

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Кожемякина А.Е., Носов Л.В., Сверчков А.И.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛЕНТ, ОБЛАДАЮЩИХ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И ПЛАСТИЧНОСТЬЮ

**Аннотация.** Одной из главных задач современной промышленности является повышение эффективности производства, а также качества выпускаемой продукции. В связи с этим необходимо разрабатывать технологии обработки металлических материалов, позволяющие получить высокий уровень механических свойств. Поэтому рассмотрен процесс асимметричной прокатки алюминиевых сплавов. Проводился анализ закономерностей процесса прокатки алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров, которые обеспечат требуемую градиентную структуру, на основе компьютерного моделирования в программных комплексах Deform 2D/3D, Qform 2D/3D. Проверка результатов компьютерного моделирования осуществлялась на стане дуо 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». В качестве исходных заготовок для асимметричной прокатки были использованы образцы алюминиевого сплава Д16. Проведена сравнительная оценка результатов компьютерного моделирования и данных, полученных экспериментальным путем. Показаны преимущества асимметричного деформирования перед симметричным процессом, в том числе заключающиеся в возможности существенного снижения усилия прокатки и регулирования прочностных характеристик и технологической пластичности в зависимости от отношения скоростей рабочих валков и степени обжатия. Приведены результаты испытаний на твердость методом Бринелля.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, алюминиевый сплав, интенсивность деформации, компьютерное моделирование, прочность, пластичность.

### Введение

Процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей валков, разницы диаметров, условий контактного трения, подходит для формирования градиентных структур металлических материалов, обеспечивающих одновременное повышение прочности и пластичности металлических лент [1,2].

Поэтому разработка технологических схем асимметричной прокатки металлических полос с градиентной структурой, обладающих повышенной прочностью и пластичностью, является весьма актуальной [3].

Среди деформируемых легких сплавов наибольшее распространение нашли алюминиевые сплавы, как обладающие наиболее благоприятным комплексом физико-механических свойств. Поэтому для проводимых исследований был выбран алюминиевый сплав марки Д16. По твердости и механической прочности он не уступает стали, но, в отличие от нее, обладает в 3 раза более легким удельным весом. В связи с этим он активно используется во всех областях промышленности, особенно в авиастроении, при изготовлении силовых конструктивных элементов.

### Методы исследования и используемые материалы

Целью данной работы является анализ закономерностей асимметричной прокатки алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров,

которые обеспечивают повышение прочности и пластичности. Анализ проводился с помощью моделирования процесса асимметричной прокатки в программных комплексах Deform 2D/3D, Qform 2D/3D. Показано исследование на примере асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16, химический состав которого подтвержден энергодисперсионным анализом: Si – 0,26 %; Fe – 0,39 %; Cu – 4,00 %; Mn – 0,55 %; Mg – 1,48 %; Cr – 0,018 %; Zn – 0,16 %; Ti – 0,043 %; Ni – 0,030 %; В – 0,0018 %; Al – 93,09 %.

### Результаты исследования

При моделировании целенаправленно создаваемого процесса асимметричной тонколистовой прокатки были приняты следующие допущения: плоскодеформированное состояние металла; деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; рабочие валки – абсолютно жесткие; изотермический процесс; закон трения – Кулона; кривые текучести были взяты из базы данных DEFORM 2D/3D.

Исходные данные для моделирования процесса: начальная толщина полосы  $h_0 = 2,0$  мм; температура деформируемого металла  $20^\circ\text{C}$ ; радиус рабочих валков  $R = 100\text{--}400$  мм; коэффициент трения  $\mu = 0,05\text{--}0,4$ ; степень деформации (обжатие)  $\varepsilon = 50\text{--}70$  %. Окружная скорость нижнего валка  $V_1 = 5$  мм/с, в то время как окружную скорость верхнего валка  $V_2$  снижали на 10–90% относительно окружной скорости нижнего валка для создания кинематической асимметрии процесса.

При асимметричной прокатке относительная разница скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками определяет деформацию сдвига, которая характеризуется тангенсом угла  $\varphi$  (рис. 1).

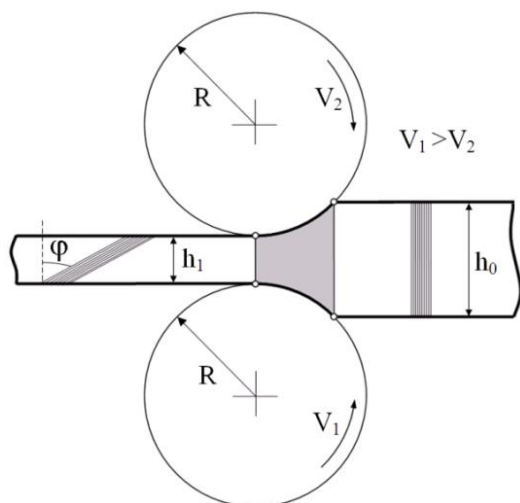


Рис. 1. Угол сдвига  $\varphi$  при асимметричной прокатке

Особенностью процесса асимметричной листовой прокатки является возможность совмещения больших деформаций сжатия и сдвига. Другими словами, при асимметричной прокатке может быть реализована схема совмещенного простого и чистого сдвига (рис. 2). Согласно этой схеме, квадрат ABCD

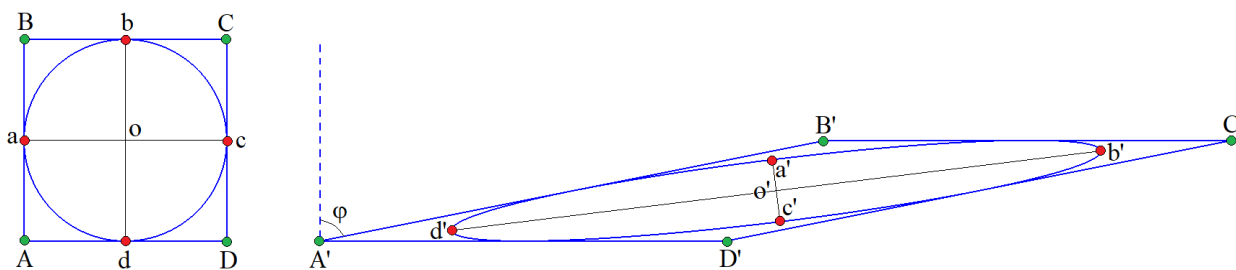


Рис. 2. Схема совмещенного простого и чистого сдвига

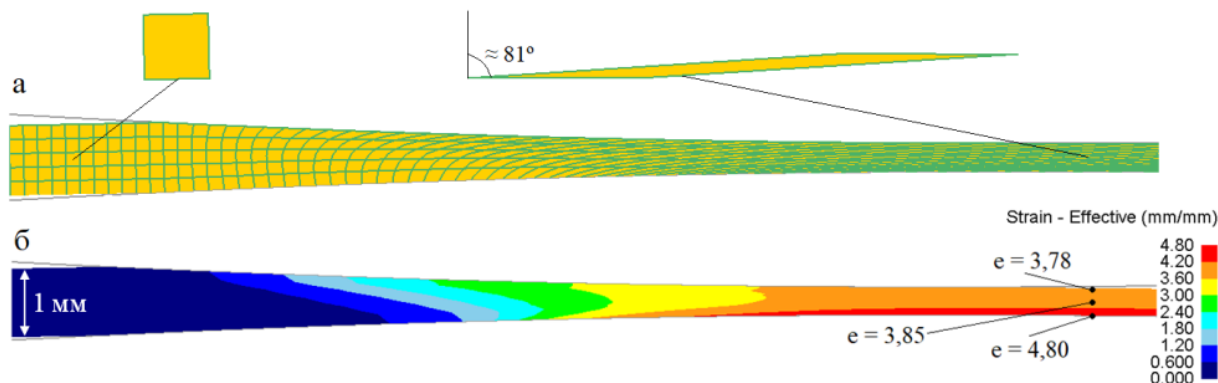


Рис. 3. Сетка Лагранжа (а) и поле интенсивности деформации (б) при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига ( $D = 500$  мм,  $\varepsilon = 60\%$ ,  $\Delta V = 57\%$ ,  $\mu = 0,4$ )

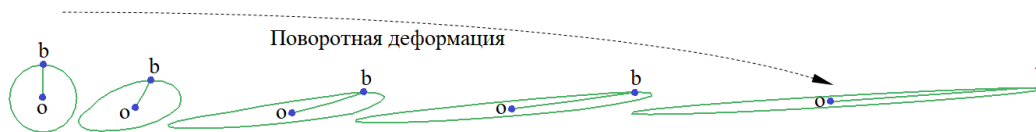


Рис. 4. Поворотная деформация при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига

трансформируется в параллелограмм  $A'B'C'D'$ , основание которого вытягивается, а высота укорачивается. При этом круг трансформируется в эллипс, направление осей которого непрерывно меняется, т.е. происходит их поворот, а деформация является немонотонной. Сдвиговая деформация также характеризуется углом сдвига  $\varphi$ .

Данная схема реализуется при асимметричной тонколистовой, аккумулирующей, криогенной прокатке. Предполагается, что данная схема, совмещающая простой и чистый сдвиг, будет эффективнее для получения нано и ультрамелкозернистой структуры, чем схема простого сдвига, присущая большинству методов интенсивной пластической деформации (рис. 3) [3, 7-11].

В результате поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно меняется (рис. 4). Это обеспечивает немонотонность деформации при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига [7-10].

Влияние угла сдвига на величину истинной деформации в материале заготовки при обработке различными методами показано на рис. 5.

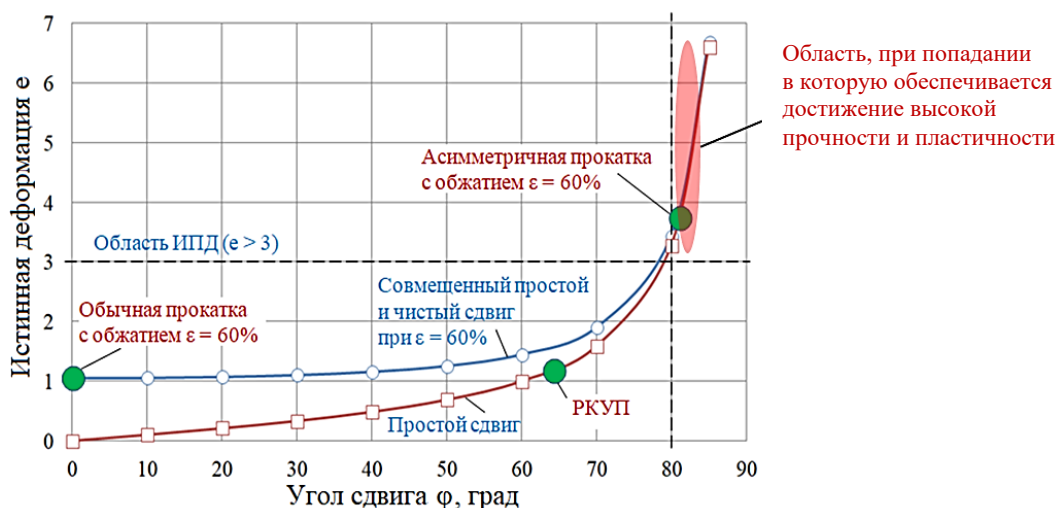


Рис. 5. Влияние угла сдвига на величину истинной деформации в материале заготовки при обработке различными методами

Анализ результатов компьютерного моделирования показал снижение силы прокатки более чем в 3,1 раза, значение не превышало  $\approx 7$  кН (рис. 6), увеличение момента прокатки на нижнем валке в 2,1 раза до  $\approx 245$  кН·мм и на верхнем в 1,5 раза до  $\approx 167$  кН·мм.

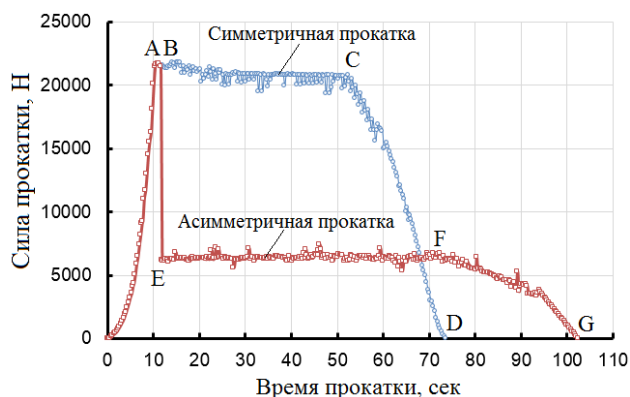


Рис. 6. Изменение силы прокатки (на 1,0 мм ширины листа) во времени при симметричной и асимметричной прокатке при  $\epsilon = 75\%$   $V_1 = 1$  мм/с

Таким образом, при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига поворотная мода деформации обеспечивает немонотонность течения металла, что является одной из ключевых особенностей данного способа обработки металлов давлением [7]. Способ асимметричной прокатки имеет потенциал практического применения в производстве в качестве метода получения тонких металлических листов и полос из различных металлов и сплавов, обладающих одновременно высокой прочностью и технологической пластичностью.

На основе научного задела, сформированного коллективом лаборатории «Механика градиентных

наноматериалов им. А.П. Жилиева», спроектирован и изготовлен не имеющий аналогов в РФ стан дуо 400 с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной прокатки с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящими моментами  $2 \times 65$  кН·м, что обеспечивает возможность получения и испытания полноразмерных опытных образцов из различных металлов и сплавов [12]. В 2022 году стану дуо 400 присвоен статус уникальной научной установки.

Технические характеристики стана дуо 400 представлены в табл. 1. Габаритные размеры представлены на рис. 7. Все органы регулирования и контроля работы прокатного стана объединены на одном пульте управления с сенсорной панелью и расположены на безопасном удалении от стана. Система управления прокатным станом обеспечивает мониторинг в режиме реального времени с цифровой (количественной) индикацией параметров технологического процесса [13, 14]. На данном стане можно обрабатывать как черные (сталь), так и цветные (алюминий, медь, титан) металлы и сплавы (см. рис. 7).

В данном исследовании результаты компьютерного моделирования, выполненного в программном комплексе QForm 2D/3D, сопоставлялись с результатами, полученными экспериментальным путем. Сравнению подвергались следующие данные на примере сплава Д16:

- сила деформирования (усилие прокатки);
- внешний вид ленты после деформирования.

Рассмотрим сопоставление результатов компьютерного моделирования и проведенных экспериментов асимметричной прокатки, соответствующие максимальной степени обжатия при соотношении скоростей рабочих валков  $V_1/V_2 = 2/10$ .

Технические характеристики стана дуо 400

Параметр	Значение
Тип	Реверсивный дуо с индивидуальным приводом рабочих валков
Нажимное устройство	Гидравлическое
Диаметр рабочих валков	340 мм
Длина бочек рабочих валков	400 мм
Усилие прокатки (max)	2500 кН (250 тс)
Крутящие моменты (max)	2×65 кН·м
Мощность главного привода	2×75 кВт
Толщина прокатываемых листовых заготовок	от 50 мм до 0,5 мм
Прокатываемые материалы	Al, Fe, Ti, а также другие металлы и сплавы с $\sigma_T$ до 1500 МПа
Реализуемые технологии	<ul style="list-style-type: none"> <li>– симметричная прокатка;</li> <li>– асимметричная прокатка;</li> <li>– криогенная прокатка;</li> <li>– аккумулирующая прокатка</li> </ul>
Общая масса оборудования	20 тонн

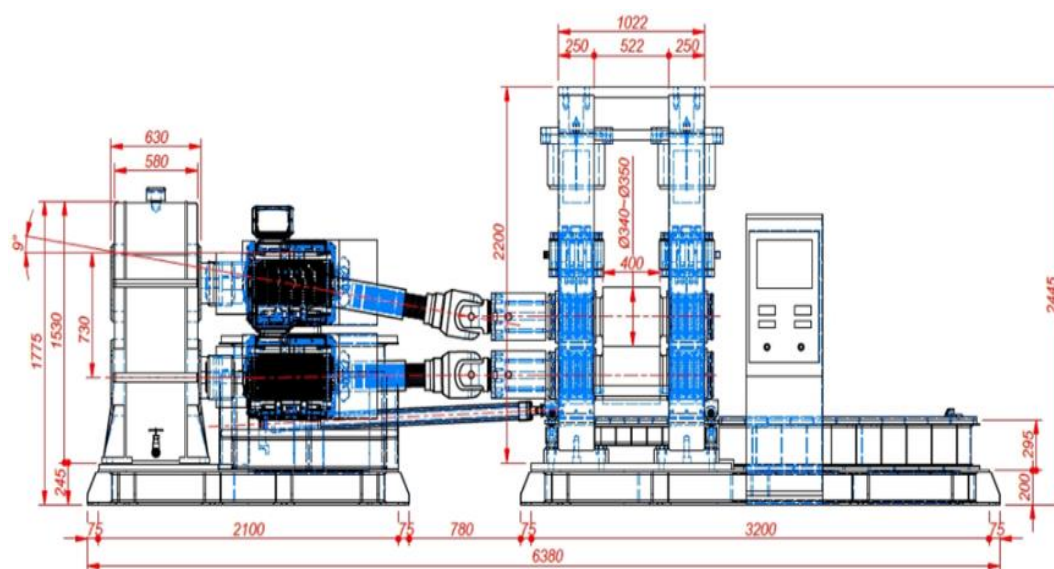


Рис. 7. Габаритные размеры стана дуо 400 с индивидуальным приводом рабочих валков

Экспериментальное значение усилия прокатки при  $V_1/V_2 = 2/10$ , обжатия 87 % составляет 44,66 т.

Адекватность компьютерного моделирования процесса асимметричной прокатки образцов Д16 подтверждается значениями усилия прокатки, представленными на рис. 8 и 9.

Максимальное значение усилия, полученное при моделировании процесса асимметричной прокатки в QForm – 46,51 т, максимальное значение усилия, полученное экспериментальным путем – 44,66 т (значение на 18,04 с), следовательно, погрешность моделирования составила 4,14%.

Адекватность компьютерного моделирования подтверждает формоизменение образца (рис. 10).

Таким образом, результаты компьютерного моделирования являются адекватными, что подтверждается сопоставлением усилия прокатки и внешним видом образцов, полученных при моделировании и экспериментальным путем.

Инструмент 1 Нижний валок - Усилие Z, тс

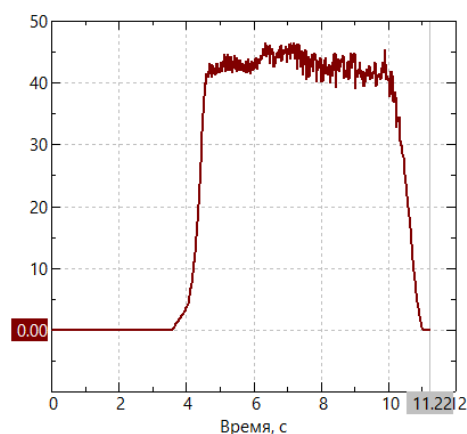


Рис. 8. Изменение силы деформирования при моделировании процесса асимметричной прокатки образца Д16 (степень обжатия 87%,  $V_1/V_2 = 2/10$ )

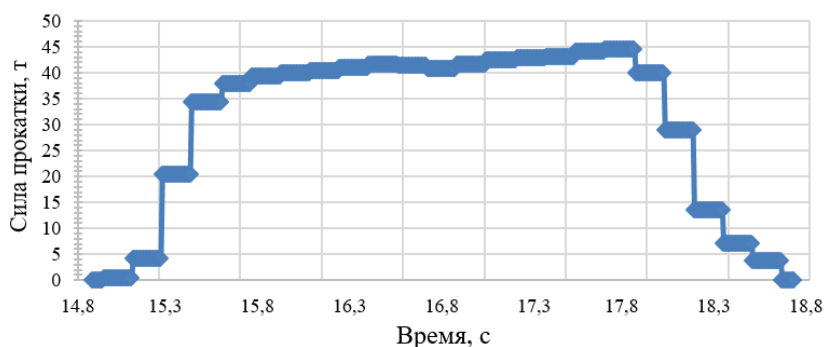


Рис. 9. Изменение силы деформирования процесса асимметричной прокатки образца Д16, полученное экспериментальным путем (степень обжатия 87 %,  $V_1/V_2=2/10$ )

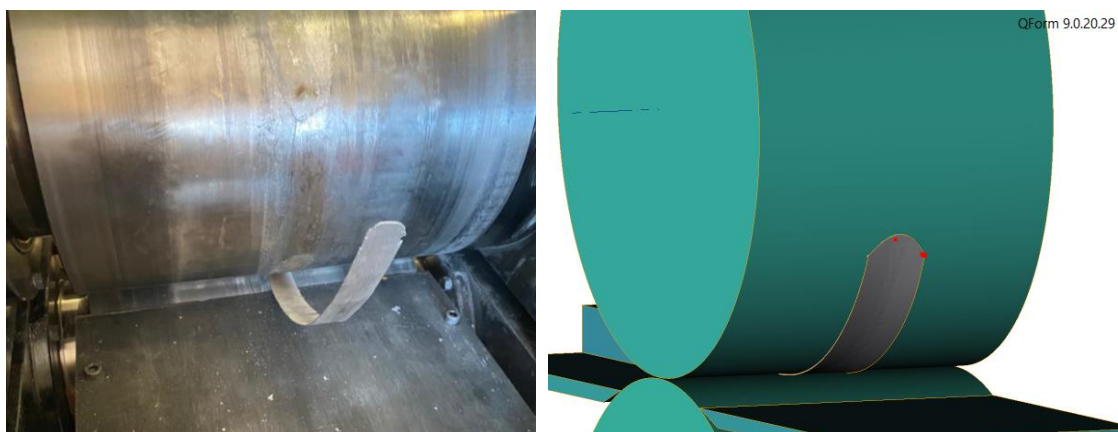


Рис. 10. Формоизменение образца Д16 при асимметричной прокатке образца Д16 (обжатие 87 %,  $V_1/V_2 = 2/10$ )

Листовые заготовки алюминиевого сплава Д16 толщиной 6 мм, шириной 25 мм и длиной 100 мм подвергались прокатке при комнатной температуре. Прокатку вели без смазки, на сухих валках во всех случаях.

При обычной прокатке ( $V_1/V_2=1/1$ ) термически упрочняемого алюминиевого сплава Д16 за один проход образец разрушался при попытке деформировать его до толщины 3,1 мм (обжатие 48%) (рис. 11). Усилие прокатки при этом составило 463,8 кН. Введение асимметрии за счет увеличения рассогласования скоростей рабочих валков до  $V_1/V_2 = 1/7$  приводило к увеличению обжатия до 89% (конечная толщина 0,65 мм) при прочих равных условиях.

Увеличение рассогласования скоростей рабочих валков до 5 раз ( $V_1/V_2=1/5$ ) приводит к снижению усилия прокатки более чем в 2,6 раза (до 176,4 кН) при степени обжатия, соответствующей степени обжатия в симметричном режиме, при которой образец разрушился.

Изменение усилия прокатки в зависимости от степени обжатия образцов алюминиевого сплава Д16 при различных отношениях скоростей валков представлено на рис. 12.

Увеличение рассогласования скоростей рабочих валков до 1/2 приводит к снижению усилия прокатки. Так, при симметричном режиме усилие составило

463,8 кН при максимальной степени обжатия 48 %, в то время как при асимметричном режиме 181,4 кН при степени обжатия 58 %.

Наибольшее значение твердости 122 НВ было достигнуто в Д16 при соотношении скоростей  $V_1/V_2 = 1/2$  и обжатии 47 %, наименьшее значение твердости 68 НВ было достигнуто при соотношении скоростей  $V_1/V_2 = 1/7$  и обжатии 89 %.

По результатам проведенных исследований разработаны технологические регламенты асимметричной прокатки алюминиевых лент с градиентной структурой, обладающих повышенной прочностью и пластичностью, на уникальной научной установке – стане дуо 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева».

Разработанные технологические регламенты могут применяться в качестве руководства для технологически правильного выполнения работ при прокатке металлических лент различных назначений.

Исходным материалом для асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 являются заготовки следующих размеров:

- толщина исходных заготовок 2,0–6,0 мм;
- ширина исходных заготовок до 300,0 мм.

Результаты проведенных экспериментов асимметричной прокатки лент из Д16 в зависимости от выбранных режимов представлены в табл. 2.



Рис. 11. Разрушенный образец Д16 после симметричной прокатки (обжатие 48 %)

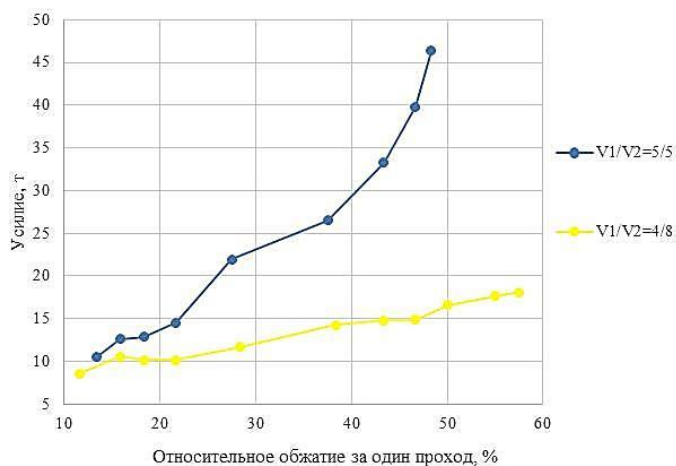


Рис. 12. Изменение силы прокатки в зависимости от степени обжатия образцов алюминиевого сплава Д16 при различных отношениях скоростей валков

Таблица 2

Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
23.09.2021–9	6	3,1	48	463,8	5/5	104	Образец разрушился
23.09.2021–19 (3)	6	2,6	58	181,4	4/8	118	Образец разрушился
23.09.2021–41	6	2,0	67	215,1	3/9	86	Образец разрушился
23.09.2021–61	6	1,9	68	188,6	2/8	88	Образец разрушился
23.09.2021–93	6	0,8	87	446,6	2/10	74	Образец сохранил целостность

Увеличение отношения скоростей рабочих валков от 1 до 5 раз приводит к увеличению относительного удлинения образцов после разрыва. Так, у образцов, полученных после симметричной прокатки, относительное удлинение после разрыва снижалось до 0,78%, у образцов, полученных после асимметричной прокатки, относительное удлинение после разрыва увеличивалось до 12,34%. Для сравнения относительное удлинение исходного образца после разрыва составляло 6,19%.

При асимметричной прокатке с большим отношением скоростей рабочих валков металл сильно разогревается. При отношении скоростей валков 7,69 ( $V_1/V_2 = 1,3/10$ ) происходит расплавление образца.

При значительных степенях обжатия (более 60%) и большой разностью скоростей рабочих валков  $V_1/V_2 = 1/4$  и  $V_1/V_2 = 1/5$  помимо больших сдвиговых деформаций происходит дополнительный разогрев металла, при котором начинаются термически активные процессы разупрочнения (процессы рекристаллизации), обеспечивающие повышение пластичных характеристик.

важные процессы разупрочнения (процессы рекристаллизации), обеспечивающие повышение пластичных характеристик.

### Заключение

Было проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов. Показано, что при оптимальных параметрах процесса асимметричной тонколистовой прокатки ( $\epsilon = 60\%$ ,  $\Delta V = 57\%$ ,  $\mu = 0,4$ ) истинная деформация за один проход составляет 3,8–4,8 по толщине листа. Установлено, что особенностью силовых параметров процесса асимметричной прокатки является значительное снижение силы деформирования в сравнении с обычной прокаткой при прочих равных условиях.

Асимметричная тонколистовая прокатка может применяться для целенаправленного создания градиента деформации по толщине обрабатываемых металлов и сплавов с целью формирования в них градиентных микроструктур, обеспечивающих одновременное

повышение прочности и пластичности листовых полуфабрикатов [15, 16].

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась на стане дуо 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Выявлены рациональные режимы асимметричного деформирования алюминиевого сплава Д16: толщина исходных образцов может варьироваться от 2,0 до 6,0 мм; ширина исходных заготовок до 300,0 мм. Показано, что, регулируя отношение скоростей рабочих валков, можно воздействовать как на усилие прокатки, так и на прочностные характеристики и технологическую пластичность лент, полученных асимметричной прокаткой.

#### Благодарность

Исследование проводилось в рамках реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 (договор 075-15-2021-627 от 08.06.2021), за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46042 от 20.05.2020), а также при финансовой поддержке РФФИ (в рамках научного проекта № 20-38-90097 от 03.09.2020).

#### Список литературы

1. Влияние особенностей формирования градиентной структуры при интенсивной пластической деформации сплавов с различными типами кристаллической решётки / Г.И. Рааб, И.С. Кодиров, Г.Н. Алешин, А.Г. Рааб, Н.К. Ценев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. № 17 (1). С. 64-75.
  2. Рааб Г.И. Перспективы использования методов интенсивной пластической деформации для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2011. С. 205-206.
  3. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science. 2006. V. 51. P. 881-981.
  4. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Сverdlik М.К. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. 151 с.
  5. Ma C., Hou L., Zhang J., Zhuang L. Microstructures and properties of asymmetrical rolled 7050 Al alloy plate with bending behavior optimization // Mater. Sci. Eng. A. 2016. 657. P. 322-330.
  6. Kraner J., Fajfar P., Palkowski H., Kugler G., Godec M., Paulin I. Microstructure and Texture Evolution with Relation to Mechanical Properties of Compared Symmetrically and Asymmetrically Cold Rolled Aluminum Alloy // Metals . 2020. 10(2), 156. p. 1-14.
  7. Компьютерное моделирование новых методов интенсивной пластической деформации металлов и сплавов: монография / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин, Т.В. Швеева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 146 с.
  8. Pustovoytov D., Pesin A., Tandon P. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review // Metals 2021. 11 (956). P. 1-46.
  9. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 23-28.
  10. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.А. Перехожих, М.К. Сverdlik // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 65-68.
  11. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М. Оценка поврежденности металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 // Качество в обработке материалов. 2015. № 2. С. 63-67.
  12. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.
  13. 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.
  14. Pesin, A., Pustovoytov D., Biryukova O., Kozhemyakina A., Pivovarov K. Producing brass narrow strips with an ultrafine-grained structure by asymmetric rolling // METAL 2021. 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 2021. p. 306-311.
  15. Pustovoytov D., Pesin A., Biryukova O. Finite element analysis of strain gradients in aluminium alloy sheets processed by asymmetric rolling // Procedia Manufacturing. 2018. p. 129-136.
- Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverdlik M.K. Mathematical modeling of grain evolution with asymmetric rolling of pure aluminum and alloy 7075 // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University. 2015. №4. P. 81-87.

### Сведения об авторах

**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](mailto:pustovoitov_den@mail.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](mailto:pesin@bk.ru).

**Песин Илья Александрович** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-инновационного сектора, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ilya33392@bk.ru](mailto:ilya33392@bk.ru).

**Кожемякина Анна Евгеньевна** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [kozehmiakina.a@yandex.ru](mailto:kozehmiakina.a@yandex.ru).

**Носов Леонид Васильевич** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [nosov.leopold@yandex.ru](mailto:nosov.leopold@yandex.ru).

**Сверчков Алексей Игоревич** – магистрант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [sverchkov.ai@mmk.ru](mailto:sverchkov.ai@mmk.ru).

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### DEVELOPING ASYMMETRIC ROLLING PROCESS SCHEDULES FOR METAL NARROW STRIPS, SHOWING HIGHER STRENGTH AND DUCTILITY

**Pustovoitov Denis O.** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [pustovoitov\\_den@mail.ru](mailto:pustovoitov_den@mail.ru).

**Pesin Aleksandr M.** – DSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [pesin@bk.ru](mailto:pesin@bk.ru).

**Pesin Ilya A.** – PhD (Eng.), junior researcher of the research and innovation sector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ilya33392@bk.ru](mailto:ilya33392@bk.ru).

**Kozehmiakina Anna E.** – postgraduate student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [kozehmiakina.a@yandex.ru](mailto:kozehmiakina.a@yandex.ru).

**Nosov Leonid V.** – postgraduate student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [nosov.leopold@yandex.ru](mailto:nosov.leopold@yandex.ru).

**Sverchkov Aleksei I.** – Master's student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [sverchkov.ai@mmk.ru](mailto:sverchkov.ai@mmk.ru).

**Abstract.** One of main objectives of the modern industry is to increase efficiency of production and improve the quality of products. Consequently, there is a need for developing metallic materials processing technologies to achieve a high level of mechanical properties. Therefore, the paper describes asymmetric rolling of aluminum alloys. The authors analyzed regularities of the rolling process of aluminum alloys to determine rational parameters, ensuring the required gradient structure, by applying computer modeling in Deform 2D/3D and Qform2D/3D software complexes. The computer modeling results were tested on two-high asymmetric rolling mill 400 at the Zhilyaev Mechanics of Gradient Nanomaterials Laboratory at Nosov Magnitogorsk State Technical University. Samples of aluminum alloy D16 were used as incoming workpieces for asymmetric rolling. The paper presents a comparative evaluation of the computer modeling results and experimental data. It contains advantages of asymmetric deforming over a symmetric process, including a



significant decrease in rolling force. It also describes a possibility of controlling strength characteristics and process ductility depending on a ratio between speeds of work rolls and reduction rate. The Brinell hardness testing results are given.

**Keywords:** asymmetric rolling, aluminum alloy, strain rate, computer modeling, strength, ductility

---

Ссылка на статью:

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., Свечков А.И. // Теория и технология металлургического производства. 2022. №2(41). С. 32-40.

Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Pesin I.A., Kozhemiakina A.E., Nosov L.V., Sverchkov A.I. Developing asymmetric rolling process schedules for metal narrow strips, showing higher strength and ductility. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 32-40.