

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.715

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-СКАНДИЙ

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

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Алюминиевые термически неупрочняемые сплавы системы алюминий-магний-скандий характеризуются хорошей свариваемостью, высокими механическими свойствами, сравнительно низкой плотностью и отсутствием упрочняющей термической обработки (например, таких как закалка и старение). Однако высокая стоимость данных сплавов является сдерживающим фактором для их применения в различных отраслях промышленности. В связи с этим необходимо разрабатывать способы обработки, позволяющие увеличить выход годного продукта с дорогостоящей лигатурой Al-2%Sc. Но из-за низкой технологической пластичности алюминиевых сплавов серии 5XXX происходит растрескивание кромок листов или полос при горячей прокатке, что требует увеличивать дробность деформации. Это, в свою очередь, отражается на конечной стоимости горячекатаного подката. Соответственно, исследование изменения технологической пластичности алюминиевых сплавов серии 5XXX при прокатке является актуальным. **Цель работы.** Определить параметры процесса асимметричной прокатки, в частности отношение скоростей валков, при обработке алюминиевого сплава серии 5XXX со скандием, обеспечивающее увеличение технологической пластичности материала при одновременном снижении усилия при горячей прокатке с сохранением уровня механических свойств после холодной прокатки. **Используемые методы.** Горячая и холодная прокатка проводилась на уникальном промышленно-лабораторном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Усилие, возникающее в процессе прокатки, регистрировалось программным обеспечением стана ДУО 400. Качество полученного подката оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 57510-2017. Твердость поверхности определялась методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012-59. Механические свойства оценивались в соответствии со стандартом ASTM E8. **Результат.** При отношении скоростей рабочих валков V_1/V_2 в диапазоне 1,1–1,3 при горячей прокатке дефекты отсутствовали. При этом усилие прокатки снижалось с 1400 до 1280 кН. Технологическая пластичность увеличилась, о чем свидетельствует снижение вероятности растрескивания кромок при увеличении относительного обжатия при горячей прокатке. Значения механических свойств после холодной прокатки (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) варьировались в пределах: 421–464 МПа для временного сопротивления σ_b , 373–416 МПа для условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и 2–7 % для относительного удлинения δ . **Практическая значимость.** Асимметричная прокатка влияет на изменение технологической пластичности алюминиевого сплава серии 5XXX с дорогостоящей лигатурой Al-2%Sc. В результате возможно снизить количество проходов при чистовой горячей прокатке (до одного). Благодаря этому исключается дополнительное захлаживание кромок и их растрескивание, а также положительно сказывается на стоимости горячекатаного подката и сроках его изготовления.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1580, асимметричная прокатка, горячая прокатка, скандий, горячекатаный подкат, скандийсодержащий сплав, плоский прокат, усилие прокатки, технологическая пластичность

Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>)

© Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В., 2025

Для цитирования

Влияние скоростной асимметрии на технологическую пластичность при прокатке сплава системы алюминий-магний-скандий / Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 71–79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THE EFFECT OF THE SPEED ASYMMETRY ON TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF THE ALUMINUM-MAGNESIUM-SCANDIUM SYSTEM ALLOY DURING ROLLING

Nikitina M.A., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Pesin I.A., Baryshnikova A.M., Nosov L.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Aluminum nonheat-treatable alloys of the aluminum-magnesium-scandium system are characterized by good weldability, high mechanical properties, relatively low density, and the absence of strengthening heat treatment (such as quenching and aging). However, the high cost of these alloys hinders their use in various industries. Therefore, it is necessary to develop processing methods that can increase the yield of the finished product with the expensive Al-2%Sc masteralloy. However, due to the low technological plasticity of 5XXX series aluminum alloys, edge cracking of sheets or strips occurs during hot rolling, which requires increasing the fractional deformation. This, in turn, affects the final cost of the semi-finished hot-rolled product. Accordingly, studying changes in the technological plasticity of 5XXX series aluminum alloys during rolling is relevant. **Objectives.** The work is aimed at determining the parameters of the asymmetric rolling process, in particular the rolls speed ratio, during processing the 5XXX series aluminum alloy with scandium, ensuring an increase in the technological plasticity of the material while reducing the force during hot rolling maintaining the level of mechanical properties after cold rolling. **Methods Applied.** Hot and cold rolling were carried out on a unique industrial and laboratory mill DUO 400 of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials of the NMSTU. The forces arising during rolling were recorded by the software of the DUO 400 mill. The quality of the obtained semi-finished rolled products was assessed in accordance with GOST R 57510-2017. Surface hardness was determined by the Brinell method in accordance with GOST 9012-59. Mechanical properties were assessed in accordance with the ASTM E8 standard. **Results.** At the rolls speed ratio V_1/V_2 in the range of 1.1-1.3, no defects were observed during hot rolling. The rolling force decreased from 1400 kN to 1280 kN. The technological plasticity increased, as evidenced by the decreased probability of edge cracking with an increase in the percent reduction during hot rolling. The values of mechanical properties after cold rolling (σ_v , $\sigma_{0.2}$, δ) varied within the range of 421-464 MPa for ultimate strength σ_v , 373-416 MPa for yield strength $\sigma_{0.2}$, and 2-7% for relative elongation δ . **Practical Relevance.** Asymmetric rolling affects the change in the technological plasticity of 5XXX series aluminum alloy with the expensive Al-2%Sc masteralloy. As a result, the number of passes during finish hot rolling can be reduced (to one). This eliminates additional edge cooling and cracking, and also has a positive effect on the cost of semi-finished hot-rolled products and their production time.

Keywords: aluminum alloy 1580, asymmetric rolling, hot rolling, scandium, semi-finished hot-rolled products, scandium-containing alloy, flat rolled products, rolling force, technological plasticity

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant (Agreement No. 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>).

For citation

Nikitina M.A., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Pesin I.A., Baryshnikova A.M., Nosov L.V. The Effect of the Speed Asymmetry on Technological Plasticity of the Aluminum-Magnesium-Scandium System Alloy During Rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 71-79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79>

Введение

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg характеризуются высоким уровнем прочности, коррозионной стойкости и низкой плотностью, что делает их востребованными в транспортной, авиационной и строительной промышленности. Например, сплав AMg6, содержащий 6% магния, традиционно используется для изготовления герметичных сварных конструкций, применяемых в условиях высоких нагрузок и агрессивной среды. Однако его свойства в отожжённом состоянии часто не соответствуют требованиям эксплуатации, что приводит к необходимости использо-

вания сплава в нагартованном состоянии. Прокат Н (нагартованный) и НВП (нагартованный высокой прочностью) характеризуется повышенным комплексом прочностных свойств, но имеет определённые недостатки. Одним из таких существенных недостатков нагартованных алюминиевых сплавов является их склонность к разупрочнению в процессе длительного хранения и эксплуатации. Это обусловлено процессами рекристаллизации и миграции дефектов кристаллической решётки, которые приводят к снижению механических свойств материала.

Для преодоления указанных недостатков и расширения возможностей применения алюминиевых

сплавов системы Al-Mg учёные ОК «Русал» совместно с Сибирским федеральным университетом разработали новый экономно-легированный скандием алюминиевый сплав марки 1580. Скандий является высокоэффективным легирующим элементом для алюминиевых сплавов и обеспечивает существенное повышение механических характеристик, таких как прочность, пластичность и сопротивление усталостному разрушению. Дополнительное легирование алюминиевых сплавов скандием позволяет не только повысить их механические свойства, но и улучшить коррозионную стойкость, а также снизить склонность к разупрочнению. Исследования показали, что скандий эффективно растворяется в алюминии, образуя твёрдые растворы, которые упрочняют материал за счёт дисперсионного твердения. Это позволяет создавать сплавы с высокими эксплуатационными характеристиками, которые могут успешно конкурировать с традиционными материалами (например, сплавы АМг5 и АМг6) [1-7]. Идея использования скандия для упрочнения этих сплавов была разработана и запатентована в США в 1971 году [8]. В Советском Союзе первые промышленные сплавы на основе алюминия, магния и скандия были созданы в 1970-х годах под руководством М. Е. Дрица в Институте металлургии и под руководством В. И. Елагина в Центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов «Прометей» [9, 10].

В настоящее время в мире продолжают исследования алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Однако основным препятствием для широкого применения сплавов, содержащих скандий, является их высокая стоимость (которая может достигать 50 долларов за килограмм). Это обстоятельство существенно ограничивает экономическую целесообразность использования данных сплавов. Для снижения стоимости горячекатаного проката, в свою очередь, необходимо сократить производственные издержки. Существующие методы обработки сплавов серии 5XXX, включающие многочисленные проходы при горячей прокатке, проведение отжига для снятия внутренних напряжений, а также необходимость использования эджеров [11], существенно увеличивают производственные затраты. Необходимость использования большого количества проходов при горячей прокатке неизбежно снижает температуру кромок, что, как следствие, способствует образованию трещин на краях подката. Комплексный подход к совершенствованию производственных процессов (выплавки и обработки давлением) позволит снизить стоимость горячекатаного подката из сплавов, содержащих скандий, что, в свою очередь, расширит их применение в различных отраслях промышленности.

Материалы и методы исследования

С точки зрения обработки металлов давлением наибольший интерес представляет способ асимметричной прокатки как метод улучшения механических

и технологических характеристик металлов и сплавов. Асимметричными называются такие случаи прокатки, когда некоторые условия процесса или их комбинации несимметричны относительно оси проката. Существует несколько классификаций процессов асимметричной прокатки, но наиболее распространённая включает в себя шесть факторов асимметрии: геометрический, кинематический, поверхностный, физико-механический, контактный, температурный. В данной работе использовался метод асимметричной прокатки, в котором кинематическая асимметрия процесса создавалась за счёт рассогласования окружных скоростей валков. С помощью данного способа возможно усовершенствовать технологические схемы обработки алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Его применение обеспечивает техническое преимущество, заключающееся в возможности уменьшения количества проходов в чистовой группе клетей при горячей прокатке. Более того при асимметричной прокатке измельчается структура материала, что позволяет получать конечный продукт с повышенным комплексом механических и технологических свойств [12].

Эффективность деформационного измельчения структурных элементов металлических материалов находится в прямой зависимости от кинематических параметров процесса, которые оказывают существенное влияние на механизмы деформации, такие как сжатие и сдвиг. В этом контексте анализ температурно-скоростных режимов деформирования является критически важным аспектом для совершенствования данного процесса. В соответствии с теоретическими основами обработки металлов давлением, кинематический анализ направлен на детальное изучение скорости перемещения металлической заготовки относительно деформирующего инструмента. Асимметричные условия при прокатке оказывают значительное воздействие на кинематические характеристики очага деформации, что приводит к изменению протяженности зон отставания и опережения. Эти зоны играют ключевую роль в определении эффективности и качества процесса деформационного измельчения, поскольку они напрямую влияют на микроструктурные параметры материала и его механические свойства [13-15].

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав марки 1580 системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Слиток сплава был получен методом литья в кристаллизатор скольжения на лабораторной установке.

Прокатка заготовки проводилась на промышленно-лабораторном стане ДУО 400 в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Данный стан обладает статусом уникальной научной установки с возможностью изменения отношения скоростей рабочих валков V_1/V_2 в широком диапазоне благодаря индивидуальному приводу рабочих валков. Это позволяет реали-

зовывать процессы симметричной и асимметричной прокатки при $V_1/V_2 = 10/1$. Диаметры рабочих валков равны и составляют 340 мм.

Перед прокаткой слиток был подвергнут гомогенизации для обеспечения структурной однородности. После обточки размеры заготовки для последующей прокатки: толщина – 100 мм, ширина – 210 мм, длина – 210 мм. Нагрев заготовки перед горячей прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ20 до температуры 440°C, время выдержки составило 3 ч.

Прокатка исходного обточенного слитка осуществлялась в горячем симметричном режиме с толщины 100 до 16,1 мм. Полученная после горячей прокатки заготовка была порезана на шесть частей, как указано в табл. 1. Образец №1 был прокатан в симметричном режиме до конечной толщины 6,5 мм за три прохода. Перед асимметричной прокаткой образцы №2–5 были доведены до толщины 14 мм для получения целевой конечной толщины 6,5 мм из-за особенностей работы оборудования (для обеспечения захвата заготовки валками при установленном зазоре). Коэффициент асимметрии варьировался от 1,1 до 1,5. Скорость нижнего валка оставалась постоянной и составила 10 об/мин, в то время как скорость верхнего валка снижалась от 9,1 до 6,6 об/мин для обеспечения коэффициентов асимметрии в указанном диапазоне.

Таблица 1. Исходные данные для горячей прокатки
Table 1. Initial data for hot rolling

Номер образца	Начальная толщина заготовки, мм	Скорость верхнего валка, об/мин	Скорость нижнего валка, об/мин	Коэффициент асимметрии (V_1/V_2)
1	16,1	10,0	10,0	1
2	14,0	10,0	9,1	1,1
3	14,0	10,0	8,3	1,2
4	14,0	10,0	7,7	1,3
5	14,0	10,0	7,1	1,4
6	14,0	10,0	6,6	1,5

Усилие, возникающее в процессе прокатки, регистрировалось программным обеспечением промышленно-лабораторного стана ДУО 400.

Таблица 2. Результаты по выходным параметрам после горячей прокатки
Table 2. Results of output parameters after hot rolling

Номер образца	Отношение скоростей валков V_1/V_2	Коэффициент асимметрии	Относительное обжатие, %	Усилие прокатки, кН	Дефекты
1	10,0/10,0	1	20,3	1600	-
			27,8	1870	-
			30,1	1920	-
2	10,0/9,1	1,1	53,6	1400	-
3	10,0/8,3	1,2	53,8	1340	-
4	10,0/7,7	1,3	53,9	1280	-
5	10,0/7,1	1,4	57,2	1260	Серповидность
6	10,0/6,6	1,5	60,0	1160	Растрескивание кромки

Качество полученных образцов горячекатаного подката оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 57510-2017 [16]. Основным критерием оценки являлось отсутствие дефектов, таких как трещины, разрывы и другие структурные неоднородности.

Твердость поверхности горячекатаного подката определялась методом Бринелля на универсальном твердомере EMCO TEST M4C/R G3 в соответствии с ГОСТ 9012-59 [17].

Для оценки механических свойств полученных образцов были проведены испытания на растяжение на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type в соответствии со стандартом ASTM E8. Определялись такие параметры, как временное сопротивление, условный предел текучести и относительное удлинение (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ). Образцы отбирались после холодной прокатки в нагартованном состоянии, что позволило оценить влияние предварительной деформации на их механические характеристики.

Полученные результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены результаты по значениям относительных обжатий и усилий прокатки при отношении скоростей валков в диапазоне от 1 до 1,5.

Суммарное относительное обжатие при горячей прокатке образца №1 за три прохода составило 59,7%.

Установлено, что при увеличении коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,1 до 1,5 наблюдается закономерное снижение усилия прокатки: от 140 т при $V_1/V_2 = 1,1$ до 116 т при $V_1/V_2 = 1,5$. Это связано с ростом доли сдвиговой составляющей в очаге деформации и уменьшением нормальной составляющей контактных напряжений. Однако снижение усилия не является прямым индикатором повышения технологической пластичности, поэтому основным критерием оценки служит отсутствие дефектов поверхности и геометрии прокатываемого изделия.

При коэффициентах асимметрии 1,1–1,3 формирование подката происходит стабильно: кромочные дефекты и геометрические искажения не наблюдаются. В этом диапазоне обеспечивается устойчивый захват металла валками и стабильный очаг деформации.

При дальнейшем увеличении коэффициента асимметрии до 1,4 начинает проявляться серповидность прокатываемой полосы, обусловленная ростом кинематической неоднородности по толщине. Этот дефект особенно критичен при работе с образцами небольших размеров.

При коэффициенте асимметрии 1,5 зафиксировано появление выраженного растрескивания кромки, что свидетельствует о снижении технологической пластичности материала при высокой величине рассогласования окружных скоростей валков. Такой режим следует считать технологически неприемлемым.

Попытка выполнения прокатки при ещё большем коэффициенте асимметрии (1,6) показала полное отсутствие захвата заготовки при обжатии 53,6%, что указывает на критическое нарушение условий процесса.

Эти наблюдения согласуются с результатами механических испытаний после холодной прокатки: в диапазоне коэффициентов 1,4–1,5 относительное удлинение снижается, что указывает на ухудшение пластичности материала.

Результаты измерения твёрдости горячекатаного подката до и после отжига представлены на **рис. 1**.

Анализ полученных данных показывает, что максимальная твёрдость наблюдается у образца, прокатанного в симметричном режиме $V_1/V_2 = 1,0$: значение составляет 126 НВ до отжига. При переходе к асимметричной прокатке твёрдость уменьшается и для

коэффициентов асимметрии 1,1–1,2 находится в диапазоне 105–108 НВ. Дальнейшее увеличение коэффициента асимметрии до 1,3–1,5 приводит к небольшому росту твёрдости (до 109–115 НВ), однако этот рост остаётся в пределах экспериментальной погрешности, что не позволяет говорить о выраженной зависимости твёрдости от величины рассогласования скоростей валков.

После проведения отжига твёрдость всех образцов выравнивается и находится на уровне 104–110 НВ. Характерная особенность заключается в том, что именно симметрично прокатанный образец демонстрирует наиболее существенное снижение твёрдости – со 126 до 110 НВ, что приводит его параметры к уровню асимметрично прокатанных образцов.

Полученные данные подтверждают, что различия в исходной твёрдости после горячей прокатки практически нивелируются отжигом. Это указывает на то, что холодная прокатка подката, полученного в симметричном и асимметричном режимах, может выполняться при одинаковых технологических параметрах. Следовательно, при использовании асимметричной горячей прокатки появляется возможность исключить промежуточный отжиг перед холодной прокаткой без риска ухудшения условий захвата или увеличения усилия деформации.

Результаты исследований механических свойств после холодной прокатки, проведенной по стандартной технологии, представлены на **рис. 2**.

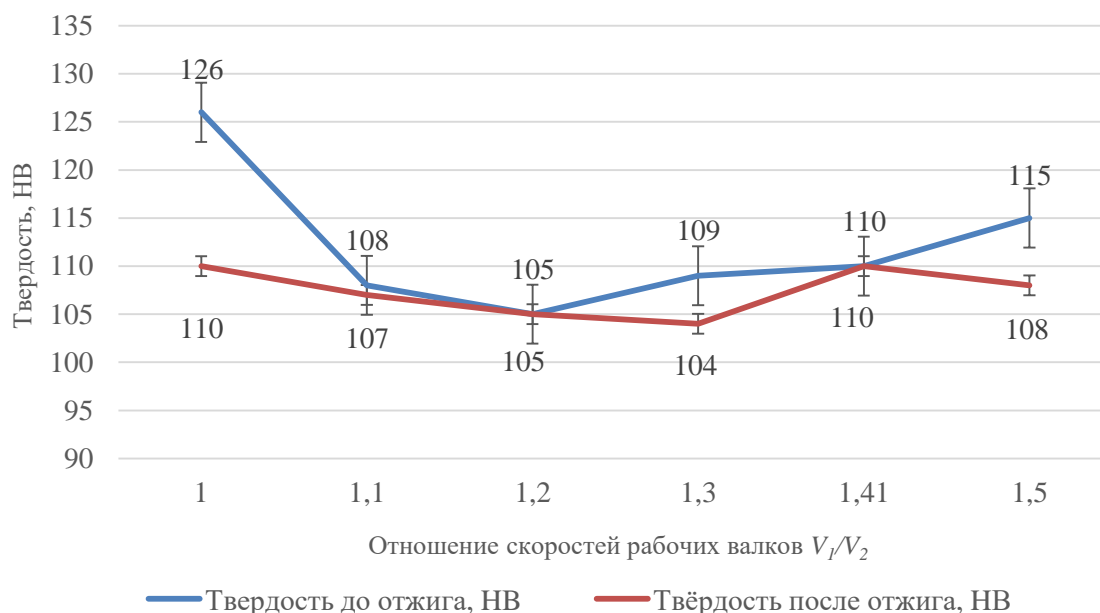


Рис. 1. Влияние коэффициента асимметрии на твердость проката

Fig. 1. The effect of the asymmetry coefficient on the hardness of rolled products

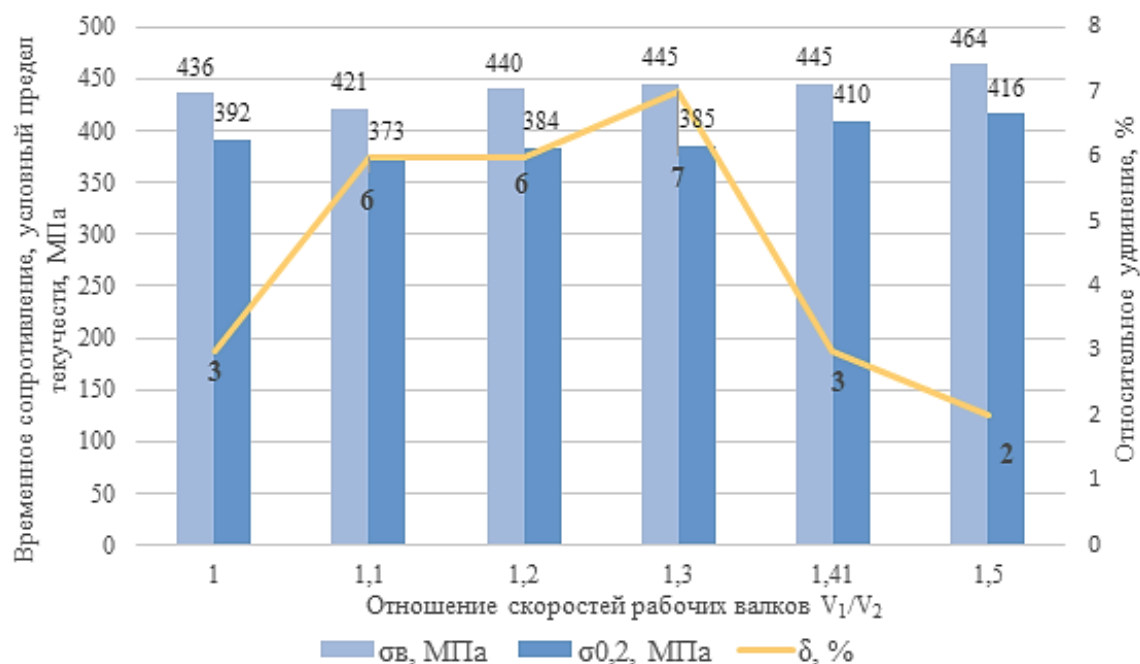


Рис. 2. Влияние коэффициента асимметрии на изменение механических свойств после холодной прокатки
 Fig. 2. The influence of the asymmetry coefficient on the changes of mechanical properties after cold rolling

Анализ представленных данных показывает, что применение асимметричной горячей прокатки с коэффициентом асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает наиболее благоприятное сочетание механических свойств после последующей холодной прокатки. В данном диапазоне наблюдается увеличение относительного удлинения δ до 6–7%, что превышает значения, полученные после симметричной прокатки ($\delta \approx 3\%$). При дальнейшем увеличении коэффициента асимметрии до 1,4–1,5 относительное удлинение снижается до 2–3%, что свидетельствует об ухудшении пластичности материала.

Временное сопротивление σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ во всех исследованных режимах различаются несущественно и остаются в диапазонах 421–464 и 373–416 МПа соответственно. Это указывает на то, что изменение кинематических условий горячей прокатки в первую очередь отражается на пластичности материала, тогда как уровень прочности изменяется в пределах статистической погрешности.

Экспериментальные данные показали, что применение асимметричной горячей прокатки при повышении коэффициента асимметрии до значений 1,1–1,3 обеспечивает формирование проката с более благоприятным сочетанием механических и технологических свойств по сравнению с симметричной прокаткой. Сопоставление твердости и механических характеристик образцов, прошедших различные режимы обработки, также показывает, что проведение отжига после горячей прокатки не приводит к заметному изменению прочностных параметров. Это позволяет рассматривать возможность исключения операции отжига на данном этапе обработки без ухудшения качества получаемого материала и, как след-

ствие, сокращения продолжительности технологического цикла.

Заключение

Проведённые исследования показали, что изменение кинематических условий горячей прокатки оказывает значимое влияние на технологическую пластичность и механическое состояние алюминиевого сплава 1580. Установлено, что асимметричная горячая прокатка в диапазоне коэффициентов асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает устойчивый процесс деформации без возникновения кромочных дефектов и геометрических искажений, а также приводит к снижению усилия прокатки по сравнению с симметричным режимом.

При увеличении коэффициента асимметрии до 1,4 наблюдается развитие серповидности, а при 1,5 – выраженное растрескивание кромки, что свидетельствует о снижении технологической пластичности и делает такие режимы технологически неприемлемыми.

Анализ твердости и механических свойств показал, что различия, возникающие после горячей прокатки, нивелируются последующим отжигом, а прочностные характеристики σ_b и $\sigma_{0,2}$ во всех режимах остаются на сопоставимом уровне. Существенные изменения наблюдаются в показателях пластичности: при коэффициентах асимметрии 1,1–1,3 относительное удлинение достигает 6–7% после холодной деформации, что превышает значения после симметричной прокатки.

Таким образом, асимметричная горячая прокатка с коэффициентом асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает увеличение технологической пластичности сплава.

Полученные результаты указывают на возможность исключения промежуточного отжига перед холодной прокаткой, а также обосновывают предпосылки для уменьшения числа проходов на стадии горячей чистовой прокатки.

Список источников

1. Филатов Ю.А. Алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Sc для космической техники // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 61–65.
2. Захаров В.В., Филатов Ю.А. Современные тенденции развития алюминиевых сплавов, легированных скандием // Технология легких сплавов. 2022. № 3. С. 9–18.
3. Филатов Ю.А. Развитие представлений о легировании скандием сплавов Al–Mg // Технология легких сплавов. 2015. № 2. С. 19–22.
4. Пат. 2343218 РФ, МПК C22C 21/08. Криогенный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Ю.А. Филатов, В.И. Елагин, В.В. Захаров, Л.И. Панасюгина, Р.И. Доброжинская и др. Заявл. 06.04.2007; Опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
5. Захаров В.В., Филатов Ю.А., Дриц А.М. Возможности повышения прочностных свойств крупногабаритных полуфабрикатов из сплавов Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 2023. № 4. С. 34–41.
6. Эффективность Sc для упрочнения и улучшения формовости листов BIW 5XXX / Никитина М., Градобоев А., Рябов Д., Вахромов Р., Манн В., Крохин А. // Легкие металлы 2023 / под ред. С. Брук. TMS, 2023. (Серия «Минералы, металлы и материалы»).
7. Наноструктурная иерархия повышает прочность алюминиевых сплавов / Лиддикот П.В., Ляо Сяо-Чжоу, Чжао Ю. и др. // Nature Communications. 2010. Т. 63. С. 1–7.
8. Пат. US 3619181 A, МПК C22C 21/00. Aluminum scandium alloy / Willey L. A.; Aluminum Co. of America. Заявл. 29.10.1968; Опубл. 09.11.1971. 8 с.
9. Структура и свойства сплавов Al–Sc и Al–Mg–Sc / Дриц М.Е., Торопова Л.С., Быков Ю.Г., Елагин В.И., Филатов Ю.А. // Металлургия и металловедение цветных сплавов. М.: Наука, 1982. С. 213–223.
10. Металловедческие принципы легирования алюминиевых сплавов скандием / Захаров В.В., Елагин В.И., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 67–73.
11. Сплавы алюминия с магнием (магналии) // Промышленные алюминиевые сплавы: справочное издание / Н.Б. Кондратьева, Ю.С. Золоторевский, С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. С. 37–51.
12. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Кожемякина А.Е., Носов Л.В., Сверчков А.И. // Теория и технология металлургического производства. 2022. Т. 41, № 2. С. 32–40.
13. Влияние соотношения толщин на структуру поверхности раздела и механические свойства композитных пластин Mg/Al в условиях асимметричной разницы температур / Чжи К.С., Ву З.Ю., Ма Л.Ф., Хуан З.К., Чжэн З.Б., Сюй Х., Цзя У.Т., Лей Дж. Ю. // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Т. 24. С. 8332–8347.
14. Амегадзи М.Ю., Бишоп Д.П. Влияние асимметричной прокатки на микроструктуру и механические свойства деформируемого алюминия марки 6061 // Materials Today Communications. 2020. № 25. Ст. 101283.
15. Чжао Цилинь, Ху Сянлэй, Лю Сянхуа. Анализ механических параметров при многопроходной асимметричной прокатке полосы слябовым методом // Materials. 2023. Т. 16, № 18. Ст. 6286.
16. ГОСТ Р 57510-2017. Катаные изделия из алюминиевых сплавов. Термины и определения дефектов. М.: Стандартинформ, 2017. 52 с.
17. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.

References

1. Filatov Yu.A. Aluminum alloys of the Al–Mg–Sc system for space technology. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2013;(4):61-65. (In Russ.)
2. Zakharov V.V., Filatov Yu.A. Modern trends in the development of aluminum alloys alloyed with scandium. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2022;(3):9-18. (In Russ.)
3. Filatov Yu.A. Development of ideas on scandium alloying of Al-Mg alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2015;(2):19-22. (In Russ.)
4. Filatov Yu.A., Elagin V. I., Zakharov V.V., Panasyugina L.I., Dobrozinskaya R.I. et al. *Kriogenniy deformiruemiy termicheski neuprochnyaemiy spлав na osnove alyuminiya* [Cryogenic deformable non-heat-treatable aluminum-based alloy]. Patent RU, no. 2343218, 2009.
5. Zakharov V.V., Filatov Yu.A., Drits A.M. Possibilities of increasing the strength properties of large-sized semi-finished products made of Al–Mg–Sc alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(4):34-41. (In Russ.)
6. Nikitina M., Gradoboev A., Ryabov D., Vakhromov R., Mann V., Krokhin A. *Effektivnost Sc dlya uprochneniya i uluchsheniya formuemosti listov BIW 5HKKH* [Efficiency of Sc for strengthening and formability improvement of BIW 5XXX sheets]. In: *Light Metals 2023*, ed. by S. Broek. TMS, 2023. (In Russ.)
7. Liddicoat P. V., Liao Xiao-Zhou, Zhao Y. et al. Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminum alloys. *Nature Communications*, 2010;63:1-7.
8. Willey L.A. Aluminum scandium alloy. Patent US, no. 3619181, 1971.
9. Drits M.E., Toropova L.S., Bykov Yu.G., Elagin V.I., Filatov Yu.A. Structure and properties of Al–Sc and Al–Mg–Sc alloys. *Metallurgiya i metallovedenie tsvetnykh splavov* [Metallurgy and Metal Science of Non-Ferrous Alloys]. Moscow: Nauka, 1982. Pp. 213-223. (In Russ.)
10. Zakharov V.V., Elagin V.I., Rostova T.D., Filatov Yu.A. Metallurgical principles of scandium alloying of aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2010;(1):67-73. (In Russ.)
11. Kondratyeva N.B., Zolotarevsky Yu.S., Aliyeva S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M. *Splavy alyuminiya s magniem (magnalii)*. V kn.: *Promyshlennyye alyuminiyevye splavy: spravocnoe izdanie* [Aluminum alloys with magnesium (magnalium). In: *Industrial Aluminum Alloys: ref-*

- erence book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, pp. 37-51. (In Russ.)
12. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pesin I.A., Kozhemyakina A.E., Nosov L.V., Sverchkov A.I. Development of technological schemes for asymmetric rolling of aluminum strips with increased strength and ductility. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2022;41(2):32-40. (In Russ.)
 13. Zhi C.C., Wu Z.Y., Ma L.F., Huang Z. Q., Zheng Z.B., Xu H., Jia W.T., Lei J.Y. Effect of thickness ratio on interfacial structure and mechanical properties of Mg/Al composite plates under differential-temperature asymmetric rolling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:8332-8347.
 14. Amegadzie M.Y., Bishop D.P. Effect of asymmetric rolling on the microstructure and mechanical properties of wrought 6061 aluminum. *Materials Today Communications*. 2020;(25):101283.
 15. Zhao Qilin, Hu Xianlei, Liu Xianghua. Analysis of mechanical parameters in multi-pass asymmetrical rolling of strip using the slab method. *Materials*. 2023;16(18):6286.
 16. State standard GOST P 57510-2017. Rolled products made of aluminum alloys. Terms and definitions of defects. Moscow: Standartinform, 2017, 52 p. (In Russ.)
 17. State standard GOST 9012-59. Metals. Brinell hardness measurement method. Moscow: Standartinform, 2007, 39 p. (In Russ.)

Поступила 21.11.2025; принята к публикации 10.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 21/11/2025; revised 10/12/2025; published 25/12/2025

Никитина Маргарита Александровна – инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mgurbich@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4159-8254

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела компьютерного моделирования,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Бирюкова Олеся Дмитриевна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
старший научный сотрудник,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapartisonchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Песин Илья Александрович – кандидат технических наук, начальник технологического отдела,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Барышникова Анна Михайловна – аспирант, инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Носов Леонид Васильевич – инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8018-2603

Margarita A. Nikitina – Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mgurbich@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4159-8254

Denis O. Pustovoytov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Computer Modeling,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Olesya D. Biryukova – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Senior Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapartisonchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Ilya A. Pesin – PhD (Eng.), Head of the Technological Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Anna M. Baryshnikova – Postgraduate Student, Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Leonid V. Nosov – Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8018-2603