

**ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА**

**Аннотация.** Слоистые материалы получили распространение в транспортной, химической, нефтяной отраслях производства. Сортамент производимой продукции широк: от лент и листов до профилей специального назначения. Необходимо разрабатывать технологии обработки слоистых материалов, позволяющие получить высокий уровень механических свойств. В связи с этим рассмотрен процесс асимметричного деформирования алюминиевых слоистых листовых композитов. Проводился анализ закономерностей процесса прокатки алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров, которые обеспечат прямолинейность выхода металла из очага деформации и требуемую градиентную структуру каждого из составляющих его слоев. Анализ проводился на основе моделирования экспериментов в программном комплексе *Deform 2D*. Результаты показывают, что требуемый уровень градиента деформации может быть достигнут во всех слоях слоистого листового композита благодаря верно подобранным параметрам прокатки. Предварительная проверка результатов моделирования осуществлялась на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Были использованы образцы алюминиевых сплавов пятой и шестой серий, подготовленные к обработке по установленной технологии. Показаны преимущества асимметричного деформирования перед симметричным. Приведены результаты испытаний на твердость методом Бринелля.

**Ключевые слова:** асимметричное деформирование, алюминиевый сплав, эквивалентная деформация, интенсивность деформации, компьютерное моделирование, интенсивная пластическая деформация.

**Введение**

Слоистые металлы на сегодняшний день являются альтернативной заменой легированным монометаллам. Такого рода сплавы широко применяются в различных отраслях: от космической техники до химической промышленности. Они обладают особыми физико-механическими свойствами, так как сочетают в себе параметры двух и более составляющих. Высокая коррозионная стойкость, соизмеримые прочность и пластичность, технологичность позволят слоистым материалам выдерживать не только высокие нагрузки, но и условия использования в агрессивных средах без значительного изменения прочностных характеристик. Методы получения слоистых материалов разнообразны: сваркой, литьем, наплавкой и пластической деформацией [1,2]. Последний способ наиболее распространен при обработке металлов давлением, например при штамповке, ковке или прокатке. Однако существуют трудности в подготовке поверхности металлов для прочного соединения и образования переходных слоев или диффузионных прослоек. Сложность получения прочного переходного слоя зависит от видов соединяемых металлов, их способности образовывать защитные оксидные пленки, возможности удаления пленок, защиты поверхности от их образования и разрушения при пластической деформации. Процессы соединения также могут сопровождаться образованием интерметаллидов, что неблагоприятно влияет на свойства [3].

В связи с этим одним из наиболее подходящих материалов для производства слоистых композитов является алюминий и его сплавы. При сварке двух видов алюминиевых сплавов давлением важно верно

подобрать способ очистки поверхности от внешних загрязнений и оксидных пленок, а также значение обжатий и температурную обработку.

Предлагаемые алюминиевые листовые слоистые композиты могут найти свое применение в автомобиле-, авиа- и ракетостроении. В данном случае остро стоят вопросы экологического характера – необходимо создавать такие конструкции, которые позволят снизить массу готового изделия, что, с одной стороны, сократит потребление топлива в перечисленных отраслях, а с другой – уменьшит выбросы вредных веществ в атмосферу. Очевидно, что алюминий в качестве конструкционного материала будет соответствовать требованиям по легковесности, при этом верно подобранная обработка позволит получить высокий уровень прочностных и пластических характеристик. Таким видом обработки выступают методы интенсивной пластической деформации в виде асимметричного деформирования, что может включать в себя асимметричную прокатку, асимметричную аккумуляющую прокатку и асимметричную криогенную прокатку, схемы которых представлены на рисунке 1 [4-13]. Цель данных методов – получить нано- или ультрамелкозернистую градиентную структуру. Свойства металла после такой обработки показывают увеличение прочности, износостойкости в сочетании с сохранением или даже увеличением значения пластичности. Более того появляется возможность обрабатывать длинномерные изделия, что было достаточно затруднительно при других методах ИПД, например при равноканальном угловом прессовании или при всесторонней изотермической ковке [14-23].

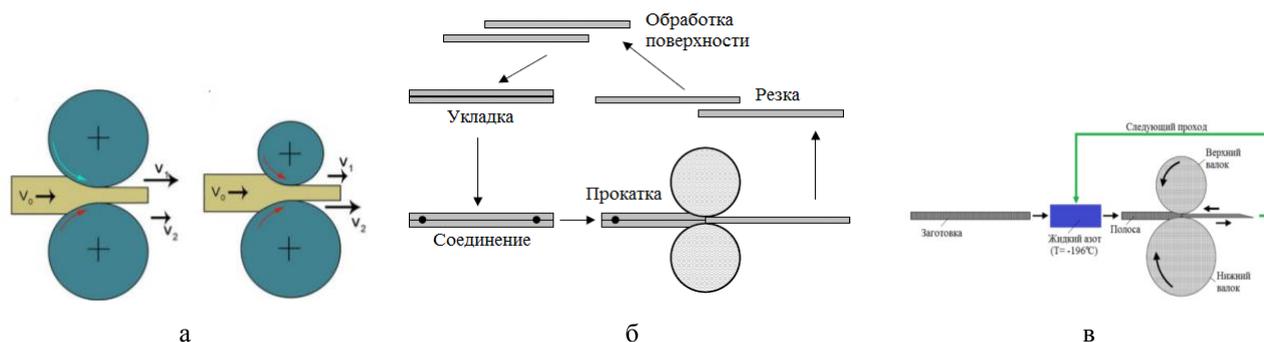


Рисунок 1 – Виды асимметричного деформирования:  
 а – асимметричная прокатка; б – асимметричная аккумуляющая прокатка;  
 в – асимметричная криогенная прокатка) [4]

Таблица 1

Химический состав алюминиевых сплавов 2024, 5083 и 6061

Сплав	Mg	Cu	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Cr	Al
2024	0,473	0,02	0,422	0,178	0,25	0,019	0,15	0,001	98,487
5083	4,479	0,027	0,091	0,285	0,014	0,682	0,007	0,104	94,282
6061	1,00	0,275	0,60	0,70	0,25	0,15	0,15	0,05	97,097

Однако методы асимметричного деформирования имеют некоторые ограничения. Большая сдвиговая деформация может приводить к высокой неоднородности полосы, которая может приводить к образованию дефектов – рванин, трещин и пор, а в слоистом материале дополнительно могут появиться расслоения по сварному шву. Для решения указанных проблем необходимо подбирать технологические режимы, согласно которым коэффициенты трения, рассогласования скоростей валков, предварительная термическая обработка (нагрев или, наоборот, скоростное охлаждение) будут соответствовать бездефектной обработке и прямолинейному выходу металла из очага деформации с учетом асимметрии.

**Методы исследования и используемые материалы**

Целью данной работы является анализ закономерностей асимметричного деформирования алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров, которые, с одной стороны, позволят обеспечить прямолинейность выхода металла из очага деформации, а с другой – требуемую градиентную структуру каждого из составляющих его слоев. При интенсивной пластической деформации (в данном случае при асимметричной прокатке листового слоистого материала и асимметричной аккумуляющей прокатке) необходимо соблюдать условия преобразования структуры, которые включают в себя достижение значений эквивалентной деформации (интенсивности) выше 3 [4], что позволит получить высокого значения прочность и пластичность. Происходит это благодаря образованию углов сдвига и поворота, которые дают увеличение сдвиговой деформации с образованием схемы совмещения простого и чистого сдвига, и получение мелкозернистой структуры (на уровне ультрамелкозернистой и нано).

Анализ проводился с помощью моделирования процесса в программном комплексе Deform 2D. Показано исследование на примере асимметричного деформирования алюминиевых сплавов 2024 (аналог Д16), 5083 (АМг4,5) и 6061 (АД33), химический состав которых представлен в табл. 1.

Для оценки деформированного состояния, условий изменения эквивалентной деформации в программном комплексе Deform 2D моделировался процесс симметричной и асимметричной прокатки слоистого листового композита и асимметричной аккумуляющей прокатки. В качестве исходного материала использовался слоистый листовый композит из алюминиевого сплава 5083/2024 и 6061/2024 с толщиной 2 мм, как показано на рис. 2. Прокатка велась без натяжения. Диаметр абсолютно жестких валков составлял 250 мм, коэффициент трения варьировался от 0,1 до 0,4. Степень деформации была принята 50%. Скорость валков при симметричной прокатке составляла 1,047 рад/с. Отношение скоростей валков при асимметричном деформировании изменялось в пределах 10% – 50%. Условия соединения двух слоев разнородных алюминиевых сплавов было задано как «склеивание», подразумевающее их механическую сварку во время деформирования.

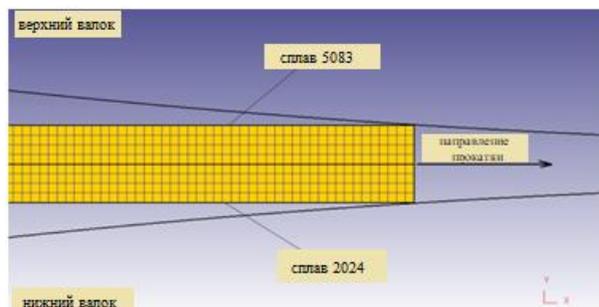


Рис. 2. Вид заготовки при компьютерном моделировании асимметричного деформирования алюминиевого слоистого композита 5083/2024

Предыдущие эксперименты показали, что при изменении скорости валков при создании асимметрии от 10 до 50 % материал может иметь отклонения по прямолинейности при выходе из очага деформации [24,25]. В большинстве моделей присутствует отклонение по прямолинейности, который вызывает изгиб как переднего, так и заднего концов полосы. Факторы, наиболее влияющие на изгиб металла: коэффициент трения, значение рассогласования скоростей валков, вид обрабатываемого материала. Разность скоростей валков варьировалась в зависимости от состава слоистого композита: марка 2024 использовалась в качестве нижнего слоя композита, а 5083 – верхнего. Чем прочнее марка нижнего слоя, тем большая разность скоростей требуется для прямолинейного выхода полосы [26-29].

### Результаты исследования

Значения интенсивности деформации в слоистом листовом композите анализировались отдельно по каждому из составляющих его металлов, а также в среднем (промежуточном) слое. Расчет параметров промежуточного слоя проводился путем анализа средних точек соприкосновения двух сплавов. Свойства этого слоя весьма отличаются от сплавов, из которых он состоит. Чтобы получить оптимальную обработку соединения металлов, необходимо учитывать особенности обоих сплавов и исключать возможность образования дефектов в промежуточном слое. Основным недостатком промежуточного слоя в алюминиевых сплавах является практическая невозможность получения одинаковых значений пластичности и прочности по сравнению с основными металлами.

Компьютерное моделирование процесса асимметричного деформирования алюминиевого слоистого композита 5083/2024 при изменении отношения разницы скоростей валков от 10 до 50% имеет следующие результаты (расчеты проанализированы для наиболее подходящих экспериментов с показателем коэффициента трения 0,3 [24-26]): зависимость интенсивности деформации от вида обрабатываемого сплава в слоистом композите показывает, что промежуточный слой деформируется меньше, чем алюминиевые сплавы 2024 и 5083 в случае рассогласования скоростей валков 10 %, 20 % и 50 %. При значениях в 30 % и 40 % наблюдается повышение интенсивности деформации в среднем слое по сравнению с более прочным сплавом 5083. Этот вывод можно сделать на основе показателей интенсивности деформации, представленных на рисунках 3 и 4. Для наглядности при построении графиков не учитывались разнотолщинность слоев в композите и размер среднего слоя. Интенсивность деформации оценивалась по точкам деформированной сетки, находящимся в одной плоскости.

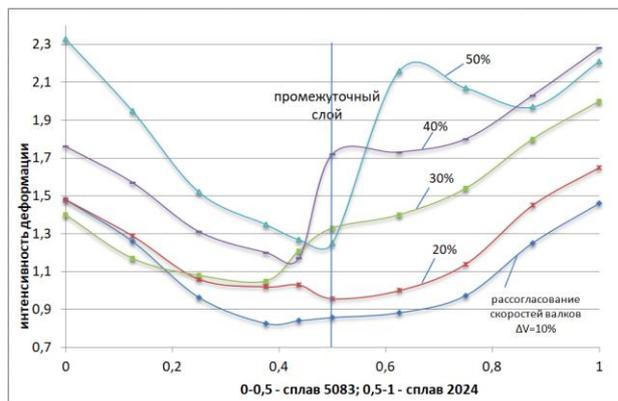


Рис. 3. Зависимость значений интенсивности деформации от вида сплава при асимметричном деформировании слоистого композита 5083/2024

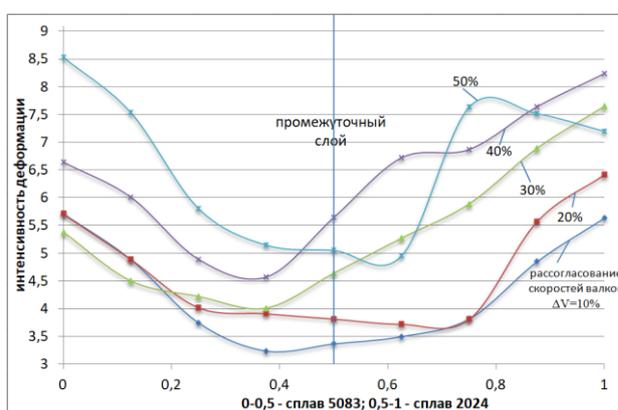


Рис. 4. Зависимость значений интенсивности деформации от вида сплава во втором цикле обработки слоистого композита 5083/2024 методом асимметричного деформирования

Стоит отметить, что рис. 3 характеризует процесс после первого цикла обработки способом асимметричной аккумуляющей прокатки или просто процесс асимметричной прокатки слоистого листового композита. Максимальное значение интенсивности деформации после обработки сплава 5083 составило 2,3; 2,2 – после обработки сплава 2024, что не позволяет получить ультрамелкозернистую структуру (на примере кривой при рассогласовании скоростей валков в 50%), промежуточный слой характеризуется относительно низкими показателями 1,2 и для получения необходимой структуры данного значения также недостаточно. Следовательно, достижение цели возможно двумя путями: проведение второго прохода с изменением конечной толщины до 0,5 мм или использование технологии асимметричной аккумуляющей прокатки с проведением 2-го цикла обработки слоистого композита (что и было выбрано для работы).

График, представленный на рис. 4, значения для которого взяты после второго цикла обработки металла, демонстрирует высокие показания интенсивности деформации, начиная с малых значений отношения скоростей валков. Для простоты сравнения с результатами 1-го цикла обработки оценивались два внутренних слоя всего слоистого листового композита. Так, при соотношении скоростей валков в 10% минимальное значение интенсивности деформации составляет 3,2, а при 50% – 4,8. Максимальное значение изменяется от 5,2 для случая с 30% отношением разницы скоростей валков и 8,5 для 50%.

Была произведена оценка отношения рассогласования скоростей валков и среднего значения интенсивности деформации по толщине проката. Показатели деформации промежуточного слоя изменяются монотонно до значений отношения разницы скоростей валков при прокатке в 40%, причем при 50% наблюдается резкое снижение почти до тех же значений, что и при 30%, как показано на рисунке 5. В этом случае значение отношения разницы скоростей валков в 40% увеличивает вероятность получения ультрамелкозернистой структуры как в каждом сплаве в отдельности, так и в промежуточном слое. Необходимо иметь в виду, что для получения УМЗ-структуры недостаточно одного прохода при асимметричном деформировании с обжатием в 50 %.

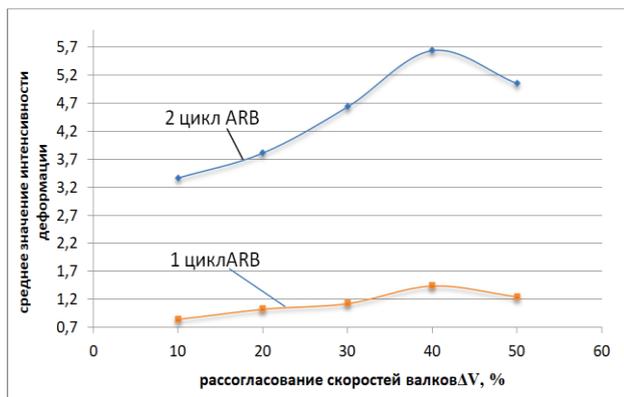


Рис. 5. Зависимость средних значений интенсивности деформации от рассогласования скоростей валков после первого и второго циклов асимметричной аккумулярующей прокатки алюминиевого слоистого листового композита 5083/2024

Исходя из результатов исследования, возможно определить соотношение накопленной деформации и угла сдвига  $\phi$  при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого листового композита 5083/2024. Пороговое значение деформации в совокупности с углом сдвига  $\phi$ , составляющим более 65 градусов, позволяет определить рациональную область реализации процесса асимметричного деформирования в режиме интенсивной пластической деформации, как показано на рисунке 6. При достижении пороговых значений произойдет динамическая рекри-

сталлизация, что позволит фрагментировать слоистый материал на субзерна с учетом промежуточной зоны. Для слоистого композита 6061/2024 результаты аналогичны.

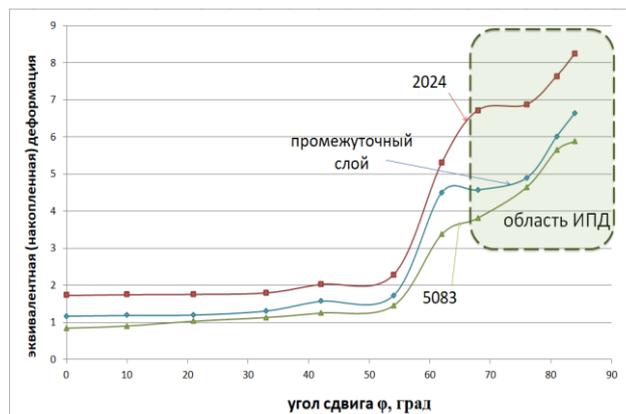


Рис. 6. Взаимосвязь эквивалентной (накопленной) деформации и угла сдвига  $\phi$  при асимметричном деформировании слоистого листового композита 5083/2024

В настоящее время идет экспериментальная проверка полученных результатов на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», который показан на рис. 7. Агрегат представляет собой реверсивный одноклетевой стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН. Диаметр валков составляет 360 мм, а максимальная скорость прокатки 15 м/мин. На данном стане можно обрабатывать как черные (сталь), так и цветные (алюминий, медь, титан) металлы и сплавы.



Рис. 7. Стан 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Предварительно были получены слоистые образцы из алюминиевых сплавов путем симметричного и асимметричного деформирования для подтверждения механизмов протекания процесса и проверки изменения твердости. В данном случае использовались алюминиевые сплавы 5-й и 6-й серий, из которых составлялся слоистый композит. Перед обработкой слоистого материала, поверхность соединения обрабатывалась: производилась зачистка образцов абразивом (шлифовальной бумагой с зернистостью Р180), а также обезжиривалась растворителем 646. Образцы до зачистки и после представлены на рис. 8.

Основные параметры прокатки 6-й серии представлены в табл. 2. На рис. 9 проиллюстрированы некоторые результаты экспериментов (образцы 1, 2, 3 и 6).

Основные параметры прокатки 5-й серии представлены в табл. 3. На рис. 10 проиллюстрированы некоторые результаты экспериментов (образцы 7, 8, 11 и 12).



Рис. 8. Образцы алюминиевого сплава 6-й серии до и после подготовки к обработке

Таблица 2

Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 6-й серии на стане 400 асимметричной прокатки

Образец	Номер прохода	Начальная толщина, мм	Усилие прокатки, кН	Установленный зазор между валками, мм	Скорость верхнего вала, об/мин	Скорость нижнего вала, об/мин	Толщина после прокатки, мм
1	1	4	980	1,7	5	5	2,3
2	1	4	676	1,8	5	2,5	2
3	1	4	716	1,7	5	2,6	2
4	2	4	520	1,7	5	2,6	1,9
5	3	3,8	520	1,6	5	2,7	1,7
6	4	3,4	402	1,6	5	2,7	1,6

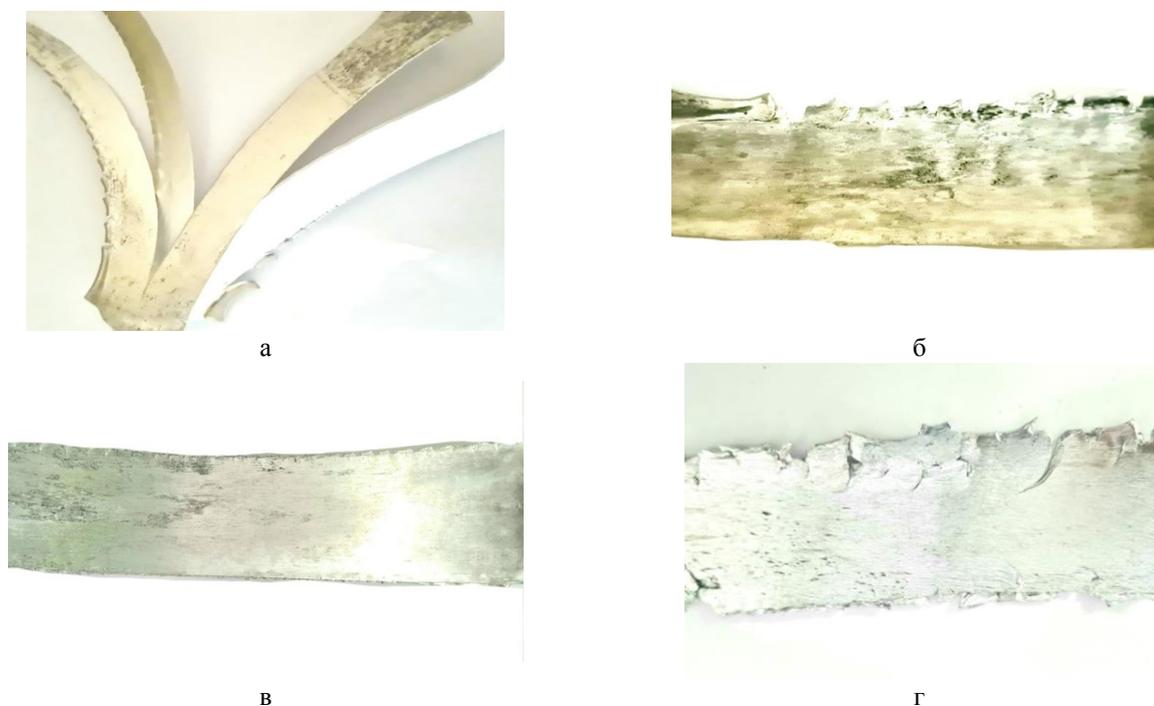


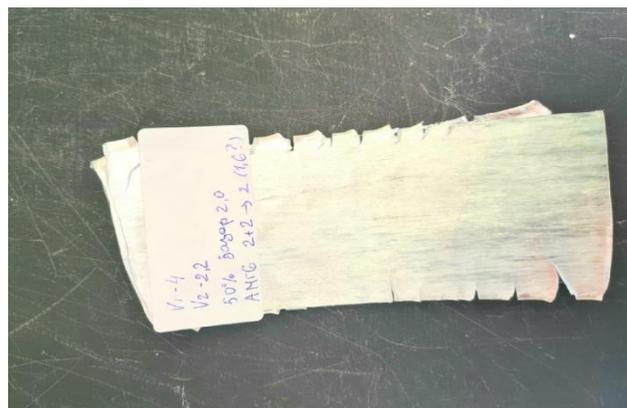
Рис. 9. Образцы алюминиевых сплавов после симметричной и асимметричной деформации: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 6

Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 5-й серии на стане 400 асимметричной прокатки

Образец	Номер прохода	Начальная толщина, мм	Усилие прокатки, кН	Установленный зазор между валками, мм	Скорость верхнего вала, об/мин	Скорость нижнего вала, об/мин	Толщина после прокатки, мм
7	1	4	912	2	4	4	2,1
8	1	4	490	2	4	2,2	2,0
9	1	4	490	1,9	4	2,1	1,9
10	2	3,8	509	1,8	4	2,2	1,8
11	1	4	490	1,8	4	2,1	1,9
12	2	3,8	372	1,8	4	2,1	1,8



а



б



в



г

Рис. 10. Образцы алюминиевых сплавов после симметричной и асимметричной деформации: а – образец 7; б – образец 8; в – образец 11; г – образец 12

В итоге образцы 1 и 7 были разрушены во время обработки, слои металлов не сварились между собой, кроме того, образовался порыв посередине образца. Асимметричная прокатка характеризуется не только уменьшением образования дефектов (все образцы показали хорошую свариваемость давлением), но и снижением усилий прокатки. При обработке образцов 1 (при симметричном случае) и 2 (при асимметрии) усилие прокатки снизилось на 304 кН (на 31 %). При деформировании образцов 7 (симметричный случай) и 8 (асимметричный случай) усилие прокатки снизилось на 421 кН (на 46 %). При проведении процесса аккумуляющей прокатки (образцы 3-6 и 9-12) также заметно снижалось усилие прокатки: с 716 до 402 кН при обработке 6-й серии и с 510 до 372 кН при обработке 5-й серии. В данном случае причиной снижения послужило уменьшение ширины образца при

обрезке боковых кромок. При этом обжатие варьировалось от 50 до 57% за проход, а суммарная степень обжатия составила более 213% для 6-й серии (за 4 цикла) и 105% для 5-й серии (за 2 цикла). Рассогласование скоростей валков варьировалось от 45 до 50% в зависимости от прохода. После всех циклов обработки был произведен замер твердости на твердомере EMCO TEST M4C/R G3, представленного на рисунке 11, методом Бринелля.

Твердость обработанного образца 6-й серии составила с верхней поверхности (со стороны вала с большей скоростью) 168 НВ, с нижней поверхности – 141 НВ, в то время как твердость исходного материала была 65 НВ, что показывает увеличение данного параметра больше чем в 2,5 раза. Средняя твердость обработанного образца 5-й серии после двух циклов прокатки составила с верхней поверхности 147 НВ, с

нижней поверхности – 145 НВ, твердость исходного материала – 81,8 НВ. Твёрдость сплава 5-й серии возросла в 1,8 раз.



Рис. 11. Твердомер EMCO TEST M4C/R G3 лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

#### Закключение

Было проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов. Показано, что достижение максимального значения интенсивности деформации возможно в крайних точках алюминиевых материалов 5083/2024 и 6061/2024 при соприкосновении с валками. Значения интенсивности деформации переходного слоя ниже, чем в основных металлах. Попадание в область ИПД возможно после 2-го цикла процесса асимметричного деформирования. На это указывает совокупность значений интенсивности деформации и угла сдвига  $\phi$ . В 1-м цикле процесса попадание в данную область при значении обжатия 50% для слоистых листовых композитов 5083/2024 и 6061/2024 невозможно. Градиент деформации может быть достигнут во всех слоях материала благодаря соблюдению установленных правил:

- 1) асимметричное деформирование при значении показателя коэффициента трения 0,3;
- 2) минимальный показатель отношения разности скоростей валков  $V_1/V_2 = 40\%$ ;
- 3) для процесса обработки методом асимметричного деформирования требуется минимум 2 цикла обработки для попадания в область ИПД.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводится на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». По предварительным проверочным результатам были подтверждены механизмы протекания асимметричного деформирования при использовании образцов 5-й и 6-й серий. Показано, что применение асимметрии позволяет уменьшить образование дефектов и снизить усилия прокатки. При обработке образцов 1 (при симметричном случае) и 2 (при асимметрии) усилие прокатки снизилось на 31 %. При деформировании образцов 7 (симметричный случай) и 8 (асимметричный случай) усилие прокатки снизилось на 46%. Проведен замер твёрдости методом Бринелля на твердомере EMCO TEST M4C/R G3. Усредненные значения показали увеличение твёрдости при обработке 5-й серии после двух циклов в 1,8 раз, а при обработке 6-й серии после четырех циклов в 2,5 раза.

#### Благодарность

Исследование проводилось в рамках реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 (договор № 075-15-2019-869 от 12 мая 2019 г.), 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 (договор №20-38-90097/20 от 03.09.2020).

#### Список литературы

1. Кобелев, А.Г. Материаловедение и технология композиционных материалов: учебник / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев, Е.В. Кузнецов. М.: Интермет Инжиниринг. 2006 368 с.
2. Костиков В.И. Физико-химические основы технологии композиционных материалов. Директивная технология композиционных материалов: учебное пособие. М.: МИСиС. 2011 163 с.
3. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. М.: Metallurgizdat, 2004. 230 с.
4. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Свердлик 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. Zebing Xu Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature / Zebing Xu, Hans J. Roven, Zhihong Jia. Materials Science and Engineering Vol. 648. 2015. P. 350–358.
6. Heydari M. Vini Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al2O3 composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding// Advanced Design and Manufacturing Technology. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 10-17.

7. Heydari M. Vini Mechanical Mechanical properties and bond strength of bimetallic AA1050/AA5083 laminates fabricated by warm-accumulative roll bonding // Canadian Metallurgical Quarterly – 2017. P. 45-50.
8. Alvandi H. Microstructural and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Structured 7075 Aluminum Alloy by Accumulative Roll-Bonding Process/ H. Alvandia, K. Farmanesha. – 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15. Procedia Materials Science Vol.11. 2015. P. 17 – 23.
9. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling //Key Engineering Materials. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
10. Nageswara rao P., Kaurwar A., Singh D. Enhancement in Strength and Ductility of Al-Mg-Si alloy by Cryorolling followed by Warm rolling // Advance Publication by J-STAGE Mechanical Engineering Journal. 2014, Vol. 75. No. 1. P. 123-128.
11. 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.
12. Плохих, А.И. Исследование влияния технологических факторов на стабильность структуры многослойных материалов конструкционного назначения / А.И. Плохих, Минаков А.А. // Проблемы механики современных машин: Материалы VI Международной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. Т. 1. С. 305–310.
13. Markushev M.V. On the effectiveness of some methods severe plastic deformation intended to obtain bulk nanostructured materials. Institute of Metals Superplasticity Problems RAS, Ufa, 2011. 43 p.
14. Romankov S. Formation of nanolaminated amorphous/crystalline structure in the multicomponent system under severe plastic deformation / Materials Letters Volume 85, 15 October 2012, pp. 109-112.
15. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Валиев Р.З., Александров И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
16. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Институт проблем сверхпластичности металлов РАН. Уфа, 2011. 43 с.
17. 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.
18. Asaro R.J. Deformation Mechanisms and Manufacturing of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation/ Asaro R.J., Krysl P., Benson D. University of California, San Diego, 2003. 80 p.
19. Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // Конструкции из композиционных материалов. 2004. № 4. С. 47-55
20. 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.
21. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications // Progress in Materials Science. 2008. V. 53. P. 893-979.
22. Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988 // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 652. P. 325-352.
23. Zhilyaev A.P., Nurislamova G.V., Kim B.K., Baró M.V., Szpunar J.A., Langdon T.G. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion // Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 753-765.
24. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. Study of deformed condition aluminium alloys 1070, 2024 and 5083 at asymmetric and package rolling by method final elements / Materials III<sup>rd</sup> international youth scientific and practical conference. 2018. №1. P. 3-5.
25. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2018, №1. P.1-4.
26. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx – 7xxx // Журнал технических исследований. 2019. Т. 5, №1. С.53-59
27. Бирюкова О.Д., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Влияние скоростной асимметрии на деформационное состояние в алюминиевом биметалле 5083/1070 при пакетной прокатке // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2018. № 1 (46). С. 44-49.
28. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д. Развитие процесса аккумулялирующей прокатки алюминиевых биметаллов на основе применения скоростной асимметрии // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции. 2016. С. 20-22.
29. 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.

**Сведения об авторах**

**Бирюкова Олеся Дмитриевна** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru.

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

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

**Кожмякина Анна Евгеньевна** – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**THE POSSIBILITY OF OBTAINING A GRADIENT STRUCTURE OF THE ALUMINUM LAMINATED COMPOSITE DURING ASYMMETRIC DEFORMATION**

**Biryukova Olesya D.** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fimapatisationchik@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

**Kozhemiakina Anna E.** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

**Abstract.** Laminated materials are popular in the transport, chemical, and oil industries. The range of products is wide: from strips and sheets to special-purpose profiles. It is necessary to develop technologies for the processing of laminated materials that allow obtaining a high level of mechanical properties. In this regard, the process of asymmetric deformation of aluminum laminated sheet composites is considered. An analysis of the regularities of the rolling process of aluminum alloys was carried out to determine the rational parameters. It would ensure the straightness of the metal exit from the deformation zone and the required gradient structure of each of constituent layers. The analysis was carried out on the basis of simulation of experiments in the Deform 2D software package. The results show that the required level of deformation gradient can be achieved in all layers of the laminated sheet composite due to correctly selected rolling parameters. A preliminary verification of the simulation results was carried out at the asymmetric rolling mill 400 of the Zhilyaev Mechanics of Gradient Nanomaterials Laboratory of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Samples of aluminum alloys of the fifth and sixth series were used and prepared for processing according to the established technology. The advantages of asymmetric deformation over symmetric are shown. The results of hardness tests by the Brinell method are presented.

**Key words:** asymmetric deformation, aluminum alloy, equivalent deformation, deformation intensity, computer simulation, severe plastic deformation.

---

Ссылка на статью:

Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожмякина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 38-46.  
Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Kozhemiakina A.E. The possibility of obtaining a gradient structure of the aluminum laminated composite during asymmetric deformation. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 38-46.