивление для слитков и прутков составил 156 МПа и 265 МПа соответственно. Относительное удлинение деформированных полуфабрикатов составило 8 %, а для литых - 1 %. Металлографические исследования выявили, что структура прутков в продольном сечении представляет собой вытянутые зерна α -твердого раствора с расположенными по их границам избыточными фазами. При деформации происходит дробление кристаллов интерметаллидных фаз, вытягивание их в направлении деформирования, в результате чего происходит образование строчечной структуры (рис.1).

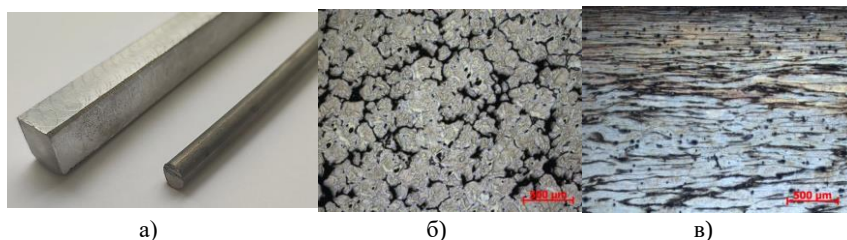


рис. 1 – Полуфабрикаты из растворимого магниевого сплава и их микроструктура: а - слитки и прутки; б – микроструктура литого образца; в - микроструктура деформированного образца, х200

Таким образом, в ходе экспериментального исследования была установлена практическая реализуемость процесса СПП литых заготовок из магниевого растворимого сплава системы Mg-Al-Zn с добавлением Cu и Ni. Механические испытания и металлографические исследования позволили сделать вывод о перспективности применении метода СПП для получения деформированных полуфабрикатов для нужд нефтегазовой промышленности.

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

Список литературы

1. Determination and structural analysis of process parameters for combined rolling and extrusion of rods from magnesium ingots / S. B. Sidelnikov, E. S. Lopatina, A. V. Parubok [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 134, No. 5-6. – P. 2623-2636. – DOI 10.1007/s00170-024-14294-0.
2. Удовико И. И. Опыт применения МГРП на нефтяных и газовых месторождениях //Энигма. – 2020. – №. 27-1. – С. 144-150.

3. Sun J. et al. A review on magnesium alloys for application of degradable fracturing tools //Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – Т. 10. – №. 10. – С. 2649-2672.

4. Chen L. et al. Effects of copper on the microstructure and properties of Mg-17Al-3Zn alloys //Materials and Corrosion. – 2015. – Т. 66. – №. 10. – С. 1159-1168.

УДК 621.7.043

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДАВЛЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ

Конюшенко М.Н., Захарьев И.Ю.

*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация
mnkonyushenko_1@edu.hse.ru*

В работе проводились имитационное моделирование процесса сверхпластической формовки (СПФ) алюминиевого сплава в матрицу специальной формы.

СПФ позволяет получать тонкостенные изделия с равномерным распределением толщины в образце [1], но в то же время для проявления сверхпластических свойств материала режим давления задают таким образом, чтобы поддерживать скорость деформации в оптимальном диапазоне значений (10^{-4} – 10^{-3}) [2]. Для моделирования использовалась реологическая модель упруго вязко-пластичной среды, которая описывает поведение сверхпластичных материалов в широком диапазоне скоростей деформации, предложенная О. М. Смирновым. Известно, что сверхпластичность материала сильно зависит от скорости деформации, в статье [3] получена явная формула оптимальной скорости деформации для СПФ, а также показателя скоростной чувствительности в уравнении Бэкофена [4].

Однако в силу того, что поддержание постоянной маленькой скорости деформации делает процесс более технологически сложным и долгим. В данной работе проводится исследование возможности применения различных режимов давления с точки зрения изменения распределения толщины заготовки.

В работе рассматривается формовка заготовок толщиной в 2 мм и 3 мм, с полным трением скольжения, а также с коэффициентами трения Кулона 0.15, 0.2, 0.25. Производился анализ режимов давления следующих видов: 1) поддерживающих постоянную величину давления от 0.1 МПа до 2.0 МПа с шагом 0.1 МПа; 2) поддерживающих постоянную оптимальную скорость деформации; 3) скачкообразные режимы давления, поддерживающие постоянную скорость деформации 10^{-4} с⁻¹ до касания заготовкой определённой точки матрицы (рис.1.), после чего поддерживающие постоянную скорость деформации 10^{-3} с⁻¹.

Из полученных распределений толщины можно сделать выводы о важности учёта геометрической конфигурации с формовочной матрицы, и на участ-

ках наибольшего утонения необходимо поддерживать маленькую скорость деформации.

Также для режимов давления с изменением целевой скорости деформации в точках 5-7 было показано, что относительное отклонение от режима с поддержанием постоянной скорости деформации составляет менее 10%. Также было показано, что использование постоянного режима давления, поддерживающего 0.5 МПа и 0.8 МПа для заготовок с начальной толщиной 2 и 3 мм, соответственно, обеспечивает наименьшее относительное отклонение распределения толщины от получаемого с поддержанием постоянной скорости деформации. В обоих случаях оно не превышало 5%. Использование постоянных и скачкообразных режимов давления также позволяет уменьшить время технологического процесса СПФ в несколько раз.

Таким образом, в работе показана применимость режимов давления, обеспечивающих значительную оптимизацию по времени формовки при небольших потерях в равномерном распределении толщины относительно режима давления с поддержанием постоянной скорости деформации.

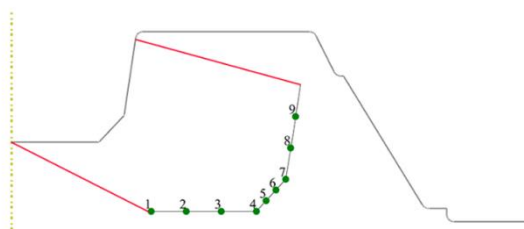


Рис. 1 – Геометрия формовочной матрицы, а также набор точек, в которых происходит смена целевой скорости деформации в скачкообразных режимах давления

Список литературы

1. Сафиуллин Р.В., Мухаметрахимов М.Х., Сафиуллин А.Р., Малышева С.П., Козлов А.Н., Берестов А.В., Харин С.А., Морозов М.А. «Исследование технологических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V» Letters on Materials 8 (3), 2018 с. 329-334
2. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А.// М. Сверхпластичность: Материалы, теория, технологии. – М.: книжный дом «Либроком» 2009. 320с
3. Aksenov S., Chumachenko E., Logashina I., Experimental investigation of Ti-Al-V alloy superplastic behavior. In Proceedings of the METAL 2012 – Conference Proceedings, 21st International Conference on Metallurgy and Material, Brno, Czech Republic, 23-25 May 2012 4. Backofen W.A., Turner I.R., Avery D.H., Superplasticity in an Al-Zn Alloy. Trans. ASM 1964, 57, 980-990

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА РАЗМЕР ЗЕРНА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Mg-Mn

Дерябина А.И., Кищик А.А., Михайловская А.В.

Университет МИСИС, Москва, Россия

m2104814@edu.misis.ru

В настоящее время алюминиевые сплавы активно применяются в изготовлении сварных конструкций (цистерны бензо- и цементовозов) в автомобильной и железнодорожной отраслях, поэтому для снижения массы изделий актуальна задача – применение более прочного хорошо свариваемого сплава, что позволяет достичь повышения грузоподъемности. Для получения изделий сложных форм алюминиевые сплавы требуют повышенных температур деформации.

Целью данной работы является изучение влияния способов обработки на размер зерна и деформационное поведение сплава системы Al-Mg-Mn с повышенным содержанием марганца. Образцы подвергали холодной прокатке со степенью деформации 67-85 % и последующему рекристаллизационному отжигу в интервале температур 350–540 °С.

Показано, что увеличение степени деформации с 67 % до 80 % приводит к уменьшению среднего размера зерна с $9,4 \pm 0,4$ мкм до $6,0 \pm 0,3$ мкм при подсолидусных температурах, росту показателя скоростной чувствительности и значений относительного удлинения. Дальнейшее увеличение степени деформации прокаткой слабо сказывается на размере зерна и свойствах.

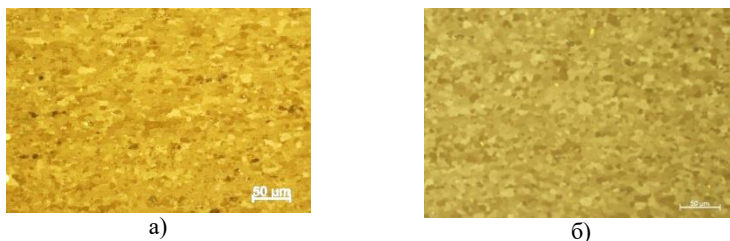


Рис. 1 - Зеренная структура сплава после отжига при 400 (а) и 500 °С (б)

Образцы, полученные прокаткой на 80 % демонстрируют относительное удлинение около 400 % при температуре 500 °С в скоростном диапазоне $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ – $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Снижение температуры до 350-400 °С приводит к снижению скоростной чувствительности напряжения и уменьшению удлинений до 150-200 %.

Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ № 23-19-00791

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГОРЯЧЕЙ-ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Рашевский К. А., Песин А.М., Пустовойтов Д.О.,
Песин И.А., Барышникова А. М.
МГТУ им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия
kirill45630@gmail.com

В процессе холодной прокатки низкоуглеродистых сталей металл быстро упрочняется вследствие наклёпа, что делает дальнейшую пластическую деформацию невозможной без промежуточной термической обработки. Это ограничивает допустимую величину обжатия за один проход на непрерывном стане холодной прокатки и, следовательно, уменьшает исходную толщину подката при заданной толщине готовой полосы.

В работе рассматривается возможность повышения технологической пластичности методом асимметричной прокатки, что позволяет увеличить суммарное обжатие [1]. При рассмотрении технологической цепочки «горячая–холодная прокатка» как единого производственного процесса установлено, что увеличение толщины заготовки для холодного деформирования способствует росту производительности широкополосного стана горячей прокатки.

Классический симметричный режим холодного деформирования реализуется на пятиклетевом стане. Первые четыре клетки обеспечивают уменьшение толщины металла за счёт обжатия до 28% на каждой стадии, а пятая клетка формирует шероховатость поверхности полосы при минимальном обжатии до 5%. Такой агрегат используется для получения холоднокатаной полосы из стали марки 08пс толщиной 1,5 мм из заготовки толщиной 5 мм. Эксперименты проводились на лабораторно-промышленном прокатном стане ДУО-400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилиева МГТУ им. Г. И. Носова» [2].

Исследования показали, что применение асимметричного деформирования позволяет достичь большей степени суммарного обжатия по сравнению с традиционной схемой. В частности, из горячекатаного подката толщиной 5 мм удалось получить конечную толщину 0,7–0,8 мм, тогда как при обычной прокатке аналогичный результат достигается лишь при использовании подката толщиной до 3,9 мм.

Для оценки влияния асимметричной прокатки на структуру материала был произведён неполный отжиг, после чего проведён металлографический анализ, позволивший установить зависимость между коэффициентом асимметрии и размером ферритного зерна. После симметричной деформации и последующего неполного отжига средний диаметр зерна составил 16 мкм (9-й балл зернистости). При асимметричной прокатке (режим 3) этот показатель снизился до 11 мкм (10-й балл), а наибольшее измельчение структуры достиг-

нуто при асимметричной деформации с применением смазки (режим 6), когда размер зерна уменьшился до 8 мкм (11-й балл зернистости) [3].

Таким образом, внедрение технологии асимметричного деформирования вместо традиционного режима позволяет не только повысить производительность станов горячей прокатки, но и обеспечить значительное измельчение ферритного зерна, что положительно сказывается на структуре и свойствах готовой полосы.

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

Список литературы

1. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Pesin L.A., Nosov L.V., Temnikov D.A., Sverchikov A.I. Testing of asymmetric cold rolling of high-carbon steel strips aimed at excluding intermediate annealing. – Magnitogorsk : Nosov Magnitogorsk State Technical University, Research & Engineering Centre MMK PJSC, Rolling Shop 8 MMK PJSC, [б. г.]. – 6 с.

2. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Барышников М.П., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е., Носов Л.В., Грачев Д.В. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса КУКА 160. – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», [б. г.]. – 8 с

3. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Носов Л.В., Барышникова А.М. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков // Черные металлы. – 2022. – № 5. – С. 55–60.

УДК 621.778.1:004.9

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ МАРКИ ШХ-15

Платов С.И., Керимова Л.Ф.

*ФГБОУ ВО «МГТУ» им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
liliya-kerimova@mail.ru*

Современное производство качественной проволоки требует постоянно-го совершенствования технологий и оборудования.

Проволока из стали ШХ-15 широко применяется в машиностроении, строительстве и электротехнических изделиях благодаря своим высоким механическим свойствам. Однако традиционные процессы волочения имеют ряд недостатков, снижающих производительность и ухудшающих характеристики готового изделия.

Целью настоящего исследования стало создание модернизированной технологии волочения проволоки марки ШХ-15, позволяющей значительно

повысить показатели качества готовых изделий и снизить производственные издержки.

Задачи исследования:

- изучение физико-механических свойств исходного сырья (стали ШХ-15);
- оптимизация режимов термообработки перед волочением;
- модификация конструкции инструмента (волоки) для снижения износа и увеличения срока службы;
- определение оптимального сочетания смазки и охлаждения для минимизации деформаций металла;
- оценка экономичности и экологичности предложенной технологии.

Для достижения поставленных целей использовались экспериментально-аналитический метод исследований, включающий лабораторные испытания образцов проволоки и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния материалов. Особое внимание уделено подбору оптимальной геометрии волоков, выбору эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей и разработке нового метода предварительной подготовки заготовки

Предложенная технология позволяет существенно повысить прочность и однородность структуры готовой проволоки, сократить энергозатраты и уменьшить износ оборудования. Это открывает новые возможности для расширения областей применения высокопрочной проволоки марок ШХ-15 в промышленности и снижает себестоимость производства.

Выводы:

1. Усовершенствованная технология обеспечивает улучшение механических свойств проволоки на 15-20%.
2. Сокращение расхода энергии и увеличение ресурса рабочих инструментов снижают затраты на производство примерно на 10-15%.
3. Результаты внедрения подтверждают высокую эффективность разработанной методики и позволяют рекомендовать ее для массового промышленного применения.

Таким образом, представленная работа имеет большое научное и прикладное значение, способствуя повышению конкурентоспособности отечественной металлургической отрасли.

Список литературы

1. Карпенко А.И., Строганов Ю.А. Совершенствование технологии волочения сталей типа ШХ // Металлургия и металлургическое оборудование. – 2020. – № 3. – С. 89-96.
2. Котов Д.В., Иванов Г.С. Повышение качества проволоки из инструментальной стали методом оптимизации технологического процесса // Современные тенденции развития металлургии и металлообработки. Сборник статей конференции. Москва, 2021. – С. 123-130.
3. Новожилов Н.Н., Смирнова Е.М. Применение инновационных подходов в производстве высокопрочных проволочных изделий // Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии металлов». СПб.: Политех-пресс, 2022. – С. 155-161.

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ 5XXX СЕРИИ СО СКАНДИЕМ

Никитина М.А., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
mgurbich@yandex.ru

Алюминиевые сплавы 5XXX с высоким содержанием магния имеют пониженную технологическую пластичность при прокатке. Одной из проблем является растрескивание кромки, что приводит к введению большего числа отжигов и применения эджеров.[1] Одним из важных направлений развития алюминиевых сплавов 5XXX серии является введение добавок скандия и циркония, с целью повышения удельного предела текучести, что значительно увеличивает стоимость полуфабрикатов. Для решения задач по снижению издержек и повышению технологической пластичности процесса в данной работе предложено введение асимметричной прокатки.

Асимметричная прокатка позволяет получить более мелкодисперсную структуру, в отличие от традиционной схемы за счет одновременного возникновения в металле высоких деформаций сжатия и сдвига из-за противоположно направленных сил контактного трения, действующих на заготовку одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями или имеющих разный диаметр. Сдвиговые деформации при этом характеризуются тангенсом макроскопического угла наклона слоев металла в вертикальной плоскости. Таким образом, реализация высоких сдвиговых деформаций является определяющим фактором при разработке процесса асимметричной прокатки для получения ультрамелкозернистой структуры [2]. Сдвиговая составляющая оказывает значительное влияние на величину истинной деформации. Это позволяет за один проход осуществлять более высокое обжатие, чем при классической симметричной прокатке. Данный способ позволяет уменьшить количество проходов, что повышает производительность и снижает затраты на производство [3].

Исследование проводилось в Лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П.Жилиева, имеющей в своём составе уникальный прокатный стан ДУО 400 с возможности проведения асимметричной прокатки. Работа проводилась в два этапа. На первом этапе прокатке подвергался деформируемый термически неупрочняемый свариваемый алюминиевый сплав системы алюминий-магний-скандий 1545К с содержанием скандия 0,17-0,27%. Основной задачей данного исследования являлось определение влияния рассогласования скоростей рабочих валков на усилие прокатки, технологическую пластичность, микроструктуру и механические свойства при горячей и холодной прокатке.

Замена симметричной прокатки на асимметричную при горячей прокатке алюминиевого сплава 1545К позволила сократить три прохода в чистовой клети. Механические свойства, полученные в результате асимметричной прокат-

ки, свидетельствуют о её положительном влиянии на прочностные характеристики.

На втором этапе прокатке подвергался деформируемый термически неупрочняемый свариваемый алюминиевый сплав системы алюминий-магний-скандий 1580 с содержанием скандия 0,05-0,14%. На данном этапе ассиметричное деформирование применялось только при горячей прокатке. Основной задачей стояло подтверждение положительного влияния ассиметричной прокатки на сплавы системы алюминий-магний-скандий и определение коэффициентов ассиметричной прокатки и разработка режима.

Наиболее рациональное использование усилий прокатки при коэффициенте ассиметрии 1,5, однако при повышении коэффициента свыше 1,3 образуются дефекты такие как сабельность и растрескивание кромки. Исследование микроструктуры до и после отжига, а также исследование твердости показали, что при применении ассиметричной прокатки возможно отказаться от отжига после горячей прокатки, что также положительно сказывается на сокращении издержек при производстве катаных полуфабрикатов.

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

Список литературы

1. Кондратьева Н.Б., Золоторевский Ю.С. Сплавы алюминия с магнием (магналий) // В кн.: Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд. / Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. 2-е изд. перераб., и доп. - М.: Металлургия, 1984. С. 37-51.
2. Песин А. М., Пустовойтов Д. О., Швеева Т. В. [и др.]/Моделирование немонотонности течения металла при ассиметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 56-63.
3. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Кожемякина А.Е., Носов Л.В., Сверчков А.И. Разработка технологических схем ассиметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью. Теория и технология металлургического производства. 2022; 41(2):32-40.

УДК 669.717, 669.7.017

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ОЛОВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА AL-1%CU-1,2%Mn

Цыденов К.А., Белов Н.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия
kirillcydenov@yandex.ru*

У марочных алюминиевых сплавов существует серьезный недостаток, который заключается в их недостаточной жаропрочности. Основные упрочня-

ющие алюминиевые фазы, такие как Al_2Cu , Al_2CuMg , Mg_2Zn , вносят значительный вклад в механические характеристики сплавов за счет высокой плотности распределения и большой объемной доли, однако, они являются термически не стабильными и при воздействии температур выше 250°C плотность распределения этих фаз значительно снижается, что приводит к уменьшению механических характеристик. Данная проблема является основной причиной, по которой алюминиевые сплавы имеют ограничения по применению в изделиях и конструкциях, подвергающихся нагреву. Повысить жаропрочность алюминиевых сплавов возможно при помощи формирования эвтектических фаз, обладающих благоприятной мелкодисперсной морфологией и термической стабильностью, что показано в работе [1]. Также повышению жаропрочности способствует добавление легирующих компонентов, которые образуют вторичные выделения, обладающие высокой термической стабильностью, однако известные на данный момент элементы либо имеют низкую растворимость в твердом растворе алюминия (Zr, Sc, Hf и т.д.), из-за чего объемная доля таких вторичных фаз не высока, либо имеют низкую плотность выделения (Mn, Cr), оба этих фактора ограничивают потенциальный вклад в упрочнение от фаз образованных данными элементами. Повышение растворимости легирующих элементов в твердом растворе алюминия возможно разве что с помощью высоких скоростей охлаждения при кристаллизации, что в большинстве изделий обеспечить не представляется возможным. В то время как плотность выделения может быть увеличена малыми добавками таких элементов как Sn, Cd, In и т.д. [2].

В данном исследовании литьем в графитовую изложницу были получены слитки размерами $10 \times 40 \times 180$ мм двух сплавов: первый сплав $\text{Al}-1\%\text{Cu}-1,2\%\text{Mn}$ (далее 11), второй сплав $\text{Al}-1\%\text{Cu}-1,2\%\text{Mn}-0,1\%\text{Sn}$ (далее 11Sn). Сплавы изготовили на основе первичного алюминия А99. Медь и олово вводили в чистом виде, марганец в виде лигатуры $\text{Al}-20\%\text{Mn}$. Состав слитков экспериментальных сплавов был установлен с использованием электронного микроскопа методом МРСА.

Слитки экспериментальных сплавов были подвергнуты холодной прокатке при до толщины 2 мм (степень обжатия 80%). Далее полученные листы были закалены при температуре 630°C и отожжены при температурах от 200 до 450°C с шагом 50°C , на каждом этапе производились измерения твердости и электропроводности. Таким образом было выявлена температура, при которой распад твердого раствора происходит с высокой плотностью вторичных выделений. После этого холоднокатанные листы были закалены при температуре 630°C и состарены при температуре 375°C в течение 21 часов. Затем из состаренных листов были вырезаны образцы в виде полос размерами 10×120 мм и проведены испытания на одноосное растяжение. Также для определения плотности выделения и размеров фаз были получены снимки ПЭМ состаренных листов.

В результате, было установлено, что в сплаве 11Sn распад твердого раствора начинается при более низкой температуре 350°C , что позволяет добиться высокой плотности выделения фазы $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ как видно на снимке ПЭМ (рис.1) размер вторичных выделений в сплаве 11Sn в среднем составляет око-

ло 50 нм. Сравнение механических характеристик экспериментальных сплавов показывает значительное увеличение твердости и предела текучести в сплаве с оловом (на ~25 HV и 60 МПа соответственно).

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены получение подобного результата без применения закалки.

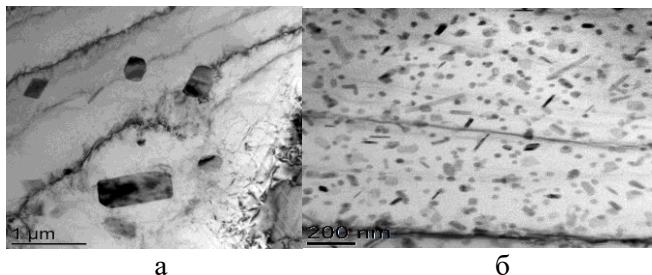


Рис. 1 – Снимки ПЭМ сплавов 11(а) и 11Sn(б) в состаренном состоянии

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25–19–00002, № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015>

Список литературы

1. Belov N.A., Kovalev A.I., Vinnik D.A., Tsydenov K.A. Comparative analysis of phase composition and heat resistance of piston silumin and experimental alloy Al4Cu2Mn0,5Ca0,2Zr (wt. %) // Metallurgist. – 2024. – Т. 68. – № 6. – С. 866-876.
2. Akopyan, T. K., Letyagin, N. V., Belov, N. A., Fortuna, A. S., & Nguen, X. D. The role of Sn trace addition in the precipitation behavior and strengthening of the wrought Al–Cu–Mn-based alloy // Journal of Materials Science. – 2023. – Т. 58. – №. 19. – С. 8210-8229.

УДК 621.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Барышников П.М., Песин А.М., Локотунина Н.М., Пустовойтов Д.О.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
pavelbar26@mail.ru

Использование кинематической асимметрии в процессе прокатки позволяет улучшить механические, технологические свойства и микроструктуру металлов. Известны эффекты метода: снижение усилия и энергопотребления, повышение пластичности и однородности деформации, измельчение зерна.

Целью данной работы являлось изучение влияния отношения скоростей валков на энергосиловые параметры прокатки стали 70.

Эксперименты проводились на уникальном промышленно-лабораторном стане 400 (УНУ). Образцы ($\varnothing 16 \times 200$ мм) из стали 70 нагревали до 845°C и прокатывали за один проход в симметричном ($V_1/V_2 = 1$) и асимметричном (V_1/V_2 от 1.25 до 5) режимах. Фиксировали усилие прокатки, крутящие моменты на валках и конечную толщину.

При увеличении отношения скоростей рабочих валков V_1/V_2 с 1 до 5 усилие прокатки снизилось с 725 кН до 156 кН, а относительное обжатие возросло с 72% до 86%.

На валке с большей скоростью момент возрастал (до 7839 Н·м при $V_1/V_2=2$), на медленном – снижался (до 537 Н·м при $V_1/V_2=5$). Пределы оборотования не превышены.

Асимметричная прокатка эффективно снижает энергосиловые нагрузки и повышает технологическую пластичность высокоуглеродистой стали 70, позволяя достигать больших обжатий. Полученные данные перспективны для разработки режимов прокатки, в том числе в трехвалковых калибрах.

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

Список литературы

1. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / А.М. Песин, Х. Дзя, А. Кавалек, П. Сжинский, Д.О. Пустовойтов, А.В. Сатонин, А.С. Чуруканов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 86-91.
2. Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Буканов Ж.У. Исследование процесса несимметричной прокатки заготовок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 27-35.
3. Синицын В.Г. Теоретическое обоснование снижения энергосиловых параметров при несимметричной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 1974. №3. С. 69-72.
4. Исследование возможности измельчения зерна при горячей прокатке листов из стали 20 / Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Барышникова А.М., Ребренцева П.В., Лактионов А.А., Чернов А.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы 83-й международной научно-технической конференции. 2025. №1. С. 154.
5. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса КУКА 160 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, Д.В. Грачев // Механическое оборудование металлургических заводов. 2021. № 1 (16). С. 9-13.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Миколаенко В.В., Аксёнов С.А.

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Российская Федерация
vmikolaenko@hse.ru*

Сверхпластическая формовка (СПФ) — это передовая технология обработки материалов давлением, используемая для производства тонкостенных изделий сложной геометрической формы [1,2]. Разработка технологических режимов производства таких изделий требует точного описания модели деформационного поведения используемых сплавов. Основным экспериментальный метод исследования таких свойств – испытание плоских образцов на растяжение с постоянной скоростью деформации. В международном стандарте ASTM E2448 [3] описаны особенности проведения таких испытаний, получения экспериментальных данных и построения по ним кривых «напряжение-деформация», которые отражают эволюцию микроструктуры материала в ходе деформирования. В связи с высокими температурами определение деформации производится исключительно по анализу перемещения захватов, что приводит к неточностям в выходных данных о напряжении и деформации [4]. Основным источником таких ошибок – неоднородность течения материала в образце, обусловленная вытеканием части материала из захватной зоны образца в рабочую [5].

В данной работе предлагается методика построения модели материала, учитывающая неоднородность течения материала в образце с помощью конечно-элементного моделирования (рис. 1а). Такая процедура является итерационной, на каждом её шаге проводится серия компьютерных моделирований, соответствующих натурным испытаниям. Модель материала на каждой итерации такой процедуры калибруется исходя из разницы между кривыми «напряжение-деформация» полученных из конечно-элементного моделирования и из натурных испытаний (рис. 1б).

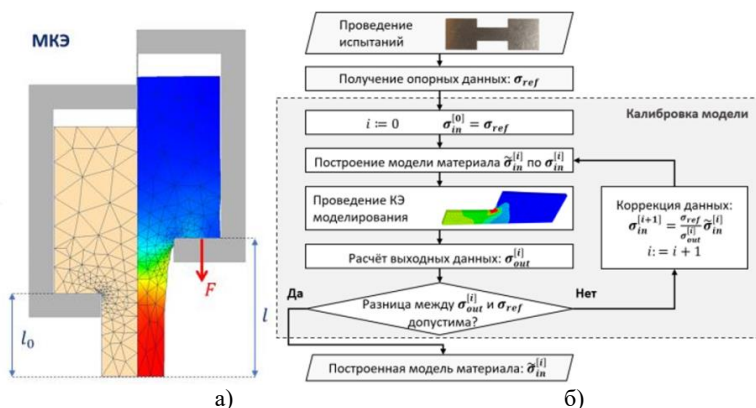


Рис. 1 – Процедура калибровки модели деформационного поведения материала: а) конечно-элементное моделирование; б) блок схема процедуры

При сотрудничестве с лабораторией «Ультрамелкозернистые металлические материалы» НИТУ МИСиС предлагаемая процедура была применена для построения модели течения алюминиевого сплава системы Al Mg–Fe–Ni. Инвариантность построенной модели к размерам образца подтверждена в ходе дополнительной экспериментальной проверки. Для автоматизации разработанной обеспечения.

Список литературы

1. Langdon T G 1982 The mechanical properties of superplastic materials Metall. Trans. A.
2. Sherby O D and Wadsworth J 1989 Superplasticity-Recent advances and future directions Prog. Mater. Sci. E2448-11 2011 Standard Test Method for Determining the Superplastic Properties of Metallic Sheet Materials ASTM B. Stand.
3. Nazzal M, Abu-Farha F and Curtis R 2011 Finite element simulations for investigating the effects of specimen geometry in superplastic tensile tests J. Mater. Eng. Perform. 20 865–76.
4. Aksenov S and Mikolaenko V 2025 Accurate determination of uniaxial flow behaviour of superplastic materials Eur. J. Mech. - A/Solids 109 105469.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА ТИТАНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Корольков О.Е., Столяров В.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

41zh1k@mail.ru

Титановые сплавы применяют в медицине вследствие их высокой биосовместимости, низкой теплоемкости и плотности, высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Для производства медицинских имплантатов используется как чистый титан (BT1-0; BT1-00; Grade 1- 4), так и титановые сплавы, самые распространенные из которых легированы алюминием и ванадием (BT-6; Ti-6Al-4V; Ti-6Al-4V ELI; Grade 5). Ультрамелкозернистый (УМЗ) титан Grade 4 также является перспективным материалом для производства имплантатов для костного и внутрикостного остеосинтеза. Данный материал может являться альтернативой титановому сплаву BT6, в составе которого имеется условно биосовместимый алюминий и токсичный ванадий [1]. УМЗ Grade 4 не уступает по механическим характеристикам сплаву BT6, но имеет такой же недостаток - недостаточную пластичность. В сплаве BT6 данный недостаток в процессе производства имплантатов устраняется с помощью горячей деформации при температурах близких к температуре полиморфного превращения. Для УМЗ Grade 4 данный способ неприменим, поскольку уже при температуре 400-500 °С начинается процесс рекристаллизации со снижением прочностных свойств. Кроме того, при нагреве титана выше 400 °С детали покрываются окалиной, удаление которой является трудоемкой операцией.

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, при котором наблюдается снижение усилий деформации, а также повышение его деформируемости под влиянием электрического тока высокой плотности [2].

Использование деформации в сопровождении импульсного тока, позволяет снизить напряжение течения в КЗ Grade 4 (рис.1, а), при этом средний размер зерна (Рис.1, б, в) остается без изменений.

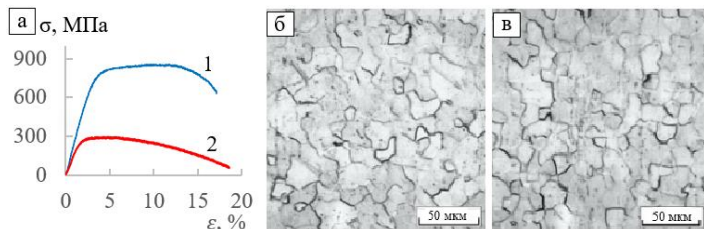


Рис. 1 – Кривые растяжения (а): 1 – без тока; 2 – с током ($j = 60 \text{ А/мм}^2$; $\tau = 500 \text{ мкс}$; $Q = 10$; $T = 200 \text{ °С}$). Микроструктура КЗ титана (б, в): исходное состояние, до растяжения (б); после растяжения с током (в)

При введении импульсного тока в процессе деформации УМЗ Grade 4 происходит резкое снижение напряжения течения при температуре, не превышающей 400 °С (рис.2, а) с сохранением размера зерна и соответственно высокой прочности данного материала (рис. 2, б, в).

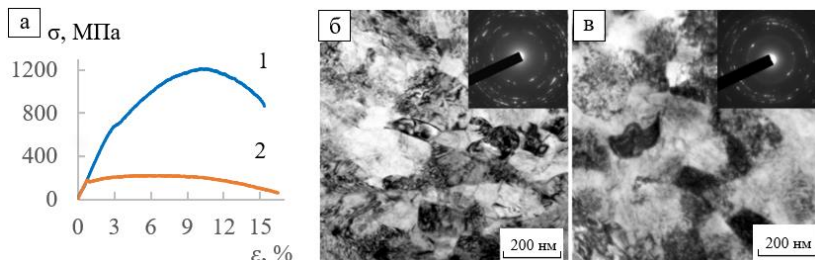


Рис.2 – Кривые растяжения (а): 1 – без тока; 2 – с током ($j = 60 \text{ A/mm}^2$; $\tau = 500 \text{ мкс}$; $Q = 10$; $T = 200 \text{ °C}$). Микроструктура УМЗ титана (б, в): исходное состояние, до растяжения (б); после растяжения с током (в). В вставке снимок микродефракции

Таким образом, деформация с импульсным током позволяет снизить напряжения течения и сохранить пластичность КЗ и УМЗ Grade 4 без заметных структурных изменений и потери прочностных свойств. Низкая температура деформации позволяет избежать образования окалины.

Список литературы

1. Иголкин, А.И. Титан в медицине / А.И. Иголкин // Титан. - 1993. - №1. С. 86-90.
2. Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы М.: МГИУ, 2001.

УДК 621.7.043

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СУЖАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦЕЛЬНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Демьяненко Е.Г., Попов И.П., Фомичев Д.С.

ФГАОУ ВО «Самарский Национальный Исследовательский Университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, Российская Федерация
compromis9@gmail.com

Технологии с использованием процессов вытяжки, обжима, раздачи или их совмещения в условиях сжимающих напряжений часто приводят к гофрообразованию и браку. Этот недостаток наблюдается у тонкостенных деталей

$S_{заг}/D(0,008$ таких, как днище баков, сопла ЖРД, перегородки газотурбинных двигателей, стенки ЖРД, поэтому их необходимо деформировать в условиях плоского напряженного состояния растяжения, с применением процессов формовки и отбортовки.

Известен способ [1], позволяющий изготовить крупногабаритные тонкостенные детали сужающейся симметричной формы ($S/D \leq 0,008$) с повышенным коэффициентом использования материала (рис.1). Поставленная задача реализуется формообразованием, как правило, сварной заготовки пуансоном, деформация которой осуществляется сначала в зоне её большего диаметра и только в конце процесса в зоне меньшего диаметра. Это возможно благодаря разным углам наклона образующих пуансона и заготовки $\alpha_n \geq \alpha_{заг}$. При этом выполняется соотношение среднеинтегральной деформацией по длине образующей заготовки: $\varepsilon_l = (\mu - 1) \frac{(1-b)(\bar{R}_{\partial R} - 1 - \ln|\bar{R}_{\partial R}|)}{\bar{R}_{\partial R} - 1}$, где μ – коэффициент анизотропии трансверсно-изотропного тела, $\bar{R}_{\partial R} = \frac{R_{\partial R}}{r_{\partial \text{кромки}}}$ – относительный радиус детали у наибольшего основания, $r_{\partial \text{кромки}}$ – радиус кромки, $R_{\partial R}$ – наибольший радиус детали, b – коэффициент пропорциональности радиуса заготовки [1].

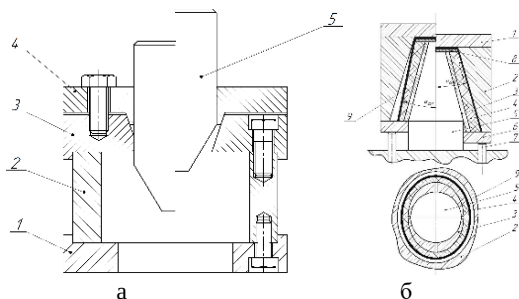


Рис. 1 – Схемы штампов способов отбортовки:

а – способ отбортовки осесимметричных деталей, б – способ отбортовки эллиптических деталей

Предлагается использовать цельноштампованную тонкостенную заготовку симметричной формы по способу [2] и осесимметричной по способу [1] с постоянной толщиной по образующим, изготовленную инкрементальной штамповкой (далее – ИШ или ИФ), вместо сварного способа. Использование сварной заготовки при изготовлении сужающихся конических оболочек отбортовкой значительно повышает стоимость конечного продукта и снижает его эксплуатационные характеристики. Это объясняется сложностью и трудоёмкостью процесса её получения, а также наличием сварного шва, который концентрирует напряжения, влияя на его качество. Кроме того, использование сварного шва не применимо к крупногабаритным тонкостенным заготовкам ($S/D \leq 0,008$).

Цельноштампованные заготовки, полученные методом ИФ, лишены этих недостатков. Они проще в производстве, не содержат сварных швов и имеют постоянную толщину по образующей, что позволяет достигать требуемых геометрических размеров при меньшем использовании материала [3]. В ИФ при движении пуансона под постоянным углом вдоль образующих относительно оси детали происходит утонение заготовки с изменением толщины по закону косинуса $S_d \approx S_{\text{заг}} \cos \theta$, где S_d и $S_{\text{заг}}$ – толщины детали и заготовки, θ – угол между образующей и осью детали. Таким образом, ИФ – единственный способ, который позволяет получать цельные детали с эллиптическими сечениями симметричной формы с постоянной толщиной по образующей.

Использование цельноштампованных заготовок в способах отбортовки [1, 2] обеспечивает получение крупногабаритных тонкостенных осесимметричных и симметричных сужающихся деталей круглых и эллиптических сечений. Толщина этих деталей увеличивается от элемента большого диаметра к меньшему диаметру, деталь обладает лучшими эксплуатационными свойствами при меньшей трудоемкости изготовления в сравнении с традиционными способами.

Список литературы

1. Демьяненко, Е.Г. Способ отбортовки тонкостенных осесимметричных конических деталей № 2769797 [Текст] / Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, А.Н. Епифанов // Федеральный Институт Промышленной Собственности. – 2022. – Бюл. № 10.
2. Ерисов, Я.А. Способ формообразования деталей сужающейся формы с концентрическим эллиптическим сечением и донной частью № 2839597 [Текст] / Я.А. Ерисов, Е.Г. Демьяненко, И.Н. Петров // Федеральный Институт Промышленной Собственности. – 2025. – Бюл. № 13.
3. Гречников, Ф.В. Современное состояние теории и технологии инкрементального формообразования / Ф.В. Гречников, С.В. Сурудин, Я.А. Ерисов, Р. Де Алваренга // Вестник Самарского Университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроения. – 2021. – № 3 (20). – С. 119-137.

УДК 669.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИИ ПАТЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ УПАКОВОЧНОЙ ЛЕНТЫ

Носов Л.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Бахчиев А.Д.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
nosov.leopold@yandex.ru

Высокопрочная упаковочная лента (ВУЛ) является ключевым материалом в логистике, упаковке и различных отраслях промышленности, где требуется надежное скрепление грузов. Традиционно, производство ВУЛ, особенно

стальных лент, включает в себя операцию патентования – термическую обработку, направленную на формирование мелкозернистой структуры и повышение прочности и ударной вязкости материала. Однако, патентование является энергоемким процессом, требующим значительных капиталовложений в оборудование и эксплуатационных расходов. Данное исследование ставит целью изучение потенциальной возможности исключения или существенной оптимизации операции патентования при производстве ВУЛ без ущерба для его эксплуатационных характеристик.

В данном исследовании рассматривается потенциал исключения патентования при производстве высокопрочной упаковочной ленты из стали 20 за счет применения асимметричной горячей прокатки. Предварительные экспериментальные данные демонстрируют, что горячая асимметричная прокатка позволяет добиться прочности до $\sigma_b = 628$ МПа, а также обеспечивает высокое относительное удлинение ($\delta_5 = 20.2\%$). Это связано с тем, что асимметрия скоростей валков вносит дополнительную деформацию сдвига, что в свою очередь приводит к существенному измельчению зерен феррита [1,2]. Последующая холодная симметричная прокатка существенно повышает временное сопротивление до $\sigma_b = 1012$ МПа, при этом относительное удлинение снижается до $\delta_5 = 8.9\%$, что соответствует и даже превосходит установленные нормативные требования для ВУЛ.

Эти результаты указывают на возможность использования горячей асимметричной прокатки перед холодным переделом в качестве эффективной альтернативы традиционному патентованию. Дальнейшее системное исследование позволит научно обосновать и разработать новую, более эффективную и экономичную технологию производства данного вида упаковочной продукции.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Исследование возможности измельчения зерна при горячей прокатке листов из стали 20 / Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Барышникова А.М., Ребренцева П.В., Лактионов А.А., Чернов А.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы 83-й международной научно-технической конференции. 2025. №1. С. 154.
2. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgia. 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МАРШРУТЫ ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

**Шеметова Е.С., Терентьев Д.В., Харитонов В.А.,
Усанов М.Ю., Платов С.И.**

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия
Hellensh88@list.ru*

Процесс изготовления биметаллической проволоки включает два этапа: получение заготовки (катанки) и готовой продукции (проволоки). На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, проводившихся в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова, учеными была разработана технология производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения металлов и внедрена на одном из предприятий, г. Магнитогорска [1]. Данная технология позволила значительно повысить сцепление оболочки с сердечником и устойчивость процесса волочения катанки в проволоку. Однако при этом вопрос снижения затрат на производство биметаллической проволоки остался не решенным. Поэтому важным является расчет эффективного маршрута волочения, который должен обеспечить получение качественной проволоки с минимальными затратами на ее изготовление. Для анализа выбран существующий маршрут изготовления проволоки диаметра 1,15 мм, включающий три передела и 20 протяжек на одном из предприятий г. Магнитогорска, а также предлагаемый маршрут волочения, где использовали методику, разработанную в нашем университете, которая основывается на оценке напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации [2, 3, 4, 5]. Результаты расчетов обеспечивают возможность получения проволоки заданного уровня качества при минимальных энерго- и материальных затратах. Анализ действующего и предлагаемого маршрутов волочения показал, что последний обеспечивает устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных), требуемое качество проволоки, за счет обеспечения равномерной деформации по сечению проволоки и высокую производительность за счет повышения стойкости волок, и уменьшения суммарной длины проволоки, проходящей через волоки. При этом количество протяжек сократилось на 7 или 35%, экономия электроэнергии составила 23%. Это обеспечивает снижение затрат на покупку оборудования и амортизационные отчисления также на 35%.

Список литературы

1. Стабильность процессов производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения Чукин М.В., Ситников И.В., Щербо Ю.А., Копцева Н.В.: Монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 234 с.
2. Харитонов, В. А. Совершенствование деформационных режимов волочения проволоки из углеродистых марок стали в монолитных и роликовых

волоках: монография / В.А.Харитонов, М.Ю. Усанов – Магнитогorsk: Изд-во Магнитогorsk. гос. техн. ун-та им.Г.И. Носова, 2020г. 133 с.

3. Совершенствование технологии изготовления углеродистой проволоки на основе повышения эффективности деформационных режимов волочения. Усанов М.Ю. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / магнитогorskий государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогorsk, 2018 – 16с.

4. Харитонов, В. А.Производство пружинной проволоки: учеб. пособие В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. Магнитогorsk: Изд-во Магнитогorsk. гос. техн. ун-та им.Г.И.Носова, 2013г. 151 с.

5. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А. Вестник Магнитогorskого государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2024. Т.22.№3. С. 170-177.

Секция «Имплементация перспективных технологических решений в индустрию производства сплавов»

УДК 621.77

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОКАТА ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В РОССИИ

Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Песин И.А.
*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
Bigmax174@gmail.com*

Спектр применения нержавеющей проката практически неограничен: от масштабных проектов в строительстве и энергетике до высокоточного оборудования в медицине и электронике. Наглядным подтверждением его высоких характеристик является использование в первой в мире сверхглубокой подземной лаборатории в Китае ($\approx 2,4$ км). Резервуары для жидкого азота, изготовленные компанией Taigang из горячекатаной нержавеющей стали, обеспечивают там необходимый постоянный температурный режим [1].

Внутреннее производство нержавеющей проката в России покрывает менее половины потребностей рынка. Значительная часть используемого в отрасли оборудования имеет высокую степень физического износа, что не позволяет не только улучшать качественные показатели продукции, но и удовлетворять растущие запросы потребителей. Проблему усугубляет фрагментарный подход к оснащению производств, выражающийся в зависимость от разрозненных импортных единиц оборудования и их компонентов [2].

Целью настоящей работы является изучение влияния различных режимов асимметричной прокатки на свойства нержавеющей сталей, определение актуальности рассматриваемых технических решений. Исследование процесса асимметричной прокатки нержавеющей стали расширит теорию обработки давлением, приведет к созданию материалов с новыми свойствами, что в перспективе позволит совершенствовать действующие технологические цепочки производства на предприятиях РФ [3].

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

Список литературы

1. Официальный сайт «Taiyuan Iron & Steel (TISCO)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://en.tisco.com.cn/CompanyNews.html>

2. Домашов В.А., Ларин В.Н. Комплекс холодной прокатки нержавеющей стали в ОАО «ЧМК». Потенциал для дальнейшего развития. Наука Техника Производство №3, 2013. С. 71-73.

3. Патент № 2829244 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22. Способ производства холоднокатаной ленты из жаропрочной нержавеющей стали: № 2024110935: заявл. 22.04.2024 : опубл. 30.10.2024 / А.И. Песин, Д.О. Пустовойтов, К.Ю. Бревнов [и др.].

УДК 62-97/98

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЫШЕННОГО ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ НА ГОРЯЧЕКАТАНОМ ТОЛСТОЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Голованов М.А.¹, Парыгина С.А.², Морогин А.А.², Ящук С.В.³

¹ ПАО «Северсталь», город Череповец, Россия

² Череповецкий государственный университет, город Череповец, Россия

³ АО «Северсталь Менеджмент», город Москва, Россия

ma.golovanov@severstal.com

Тенденции повышения качества горячекатаного толстолистого проката носят комплексный характер и определяются запросами смежных отраслей переработки продукции. Не исключением являются требования к состоянию поверхности, в частности, к участкам вкатанной при горячей прокатке окарины.

Процессы окаринообразования и вкатывания оксидов в поверхность проката зависят от множества взаимосвязанных факторов: химический состав стали, температура нагрева сляба, эффективность системы удаления окарины, количество проходов в клетях, степени обжаты и других факторов горячей прокатки. Общий тренд – это переход от реактивного контроля качества (выявить и отбраковать) к проактивному управлению качеством (спрогнозировать и не допустить). В рамках данной работы на основе методов анализа производственных данных рассмотрены факторы, имеющие наибольшую значимость в процессе образования дефекта.

В работе рассматриваются основные этапы разработки прогнозной математической модели с элементами кластеризации данных по толщине готовой продукции и использованием алгоритмов случайного леса, градиентного бустинга, методов опорных векторов, логистической регрессии. Исследования проводились на выборке, включающей более 400 переменных, полученных в результате промышленного производства окаринообразующих марок стали в объеме более 1500 единиц продукции.

В результате моделирования выделено 12 значимых переменных путем сквозного и перекрестного методов анализа данных. Точность классификации параметров превышает 94%, а коэффициент детерминации не менее 72%. Зна-

чимые переменные взяты за основу при разработке автоматической интеллектуальной системы, которая прогнозирует вероятность возникновения дефекта на прокате в зависимости от величин значимых переменных. В процессе моделирования выявлены наиболее отчетливые тенденции и определены границы существенного повышения риска дефектообразования. Наибольший интерес, исходя из теоретических положений, вызывают факторы: коэффициент избытка воздуха при нагреве, температура в преднагревательной зоне методической печи, скорость прохождения через установку удаления окалина, отдельные элементы химического состава.

На рисунке 1 представлены тренды повышения и снижения вероятности образования дефекта при изменении контролируемого параметра.

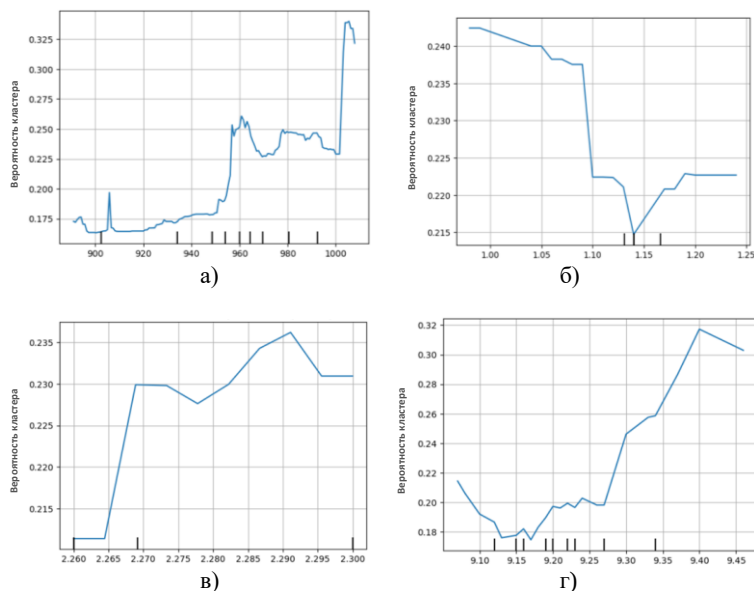


Рис. 1 – Вероятность образования дефекта «Вкатанная окалина» на поверхности толстого листа в зависимости от изменения:

- а – температура в преднагревательной зоне печи; б – коэффициент избытка воздуха; в – скорость прохождения через установку удаления окалина; г – легирующие элементы химического состава

Результаты показывают, что:

- при увеличении коэффициента избытка воздуха до 1,13 происходит снижение вероятности возникновения дефекта с 25% до 22%;
- при снижении температуры преднагревательной зоны ниже 1000 °C происходит резкое снижение вероятности с 33% до 18%;

- При снижении скорости прохождения через установку удаления окалина до 2,26 м/с происходит снижение вероятности с 24% до 22%;
- При снижении легирования стали ниже 9,2% (Ni + Cr) происходит снижение вероятности с 32% до 18%.

Проведенное исследование демонстрирует как перспективность новых методов математического моделирования при решении производственных задач, так и почву для дальнейших исследований физических аспектов металлургии: кинетики образования окалина в зависимости от воздействия времени и температуры нагрева; влияния атмосферы печи и использование повышенного коэффициента избытка воздуха; критериев эффективности работы гидробивов для различных сталей и многокомпонентной окалина; специфики механического преобразования окалина в зависимости от степени деформации при горячей прокатке.

УДК 669-1

РАБОТА ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ ФЕРРИТ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

Ганеев А.В., Хайбулина Н.А., Исламгалиев Р.К.

*¹ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» ,г. Уфа, Россия
artur_ganeev@mail.ru*

Структура сталей влияет на такие важные характеристики прочность и пластичность. Одной из важных эксплуатационных показателей стали является ее способность сопротивляться ударным нагрузкам в широком интервале температур. Склонность к хрупкому разрушению – важная характеристика сталей, зависящая от состава, структуры и технологии получения. Для её оценки на основе результатов ударных испытаний строят кривые температурной зависимости ударной вязкости. Испытание на ударный изгиб проводят с целью оценки склонности металла к хрупкому разрушению. Ударная вязкость (КС) оценивается как частное от деления работы удара к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

По температурной зависимости ударной вязкости оценивают склонность материала к хрупкому разрушению. Это определяют при визуальном осмотре структуры излома образцов. В одном случае вязкая область локализуется в очаге разрушения, образуя вязкую зону, в другом случае хрупкая область локализуется центральной части излома, образуя так называемый «хрупкий квадрат». Стандартами предписывается измерение «доли хрупкого излома» в %: отношение площади хрупкого квадрата ко всему сечению образца [1]. При этом существуют и другие подходы оценки вязкости: величина уширения при выбеге трещины [2] локальный геометрический анализ вязкого разрушения [3].

Более точное представление об изменении характеристик на различных стадиях ударного изгиба дает диаграмма нагружения, записанная в процессе испытания. По диаграмме ударного деформирования можно оценить нагрузки, соответствующие началу общей текучести, максимума, начала нестабильного хрупкого разрушения и затупления трещины. Полученные данные позволяют оценить работу зарождения и распространения трещины, что необходимо для построения температурных зависимости полной работы разрушения и динамической трещиностойкости, а также критической температуры хрупкости [4].

В данной работе исследовано влияние структуры жаропрочной высоколегированной стали 13X11H2B2MB-III после различной деформационно-термической обработки (ДТО) на значения ударной вязкости. Испытания проводились на системе с падающим грузом для измерения параметров ударных испытаний (вертикальный копер) Instron CEAST 9350 с записью диаграммы нагружения на образцах с V-образным надрезом в интервале температур от -60° до 120°C . Структура изломов образцов была анализируема на сканирующем электронном микроскопе JSM 6490 без предварительной обработки. По результатам определена температура хрупко-вязкого перехода для каждого вида ДТО. Определение работы зон распространения и зарождения трещин оценивали методикой Ботвиной [4] по макроструктуре изломов и диаграммам ударного деформирования.

Полученные результаты показывают высокую корреляцию между различными методами оценки характера и величины энергии удара и работы разрушения. Работа зарождения трещины в всем температурном диапазоне испытаний остается практически постоянной и не зависит от морфологии структуры стали 13X11H2B2MB-III. Работа распространения трещины имеет ярко выраженную температурную и структурную зависимость и изменяется в 7 раз от вида ДТО.

Список литературы

1. Штремель М.А. Возможности фрактографии МиТОМ, 2005, №5, С. 25–31.
2. Штремель М.А. Информативность измерений ударной вязкости, МиТОМ, 2008, № 11. С. 37–51
3. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов В.А. Траченко и др. Развитие процедур измерения неоднородности структур и разрушения (по геометрии излома) для классификации сталей по вязкости, Вектор науки ТГУ, 2013, №3, С.198–201.
4. Ботвина Л.Р., Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности, Изд-во Наука, 2008, 334с.

ВИДЫ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ДРЕССИРОВОЧНЫХ СТАНОВ. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Арцибашев С.В.¹, Белов В.К.², Губарев Е.В.²

¹ ПАО Магнитогорский металлургический комбинат,
Магнитогорск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
fractal5.sa@gmail.ru

В настоящее время холоднокатаную листовую сталь для автомобильной промышленности выпускают с регламентированной микротопографией поверхности. Например, автолист, имеющий определенный профиль шероховатости поверхности (умеренные значения амплитудного параметра R_a , и высокие значения частотного параметра профиля RP_c) хорошо удерживает смазку, эффективно штампуется в прессах с малыми остаточными напряжениями. Но если такая поверхность будет иметь высокие значения R_a , то это может привести к появлению нежелательного дефекта при штамповке «апельсиновая корка». Также микротопография поверхности влияет на трепетно учитывающий автомобилестроителями показатель – внешний вид автомобиля. Здесь длинноволновая составляющая профиля (по амплитуде соизмеримая с R_a) после окраски автомобиля может проявиться в виде нежелательных бликов.

В настоящее время существует пять основных вида текстурирования рабочих валков: дробеструйная (Shot Blasting Texturing – SBT), электроэрозионная (Electro-Discharge Texturing – EDT), лазерная (Laser Beam Texturing – LBT), электроннолучевая (Electron Beam Texturing – EBT), электрохромирование (ECT, Pretex или Torocrom) (см. табл). Известно, что при дрессировке первых нескольких рулонов параметры шероховатости значительно меняются, так как зашлифовываются наиболее высокие выступы шероховатого слоя. Чтобы сразу дрессировка автолиста была бы жёстко лимитирована по топографии, иногда осуществляется процесс лёгкой дошлифовки (Superfinish) [1,2].

Так текстурирование SBT обладает очень низкой стоимостью, но он не удовлетворителен современным критериям к топографии поверхности.

Текстурирование ECT даёт прекрасную микротопографию поверхности и высокие показатели по стойкости микротопографии поверхности валка при дрессировке. Но данный способ требует дорогостоящей системой защиты от опасных ионов хрома. Последние относятся к I классу опасности (самому высокому) для предприятий.

Текстурирование EBT является наиболее экологически чистым способом текстурирования и имеющим прекрасные показатели по микротопографии поверхности, но стоимость установки текстурирования и её обслуживания очень высока.

Классический и успешно использующийся до сих пор вид текстурирования EDT обладает неприятным свойством: произведение параметров R_a и RP_c

является постоянной величиной. То есть одновременно высокие значения параметров Ra и R_{Pc} невозможны [3].

Популярный в настоящее время метод текстурирования LST позволяет получать поверхность в очень большими значениями параметра R_{Pc}, но упорядоченный по импульсам режим текстурирования приводит к нежелательному муаровому зрительному эффекту. Следует также отметить традиционный недостаток лазерной обработки- низкий оптический КПД (10-20%).

Желательно, чтобы поверхность автолиста имела большее число впадин и меньшее выступов (то есть у поверхности валька R_{sk}>0. К сожалению, таким качеством обладает только один способ – ЕСТ.

Оценку достоинств и недостатков различных видов текстурирования следует делать только по полному набору показателей: В таблице обозначение показателей: W – наихудшие, Р – плохие, А – средние, G – хорошие, В – наилучшие.

Вид обработки	Стоимость	Диапазон Ra	Диапазон R _{Pc}	Знак R _{Sk}	Муаровый эффект	Стойкость микро топографии	Экология
SBT	В	Р	Р	Р	G	А	А
EDT	А	А	А	Р	G	А	А
LST	Р	G	G	Р	Р	А	А
EBT	W	В	В	Р	G	G	А
ЕСТ	Р	В	В	В	В	В	W

Список литературы

1. О режимах текстурирования поверхности рабочих валков для производства листа с высококачественной микро топографией поверхности. Часть 1. Физическая интерпретация процесса искрообразования на электроэрозионных установках (эрт). О связи амплитудного параметра шероховатости Ra и частотного параметра шероховатости R_{Pc} текстурированной поверхности с технологическими параметрами текстурирования. Белов В.К., Беглецов Д.О., Дьякова М.В., Ласьков С.А., Жумагалиев Н.И., Журавлёв А.М. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 2 (1406). – С. 44-52.
2. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю Расчет параметров шероховатости при текстурировании поверхности прокатных валков электроэрозионным методом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. – № 2. – С. 29-36.
3. Патент на изобретение RU2012137658/02А. Патент Способ текстурирования поверхности рабочего валька листопрокатной клетки после шлифования с обеспечением получения регламентированных параметров шероховатости поверхности // Ласьков С.А., Горбунов А.В., Жумаргалиев Н.И., Белов В.К., Александрова Е.В., – 2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРНА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20

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

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия
andrey.laktionov1963@gmail.com*

На сегодняшний день современная металлургия стремится снизить себестоимость стали за счет сокращения легирующих элементов. Ключевая задача — сохранить высокие свойства материала не через химический состав, а с помощью специальных методов обработки, которые формируют нужную микроструктуру [1]. Применение асимметричной прокатки позволяет существенно повысить комплекс механических свойств конструкционных сталей, включая прочность, пластичность и вязкость [2]. Данная технология обеспечивает формирование ультрамелкозернистой структуры [3-5], благодаря чему нелегированные стали после обработки демонстрируют уровень эксплуатационных характеристик, сопоставимый с показателями легированных аналогов. Это открывает перспективы для создания экономически эффективных материалов с высокими эксплуатационными показателями.

Целью работы было установление влияния коэффициента кинематической асимметрии (V_1/V_2) на измельчения зерна в низкоуглеродистой стали 20 в процессе горячей прокатки. Сталь 20 — низкоуглеродистая нелегированная конструкционная качественная сталь, широко доступна на рынке. Благодаря устойчивости к деформации и хорошей пластичности (около 25%), а также достаточной прочности (при временном сопротивлении равном 410 МПа) применяется для производства строительных конструкций, а также в трубной и машиностроительной отраслях.

Экспериментальная часть исследований была выполнена на уникальной научной установке — лабораторно-промышленном стане асимметричной прокатки, расположенном в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева» МГТУ им. Г.И. Носова. Ключевым преимуществом оборудования является широкий диапазон регулировки отношения скоростей валков ($V_1/V_2 = 1 \dots 10$). Образцы из качественной углеродистой стали 20 размерами $5 \times 50 \times 125$ мм подвергались горячей деформации с начальной температуры 950°C . Наблюдалась прямая зависимость между величиной обжатия и увеличением коэффициента асимметрии: при неизменном зазоре 0,9 мм относительное обжатие увеличивалось с 61% до 70% с одновременным повышением коэффициента асимметрии с 1 до 1,61.

Из исследования было выявлено, что усилие прокатки снижается с 1516 кН до 1170 кН при изменении отношений скоростей валков в таком же диапазоне. Рост коэффициента асимметрии приводит к практически четырехкрат-

ному увеличению крутящего момента на валке с большей скоростью при одновременном его снижении на другом. При этом рабочие моменты остаются в пределах допустимых нагрузок стана.

Микроструктурные исследования методом электронной микроскопии полученных образцов позволили выявить устойчивую зависимость: рост соотношения скоростей валков приводит к уменьшению среднего размера зерна. Выявлено, что при увеличении коэффициента асимметрии размер зерна уменьшается с 5,25 мкм до 2,78 мкм.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Dong, J., Shao, Z., Li, K. et al. Enhancing the mechanical and magnetic properties for low magnetic stainless-steel plates by non-recrystallization hot rolling and solution treatment. J Mater Sci 59, 8465–8491 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09634-0>

2. Достоинства и ограничения процессов асимметричной прокатки металлов и сплавов / Песин И.А., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Носов Л.В., Никитина М.А., Цатурянц М.С., Грачев Д.В., Барышникова А.М. // Magnitogorsk rolling practice Материалы VIII международной молодежной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2024. – С. 19-20.

3. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков / Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова, А. М. Песин [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материаловобработки. – 2022. – № 21. – С. 83-92.

4. Влияние ультрамелкозернистой структуры на механические свойства и биосовместимость аустенитных нержавеющей сталей / А. А. Токарь, О. В. Рыбальченко, Н. Ю. Анисимова [и др.] // Биоматериалы: от исследований к практике : Сборник материалов Международной конференции, Москва, 22–25 сентября 2025 года. – Москва: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2025. – С. 107-108.

5. Дерюгин, Е. Е. Трещиностойкость материалов с ультрамелкозернистой структурой / Е. Е. Дерюгин, Б. И. Суворов, Л. С. Дерягина // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3, № 2(10). – С. 106-109.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Китев М.О.¹, Гун И.Г.¹, Сальников В.В.², Столяров Ф.А.¹

¹ *ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия*

² *АО НПО «БЕЛМАГ», г. Магнитогорск, Россия*

kitev@belmag.ru

Повышение эффективности и конкурентоспособности машиностроительных предприятий неразрывно связано с постоянным совершенствованием технологии производства. Любой производитель находится в непрерывном процессе повышения экономической эффективности, что достигается за счет снижения себестоимости и повышения качества продукции. Реализация данных видов улучшений происходит в том числе посредством совершенствования технологии, повышения качества входного сырья, построения организационной структуры управления предприятием и обновления (модернизации) технологического парка оборудования.

Так, в частности, для Массового производства изделий типа наружный рулевой наконечник целесообразно производить механическую обработку корпусов на агрегатных станках. Однако, технология производства на таком типе оборудования требует тщательной подготовки для минимизации всех видов затрат.

Стоит отметить, что в открытых источниках методика подготовки такого производства отсутствует. В настоящий момент технология обработки корпусов изделий данного типа на высокопроизводительных агрегатных станках на предприятии АО НПО «БелМаг» находится на стадии разработки и предсерийного внедрения.

Значительную часть добавленной стоимости корпуса рулевого наконечника формирует обработка резанием и обработка давлением.

Одним из важнейших факторов, влияющих на удельную себестоимость технологических операций, является стойкость технологического инструмента [1, 2]. Таким образом необходимо прогнозировать и контролировать данный параметр.

Существенное влияние на стойкость инструмента оказывают геометрия и материал самого инструмента, свойства обрабатываемой заготовки и режимы обработки [3]. Одним из ключевых факторов повышения эффективности технологии обработки корпусов рулевых наконечников легковых автомобилей является выбор параметров технологии, обеспечивающих максимальную производительность и стойкость инструмента.

Таким образом, является актуальной задача разработки методики повышения эффективности технологии производства корпусов рулевых наконечников на высокопроизводительных агрегатных станках, что заключается в рациональном выборе вышеуказанных параметров.

Список литературы

1. Янюшкин, А. С. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента / А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов, Д. А. Рычков // Механика XXI века. – 2009. – № 8. – С. 120-123. – EDN RHDQNN.
2. Лобанов, Д. В. Оптимизация выбора режущего инструмента на основе методов сравнительного анализа / Д. В. Лобанов, А. С. Янюшкин, Д. А. Рычков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5-2(283). – С. 23-30. – EDN TIAUQV.
3. Твердосплавные сменные пластины / К. Е. Анохин, И. В. Гузь, Д. С. Солдатов, Д. А. Носков // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 мая 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 57-59. – EDN FWCWYK.

УДК 67.017

ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОКАТА ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ В АГРЕГАТАХ НЕПРЕРЫВНОГО ОТЖИГА

Быков А.В.¹, Ящук С.В.²

¹ АО «Северсталь Менеджмент», город Череповец, Россия

² АО «Северсталь Менеджмент», город Москва, Россия
avbykov@severstal.com

В настоящее время существует потребность в использовании высокопрочных сталей в сегменте промышленной упаковки.

Условия эксплуатации устанавливают высокие требования для крепежа тяжелых грузов: высокий предел прочности не менее 1000 МПа, увеличенную устойчивость к динамическим и ударным нагрузкам, относительное удлинения не менее 8%. Производство продукта с такими характеристиками возможно в агрегате непрерывного отжига с дополнительной стадией отпуска или перестаривания. В рамках данной работы рассмотрено влияние отпуска на механические свойства высокопрочной ленты на основе двухфазных феррито-мартенситных сталей.

В работе рассматривается проведение дополнительного термического цикла (отпуска) в диапазоне температур от 200 до 500 градусов и его влияния на структуру и механические свойства исследуемой феррито-мартенситной стали. Исследования проводились на прокате стали с содержанием углерода ~0,18%, марганца ~1,8%, с дополнительным легированием кремнием, титаном и бором, полученном в промышленных условиях.

На рисунке 1 приведены результаты испытаний по пределу прочности и относительному удлинению в зависимости от температуры дополнительного отпуска.

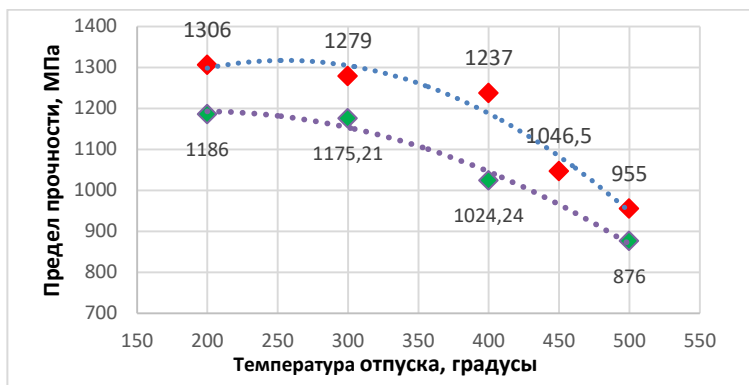


Рис. 1 – Изменение предела прочности после отпуска:
красный – после выдержки при температуре 800 градусов;
зеленый – после выдержки при температуре 750 градусов

Результаты показывают, что увеличение содержания второй фазы повышает предел прочности, но снижает относительное удлинение, тогда как дополнительный отпуск при температурах от 200 до 500 °C позволяет скорректировать баланс между ферритом и углеродсодержащей фазой (рис. 2).

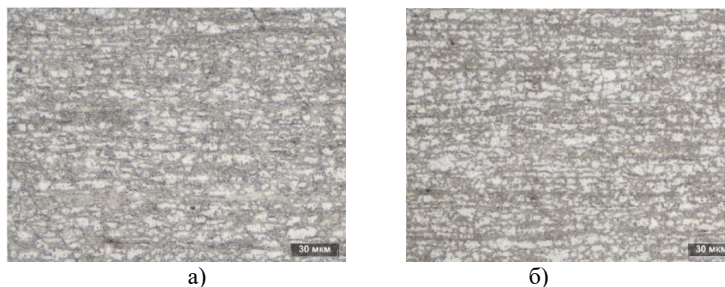


Рис. 2 – Оптические фотографии микроструктуры: а – без отпуска;
б – с отпуском при температуре 350 градусов

Данное исследование демонстрирует перспективность оптимизации термической обработки и состава сталей для производства высокопрочного и пластичного проката, соответствующего современным требованиям эксплуатации в упаковочной индустрии.

Список литературы

1. Нишик А.В., Ящук С.В.. Получение двухфазных ферритно-мартенситных сталей различных систем легирования в агрегатах непрерывного отжига // *Металлург.* – 2016. – Т. 60 – С. 66 – 71.
2. G. Rosenberg, I. Sinaiová. Development of Cold-Rolled Dual-Phase Steels with Tensile Strength Above 1000 MPa and Good Bendability // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2015. – Т.46.
3. H. Liu, S. Kuang. Influence of annealing temperature and temper rolling on microstructure and mechanical properties of 1000 MPa grade dual phase steel // *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals.* – 2017 – Т. 42.
4. A. Mathevon, V. Massardier. Tempering of Dual Phase steels: Microstructural evolutions and mechanical properties // *Materials Science and Engineering: A.* – 2024 – Т.908.
5. A. Kamp, S. Celotto. Effects of tempering on the mechanical properties of high strength dual-phase steels // *Materials Science and Engineering: A.* – 2012 – Т.538 – С. 35 – 41.

УДК 621.771.06

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЛОСОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Архипов Е.В., Платов С.И.

*«МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия
arhipov.mgn@yandex.ru*

В условиях глобальной конкуренции на рынке металлопродукции способность производителя гарантировать стабильно высокое качество становится ключевым фактором успеха. Для плоского горячекатаного проката критическим показателем является плоскостность, регламентируемая международными стандартами (ГОСТ 19903, ASTM A568, JIS) в пределах 5-30 мм/м. Достижение этих требований напрямую связано с контролем поперечного профиля полосы с допуском 0,02-0,03 мм. Дефекты профиля составляют существенную долю брака, что обуславливает необходимость внедрения комплексных систем управления.

Анализ современных методов управления профилем полос:

1. Правила составления монтажных партий. Данный метод направлен на стабилизацию теплового режима валков. Последовательная прокатка от узких к широким полосам для разогрева валков с последующим переходом к более узким позволяет сформировать стабильный тепловой профиль бочки валка. Однако данный метод ограничивает планирование производства, которое имеет высокую зависимость от портфеля заказов.

2. Применение профилировок рабочих валков. Предварительная переточка валков под прокат определенного сортамента. Правильно подобранная профилировка обеспечивает требуемую выпуклость полосы и ее стабильное позиционирование в очаге деформации, предотвращая смещение полосы, которое может вызвать поперечную разнотолщинность до 0,10 мм.

3. Использование специализированных материалов валков. Применение различных материалов прокатных валков направлено на повышение их износостойкости, а также стойкости к термическим ударам. На современных широкополосных станах применяют следующие материалы: черновые клети оснащаются валками из быстрорежущей (HSS) и высокохромистой стали; первые клети чистовой группы – валками из высокохромистого чугуна; а финишные клети – валками из индифинитного чугуна, наличие свободного графита в котором предотвращает налипание металла при высоких скоростях прокатки.

4. Система противоизгиба рабочих валков. Данная система, использующая гидронажимные устройства, позволяет компенсировать прогиб валков под давлением металла. Преимуществом данной системы является равномерность износа валков. Однако эффективность системы в борьбе с локальными дефектами профиля существенно ограничена.

5. Система осевого перемещения (сдвиги) рабочих валков. Этот метод является наиболее высокотехнологичным и эффективным. Периодическое перемещение валков вдоль их оси позволяет равномерно распределить износ по бочке и динамически влиять на форму поперечного профиля, компенсируя возникающие отклонения в реальном времени.

6. Системы охлаждения рабочих валков. В процессе прокатки валки нагреваются до температур, вызывающих тепловую выпуклость 0,1-0,2 мм. Недостатком систем с равномерным охлаждением по ширине бочки валка является наличие частых локальных перегревов, усугубляемых засорением сопел коллекторов охлаждения. Решением является внедрение перспективных систем секционного (зонного) охлаждения. Данные системы оснащенные несколькими независимыми коллекторами, которые позволяют целенаправленно изменять интенсивность охлаждения в разных зонах валка в зависимости от ширины прокатываемой полосы. При прокатке узких полос усиливается охлаждение центра бочки валка, а при прокатке широких полос также и краев бочки, что обеспечивает активное управление тепловым профилем.

Таким образом, обеспечение требуемого профиля и плоскостности полос невозможно без комплекса взаимосвязанных мер. Комбинация указанных систем позволяет воздействовать на процесс прокатки, компенсируя тепловые и силовые искажения валков и горячекатаных полос, что позволяет современным металлургическим предприятиям снизить брак, повысить конкурентоспособность и выйти на новые рынки сбыта.

Список литературы

1. Дема Р.Р. Совершенствование системы охлаждения прокатных валков черновой группы клетей на листовом стане горячей прокатки // Производство проката. 2018. № 12. С. 15-21.

2. Каневский А.Л., Ботштейн В.А., Белобров Ю.Н. и др. Усовершенствование охлаждения валков и полос на станах горячей прокатки// Сталь, 2006, №4. С. 50-52.

3. Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В. Основные параметры валковых узлов широкополосных станов, оснащенных системами осевой сдвижки // Производство проката. 1998. №6. С. 31-37.

УДК 67.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОБЪЕМНУЮ ДОЛЮ М/А-СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В БЕЙНИТНЫХ СТРУКТУРАХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Кузин С.А., Тетерятников В.С.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия
kuzinsta@yandex.ru*

Известно, что пластичность и вязкость разрушения высокопрочных трубных сталей в значительной степени зависит от объемной доли, дисперсности и фазового состава второй структурной составляющей бейнитной структуры, которой в низкоуглеродистых трубных сталях является мартенситно-аустенитная составляющая (М/А-составляющая) [1]. С одной стороны, увеличение объемной доли и размера М/А-частиц приводит к снижению вязкости разрушения и повышению температуры вязко-хрупкого перехода. С другой стороны, если обеспечить получение заданной объемной доли М/А-составляющей (3–7 %), состоящей преимущественно из остаточного аустенита, то это может повысить деформационную способность трубных сталей за счет реализации TRIP-эффекта. Объемная доля М/А-составляющей, как один из определяющих факторов, зависит от химического состава стали и параметров термомеханической обработки (ТМО), однако результаты опубликованных исследований зачастую носят противоречивый характер, что не позволяет сформулировать обоснованные рекомендации для получения заданного соотношения структурных составляющих в сталях такого типа.

В связи с этим, целью работы явилось установить влияние химического состава и параметров ТМО на формирование М/А-составляющей.

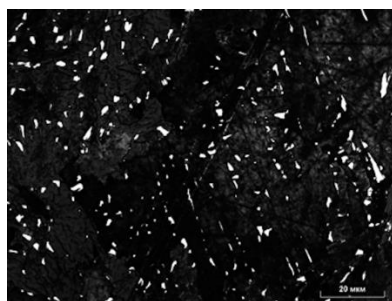
Для систематизации экспериментальных исследований и определения механизма влияния основных технологических параметров на формирование М/А-составляющей было разработано математическое соотношение, описывающее взаимосвязь химического состава, параметров ТМО и объемной доли М/А-составляющей:

$$f_{M/A} = (1 - f_{\alpha}^{ПФ}) \frac{C_{\gamma}^{\gamma \rightarrow B} - C_{\alpha}^{B\Phi}}{C_{\gamma}^1 - C_{\alpha}^{B\Phi}} * 100, \quad (1)$$

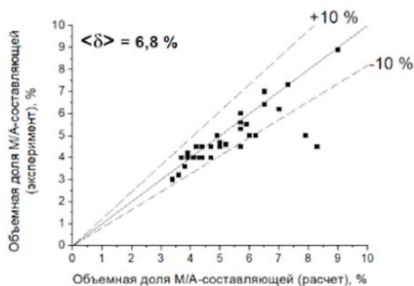
где $f_{M/A}$ – объемная доля М/А-составляющей; $f_a^{ПФ}$ – объемная доля полигонального феррита в структуре; $C_{\gamma}^{\gamma \rightarrow B}$ – концентрация углерода в аустените перед началом бейнитного превращения, масс. %; $C_a^{BФ}$ – концентрация углерода в бейнитном феррите, масс. %; C_{γ}^1 – концентрация углерода в непревращенном аустените по завершению бейнитного превращения, масс. %.

Для определения концентрационных факторов в (1) были предложены соответствующие выражения, учитывающие химический состав стали и параметры ТМО.

Для проверки работоспособности предложенного соотношения были проведены экспериментальные исследования на термомеханическом симуляторе Gleeble 3800 на образцах из трубной стали категории прочности К60. Методом «растяжение-сжатие» [2] имитировали режимы горячей прокатки на реверсивном стане 5000 по одной из заводских технологий, а при изменении параметров ТМО учитывали возможности производственного оборудования. Для выявления М/А-составляющей образцы травили в 10 % водном растворе метабисульфита натрия (рис. 1, а), количественный анализ микроструктуры выполнен в программе Thixomet Pro. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 1, б, показывает, что предложенное соотношение обеспечивает достаточно высокую точность предсказания f_{MA} , а разброс значений сравним с погрешностью определения при количественном анализе микроструктуры.



а)



б)

Рис. 1 - Сравнение экспериментальных и расчетных данных

На основе предложенного соотношения и результатов экспериментальных исследований показано, что объемная доля М/А-составляющей в бейнитных структурах трубных сталей увеличивается при повышении концентрации легирующих элементов, повышающих стабильность аустенита, дисперсности микроструктуры, объемной доли равновесного феррита в структуре. Уменьшение объемной доли М/А-составляющей наблюдается при снижении температуры конца бейнитного превращения вследствие повышения неравновесности бейнитного феррита.

Список литературы

1. Matsuda F., Fukada Y., Okada H., Shiga C., Ikeuchi K., Horii Y., Shiwa T., Suzuki S. Review of Mechanical and Metallurgical Investigations of Martensite-Austenite Constituent in Welded Joints in Japan // *Welding in the World*. — 1996. — Vol. 37, № 3. — P. 134–154
2. Колбасников Н.Г., Наумов А.А. «Моделирование и управление структурой и свойствами материалов в процессах термомеханической обработки»: учеб. пособие – 2-е изд., испр., – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. – 274 с.

УДК 621.771

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЛЕНТЫ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

Сверчков А.И. Песин А.М., Пустовойтов Д.О.,
Локотуннина Н.М., Песин И.А.

ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия
leshka-sverhc@rambler.ru

В настоящее время основная задача развития черной металлургии заключается в улучшении качества и увеличении выпуска эффективных видов металлопродукции, в первую очередь холоднокатаного проката. В связи с этим выявление и реализация имеющихся резервов повышения качества проката и экономии затрат на его производство относятся к числу наиболее важных задач современного металлургического предприятия.

При производстве холоднокатаной ленты из высокоуглеродистых марок сталей типа 65Г, 70 и т.д. в толщинах 0,5-1,5 мм на непрерывных станах холодной прокатки технологический процесс состоит из 2-3 технологических циклов «холодная прокатка – промежуточный отжиг». Это связано с значительным упрочнением таких сталей при холодной прокатке, и, как следствие, ограничениями прокатного оборудования по энергосиловым характеристикам. Для возможности обеспечения холодной прокатки и получения ленты заданной толщины 0,5-1,5 мм требуется проведение промежуточных отжигов. Промежуточный отжиг – это рекристаллизационный отжиг при температуре от 600 до 710 °С нагартованного металлопроката в печах с азото-водородной защитной атмосферой. Длительность 1 промежуточного отжига составляет 38-44 часа. Таким образом, каждый технологический цикл «холодная прокатка – промежуточный отжиг» значительно увеличивает затраты на производство, снижает производительность технологического процесса.

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 эф-

фект 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 в промышленности. Обширные теоретические и экспериментальные исследования 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 создании дополнительных сдвиговых деформаций в прокатываемом металле. В отличие от симметричного процесса в очаге деформации при асимметричной прокатке возникает зона сдвиговой деформации. Асимметричная прокатка за счет рассогласования скоростей рабочих валков может быть также использована для измельчения зерна, улучшения текстуры и механических свойств различных металлов и сплавов [1-2]. Основным управляемым параметром асимметричной прокатки является коэффициент асимметрии (f_a) – соотношение линейных скоростей ведущего (V_1) и ведомого (V_2) рабочих валков.

На непрерывных станах холодной прокатки скоростная асимметрия является альтернативой применения дополнительного обжата. Скоростную асимметрию также рекомендуют для уменьшения продольной разнотолщинности на отдельных участках прохождения полосы с пониженной скоростью. К ним относятся: передний участок, который заправляют в стан и моталку, участок прокатки сварного шва, задний участок на выходе из стана.

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 без использования промежуточных отжигов. Асимметричная прокатка также является эффективным методом, который позволяет оптимизировать процесс холодной прокатки и снизить износ валков. Поскольку асимметричная прокатка позволяет более точно достигать требуемых размеров и форм, это может сократить количество перевалок на стане, что, в свою очередь, снижает износ валков и уменьшает затраты на их замену.

Исследование выполнено за счет грантов Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/> и № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015>.

Список литературы

1. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. – Магнитогорск, 2013. – 128 с.
2. 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.

3. Межгосударственные стандарты. ГОСТ 2283-79 «Лента холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали».

4. G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev and T.R. Khramshin, Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatij [Modeling of electro-technical complexes of metallurgical enterprises], Magnitogorsk: NMSTU Publ., 2014.

УДК 67.017

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 08X18H10T

Зотов Д.А., Сахаров Н.В., Нохрин А.В., Мелехин Н.В., Рубцова К.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

zotov@nifti.unn.ru

Целью работы является разработка методики изучения особенностей эволюции микроструктуры и микротвердости образцов крупнозернистой стали 08X18H10T при высокоскоростном нагружении.

В качестве объекта исследования выступали образцы аустенитной стали 08X18H10T, вырезанные вдоль оси горячедеформированного прутка. Цилиндрические образцы диаметром 5 мм испытывались по методу теста Тейлора путем соударения под нормалью о стальную преграду образцов с начальной скоростью 119, 163, 231 и 243 м/с. Контроль микроструктуры выполнялся на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6495 и оптическом микроскопе Leica. Исследование фазового состава проводилось методом EBSD на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 2, методом магнитного фазового анализа на магнитометре МАГ-51Б и с помощью рентгеновского дифрактометра DX-2700BH (кобальтовое излучение). Исследование микротвердости осуществлялось на микротвердомере Qness A60+ методом картирования поверхности шлифа.

В исходном состоянии сталь имеет равномерную крупнозернистую аустенитную микроструктуру, с единичными неметаллическими включениями (преимущественно Ti(C,N)), а также частицами δ -феррита (рис. 1а). После испытания по методу теста Тейлора происходит изменение микроструктуры непосредственно вблизи области удара и наблюдается изменение формы зёрен с равновесной на сжатую вдоль нормали к плоскости удара (рис. 1б). Результаты EBSD анализа (рис. 1) и магнитного фазового анализа образца 08X18H10T не выявили присутствия мартенсита деформации, однако локальные рентгеновские исследования материала образца в зоне соударения свидетельствуют о появлении пиков ОЦК-фазы (рис. 2), которая, вероятно, является мартенситом деформации. Относительная интенсивность рентгеновских максимумов сильно отличается от эталонной в PDF-карточках, что свидетельствует о присутствии текстуры (преимущественной ориентации кристаллитов) в образце.

Сильная текстурированность металла в зоне соударения не позволила провести корректную оценку содержания мартенсита.

Показано, что в области удара происходит интенсивное деформационное упрочнение материала, которое выражается в существенном повышении микротвердости на ~1500 МПа. Микротвердость стали в зоне соударения (4.0-4.1 ГПа) сопоставима с микротвердостью сильнодеформированной ультрамелкозернистой стали 08X18H10T [1]. Установлено, что глубина деформированного слоя составляет ~1.5 мм от области соударения (рис. 3). Проанализировано влияние скорости соударения на микротвердость стальных образцов.

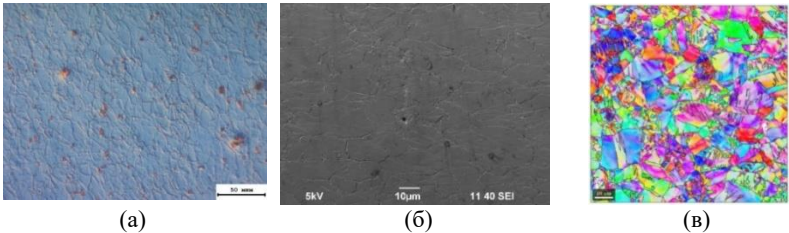


Рис. 1 – Структура стали 08X18H10T в исходном состоянии (а) и после испытания со скоростью 243 м/с (б, в). Металлография (а) и РЭМ (б, в)

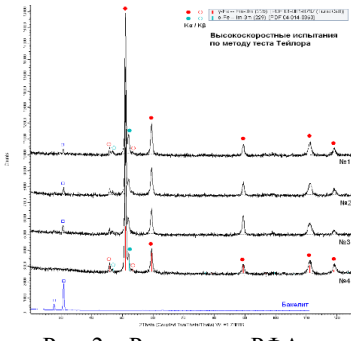


Рис. 2 – Результаты РФА образцов стали 08X18H10T после испытаний с различными скоростями

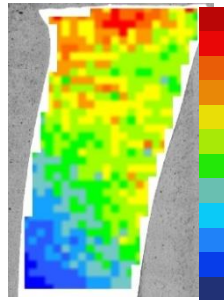


Рис.3 – Распределение микротвердости в образце после испытания по методу теста Тейлора

Hv, МПа
> 4090
3933 – 4090
3776 – 3933
3609 – 3776
3442 – 3609
3285 – 3442
3119 – 3285
2962 – 3119
2795 – 2962
2638 – 2795
2471 – 2638
< 2471

Проведены исследования постдеформационной термической обработке на закономерности эволюции микроструктуры и микротвердости деформированных образцов. Исследовано влияние степени и скорости деформации на кинетику процессов рекристаллизации.

Полученные результаты проанализированы с использованием моделей физического материаловедения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект №075-03-2023-096 (FSWR-2023-0037)).

Авторы благодарят коллектив НИИ Механики ННГУ под руководством д.т.н., проф. Брагова А.М. за проведение динамических испытаний.

Список литературы

1. Зотов Д.А., Копылов В.И., Чегуров М.К. и др. Исследование механических свойств и коррозионной стойкости ультрамелкозернистой аустенитной хромоникелевой стали, полученной методом ротационнойковки // ФММ, 2025, т.126, №4, с. 482-495.

УДК 669.13.018

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУННОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Колокольцев В.М., Юмабаев А.А., Скрипкин Е.В., Феоктистов Н.А.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ
yumabaev.azamat95@gmail.com

Термообработка центробежнолитых чугуновых высокохромистых прокатных валков преследует несколько целей: улучшение эксплуатационных свойств, повышение стойкости и снижение остаточных напряжений. Для достижения этих результатов важно правильно подобрать режим термообработки. Неверный выбор режима в процессе термообработки может привести к разрушению вала из-за напряжений, возникающих в процессе кристаллизации отливок после литья.

Высокохромистый валок состоит из трёх слоёв. Рабочий слой выполнен из высоколегированного чугуна с содержанием хрома более 17 %. Промежуточный слой изготовлен из среднелегированного чугуна (Cr 4–5 %), а сердцевина — из серого чугуна. Эта особенность конструкции влияет на напряжённое состояние вала.

При назначении режима термической обработки необходимо учитывать скорость нагрева и охлаждения, а также время выдержки. Эти параметры должны быть подобраны так, чтобы возникающие напряжения не превышали прочность материалов рабочего слоя и сердцевины.

Для оценки напряжённого состояния вала в процессе термообработки был разработан математический аппарат. Он позволяет прогнозировать напряжения на основе градиентов температур при нагреве и охлаждении. Математическое моделирование помогло определить максимальные градиенты температур, зависящие от геометрии вала и теплофизических свойств материалов.

Модель выявила области с повышенными градиентами температур, где в процессе термообработки могут возникать сколы на бочке вала. Сравнение расчётных и промышленных данных показало их хорошую сходимость. На основе результатов моделирования были разработаны методы для снижения

градиентов температур в бочке за счёт изменения скорости нагрева и охлаждения и утепления отдельных частей вала минеральной ватой.

Применение математического аппарата позволило скорректировать существующий режим термообработки. Это устранило сколы на бочке прокатных валков и сократило время обработки. В результате количество бракованных валков снизилось на 20 %.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Юмабаев, А. А. Оценка тепловых полей в прокатном валке при его термической обработке с помощью математического анализа / А. А. Юмабаев, Е. В. Скрипкин // Прогрессивные литейные технологии : Труды XII Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября – 01 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2024. – С. 126-128. – EDN XSWQLS.

2. Применение компьютерного моделирования для оценки напряженного состояния литого прокатного вала / Н. А. Феоктистов, А. А. Юмабаев, Е. В. Скрипкин, А. В. Монастырский // Литейное производство. – 2024. – № 2. – С. 27-33. – EDN RQAUNY.

3. Оптимизация режима термической обработки стальных прокатных валков в исполнении HiCr / А. А. Юмабаев, А. С. Савинов, И. В. Михалкина [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 12. – С. 21-27. – DOI 10.17580/chm.2024.12.03. – EDN QHGQSN.

4. Оценка градиента температуры в литых прокатных валках в процессе термической обработки / А. А. Юмабаев, А. С. Савинов, Н. А. Феоктистов [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2024. – № 4(51). – С. 34-39. – EDN EHRIMZ.

5. Прокатные валки [Текст]: монография / К. Н. Вдовин; М-во образования и науки Российской Федерации, Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова. - Магнитогорск: Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова, 2013. - 443 с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-9967-0415-6.

6. Монастырский, В. П. Имитационная модель образования усадочной раковины и макропористости / В. П. Монастырский, М. Ю. Ершов // Литейщик России. – 2014. – № 8. – С. 41-45. – EDN SNXVAT.

7. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного вала из заэвтектоидной стали / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – № 1(32). – С. 18-25. – EDN RCUVGB.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА КАЧЕСТВО СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

Миянов А.Г., Фасхитдинова Ю.Р.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им.
Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия
miyanovag@mail.ru

Сильная 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].

Обширные теоретические и экспериментальные исследования [1-4] механизма формирования плоскостности в процессе холодной прокатки позволили выявить, что дефекты плоскостности прокатываемых полос являются следствием неравномерного распределения коэффициентов вытяжки по ширине очага деформации. Считается [2], 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.

Вместе с тем, авторами отмечено, что в процессе холодной прокатки оперативное воздействие на полосу оказывается одновременно несколькими локальными системами управления отдельными устройствами и механизмами стана холодной прокатки такими, как противоишгиб, осевая сдвижка, перекося рабочих валков, многозонное охлаждение и т.д. В связи с этим авторы считают недостаточно изученным процесс образования дефектов плоскостности при холодной прокатке.

В связи с увеличением количества поступающих претензий по неплоскостности холоднокатаного проката, была проведена большая (≥ 500) выборка замеров плоскостности холоднокатаного проката из низкоуглеродистых марок стали, прокатанных на двухклетевом реверсивном стане. Полученные опытные данные выявили необходимость анализа и построения математической модели плоскостности холоднокатаного проката в зависимости от параметров горячекатаного подката, технологических параметров прокатки и др.

Для улучшения плоскостности холоднокатаного проката из низкоуглеродистых марок стали требуется определить достаточную величину противоишгиба рабочих валков i -й клетки $[K_{изг}^i]$, осевой сдвижки рабочих валков i -й клетки $[K_{сд}^i]$, перекося рабочих валков i -й клетки $[K_{п}^i]$, определяемые как зависимость от параметров и состояния рабочих валков в i -й клетки $[K_{рв}^i]$, параметров горячекатаного подката $[K_{под}]$ и готовой продукции $[K_{гп}]$, условий прокатки

(натяжение, скорость, усилие, обжатие и др.) в i -й клетки $[K_{уп}^i]$, заданной кривой распределения планшетности $[K_{рп}]$:

$$K_{изг}^i = f(K_{рв}^i, K_{под}, K_{гп}, K_{уп}^i, K_{рп})$$

$$K_{сд}^i = f(K_{рв}^i, K_{под}, K_{гп}, K_{уп}^i, K_{рп})$$

$$K_{п}^i = f(K_{рв}^i, K_{под}, K_{гп}, K_{уп}^i, K_{рп})$$

Таким образом, моделирование механизма образования дефектов плоскостности 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 научнотехнической и экономической информации. – 2017. – № 12. – С. 51-55.
2. Бартхольдт Х., Копин Ф., Джелали М. Универсальная модель плоскостности для оптимизации процесса холодной прокатки // Черные металлы. – 2015. – № 3 (999). – С. 53-58.
3. 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.
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 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОКАТАНОЙ ЛЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Барышникова А.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
Anyabar1999@mail.ru*

В настоящее время, при производстве стальных лент традиционно сохраняются две основные технологические проблемы. Первая проблема возникает при производстве ленты из высокоуглеродистых сталей 65Г, 70, 80 и др. является то, что приходится делать несколько (3–4) технологических циклов «про-

катка отжиг», что существенно увеличивает затраты [1-2]. Вторая проблема связана с производством ленты из низкоуглеродистых сталей 08пс, 10, 20 и др., где из-за недостаточной технологической пластичности металла уменьшают входную толщину горячекатаного подката, тем самым снижая производительность широкополосного стана горячей прокатки [3].

Разработанные в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Носова» технологические схемы апробированы на стане 400. Для стали 08пс доказана возможность увеличения толщины горячекатаного подката с 2,8 до 5,0 мм при конечной толщине 1,0 мм. Это позволяет сократить циклы отжига для высокоуглеродистых сталей и в 1,3–1,7 раза увеличить толщину подката для низкоуглеродистых, существенно повышая производительность. Результаты исследования могут быть масштабированы на другие станы с индивидуальным приводом валков.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018.

Список литературы

1. Достоинства и ограничения процессов асимметричной прокатки металлов и сплавов / Песин И.А., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Носов Л.В., Никитина М.А., Цатурияц М.С., Грачев Д.В., Барышникова А.М. // Magnitogorsk rolling practice Материалы VIII международной молодежной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2024. – С. 19-20.
2. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков / Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова, А. М. Песин [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2022. – № 21. – С. 83-92.
3. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Kuka 160 / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, М. П. Барышников [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2021. – № 1(16). – С. 9-13.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарная секция

Песин А.М. ЛАБОРАТОРИЯ «МЕХАНИКА ГРАДИЕНТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ИМ. А.П. ЖИЛЯЕВА»: НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОКАТКИ.....	3
Ящук С.В., Масягин Я.А., Быков А.В. ДИСПЕРСИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИ- РОВАННЫХ СТАЛЕЙ МЕЖФАЗНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ КАРБОНИТРИ- ДОВ.....	4
Мурашкин М.Ю., Медведев А.Е. КОМПОЗИТНЫЕ ПРОВОДНИКИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ: МЕХА- НИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ, ТЕРМОСТОЙ- КОСТЬ.....	6
Наумова Е.А., Белов Н.А. АЛЮМИНИЕВО-КАЛЬЦИЕВЫЕ СПЛАВЫ: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ.....	7
Столяров В.В. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В СОПРОВОЖДЕНИИ ИМПУЛЬС- НОГО ТОКА.....	9
Рааб Г.И. АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА - КАК ИНСТРУМЕНТ АКТИВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ.....	11

Секция «Технологии и методы формирования свойств материалов и изделий»

Бирюкова О.Д., Песин И.А., Песин А.М., Рааб Г.И., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ «МЕХАНИКА ГРАДИЕНТ- НЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ИМ. А.П. ЖИЛЯЕВА».....	14
Дёмин Д.О., Гребенкин И.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОВОЛОКАХ КРУГЛЫХ СЕЧЕНИЙ ПОСЛЕ ПРО- ЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ.....	15

Лукьянов Е.Д., Харитонов В.А., Локотунина Н.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Усанов М.Ю., Песин И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ.....	17
Зайнуллин А.И., Харитонов В.А. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПОДЪЕМ- НЫХ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ.....	19
Бочкарев А.А., Корнилов Г.П. СТАБИЛИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ЭЛЕКТРОПРИ- ВОДОВ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ.....	20
Черкасов С.О., Белов Н.А., Тимофеев В.Н., Мотков М.М. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-ZN-MG-CA-FE В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВО- ЛОКИ.....	23
Мелихов Е.Д., Усанов М.Ю., Харитонов В.А., Мелихова Н.В. РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРО- ВОЛОКИ.....	25
Калинина Н.А., Швейкин В.П., Мальцева Т.В., Пугачева Н.Б., Разинкин А.В., Каманцев И.С. ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИ- НИЕВЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛО- ГИИ ПРЕССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	27
Иванова А.О., Белов Н.А., Градобоев А.Ю. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОН- НЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛА- ВА 1407.....	29
Ульянов С.А. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПОРНОГО ВИТКА И ОПОРЫ. ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРУЖИН.....	31
Градобоев А.Ю., Иванова А.О., Белов Н.А., Никитина М.А. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК SC НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИ- СТИКИ И ФОРМУЕМОСТЬ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА 5182.....	32

Веселова В.Е., Каманцев И.С., Путилова Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СТАЛЕЙ 09Г2С И 10Х18Н10 ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ.....	34
Олейник Д.Г., Корчунов А.Г. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ БОЛТОВ С ФЛАНЦЕМ.....	36
Лапшов М.А., Малкин К.А., Рагазин А.А., Арышенский В.Ю., Арышенский Е.В. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ВЫСОКОМАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ДОБАВКАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	37
Платов С.И., Столяров А.Ю., Тухветова Л.М. О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ВОЛОЧЕНИЯ КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ.....	39
Воротников М.Ю., Смирнов А.В. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА ПОСТАВЩИКА АВТОКОМПОНЕНТОВ.....	41
Ворошилова М.В., Юрьев П.О., Дурнопьянов А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА 1580, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ СХЕМАМ ПРОКАТКИ.....	43
Луганенко Т.Д., Лавриненко В.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭИ698-ВД В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	45
Шленкин С.А., Терентьев Д.В., Точилкин В.В. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПРИВОДА КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАХВАТА И ПОДЪЕМА ЭЛЕКТРОДА.....	47
Бундин М.П., Сидельников С.Б., Парубок А.В., Лопатин В.В. ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО СПОСОБА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД31.....	48

Юрьев П.О., Дурнопьянов А.В., Ворошилова М.В., Байковский Ю.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНОКАТАНЫХ И ОТОЖЕННЫХ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА 1580 С ЧАСТИЧНОЙ ЗАМЕ- НОЙ Sc НА Er И Yb В ЕГО СОСТАВЕ.....	50
Замараева Ю.В., Разинкин А.В. ВЛИЯНИЕ НАСЛЕДИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНСТРУМЕНТА НА РАДИ- АЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВА- НИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА.....	52
Бернгардт В.А., Беспалов В.М., Ворошилов Д.С., Покшиванов С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ, БЕСЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ И ОТЖИ- ГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛУФАБРИ- КАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr-P3M-Fe.....	54
Богданов С.Н. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРО- КАТКИ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ НА СТАНЕ KPW-25.....	56
Алимов И. С., Гладков Ю. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАЛИБРА ДЛЯ ОБЖИМНОЙ КЛЕТИ 1300 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННОГО МЕТОДА ИЗО- ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	58
Ушаков А.В., Лавриненко В.Ю. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НИЗКО- ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ЗАГОТОВОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ 41X1, 20Г2Р и 38ХГНМ.....	63
Байковский Ю.В., Константинов И.Л., Богданов Е.В., Бернгардт В.А. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА АК7.....	65

Секция «Деформационные процессы для формирования функциональных свойств и улучшения характеристик металлов»

Парубок А.В., Сидельников С.Б. ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ РАСТВОРИМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ MG-AL-ZN И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ.....	68
---	----

Конюшенко М.Н., Захарьев И.Ю. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДАВЛЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ.....	70
Дерябина А.И., Кищик А.А., Михайловская А.В. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА РАЗМЕР ЗЕРНА И ДЕФОРМА- ЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Mg-Mn..	72
Рашевский К. А., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Барышникова А. М. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГОРЯЧЕЙ- ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА АСИМ- МЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	73
Платов С.И., Керимова Л.Ф. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕ- НИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ МАРКИ ШХ-15.....	74
Никитина М.А., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А. ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ 5XXX СЕРИИ СО СКАНДИЕМ.....	76
Цыденов К.А., Белов Н.А. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ОЛОВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙ- СТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА AL-1%CU-1,2%Mn.....	77
Барышников П.М., Песин А.М., Локотунниа Н.М., Пустовойтов Д.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ВЫ- СОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.....	79
Миколаенко В.В., Аксёнов С.А. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕ- ДЕНИЯ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ.....	81
Корольков О.Е., Столяров В.В. ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА ТИТАНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.....	83
Демьяненко Е.Г., Попов И.П., Фомичев Д.С. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СУЖАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦЕЛЬНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ.....	84
Носов Л.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Бахчиев А.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИИ ПА- ТЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ УПАКО- ВОЧНОЙ ЛЕНТЫ.....	86

Шеметова Е.С., Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Платов С.И. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МАРШРУТЫ ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ.....	88
---	----

Секция «Имплементация перспективных технологических решений в индустрию производства сплавов»

Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Песин И.А. АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕ- НИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОКАТА ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В РОССИИ.....	90
---	----

Голованов М.А., Парыгина С.А., Морогин А.А., Яшук С.В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЫШЕННОГО ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ НА ГОРЯЧЕКАТАНОМ ТОЛСТОЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕ- ВЫХ АЛГОРИТМОВ.....	91
---	----

Ганеев А.В., Хайбулина Н.А., Исламгалиев Р.К. РАБОТА ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ УДАР- НОМ НАГРУЖЕНИИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ ФЕРРИТ МАР- ТЕНСИТНОГО КЛАССА.....	93
--	----

Арцибашев С.В., Белов В.К., Губарев Е.В. ВИДЫ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ДРЕССИРОВОЧНЫХ СТАНОВ. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ.....	95
--	----

Лактионов А. А., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Барышникова А.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРО- КАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРНА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТА- ЛИ 20.....	97
--	----

Китев М.О., Гун И.Г., Сальников В.В., Столяров Ф.А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИ- ЛЕЙ.....	99
---	----

Быков А.В., Яшук С.В. ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИ- ЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОКАТА ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ФЕРРИТО- МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ В АГРЕГАТАХ НЕ- ПРЕРЫВНОГО ОТЖИГА	100
---	-----

Архипов Е.В., Платов С.И. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЛОСОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРО- КАТКИ.....	102
Кузин С.А., Тетерятников В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПАРА- МЕТРОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОБЪЕМНУЮ ДО- ЛЮ М/А-СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В БЕЙНИТНЫХ СТРУКТУРАХ ГОРЯЧЕ- КАТАНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ.....	104
Сверчков А.И. , Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Песин И.А. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛА- СТИЧНОСТИ ЛЕНТЫ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ С ИС- ПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ.....	106
Зотов Д.А., Сахаров Н.В., Нохрин А.В., Мелехин Н.В., Рубцова К.А. ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 08Х18Н10Т.....	108
Колокольцев В.М., Юмабаев А.А., Скрипкин Е.В., Феоктистов Н.А. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕН- ТРОБЕЖНО-ЛИТОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУННОГО ПРО- КАТНОГО ВАЛКА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	110
Миянов А.Г., Фасхитдинова Ю.Р. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА КА- ЧЕСТВО СТАЛЬНОГО ПРОКАТА.....	112
Барышникова А.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОКА- ТАНОЙ ЛЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОР- МИРОВАНИЯ.....	113

Научное издание

Magnitogorsk materials week 2025

Материалы научной школы и международной молодежной конференции

Под редакцией А.М. Песина

Издается полностью в авторской редакции

Подписано в печать 20.02.2026. Рег. № 29-26. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага тип № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 7,75. Тираж 100 экз. Заказ 47.



Издательский центр ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»