

УДК 621.77

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-4-43-53>

Научная статья

Research article



Возможности асимметричной прокатки однослойных и слоистых материалов из алюминия и его сплавов

О.Д. Бирюкова¹, А.Е. Могильных¹, А.М. Песин¹, Д.О. Пустовойтов¹,
И.А. Песин¹, М.А. Бирюков²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, ул. Кирова, 93

✉ Олеся Дмитриевна Бирюкова (fimapatisonchik@inbox.ru)

Аннотация: Асимметричная прокатка алюминиевых сплавов является одним из способов улучшения их механических и эксплуатационных характеристик. Кинематическая асимметрия при прокатке осуществляется при варьировании отношений скоростей рабочих валков (V_1/V_2). Считается, что при $V_1/V_2 > 3$ процесс асимметричной прокатки по механизму совмещения больших деформаций сжатия и сдвига приближен к процессам интенсивной пластической деформации. Выявлено, что большее количество исследований основано на данных, полученных при ограниченном диапазоне соотношения скоростей валков $V_1/V_2 < 2$ при асимметричной прокатке. В статье рассмотрены эффекты, полученные при $V_1/V_2 = 1\div 7,7$. Реализация данного условия стала возможна благодаря уникальной научной установке – лабораторно-промышленному стану 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова. Проведены эксперименты по асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевых сплавов 2024, 5083 и 6061 и аккумулярующей прокатке с получением листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/2024, 5083/1070 и 6061/5083. Выявлены недостатки асимметричной прокатки по сравнению с симметричной: наблюдалось разрушение образцов при единичных относительных обжатиях от 37 % для листовых слоистых алюминиевых композитов (5083/2024) и от 40 % – для тонколистовых алюминиевых сплавов (6061). Описаны нюансы подготовки материала к обработке, в том числе необходимость зачистки и обезжиривания поверхности сплавов перед соединением в композит. Подобраны температурные режимы прокатки, определившие холодную асимметричную тонколистовую прокатку (комнатная температура обработки) и теплую асимметричную аккумулярующую прокатку (температура нагрева заготовок в печи перед прокаткой 320–350 °С). Показаны снижение силы прокатки (минимально в 1,3 раза), возможность варьирования твердости (в том числе увеличения минимально на 30 %) и технологической пластичности при изменении отношений скоростей валков в пределах от 2 до 7,7. Предложены варианты сокращения технологических циклов обработки алюминиевых сплавов без снижения качества готовой продукции путем уменьшения количества прокаток и отжигов в стандартной схеме.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, аккумулярующая прокатка, интенсивная пластическая деформация, технологическая пластичность, твердость, кинематическая асимметрия, сила прокатки.

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

Для цитирования: Бирюкова О.Д., Могильных А.Е., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Бирюков М.А. Возможности асимметричной прокатки однослойных и слоистых материалов из алюминия и его сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(4):43–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-4-43-53>

Capabilities of asymmetric rolling of single-layer and laminated materials made from aluminum and its alloys

O.D. Biryukova¹, A.E. Mogilnykh¹, A.M. Pesin¹, D.O. Pustovoytov¹,
I.A. Pesin¹, M.A. Biryukov²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University
38 Lenin Prosp., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russia

² PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”
93 Kirov Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russia

✉ Olesya D. Biryukova (fimapatisonchik@inbox.ru)

Abstract: Asymmetric rolling of aluminum alloys is one of the methods for improving their mechanical and performance characteristics. Kinematic asymmetry during rolling is achieved by varying the roll speed ratios (V_1/V_2). It is believed that when $V_1/V_2 > 3$, the process of asymmetric rolling, by combining significant compression and shear deformations, approximates the processes of severe plastic deformation. It has been found that the majority of studies are based on data obtained within a limited roll speed ratio range, $V_1/V_2 < 2$, in asymmetric rolling. This article examines the effects observed at $V_1/V_2 = 1\div 7.7$. The implementation of this condition became possible thanks to a unique scientific facility – the 400 laboratory-industrial asymmetric rolling mill at the Zhilyaev laboratory “Mechanics of Gradient Nanomaterials” at Nosov Magnitogorsk State Technical University. Experiments were conducted on asymmetric thin-sheet rolling of aluminum alloys 2024, 5083, and 6061, as well as accumulative roll bonding to produce laminated sheet aluminum composites 5083/2024, 5083/1070, and 6061/5083. The disadvantages of asymmetric rolling compared to symmetric rolling were identified: sample failure was observed at single relative reductions of 37 % for layered sheet aluminum composites (5083/2024) and 40 % for thin-sheet aluminum alloys (6061). The nuances of material preparation for processing were described, including the necessity of cleaning and degreasing the alloy surfaces before bonding into a composite. The rolling temperature regimes were selected, determining cold asymmetric thin-sheet rolling (room temperature processing) and warm asymmetric accumulative roll bonding (heating of the workpieces in the furnace before rolling at 320–350 °C). A reduction in rolling force (by a minimum of 1.3 times), the ability to vary hardness (including an increase by a minimum of 30 %), and technological plasticity with changes in the roll speed ratios within the range of 2 to 7.7 were demonstrated. Options were proposed for reducing the processing cycles of aluminum alloys without compromising the quality of the finished product by reducing the number of rolling passes and annealing steps in the standard process scheme.

Key words: asymmetric rolling, accumulative roll bonding, severe plastic deformation, technological plasticity, hardness, kinematic asymmetry, rolling force.

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Science Foundation grant (agreement No. 23-79-30015).

For citation: Biryukova O.D., Mogilnykh A.E., Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Pesin I.A., Biryukov M.A. Capabilities of asymmetric rolling of single-layer and laminated materials made from aluminum and its alloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(4):43–53.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-4-43-53>

Введение

В соответствии со стратегией развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.¹ установлен ряд задач, ориентированных на получение металлопродукции высокого качества. Отдельно стоит отметить, что отрасль цветной металлургии в таких условиях должна показывать прирост производства, в том числе не только для импортозамещения, но и для возможности экспорта высококачественной конкурентоспособной продукции. Важно, что освоение обработки новых сверхпрочных и в

то же время очень легких материалов определяет вектор развития технического прогресса в таких отраслях, как космическая, электротехническая, автомобилестроение и авиастроение. Алюминий и его сплавы являются материалами основного выбора при проектировании конструкций в данных областях производства.

Обеспечить качество алюминиевого металлопроката позволят способы обработки материалов, направленные на комплексное улучшение свойств, структуры и геометрических параметров продукции. Например, асимметричная прокатка — перспективный способ получения качественных материалов, с ее помощью возможно улучшить такие механические характеристики, как прочность, твердость, пластичность, а также эксплуатацион-

¹ Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р «Об утверждении стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г.».

ные свойства — обрабатываемость давлением, технологическую пластичности и т.п. [1–10]. Асимметрия при прокатке создается целенаправленно несколькими способами: варьированием отношения скоростей валков возможно получить кинематическую асимметрию; изменяя отношение диаметров валков, — геометрическую; модифицируя поверхность рабочих валков или обрабатываемого материала, — физико-механическую или контактную и т.д. [11–14]. Однако кинематическая асимметрия является наиболее технологичным видом, которому чаще всего отдается предпочтение. На сегодняшний день процесс асимметричной прокатки с соотношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 > 3$ считается видом обработки металлов давлением, который максимально приближен к процессам интенсивной пластической деформации. Главная особенность заключается в возможности совмещения больших деформаций сжатия и сдвига при реализации схемы простого и чистого сдвига, что влияет на деформируемость металлов и сплавов в том числе.

Установлено, что при асимметричной прокатке значительно возрастают твердость и прочность материалов [15–19], пластичность при этом снижается, что вызывает необходимость проводить промежуточные и заключительные термические обработки металлопроката. Но при сочетании высоких значений обжатий и отношений скоростей валков возможно сохранение или даже увеличение относительного удлинения проката.

Стоит отметить, что в зарубежных публикациях [20–23] авторы в подавляющем большинстве случаев рассматривают ограниченный диапазон рассогласования скоростей валков, а именно отношение V_1/V_2 не более 2. Данные по влиянию более широкого диапазона отношений рабочих валков ($V_1/V_2 = 2\div 10$) практически полностью отсутствуют как в российских, так и в зарубежных исследованиях. В связи с этим рассматриваемый вопрос является, несомненно, актуальным.

Реализация асимметричной прокатки с использованием кинематической асимметрии при установленном отношении скоростей рабочих валков V_1/V_2 в диапазоне 1,05–10,0 стала возможной благодаря уникальной научной установке (УНУ)¹ — лабораторно-промышленному стану 400 асимметричной прокатки² лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилеева

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Данное оборудование не имеет аналогов в России, а наиболее схожий по характеристикам агрегат расположен в Южной Корее (отношение скоростей рабочих валков V_1/V_2 может составлять 2).

Методика исследований

Исследовалось влияние кинематической асимметрии при тонколистовой и аккумуляющей прокатке на изменение механических свойств в алюминиевых сплавах. Технология асимметричной прокатки проводилась на УНУ «Стан асимметричной прокатки 400» при комнатной температуре. Смазки не были использованы, однако предварительно выполнялась прокатка алюминия для осуществления его налипания на поверхность валков и увеличения тем самым коэффициента трения. Прокатке подвергались алюминиевые сплавы 1xxx, 2xxx, 5xxx и 6xxx серий, а именно 1070, 2024, 5083 и 6061, химический состав которых представлен в табл. 1. Выбор сплавов был обусловлен их распространенностью и популярностью применения в отраслях производства, для которых проводилось данное исследование (автомобилестроение, космическая отрасль и т.д.)

Алюминиевые сплавы 2024, 5083 и 6061 обрабатывали методом асимметричной прокатки с варьированием значений относительных обжатий в пределах от 5 до 89 % при отношениях скоростей валков V_1/V_2 от 1 до 7,7. Образцы имели следующие размеры, мм: толщина — от 1,9 до 6, ширина — 25, длина — 100. Дополнительная термическая обработка или предварительный нагрев перед прокаткой не использовались.

Некоторые параметры асимметричной тонколистовой и асимметричной аккумуляющей прокатки отличались, что обуславливалось технологическими особенностями процесса: тонколистовая прокатка представляла собой обработку однослойных алюминиевых сплавов, в то время как аккумуляющая прокатка, общая схема которой приведена на рис. 1 [24], предназначена для слоистых материалов, составляющих композит.

Данные методы используются для получения ультрамелкозернистой структуры, при этом в процессе аккумуляющей прокатки помимо действия схемы совмещенного и простого сдвигов также работает процесс аккумуляции напряжений после каждого цикла обработки. Однако сложность данного процесса, по сравнению с асимме-

¹ <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3206908>

² <http://lmgn.magtu.ru/ru/oborudovanie.html>

Таблица 1. Химический состав (%) алюминиевых сплавов различных серий

Table 1. Chemical composition (%) of aluminum alloys from various series

Сплав	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
1070	0,03	0,02	0,15	0,16	0,01	—	0,01	0,04	99,70
2024	0,019	0,473	0,422	0,178	0,02	0,001	0,15	0,25	98,487
5083	0,682	4,479	0,091	0,285	0,027	0,104	0,007	0,014	94,282
6061	0,90	1,00	0,60	0,70	0,32	0,22	0,15	0,25	95,86

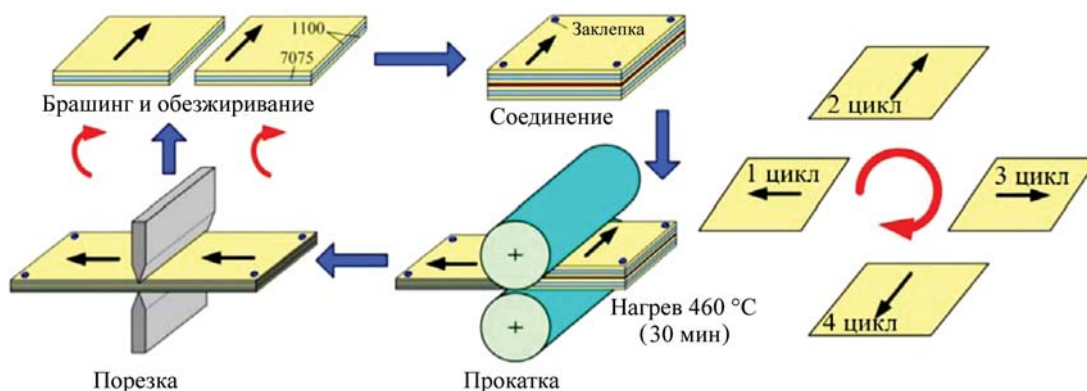


Рис. 1. Схема аккумуляторной прокатки [24]

Fig. 1. Scheme of accumulative roll bonding [24]

тричной тонколистовой прокаткой, заключается в необходимости подготовки поверхности сплавов к соединению в процессе обработки. В некоторых работах [24–27] описано требование предварительного механического соединения листов, влияющего на повышение уровня их сцепления при прокатке, которое было выполнено на нескольких образцах, что показано на рис. 2.

При проведении асимметричной аккумуля-



Рис. 2. Образцы, подготовленные для асимметричной аккумуляторной прокатки с предварительным соединением их тонкой проволокой

Fig. 2. Workpieces prepared for asymmetric accumulative roll bonding with preliminary joining using thin wire

рующей прокатки использовались алюминиевые сплавы 1070, 2024, 5083 и 6061, из которых были составлены листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070, 5083/2024 и 6061/5083. Для перечисленных материалов во всех случаях проведены два цикла прокатки при относительных обжатиях в пределах от 45 до 75 % (за исключением случаев с разрушенными образцами после 1-го цикла прокатки), отношение скоростей валков V_1/V_2 составило от 1 до 5. Образцы имели следующие размеры, мм: толщина отдельных слоев, составляющих композит, — от 1 до 2 при общей толщине двух сплавов от 2 до 4, ширина — 50, длина — 100. Температурные условия прокатки варьировались от холодной до горячей, преимущественно осуществлялся предварительный нагрев заготовок до температур 320–350 °C. Поверхность каждого сплава (только для способа холодной асимметричной аккумуляторной прокатки) предварительно зачищали проволочными щетками или шлифовальной бумагой, после чего обезжиривали при помощи растворителя. Последующее транспортирование до клетки осуществлялось незамедлительно во избежание образования нового крупного слоя оксидной пленки.

Результаты и их обсуждение

В симметричных случаях (при $V_1/V_2 = 1$) происходило разрушение всех образцов уже в первом проходе как при тонколистовой, так и при холодной аккумулярующей прокатке с единичным относительным обжатием 40 % и более, результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3.

При исследовании также стало очевидным, что неправильная, а также не очень тщательная предварительная зачистка и последующее обезжиривание поверхности перед аккумулярующей прокаткой (с любым отношением скоростей валков) негативно влияют на формирование переходного слоя, образуемого за счет диффузионных взаимодействий с определением низкого уровня внедрения слоев основных металлов и сплавов друг в друга. Это, в свою очередь, приводит к возникно-

вению микротрещин на границах раздела, а также участков с частичным отсутствием сваривания слоев.

Целесообразность предварительного соединения сплавов для получения слоистого материала, как показано на рис. 2, не была доказана — при небольших обжатиях данная «сцепка» не имела положительного результата, слои разъезжались, проволока разрывалась. При обжатиях более 50 % в таком соединении не было необходимости — слои одинаково сваривались как при наличии, так и при отсутствии проволоки. В некоторых случаях она оказывала отрицательное влияние, которое приводило к образованию дефектов переднего и заднего концов проката.

Также было выявлено, что формирование листовых слоистых композитов в режиме холодной обработки возможно только при соединении од-

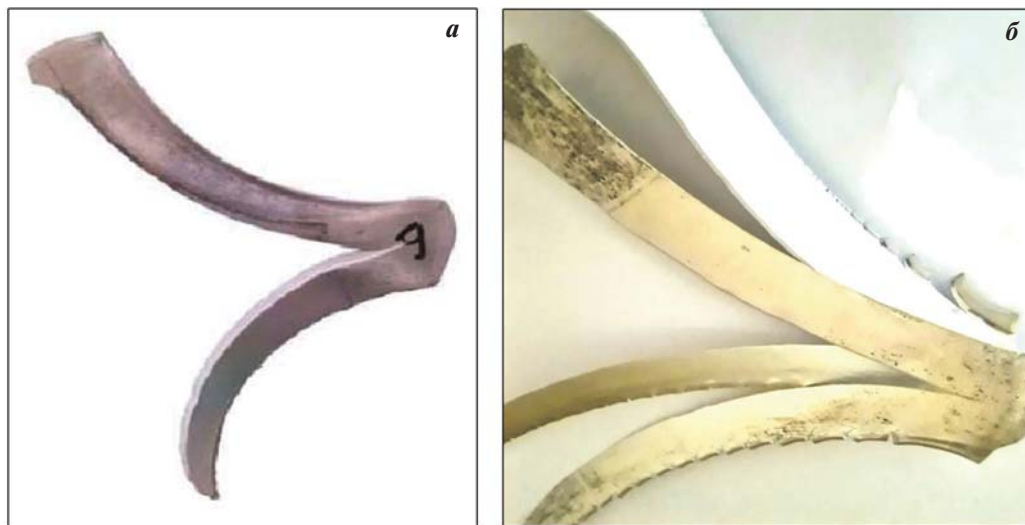


Рис. 3. Образцы после симметричной тонколистовой (а) и аккумулярующей (б) прокаток

Fig. 3. Workpieces after symmetrical thin-sheet rolling (a) and accumulative (b) roll bonding

Таблица 2. Результаты симметричной тонколистовой и аккумулярующей прокаток алюминиевых сплавов

Table 2. Results of symmetrical thin-sheet rolling and accumulative roll bonding of aluminum alloys

Материал	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	конечная		
2024	6,00	3,10	48	464
5083	1,90	0,95	50	290
6061	2,00	1,20	40	353
5083/2024	3,00	1,90	37	1330
5083/1070	3,00	1,60	47	900
6061/5083	3,00	1,55	48	1200

нородных сплавов в первом цикле (например, сплав 5083 + сплав 5083 или сплав 1070 + сплав 1070). Первый и второй циклы с соединением разнородных сплавов (например, сплав 5083 + сплав 2024 или сплав 6061 + сплав 5083) необходимо проводить в режиме теплой прокатки с предварительным нагревом под прокатку до температуры 320–350 °С (с учетом остывания материала во время транспортировки от печи до клетки). Горячее деформирование листовых слоистых алюминиевых композитов проводилось при нагреве заготовок до 420–500 °С, что показало неудовлетворительные результаты, так как на всех образцах образовывались дефекты «передав», «волнистость». В табл. 3 приведены некоторые параметры режимов асимметричной аккумулярующей прокатки — для различных видов обрабатываемого материала (однородных 6061/6061, 5083/5083, 1070/1070 и разнородных 5083/1070, 5083/2024, 6061/5083) указаны температуры нагрева заготовок перед прокаткой, номер цикла асимметричной аккумулярующей прокатки, значение относительного обжатия и результат сохранения целостности образцов после обработки, включая вероятность возникновения дефектов, влияющих на возможность дальнейшей обработки материалов.

Выявлены основные преимущества асимметричной прокатки по сравнению с симметричной: снижение усилия прокатки, возможность управления механическими свойствами (в том числе твердостью, прочностью, пластичностью) в зависимости от уровня асимметрии, повышение технологической пластичности. Данные преимущества характерны как для тонколистовой, так и для аккумулярующей прокатки, что показано в табл. 4 (на примере сплава 6061, обработанного за 1 проход и листового слоистого композита 6061/5083, обработанного за 2 цикла). При асимметричной аккумулярующей прокатке предварительный нагрев образцов проводился в течение 10–15 мин при температуре 320 °С. Все представленные образцы сохранили целостность после обработки.

Важно, что при асимметричной прокатке происходит значительное повышение технологической пластичности. Данный параметр учитывается при разработке новых технических и технологических решений по обработке материалов. Ниже приведены экспериментальные данные по симметричной и асимметричной прокаткам (на примере алюминиевого сплава 6061), которые наглядно показывают разницу в деформируемости образцов. Конечная цель эксперимента — получение ленты

Таблица 3. Параметры режимов асимметричной аккумулярующей прокатки алюминиевых сплавов (сравнение температурных условий)

Table 3. Parameters of the asymmetric accumulative roll bonding modes for aluminum alloys (comparison of temperature conditions)

Материал	Температура предварительного нагрева алюминиевого композита, °С	№ цикла	Относительное обжатие, %	Дефекты Сохранение целостности образцов
6061/6061 5083/5083 1070/1070	—	1	50	+
5083/1070 5083/2024 6061/5083	—	1	50	Расслоение (целостность не сохранена)
5083/1070 5083/2024 6061/5083	320–350	1	50	+
5083/1070 5083/2024 6061/5083	320–350	2	50	+
5083/1070 5083/2024 6061/5083	420–500	1	50	Волнистость и передав (целостность сохранена, однако цикл 2 невозможен)

толщиной 0,5 мм. В случае симметричной прокатки такой результат достигался за 4 прохода. После каждого из проходов возникала необходимость в проведении термической обработки, а именно отжига, т.е. он проводился 4 раза. Межвалковый зазор устанавливался на значение относительного обжатия в 35 % в первых трех проходах и 9 % в последнем проходе. Обжатие более 35 % приводило к нарушению целостности образца, т.е. его разрушению. Результаты приведены в табл. 5.

При асимметричной прокатке отношение скоростей валков составляло $V_1/V_2 = 2$ (в проходах 1

и 2), при этом удалось осуществить процесс прокатки при значении относительного обжатия 63 % без разрушения образцов. Как видно из данных табл. 6, цель удалось достичь за два прохода. Количество отжигов также сократилось до двух.

При дальнейшем увеличении уровня кинематической асимметрии до $V_1/V_2 = 4$ значение относительного обжатия при обработке без разрушения составило 75 %. Очевидно, что при асимметричной прокатке с отношением скоростей валков $V_1/V_2 = 4$ достаточно было одного прохода и одного заключительного отжига (см. табл. 6).

Таблица 4. Результаты асимметричной тонколистовой и аккумуляющей прокатки алюминиевых сплавов (сравнение силы прокатки и твердости)

Table 4. Results of asymmetrical thin-sheet rolling and accumulative roll bonding of aluminum alloys (comparison of rolling force and hardness)

Материал	Отношение скоростей рабочих валков	Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Твердость, НВ
6061	2	63	320	118
6061	3	70	228	121
6061	4	75	166	100
6061/5083	2	53	640	65/78
6061/5083	3	62	558	73/89
6061/5083	4	67	490	93/100

Таблица 5. Экспериментальные данные симметричной прокатки алюминиевой ленты из сплава 6061

Table 5. Experimental data on symmetrical rolling of aluminum strip made from alloy 6061

№ прохода	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	конечная		
1	2,00	1,30	35	337
2	1,30	0,85	35	272
3	0,85	0,55	35	275
4	0,55	0,50	9	151

Таблица 6. Экспериментальные данные асимметричной прокатки алюминиевой ленты из сплава 6061

Table 6. Experimental data on asymmetric rolling of aluminum strip made from alloy 6061

№ прохода	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	конечная		
$V_1/V_2 = 2$				
1	2,00	0,74	63	320
2	0,74	0,50	32	234
$V_1/V_2 = 4$				
1	2,00	0,50	75	166

При аккумулярующей прокатке наблюдались похожие результаты. Показано, что при холодной симметричной аккумулярующей прокатке образцы разрушались уже при значении относительного обжатия 42 %. Кроме того, такого уровня относительного обжатия было недостаточно для сварки заготовок в очаге деформации, в связи с чем слои металлов либо не сваривались, либо наблюдались порывы посередине образцов и дефект «серповидность». Холодная асимметричная прокатка характеризуется уменьшением образования дефектов. Все образцы показали хорошую свариваемость давлением. Технологическая пластичность значительно выросла — листовые слоистые алюминиевые композиты стало возможным прокатывать при единичных относительных обжатиях в диапазоне 75–95 %.

При теплой асимметричной аккумулярующей прокатке максимальное значение единичного относительного обжатия составило 98 %. При более низких его значениях (до 75 %) наблюдалось увеличение коэффициента вытяжки (рассчитываемого по формуле $\mu = l_1/l_0$) при повышении уровня кинематической асимметрии V_1/V_2 до 4 (температура предварительного нагрева образцов составила 320 °С, исходная общая толщина сплавов в композите — 3 мм). Значения коэффициента вытяжки при различных отношениях скоростей валков для листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 представлены ниже:

V_1/V_2	1,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
μ	1,60	3,00	3,58	3,92	4,40	5,06

Заключение

В России и за рубежом рассматривается ограниченный диапазон рассогласования скоростей валков при асимметричной прокатке. Благодаря современному оборудованию, а именно УНУ — лабораторно-промышленному стану 400 асимметричной прокатки — лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева» стало возможным обрабатывать металлы и сплавы при отношении скоростей валков $V_1/V_2 > 2$. По результатам проведенных экспериментальных исследований асимметричной тонколистовой и аккумулярующей прокатки показаны:

1. Увеличение технологической пластичности алюминиевых сплавов (на примере сплавов 2024, 5083 и 6061) и листовых слоистых алюминиевых

композитов (на примере 5083/1070, 5083/2024 и 6061/5083). При тонколистовой прокатке стало возможным сократить технологический цикл холодной обработки материалов, в том числе уменьшить количество прокаток и отжигов без снижения качества металлопроката. Показано, что вместо четырех стандартных проходов в симметричном режиме допустимо проводить один в режиме асимметрии. При аккумулярующей прокатке возможно осуществление единичного относительного обжатия 98 % без разрушения материала в асимметричном режиме по сравнению с 42 % в режиме симметрии. Коэффициент вытяжки возрастал с 1,60 до 5,06 при увеличении отношения скоростей валков V_1/V_2 в диапазоне от 1 до 4 (на примере листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024).

2. Возможность регулирования механических свойств (на примере твердости) при изменении уровня асимметрии при отношении скоростей валков V_1/V_2 в диапазоне от 2 до 4.

3. Снижение усилия прокатки при повышении уровня асимметрии: например, для алюминиевого сплава 6061 усилие уменьшалось с 320 до 166 кН при увеличении отношения V_1/V_2 в диапазоне от 2 до 4, для листового слоистого алюминиевого композита 6061/5083 усилие изменялось с 640 до 490 кН соответственно. Для других рассматриваемых марок алюминиевых сплавов и листовых слоистых алюминиевых композитов результаты были аналогичными.

4. Особенности подготовки алюминиевых сплавов для получения листовых слоистых алюминиевых композитов, заключающиеся в правильной обработке поверхности перед соединением и в отсутствии необходимости в дополнительной «сцепке» слоев с помощью проволоки.

Список литературы/References

1. Youzhi Li, Yongfeng Shen, Sixin Zhao, Weina Zhang, Xue W.Y. Strengthening a medium-carbon low-alloy steel by nanosized grains: The role of asymmetrical rolling. *Nanomaterials*. 2023;13(5):956. <https://doi.org/10.3390/nano13050956>
2. Muñoz J.A., Avalos M., Schell N., Brokmeier H.G., Bolmaro R. Comparison of a low carbon steel processed by cold rolling (CR) and asymmetrical rolling (ASR): Heterogeneity in strain path, texture, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;64:557–575. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.017>

3. Graça A., Vincze G., Wen W., Butuc M.C., Lopes A.B. Numerical study on asymmetrical rolled aluminum alloy sheets using the visco-plastic self-consistent (VPSC) method. *Metals*. 2022;12(6):979. <https://doi.org/10.3390/met12060979>
4. Tao Zhang, Lei Li, Shi-hong Lu, Jia-bin Zhang, Hai Gong. Comparisons of flow behavior characteristics and microstructure between asymmetrical shear rolling and symmetrical rolling by macro/micro coupling simulation. *Journal of Computational Science*. 2018;29: 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.10.005>
5. Guofu Xu, Xiaowu Cao, Tao Zhang, Yulu Duan, Xiaoyan Peng, Ying Deng, Zhimin Yin. Achieving high strain rate superplasticity of an Al–Mg–Sc–Zr alloy by a new asymmetrical rolling technology. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;672:98–107. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.070>
6. Ji Wang, Xianghua Liu, Xiangkun Sun. Study on asymmetrical cold rolling considered sticking friction. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6): 14131–14141. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.027>
7. Amegadzie M.Y., Bishop D.P. Effect of asymmetric rolling on the microstructure and mechanical properties of wrought 6061 aluminum. *Materials Today*. 2020;25:101283. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101283>
8. Tao Zhang, Lei Li, Shi-Hong Lu, Hai Gong, Yun-Xin Wu. Comparisons of different models on dynamic recrystallization of plate during asymmetrical shear rolling. *Materials*. 2018;11(1):151. <https://doi.org/10.3390/ma11010151>
9. Cunqiang Ma, Longgang Hou, Jishan Zhang, Linzhong Zhuang. Influence of thickness reduction per pass on strain, microstructures and mechanical properties of 7050 Al alloy sheet processed by asymmetric rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;650(5): 454–468. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.059>
10. Šlapáková M., Kihoulou B., Grydin O. Development of microstructure of asymmetrically rolled AA3003 aluminum sheets with Zr addition. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2023;2:100012. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2023.100012>
11. Muñoz J.A., Khelfa T., Duarte G.A., Avalos M., Bolmaro R., Cabrera J.M. Plastic behavior and microstructure heterogeneity of an AA6063-T6 aluminum alloy processed by symmetric and asymmetric rolling. *Metals*. 2022;12(10):1551. <https://doi.org/10.3390/met12101551>
12. Vincze G., Simões F., Butuc M.C. Asymmetrical rolling of aluminum alloys and steels: A review. *Metals*. 2020;10(9):1126. <https://doi.org/10.3390/met10091126>
13. Sułek B., Krawczyk J., Majewski M., Nawida N., Plewa K. Analysis of the influence of kinematic and friction asymmetry on the curvature of the strip and force parameters of the rolling process. *Tribologia*. 2023; 305(3):81–94. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9439>
14. Sai Wang, Xianlei Hu, Xiaogong Wang, Jingqi Chen, Xianghua Liu, Changsheng Li. Design and experiment of V-shaped variable thickness rolling for rolled profiled strips. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:4381–4396. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.067>
15. Biryukova O.D., Pesin A.M., Pustovoytov D.O. Investigation of the influence of kinematic asymmetry on the properties of laminated materials. *Materials Research Proceedings*. 2023;32:287–293. <https://doi.org/10.21741/9781644902615-33>
16. Biryukova O., Pesin A., Pustovoytov D. Experience in obtaining laminated aluminum composites by asymmetric accumulative roll bonding. *Letters on Materials*. 2022;12(4):373–378. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-373-378>
17. Pustovoytov D., Pesin A., Tandon P. Asymmetric (hot, warm, cold, cryo) rolling of light alloys: A review. *Metals*. 2021;11(6):956. <https://doi.org/10.3390/met11060956>
18. Biryukova O., Pesin A., Pustovoytov D., Kozhemiakina A., Nosov L. Obtaining laminated aluminum composites with a gradient structure based on asymmetric deformation. *METAL*. 2021;496–501. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4133>
19. Pesin A., Raab G., Sverchkov A., Pustovoytov D., Kornilov G., Bochkarev A., Pesin I., Nosov L. Development of asymmetric cold rolling technology of high-strength steel grades in order to exclude intermediate annealing operations. *Materials Research Proceedings*. 2023;32: 355–361.
20. Kosturek R., Mróz S., Stefanik A., Szota P.L., Gębara P., Merda A., Wachowski M., Gloc M. Study on symmetry and asymmetry rolling of AA2519-T62 alloy at room-temperature and cryogenic conditions. *Materials*. 2022;15(21):7712. <https://doi.org/10.3390/ma15217712>

21. Pan D., Sansome D.H. An experimental study of the effect of roll-speed mismatch on the rolling load during the cold rolling of thin strip. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1982;6(4):361–377.
[https://doi.org/10.1016/0378-3804\(82\)90034-1](https://doi.org/10.1016/0378-3804(82)90034-1)
22. Aboutorabi A., Assempour A., Afrasiab H. Analytical approach for calculating the sheet output curvature in asymmetrical rolling: In the case of roll axis displacement as a new asymmetry factor. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;105:11–22.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.10.016>
23. Qilin Zhao, Xianlei Hu, Xianghua Liu. Analysis of mechanical parameters in multi-pass asymmetrical rolling of strip by slab method. *Materials*. 2023;16(18):6286.
<https://doi.org/10.3390/ma16186286>
24. Zejun Chen, Hongbo Hu, Xia Wu, Minhong Zhou, Kawunga Nyirenda, Qing Liu, Guojun Wang, Deman Wang. Effect of cross accumulative roll bonding process on microstructure and mechanical properties of laminated 1100/7075 composite sheets. *TMS (The Minerals, Metals and Society)*. 2013;2285–2295.
<https://doi.org/10.1002/9781118792148.ch284>
25. Mehtedi M.E., Lai D., Mohtadi R.E., Carta M., Buondonna P., Aymerich F. Bonding of similar AA3105 aluminum alloy by accumulative roll bonding process. *ESA-FORM*. 2021;942/1–942/11.
<https://doi.org/10.25518/esaform21.942>
26. Seleznev M., Renzing C., Schmidtchen M., Prah U., Biermann H., Weidner A. Deformation lenses in a bonding zone of high-alloyed steel laminates manufactured by cold roll bonding. *Metals*. 2022;12:590.
<https://doi.org/10.3390/met12040590>
27. Karganroudi S.S., Nasab B.H., Rahmatabadi D., Ahmadi M., Gholami M.D., Kasaeian-Naeini M., Hashemi R., Aminzadeh A., Ibrahim H. Anisotropic behavior of Al1050 through accumulative roll bonding. *Materials*. 2021;14:6910.
<https://doi.org/10.3390/ma14226910>

Информация об авторах

Олеся Дмитриевна Бирюкова — к.т.н., ст. науч. сотрудник, лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» Магнитогорского государственного технического университета (МГТУ) им. Г.И. Носова.

<https://orcid.org/0000-0002-3922-9289>

E-mail: fimapatisonchik@inbox.ru

Анна Евгеньевна Могильных — к.т.н., ст. науч. сотрудник, лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова.

<https://orcid.org/0000-0002-0977-3566>

E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru

Александр Моисеевич Песин — д.т.н., гл. науч. сотрудник, лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова.

<https://orcid.org/0000-0002-5443-423X>

E-mail: pesin@bk.ru

Денис Олегович Пустовойтов — к.т.н., вед. науч. сотрудник, лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова.

<https://orcid.org/0000-0003-0496-0976>

E-mail: pustovoytov_den@mail.ru

Илья Александрович Песин — к.т.н., ст. науч. сотрудник, лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова.

E-mail: ilya33392@bk.ru

Максим Александрович Бирюков — вед. инженер, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

E-mail: bigmax174@gmail.com

Information about the authors

Olesya D. Biryukova — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU).

<https://orcid.org/0000-0002-3922-9289>

E-mail: fimapatisonchik@inbox.ru

Anna E. Mogilnykh — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials, NMSTU.

<https://orcid.org/0000-0002-0977-3566>

E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru

Alexander M. Pesin — Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Scientist, Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials, NMSTU.

<https://orcid.org/0000-0002-5443-423X>

E-mail: pesin@bk.ru

Denis O. Pustovoytov — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials, NMSTU.

<https://orcid.org/0000-0003-0496-0976>

E-mail: pustovoytov_den@mail.ru

Ilya A. Pesin — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials, NMSTU.

E-mail: ilya33392@bk.ru

Maxim A. Biryukov — Leading Engineer, PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”.

E-mail: bigmax174@gmail.com

Вклад авторов

О.Д. Бирюкова — определение цели работы, проведение экспериментов по аккумуляющей и тонколистовой прокатке, участие в проведении механических испытаний, оценка и обработка полученных результатов, написание статьи.

А.Е. Могильных — участие в определении цели работы, проведение экспериментов по тонколистовой прокатке, участие в проведении механических испытаний, оценка и обработка полученных результатов.

А.М. Песин — руководство работой по асимметричной прокатке, определение методик экспериментов, участие в проведении экспериментов по асимметричной прокатке, оценка полученных результатов.

Д.О. Пустовойтов — руководство работой по асимметричной прокатке, определение методик экспериментов, участие в проведении экспериментов по асимметричной прокатке, оценка полученных результатов.

И.А. Песин — участие в проведении экспериментов по асимметричной прокатке, участие в обсуждении результатов.

М.А. Бирюков — участие в обсуждении результатов, участие в написании статьи.

Contribution of the authors

O.D. Biryukova — defined the research aim, conducted experiments on accumulative roll bonding and thin-sheet rolling, participated in mechanical testing, analyzed and processed the results, and authored the article.

A.E. Mogilnykh — contributed to defining the research aim, performed experiments on thin-sheet rolling, participated in mechanical testing, and analyzed and processed the results.

A.M. Pesin — led the work on asymmetric rolling, defined the experimental methods, participated in conducting the asymmetric rolling experiments, and evaluated the results.

D.O. Pustovoytov — led the work on asymmetric rolling, defined the experimental methods, participated in conducting the asymmetric rolling experiments, and evaluated the results.

I.A. Pesin — participated in conducting the asymmetric rolling experiments and contributed to the discussion of the results.

M.A. Biryukov — contributed to the discussion of the results and participated in writing the article.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024, доработана 03.04.2024, подписана в печать 07.05.2024

The article was submitted 28.03.2024, revised 03.04.2024, accepted for publication 07.05.2024