

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Могильных А.Е., Бирюкова О.Д., Песин А.М., Пустовойтов Д.О.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТВЁРДОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

**Аннотация.** На сегодняшний день наблюдается быстрый темп развития цветной металлургии в России – многие отрасли производства, включая автомобилестроение, все чаще в качестве сырья для металлоконструкций используют энергоэффективный алюминий и его сплавы. В связи с этим актуальной задачей становится разработка способов и технологий обработки алюминиевых материалов с целью получения улучшенных свойств. Повышение твёрдости, например, позволит снизить вероятность появления небольших повреждений при незначительных автомобильных авариях. В данной работе рассмотрена возможность управления значениями твёрдости с помощью процесса асимметричной прокатки. Исследовался процесс тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов АД33, Д16 и АМгб. Представлены основные характеристики процесса асимметричного деформирования, варьируемые и контролируемые параметры. Прокатка осуществлялась на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». По результатам эксперимента представлены основные параметры прокатки лент из алюминиевых сплавов, включая конечные и начальные толщины образцов, значения относительных обжатий, силы прокатки, отношения скоростей валков и твёрдости, полученной измерением по методу Бринелля. Приведен сравнительный анализ результатов, полученных при прокатке в симметричном и асимметричном режиме. Показаны основные зависимости твёрдости алюминиевых лент из сплавов АД33, Д16 и АМгб от изменения относительного обжатия.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, алюминиевые сплавы, твёрдость, автомобилестроение, отношение скоростей валков

### Введение

Спрос на продукцию из цветных металлов и сплавов в последнее десятилетие неуклонно растёт, и к 2030 году прирост потребления составит 30% [1]. Основные отрасли-потребители включают в себя: строительство (около 52%), автомобилестроение (около 25%), машиностроение и оборудование (около 20%) и т.д. Стоит отметить, что наиболее часто используемый металл – алюминий, имеющий высокий уровень производства в России.

Ещё 10 лет назад мировая автомобильная индустрия потребляла 2,87 млн т алюминия [2]. Данный металл и его сплавы устойчивы к атмосферной коррозии, очень энергоэффективны [3]. По сравнению со сталью сплавы алюминия поглощают на 50% больше энергии, препятствуют распространению разрушения, за счёт чего позволяют сделать автомобиль более безопасным.

Известно, что производители стремятся снизить массу конструкций автомобилей с целью улучшения экологической обстановки. На сегодняшний день зарегистрировано более 60 млн автомобилей в России, каждый из которых выбрасывает не менее 160 т вредных газов на каждые 10 тыс. км пробега. Снижение массы автомобиля позволит сократить потребление топлива, что позволит уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Однако главный минус использования алюминия и его сплавов в качестве кузовных деталей автомобиля – плохая ремонтпригод-

ность. Чаще всего даже при небольших повреждениях приходится заменять деталь целиком.

В настоящее время используются материалы, изготавливаемые чаще всего из алюминиевых сплавов 6 серии [4] системы Al – Mg – Si – Cu по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4 для автомобилей марок Audi, BMW, Porsche, Tesla, Jaguar, Ferrari и т.д., а также низкоуглеродистые марки сталей, производимые по ГОСТ 9045-93, EN 10130 для автомобилей марок «Лада», Chevrolet, Nissan, Volkswagen, Skoda, Peugeot и т.д. В основном массовая доля алюминия в автомобиле будет увеличиваться за счёт кузовных деталей. Уже к 2025 году доля алюминия в одном автомобиле превысит 250 кг [1].

Улучшение показателей по такой механической характеристике, как твердость алюминиевых сплавов, используемых в отрасли автомобилестроения, позволит снизить вероятность появления небольших повреждений при незначительных авариях, например царапин, небольших вмятин и т.д.

### Метод исследования и используемые материалы

Целью данной работы являлось исследование зависимостей изменения твёрдости алюминиевых сплавов, химический состав которых представлен в табл. 1 [5], от значения относительного обжатия за проход при использовании кинематической асимметрии при тонколистовой прокатке.

Химический состав алюминиевых сплавов АД33, Д16, АМг6

Сплав	Mn	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Zn	Al
АД33	до 0,15	0,4-0,8	0,8-1,2	до 0,7	0,15-0,4	до 0,15	до 0,25	95,9-98,5
Д16	0,3-0,9	до 0,5	1,2-1,8	до 0,5	3,8-4,9	до 0,1	до 0,3	90,8-94,7
АМг6	0,5-0,8	до 0,4	5,8-6,8	до 0,4	до 0,1	0,02-0,1	до 0,2	91,1-93,7

Основные размеры заготовок из алюминиевых сплавов следующие:

1) образцы из сплава Д16: толщина – 6,0 мм; ширина – 25,0 мм; длина – 100,0 мм;

2) образцы из сплава АМг6: толщина – 1,9 мм; ширина – 25,0 мм; длина – 100,0 мм;

3) образцы из сплава АД33: толщина – 2,0 мм; ширина – 25,0 мм; длина – 100,0 мм.

Прокатку образцов алюминиевых сплавов осуществляли на уникальной научной установке – стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Основная особенность стана заключается в том, что привод рабочих валков индивидуальный с возможностью работы в симметричном и асимметричном режимах. Мощность главного привода стана составляет 2,75 кВт, крутящие моменты – 2,65 кН·м, усилие прокатки – 2500 кН [6].

Прокатка осуществлялась в двух режимах – симметричном и асимметричном [7, 8]. Количество проходов для каждого образца – 1. Деформирование осуществлялось при комнатной температуре. Обработка алюминиевых сплавов велась без использования смазки, то есть на сухих валках. Однако для увеличения коэффициента трения осуществлялась предварительная прокатка алюминиевых листов.

По каждому из рассматриваемых режимов проводилось не менее десяти контрольных повторов для подтверждения достоверности.

Основные варьируемые параметры включили в себя:

- 1) относительное обжатие за проход (от 5 до 89 %);
- 2) отношение скоростей рабочих валков (от 1,0 до 7,7).

Основные контролируемые параметры следующие:

- 1) усилие прокатки;
- 2) моменты прокатки на рабочих валках;
- 3) конечные размеры проката;
- 4) механические свойства: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение;
- 5) твёрдость по Бринеллю.

В данной работе проводилась оценка твёрдости материалов. Важно отметить, что замер твердости производился по методу Бринелля на твердомере EMCO TEST M4C/R G3. Обязательное условие по сходимости результатов эксперимента (с доверительной вероятностью 95%) было соблюдено [9].

#### Полученные результаты эксперимента

Были проанализированы параметры прокатки сплавов АД33, Д16 и АМг6, включая относительные обжатия и полученные толщины, сила прокатки, твердость и состояние образцов (произошло разрушение при обработке или не произошло). В табл. 2-4 представлены основные результаты процесса тонколистовой симметричной и асимметричной прокатки.

Таблица 2

Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АД33

Номер образца	Толщина начальная, мм	Толщина конечная, мм	Относительное обжатие, %	Сила прокатки, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, ед.
1	2,00	1,20	40	353,9	5,0/5,0	116
2	2,00	0,75	63	320,90	8,0/4,0	118
3	2,00	0,60	70	227,90	9,0/3,0	121
4	2,00	0,50	75	166,30	8,0/2,0	100
5	2,00	0,50	75	173,90	10,0/2,0	105

Таблица 3

Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

Номер образца	Толщина начальная, мм	Толщина конечная, мм	Относительное обжатие, %	Сила прокатки, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, ед.
1	6,00	3,10	48	463,80	5,0/5,0	104
2	6,00	2,60	58	181,40	8,0/4,0	122
3	6,00	2,00	67	215,10	9,0/3,0	86
4	6,00	1,90	68	188,60	8,0/2,0	88
5	6,00	0,90	85	243,00	10,0/2,0	73
6	6,00	0,65	89	230,00	10,0/1,5	68

Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АМг6

Номер образца	Толщина начальная, мм	Толщина конечная, мм	Относительное обжатие, %	Сила прокатки, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, ед.
1	1,90	0,95	50	290,30	5,0/5,0	102
2	1,90	0,73	62	268,10	8,0/4,0	132
3	1,90	0,90	53	167,70	9,0/3,0	129
4	1,90	0,80	58	211,30	8,0/2,0	121
5	1,90	0,78	59	130,90	10,0/2,0	115

Из результатов эксперимента следует, что при обработке образцов 1 алюминиевого сплава АД33, образцов 1-4 алюминиевого сплава Д16 и образцов 1-4 алюминиевого сплава АМг6 происходило их разрушение во время деформирования. Образец 7 алюминиевого сплава Д16 (не представлен в таблице) при отношении скоростей валков 10,0/1,3, начальной толщины 6,00 мм при обработке расплавился в очаге деформации.

Анализ полученных данных показывает, что разрушение образца из сплава АД33 происходит при обработке в симметричном режиме при значении относительного обжатия 40%, при обработке сплавов марок Д16 и АМг6 картина похожая, оба образца в режиме симметрии были разрушены во время деформирования при значениях относительного обжатия 48 и 50% соответственно.

Однако в режиме асимметрии некоторые образцы также были разрушены. Сплав Д16 обрабатывался без образования дефектов при значительно больших значениях относительного обжатия – 85 и 89%. Сплав АМг6 сохранил целостность при значении относительного обжатия 59%, однако при обжатии 66% образцы имели разрывы.

Оценка характеристики твердость производилась в зависимости от изменения значений относительного обжатия, основные результаты представлены на рис. 1-3. Выявлено, что, регулируя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие, можно воздействовать на твердость и технологическую пластичность металлических лент из рассматриваемых сплавов АД33, Д16 и АМг6. При этом, в зависимости от назначения продукции, возможно не только увеличивать твердость материалов, выполненных из данных сплавов, но и также ее уменьшать при увеличении или снижении отношения скоростей валков.

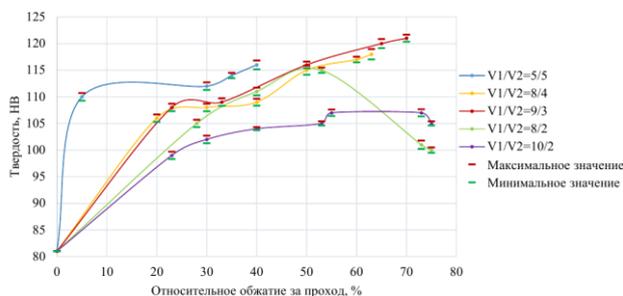


Рис. 1. Зависимость твердости алюминиевых лент из сплава АД33 от относительного обжатия

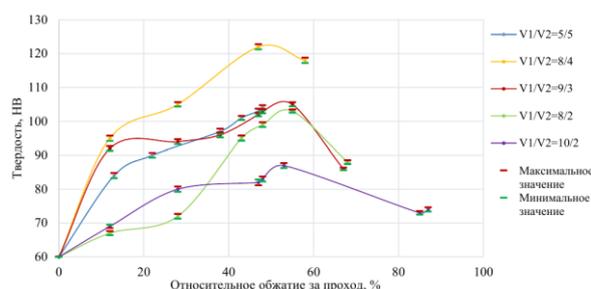


Рис. 2. Зависимости твердости лент из алюминиевого сплава Д16 от относительного обжатия

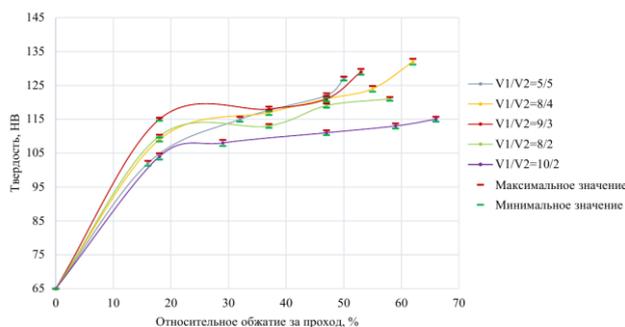


Рис. 3. Зависимости твердости лент из алюминиевого сплава АМг6 от относительного обжатия

Согласно рис. 1 и табл. 2, максимальное значение твердости (HV) в алюминиевом сплаве АД33 составило 121 ед., соотношение скоростей валков при этом составило 3,0 ( $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ ), значение относительного обжатия – 70%. Минимальное значение твердости (HV) составило 100 ед. при отношении скоростей валков 5,0 ( $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ ) и значении относительного обжатия 75%.

Согласно рис. 2 и табл. 3, максимальное значение твердости (HV) в алюминиевом сплаве Д16 составило 122 ед., соотношение скоростей валков при этом составило 2,0 ( $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ ), значение относительного обжатия – 47%. Минимальное значение твердости (HV) составило 68 ед. при отношении скоростей валков 6,7 ( $V_1/V_2 = 10,0/1,5$ ) и значении относительного обжатия 89% [10, 11].

Согласно рис. 3 и табл. 4, максимальное значение твердости (HV) в алюминиевом сплаве АМг6 составило 132 ед., соотношение скоростей валков при этом составило 2,0 ( $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ ), значение относительного обжатия – 62%. Минимальное значение

твердости (НВ) при асимметричной прокатке составило 115 ед. при отношении скоростей валков 5,0 ( $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ ) и значении относительного обжатия 66% [12, 13].

### Выводы

Проведено широкое исследование влияния кинематической асимметрии при тонколистовой прокатке на изменение значений твердости. Показано, что процесс асимметричной прокатки управляем – с его помощью можно регулировать, то есть как уменьшить, так и увеличить твердость металлических материалов в зависимости от требований и назначения продукции. Основные варьируемые параметры для достижения данной цели – относительное обжатие и отношение скоростей рабочих валков.

Основные результаты показали, что для алюминиевого сплава АД33 твердость (НВ) может изменяться в пределах от 100 до 121 ед., для алюминиевого сплава Д16 в пределах от 68 до 122 ед., для алюминиевого сплава АМг6 в пределах от 102 до 132 ед.

Отдельно стоит отметить, что ведение асимметрии с отношением скоростей рабочих валков  $V_1/V_2 = 10,0/2,0$  приводит к получению алюминиевых лент из сплава АД33 и особенно Д16 со значениями твердости, меньшими, чем у алюминиевых лент, полученных при симметричной прокатке.

Данный способ широко может применяться для получения продукции в различных отраслях, в том числе для автомобилестроения, что при увеличении твердости сплавов сможет снизить вероятность получения небольших повреждений при не крупных авариях, что особенно актуально для алюминиевых материалов.

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

### Список литературы

1. Равлюк С. Рынок алюминия в России и в мире: первичный и вторичный алюминий тенденции и перспективы [Электронный ресурс]: презентация. Москва, ОК РУСАЛ, 2020. 17 слайдов.
2. Елагин В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. №9. С. 3-11.
3. Алюминий и его сплавы: учебное пособие / сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.: ил.
4. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // Машиностроение и инженерное образование. 2009. №1. С. 27–41.
5. ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2019. 35 с.
6. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Kuka 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.
7. Shear Deformation and Grain Refinement in Pure Al by Asymmetric Rolling / Zhang XingYao, Fang-Qing Zuo, Jian-Hua Jiang, Ai-Dang Shan, Jian-Min Fang // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008. Vol. 18. P. 774-777
8. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 3. С. 81–96.
9. Румянцев М.И., Ручинская Н.А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством: учебное пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. 210 с.
10. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, И.А. Песин, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, А.И. Сверчков // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 2 (41). С. 32-42.
11. Kozhemyakina A., Pesin A., Pustovoytov D., Pesin I., Nосov L. Developing asymmetric rolling process procedures for aluminum narrow strips, showing higher strength and ductility // Материалы VI международной молодежной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Magnitogorsk, 2022. P. 93-94.
12. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Кожемякина А.Е. Исследование влияния соотношения скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке на твердость алюминиевых сплавов Д16 и АМг6 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. Т. 1. С. 233.
13. Кожемякина А.Е. Разработка способов повышения технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Кожемякина. Магнитогорск: МГТУ, 2022. 17 с.

### Сведения об авторах

**Могильных Анна Евгеньевна** – кандидат технических наук, инженер научно-инновационного сектора, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

**Бирюкова Олеся Дмитриевна** – кандидат технических наук, инженер научно-инновационного сектора, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru.

**Песин Александр Моисеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru.

**Пустовойтов Денис Олегович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**THE RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF THE HARDNESS REGULATING IN ALUMINUM ALLOYS DURING ASYMMETRICAL ROLLING**

**Mogilnykh Anna E.** – PhD (Eng.), engineer of the research and innovation sector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

**Biryukova Olesya D.** – PhD (Eng.), engineer of the research and innovation sector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fimapatisonchik@inbox.ru.

**Pustovoitov Denis O.** – Ph.D. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pustovoitov\_den@mail.ru.

**Pesin Alexander M.** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

**Abstract.** Nowadays, we see a rapid pace of a non-ferrous metallurgy development in Russia - many industries, including the automotive industry, are using energy-efficient aluminum and its alloys as raw materials for metal structures more often. In this regard, the development of methods and technologies for processing aluminum materials in order to obtain improved properties becomes a topical aim. Increasing hardness, for example, will reduce the likelihood of slight damage in minor car accidents. This paper shows the possibility of controlling hardness values using the asymmetric rolling process. The process of rolling of aluminum alloys AD33, D16 and AMg6 was studied. The main characteristics of the asymmetric deformation process, variable and controlled parameters are presented. Rolling was carried out on the asymmetric rolling mill 400 of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials in NMSTU. Based on the results of the experiment, the main parameters of aluminum alloys production are presented, including the final and initial thicknesses of the samples, the values of relative reductions, rolling forces, the rolls speeds ratio and hardness obtained by the measurement with the use of the Brinell method. A comparative analysis of the results obtained during symmetric and asymmetric rolling is presented. The main dependences of the hardness of aluminum strips made of the AD33, D16 and AMg6 alloys on changes in relative compression are shown.

**Key words:** asymmetric rolling, aluminum alloys, hardness, automotive industry, rolls speed ratio.

---

Ссылка на статью:

Исследование возможности регулирования твёрдости алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке / А.Е. Могильных, О.Д. Бирюкова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Теория и технология металлургического производства. 2023. №4(47). С. 21-25.  
Mogilnykh A.E., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M. The research of the possibility of the hardness regulating in aluminum alloys during asymmetrical rolling. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 47, no. 4, pp. 21-25.