

НГТУ



НЭТИ

# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3

Денис Салихьянов<sup>1, 2, а, \*</sup>, Николай Мичуров<sup>2, 3, б</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

<sup>2</sup> Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>3</sup> Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, ул. Мира, 22, г. Екатеринбург, 620062, Россия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>,  [d.r.salikhianov@urfu.ru](mailto:d.r.salikhianov@urfu.ru), <sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>,  [n.michurov@ya.ru](mailto:n.michurov@ya.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669

#### История статьи:

Поступила: 28 апреля 2023

Рецензирование: 20 мая 2023

Принята к печати: 13 июня 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

#### Ключевые слова:

Слоистые композиты  
Алюминиевые сплавы  
Совместная прокатка  
Напряженно-деформированное состояние  
Соединение материалов  
Конечно-элементное моделирование

#### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20243 «Мульти-масштабное моделирование процессов соединения разнородных материалов пластической деформацией» при поддержке правительства Свердловской области.

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последние десятилетия слоистые композиты на основе алюминиевых сплавов находят все большее применение в авиакосмической и автомобильной промышленности. Слоистые композиты обычно получают совместной прокаткой, в ходе которой происходит металлургическое соединение предварительно подготовленных листов. Основная задача совместной прокатки заключается в получении надежного соединения между материалами. На настоящий момент процесс соединения однородных и разнородных материалов пластической деформацией все еще остается малоизученным явлением. В связи с этим за последнее время большое развитие получили методы конечно-элементного моделирования процессов соединения материалов. **Цель работы** заключается в установлении связи между показателями напряженно-деформированного состояния и формированием устойчивого соединения между алюминиевыми сплавами разных составов. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи работы**: 1) моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 с данными, которые соответствуют физическим экспериментам, выполненным в ИМАШ УрО РАН; 2) выбор и анализ наиболее важных показателей напряженно-деформированного состояния при прокатке слоистого композита АМг3/Д16/АМг3. **Методика исследований.** В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. **Результаты и обсуждение.** С помощью анализа искажения координатной сетки слоев композита и векторов скоростей течения материала слоев было выявлено, что в процессе прокатки деформация распределяется неоднородно по материалам слоев: наружные слои текут интенсивнее по сравнению со средним слоем. Максимальный разброс интенсивности деформации  $\epsilon_i$  в поперечном сечении, наблюдаемый при максимальном обжатии 75 %, составляет 12 %, что позволяет принять для аналитических расчетов в первом приближении допущение об однородности деформации. Установлена связь начала формирования соединения между слоями композита с пороговым расширением контактной поверхности и нормальным давлением на межслойной границе. Предложены дальнейшие направления совершенствования подходов моделирования процессов прокатки слоистых композитов.

**Для цитирования:** Салихьянов Д.Р., Мичуров Н.С. Моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 6–18. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-6-18.

#### \*Адрес для переписки

Салихьянов Денис Ринатович, к.т.н., доцент  
Уральский федеральный университет,  
ул. Мира, 28,  
620002, г. Екатеринбург, Россия  
Тел.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: [d.r.salikhianov@urfu.ru](mailto:d.r.salikhianov@urfu.ru)

## Введение

В последние десятилетия слоистые композиты на основе алюминиевых сплавов находят все большее применение в авиакосмической и автомобильной промышленности [1]. Благодаря использованию разных материалов в одном изделии удастся объединить такие свойства, как прочность, коррозионную стойкость, важный для авиации удельный вес, теплопроводность и др.

Слоистые композиты обычно получают совместной прокаткой, в ходе которой происходит металлургическое соединение предварительно подготовленных листов [2]. Технология совместной прокатки включает в себя следующие основные этапы: подготовку соединяемых поверхностей листов посредством химической и механической обработки; сборку листов в пакет и их фиксацию сваркой или клепками; прокатку пакета по заданному режиму; термообработку; отрезку фиксированных краев листа. Далее могут идти операции листовой штамповки, например вырубка и вытяжка [2].

Основная задача совместной прокатки заключается в получении надежного соединения между материалами, характеризуемого прочностью и оцениваемого через специальные испытания [3]. На настоящий момент процесс соединения однородных и разнородных материалов пластической деформацией все еще остается малоизученным явлением. Это подтверждают многочисленные работы, посвященные изучению влияния отдельных технологических факторов совместной прокатки на прочность соединения слоев материала [1–10]. Анализ обзорных [2, 4, 5], экспериментальных [4–10] и теоретических [11, 12] работ показал, что наиболее значимыми факторами совместной прокатки являются следующие: величина обжатий и давлений при прокатке, технология подготовки поверхностей к соединению и соотношение прочностных свойств соединяемых материалов. Ввиду отсутствия надежных моделей прогнозирования условий, при которых начинается соединение материалов, разработка технологий производства новых слоистых композитов сопровождается большим объемом предварительных экспериментальных исследований. Как показано в предыдущей работе автора [3], дополнительные сложности вызы-

вает неодинаковое влияние одних и тех же факторов на процесс соединения материалов, зависящее от сочетания материалов в конкретном технологическом процессе. Например, в одних случаях увеличение шероховатости контактных поверхностей способствует соединению, а в других – наоборот, препятствует.

Для описания механизма соединения однородных и разнородных материалов существует около шести теоретических моделей, описанных в [13], однако наиболее часто ссылаются на теоретическую модель соединения материалов Бэя [14], который описал соединение материалов как процесс, протекающий в четыре стадии: 1) растрескивание оксидных пленок на соединяемых поверхностях материалов слоев; 2) выдавливание чистых металлов в трещины между оксидами; 3) сближение чистых металлов на величину межатомного взаимодействия; 4) образование участков соединения. Ограничениями теоретической модели Бэя являются типичные для механики сплошных сред допущения: двумерная постановка, однородность течения материалов слоев и давлений в очаге деформации и др. Кроме того, модель Бэя не позволяет аналитически определить уровень деформаций и давлений при совместной прокатке, необходимый для начала формирования соединения материалов.

В связи с этим за последнее время большое развитие получили методы конечно-элементного (КЭ) моделирования процессов соединения материалов [15–19]. С опорой на натурные эксперименты возможно воспроизведение условий, при которых происходит формирование соединения материалов. В частности, для анализа процесса соединения материалов интерес представляют такие характеристики, как нормальные давления, сдвиговые напряжения, относительное среднее нормальное напряжение, интенсивность деформации и др. Наиболее подробный КЭ-анализ прокатки алюминиевого композита предоставили Халеди и др. [17, 18], однако ими выполнялось моделирование процесса соединения однородных листов из алюминия, хорошо изученного в экспериментальных работах Бэя [14]. Исследование механизма соединения разнородных материалов представляет собой более сложную задачу, в связи с чем в настоящей работе была поставлена **цель**: установление связи между показателями напряженно-деформиро-

ванного состояния и формированием устойчивого соединения между алюминиевыми сплавами разных составов. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы: 1) моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 с данными, которые соответствуют физическим экспериментам, выполненным в ИМАШ УрО РАН; 2) выбор и анализ наиболее важных показателей напряженно-деформированного состояния при прокатке слоистого композита АМг3/Д16/АМг3.

### Методика исследований

Объектом исследования настоящей работы являлся процесс совместной прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3, состоящего из алюминиевых сплавов Д16 (сплав серии 2xxx, термически и деформационно упрочняемый) и АМг3 (сплав серии 5xxx, деформационно упрочняемый) [20].

В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. Моделирование процесса прокатки выполнено в соответствии со следующими условиями. В качестве исходных заготовок были приняты листы с размерами

2,92×50×75 мм (толщина × ширина × длина), соответствующие реальным размерам листов, использованных для физического моделирования. Листы из сплавов Д16 и АМг3 поставлялись в отожженном (мягком) состоянии. Кривые упрочнения сплавов были построены с использованием кулачкового пластометра ИМАШ УрО РАН, а затем интегрированы в среду Deform-3D. Получившееся соотношение сопротивлений деформаций сплавов  $\frac{\sigma_{Д16}}{\sigma_{АМг3}}$  оказалось близко к 0,8.

Перед прокаткой листы собирались в пакет, как показано на рис. 1. Валки приняты идеально жесткими с линейной скоростью прокатки 150 мм/с, диаметр валков составлял 255 мм. Условия трения приняты в соответствии с законом трения по Кулону с коэффициентом трения  $\mu$ , равным 0,12, между валками и наружными слоями пакета, и коэффициентом трения  $\mu$ , равным 0,5, между слоями в пакете. Температура пакета соответствовала комнатной.

Для имитации фиксации листов в пакете при прокатке было принято условие возможности их взаимного проскальзывания без отрыва друг от друга. Опытным путем установлен минимальный размер КЭ заготовок листов, позволяющий

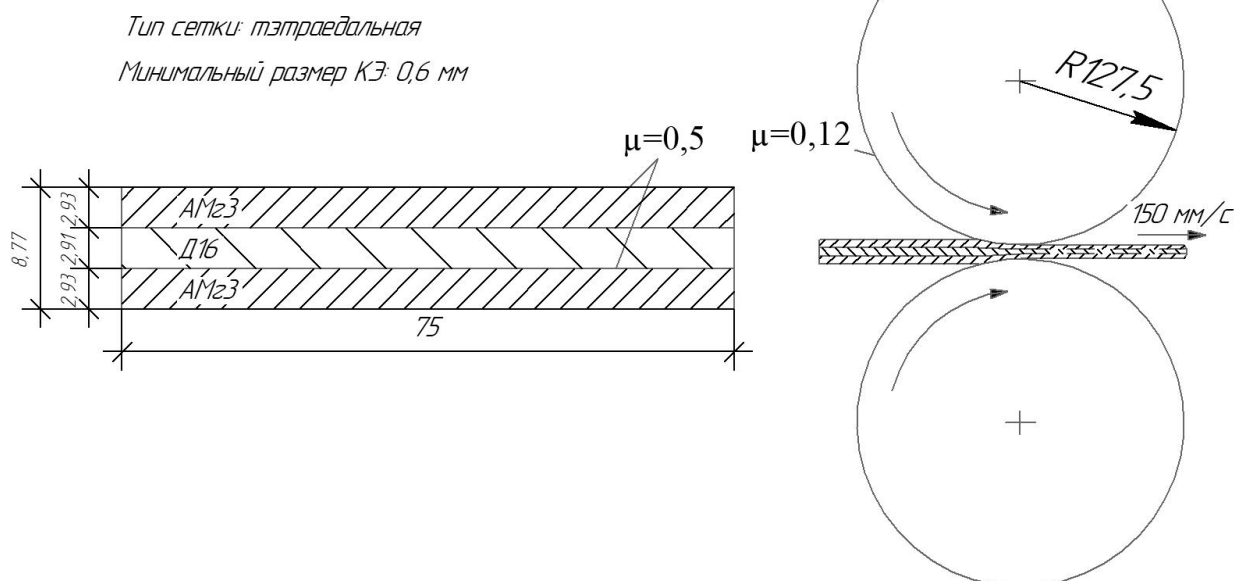


Рис. 1. Постановка задачи 3D-КЭ-моделирования процесса совместной прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3

Fig. 1. Setting of the problem of 3D FE-simulation of the laminated composites АМg3/Д16/АМg3 rolling processes

найти сходимость задачи на шагах итераций: минимальный размер КЭ в окне плотности составлял 0,6 мм, минимальный размер КЭ за пределами очага деформации – 1,3 мм, общее количество КЭ составляло ~50 тысяч для каждой листовой заготовки. Таким образом, в очаге деформации приходилось по три КЭ на толщину листа, что можно считать удовлетворительным с точки зрения точности и времени решения.

В процессе моделирования варьировалось обжатие пакета  $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$ , где  $h_0$  и  $h_1$  –

исходная и конечная толщина пакета соответственно. Обжатия  $\varepsilon$ , задаваемые при моделировании, соответствовали реальным и составляли 30, 45, 55, 65 и 75 %. При этом обжатия более 45 % выполнялись в два прохода, где первый проход равнялся 45 %, а второй соответствовал целевому конечному обжатию (от 55 до 75 %). Авторами экспериментально установлено, что соединение между алюминиевыми сплавами происходит при обжатии  $\varepsilon$  по толщине не менее 45 %. Это наблюдение согласуется с литерату-

рой: например, в [6] установлено, что для соединения листов из технически чистого алюминия требуется обжатие при прокатке не менее 40 %.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2, а, б представлено формоизменение координатной сетки, характеризующее течение частиц металла среднего слоя при совместной прокатке с обжатием 45 и 75 % соответственно. Координатная сетка была построена в центральном продольном сечении с размерами ячейки 0,5×0,5 мм. Из формоизменения сетки видно, что при совместной прокатке приповерхностные слои сплава Д16 текут в продольном направлении интенсивнее по сравнению с центральными слоями сплава. При большем обжатии (как, например, показано на рис. 2, б) происходит более сильное вытягивание приповерхностных слоев сплава Д16 по сравнению с центральными.

Как показано на рис. 3, по мере движения металла к выходу из очага деформации происходит искривление поверхности векторов скоростей

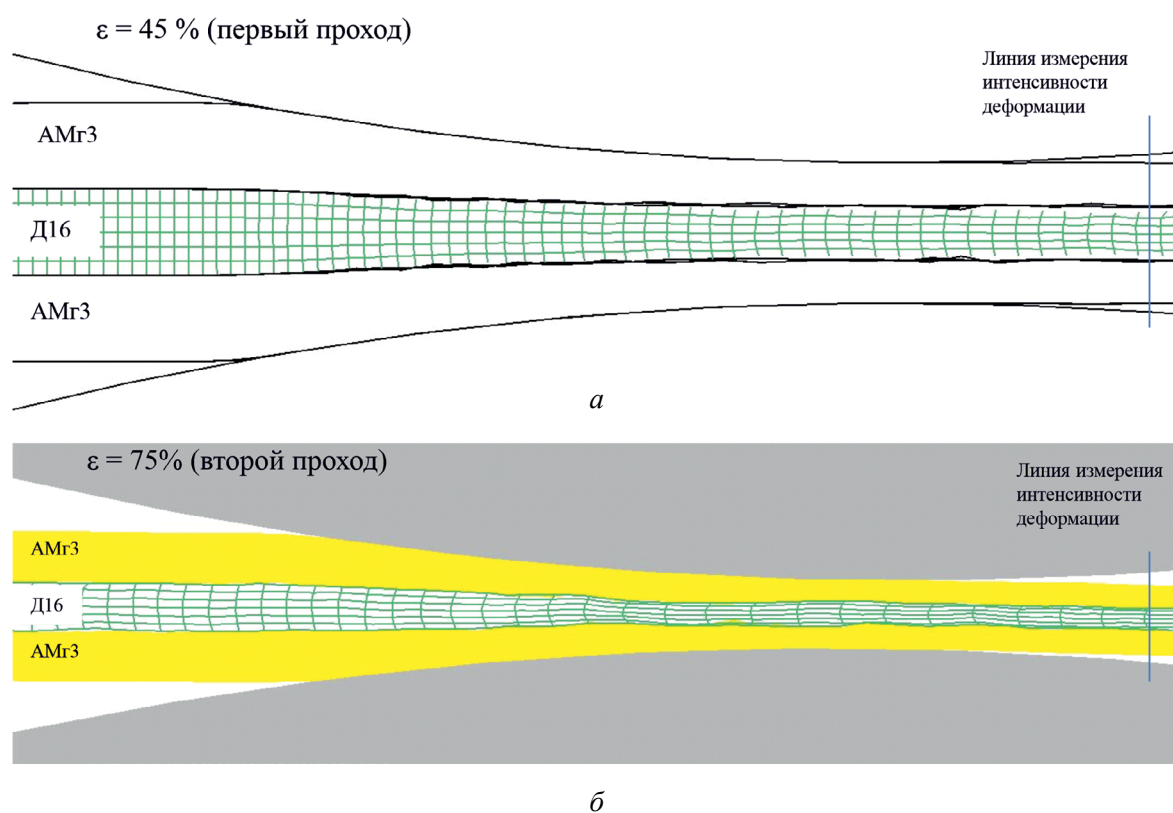


Рис. 2. Формоизменение координатной сетки центрального слоя при прокатке с обжатием 45 % (а) и 75 % (б)

Fig. 2. Shape change of the central layer grid under rolling with thickness reduction ratio of 45 % (a) and 75 % (b)



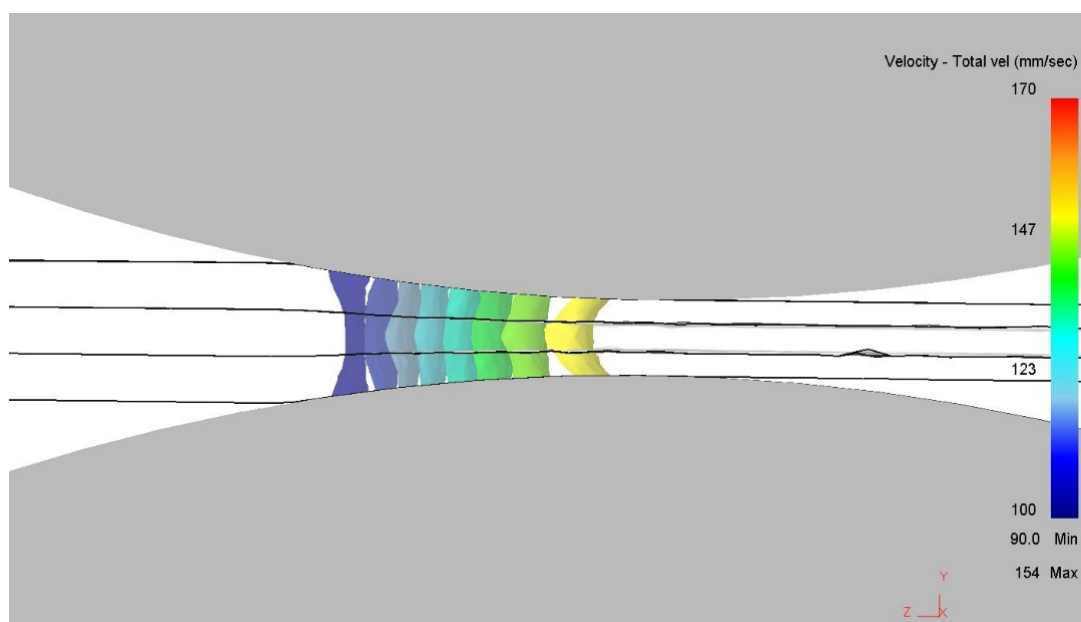


Рис. 3. Поверхности векторов скоростей течения металла слоев при совместной прокатке с обжатием 45 %

Fig. 3. Surfaces of metal flow velocity vectors of layers during accumulative roll bonding with thickness reduction ratio of 45 %

течения металла слоев с отставанием течения центрального слоя из сплава Д16 по сравнению с плакирующими слоями из сплава АМг3. Иными словами, осуществляется вытеснение металла центрального слоя в сторону входа в очаг деформации вследствие его меньшего сопротивления деформации. Исходя из этого, очевидно невыполнение закона постоянства секундных объемов с соответствующим искажением координатной сетки.

Для того чтобы оценить неоднородность деформации в поперечном сечении катаных композитов, было выполнено измерение интенсивности деформации  $e_i$  вдоль линии, схематично изображенной на рис. 2. Интенсивность деформации рассчитывалась по формуле

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \quad \text{где}$$

$e_1, e_2, e_3$  – главные деформации. Конечный результат измерения представлен в виде графика на рис. 4, где по оси абсцисс отложена относительная толщина слоистого композита ( $0$  – нижняя поверхность композита,  $1$  – верхняя поверхность композита).

На рис. 4 обращает на себя внимание рост неоднородности интенсивности деформации  $e_i$  с увеличением обжатий при совместной прокатке. При малом обжатии 30 % неоднородность де-

формации по слоям практически неразличима, а разница между максимальным и минимальным значением составляет 0,02. Далее с увеличением обжатий неоднородность интенсивности деформаций  $e_i$  становится более выраженной и достигает максимума при наибольшем обжатии 75 % с разницей между максимальным и минимальным значением, равной 0,17. Примечательно, что при обжатиях до 65 % средний слой композита (сплав Д16) характеризуется меньшими значениями интенсивности деформаций  $e_i$ , что согласуется с картиной распределения векторов скоростей течения слоев и выводом об отставании скорости течения центрального слоя от скорости течения плакирующих слоев.

При обжатии 75 % возникает обратная картина: центральный слой характеризуется большими значениями интенсивности деформаций  $e_i$ . Это наблюдение, вероятнее всего, вызвано малой толщиной листовой заготовки (2,2 мм) при данном обжатии, что приводит к более интенсивному проникновению деформации вглубь композита. В целом максимальный разброс интенсивности деформации

$$\frac{e_{i(\max)} - e_{i(\min)}}{e_{i(\max)}} \cdot 100 \%,$$

наблюдаемый при обжатии 75 %, составляет 12 %, поэтому для аналитических расчетов технологии производства слоистого композита

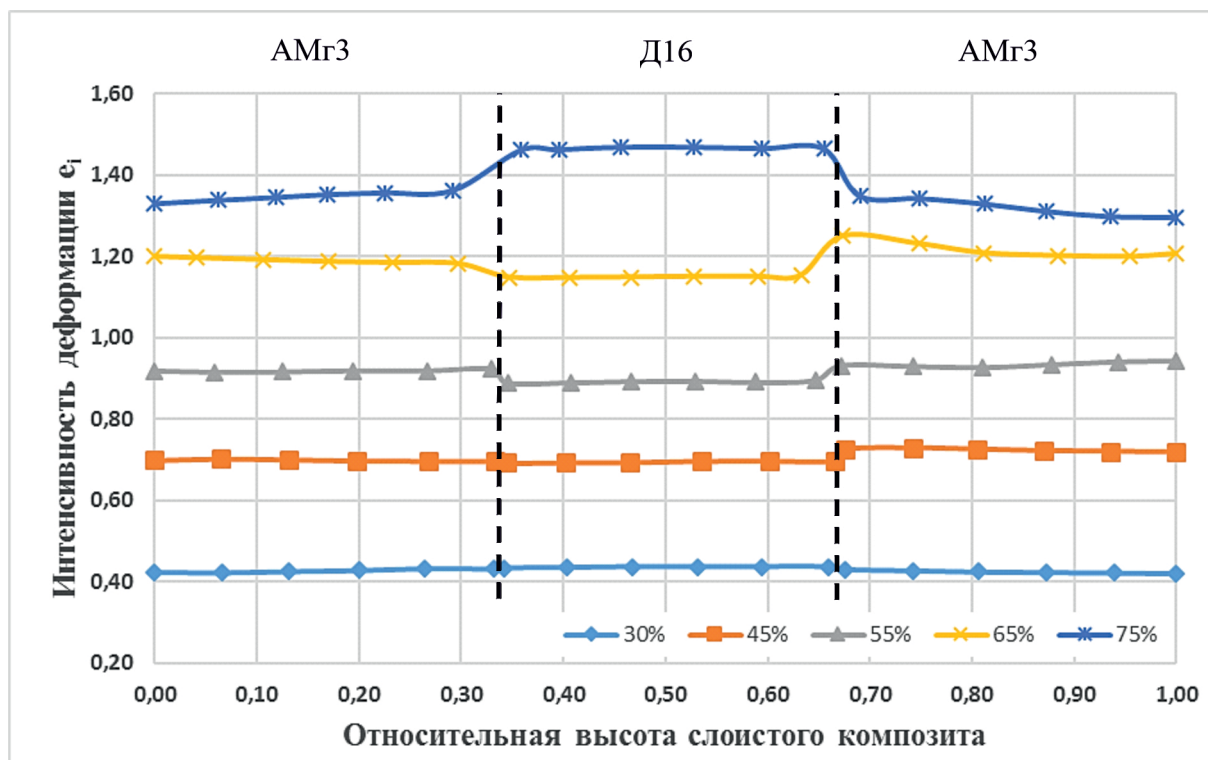


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении композитов в зависимости от обжатия при прокатке

Fig. 4. Distribution of effective strain in the cross section of composites depending on thickness reduction during rolling

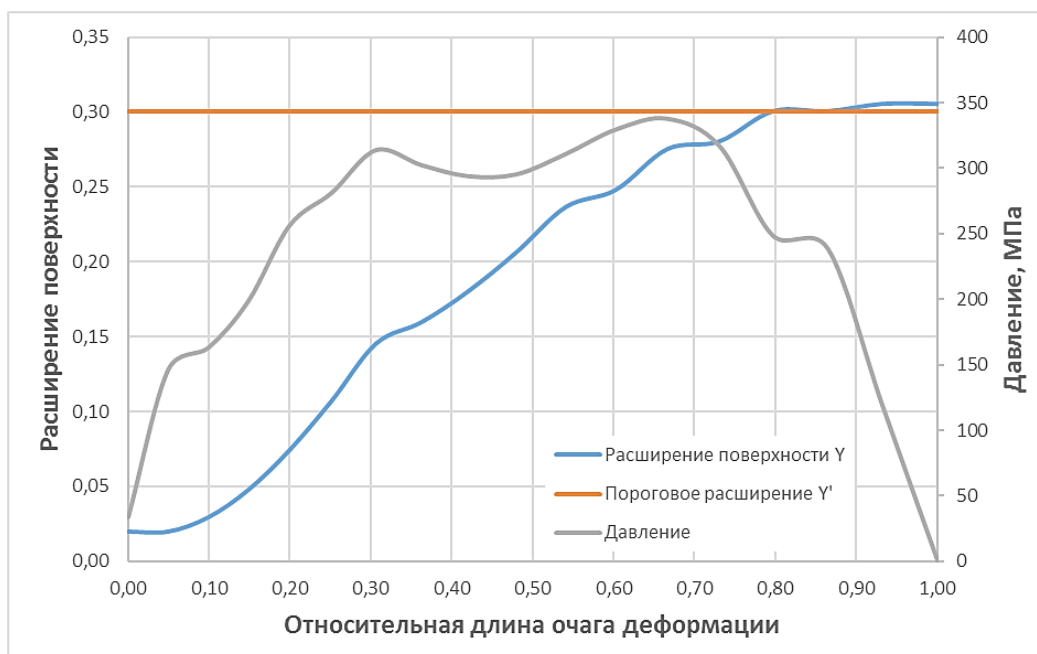
АМг3/Д16/АМг3 в первом приближении можно принять допущение об однородности распределения деформации в поперечном сечении.

С целью изучения условий формирования соединения между слоями из разных материалов для разных вариантов прокатки было рассчитано увеличение площади поверхности и сведено к общепринятому виду  $Y = \frac{A_1 - A_0}{A_1}$ , где  $A_0$

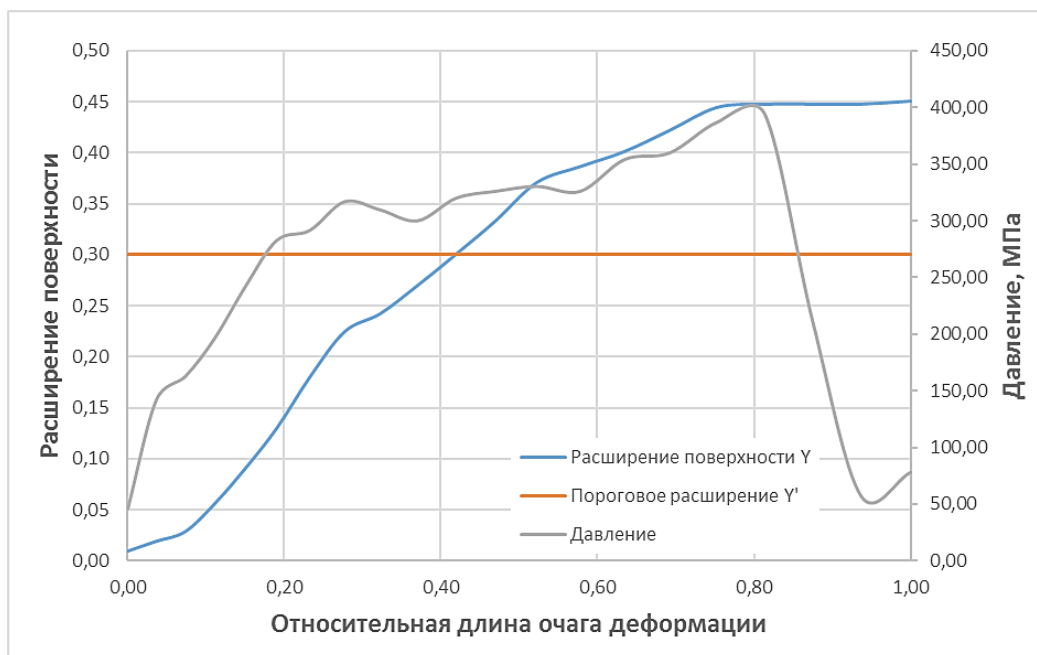
и  $A_1$  – исходная и конечная площади поверхности [14, 21]. Для установления момента начала формирования соединения в очаге деформации был задан граничный критерий  $Y'$ , означающий расширение контактной поверхности, при котором появляются трещины в оксидном слое. По данным источников [6, 14, 16–18, 22], посвященных получению алюминиевых композитов прокаткой, критерий  $Y'$  может варьироваться от 0,3 до 0,4 для технически чистого алюминия, что эквивалентно приблизительному обжатию при прокатке 30–40 %. В нашем случае критерий  $Y'$  был принят на уровне 0,3 с учетом меньшей пластичности исследуемых сплавов по сравнению с технически чистым алюминием.

На рис. 5 приведен график зависимости расширения контактной поверхности  $Y$  на межслойной границе от относительной длины очага деформации, где 0 – вход в очаг деформации, 1 – выход из очага деформации. Дополнительно на этих же графиках показано нормальное давление. Анализ значений расширения поверхности  $Y$  на выходе из очага деформации на рис. 5 показывает, что они практически совпадают со значениями обжатий. Это говорит о том, что в данных условиях влияние бокового уширения листов на расширение контактной поверхности  $Y$  ничтожно мало и им можно пренебречь для аналитических расчетов.

На рис. 5, а представлен случай прокатки трехслойного пакета АМг3/Д16/АМг3 с обжатием 30 %. Как видно, расширение контактной поверхности пересекает пороговое значение  $Y'$  на относительной длине 0,8 очага деформации, соответствующее началу растрескивания оксидного слоя и возможности контакта чистых металлов друг с другом. Однако на участке очага деформации (0,8...1) видно, что нормальные давления интенсивно снижаются с



а



б

Рис. 5. Расширение поверхности и давления на межслойной границе при прокатке композита с обжатием 30 % (а) и 45 % (б)

Fig. 5. Surface expansion and pressure at the interlayer boundary during rolling of composite with reduction ratio of 30 % (a) and 45 % (б)

250 МПа до нуля. Таким образом, максимальное отнесенное давление  $\frac{P}{\sigma_{Д16}}$  составляет 1,5,

этого недостаточно для создания контакта между материалами. В реальных условиях прокатки с обжатием 30 % соединения между материалами не происходит, что согласуется с

данными компьютерного моделирования представленного случая.

На рис. 5, б показан график зависимости расширения контактной поверхности и нормального давления от относительной длины очага деформации при прокатке с обжатием 45 %. В этом варианте достижение порогового значения рас-

ширения контактной поверхности  $Y'$  происходит на относительной длине очага деформации, равной 0,42. После достижения порогового значения расширение контактной поверхности продолжилось и достигло значения 0,45. На участке очага деформации (0,42...1), соответствующем прокатке с трещинами в оксидном слое, давления продолжили рост с 320 МПа до максимального значения, равного 394 МПа. Отнесенные давления  $\frac{P}{\sigma_{D16}}$  на участке очага деформации,

соответствующем прокатке материалов с трещинами в оксидном слое, составляют от 1,6 до 1,97. Поскольку при прокатке с обжатием 45 % в лабораторных условиях образуется первичное соединение материалов, то допустимо считать, что отнесенных давлений от 1,6 до 1,97 достаточно

для выдавливания чистых металлов между трещинами в оксидном слое и сближения их на расстояние действия межатомных сил.

С целью подтверждения результатов компьютерного моделирования на рис. 6 представлены данные микроструктурного исследования слоистых композитов АМг3/Д16/АМг3 после прокатки с обжатием 45 %. На рис. 6, а показано поперечное сечение композита в зоне соединения материалов. Граница соединения представляет собой видимую линию без признаков трещин или разрушения структурных элементов. После прокатки слоистый композит был подвергнут механическому испытанию на сдвиг с целью определения прочности сцепления, которая составила 43 МПа. Результаты механических испытаний композита приведены в таблице.

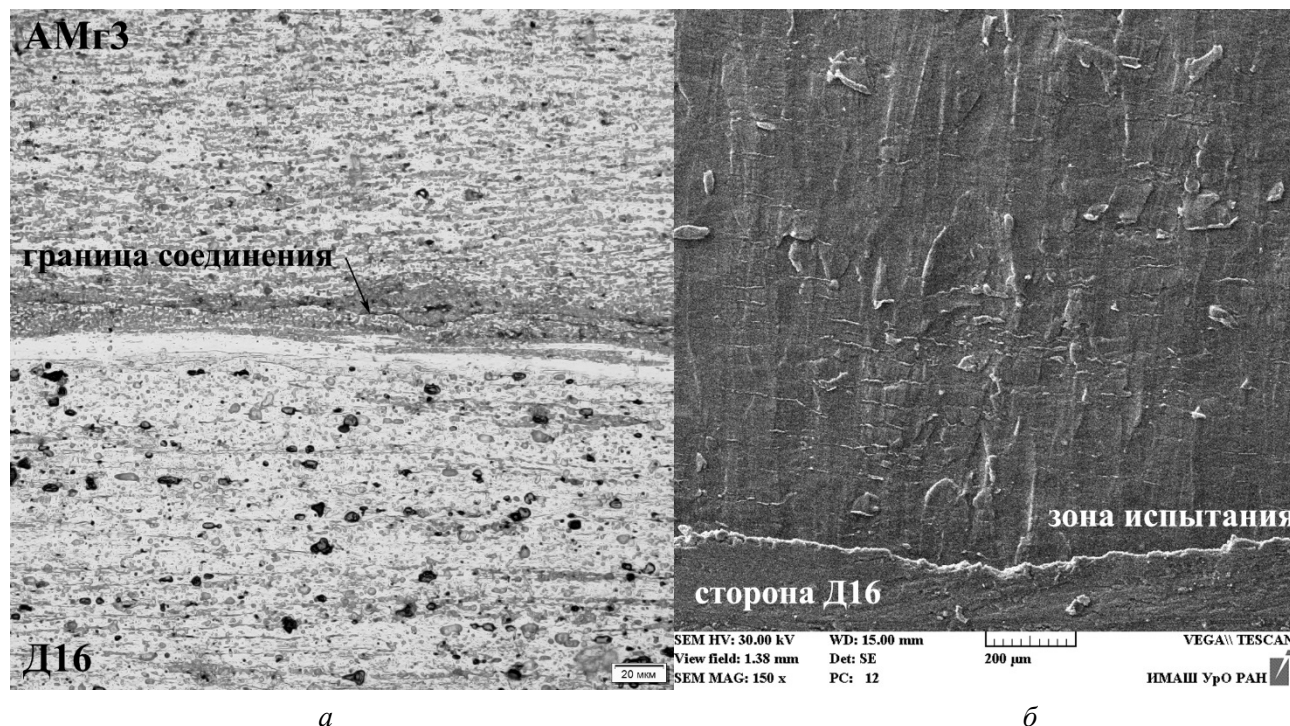


Рис. 6. Поперечное сечение композита АМг3/Д16/АМг3 в зоне соединения (а); зона сдвига со стороны сплава Д16 после испытания на сдвиг (б)

Fig. 6. Cross-section of the AMg3/D16/AMg3 composite in the bond zone (a); shear zone from D16 side after shear test (b)

#### Механические свойства композита АМг3/Д16/АМг3 после прокатки с обжатием 45 %

#### Mechanical properties of AMg3/D16/AMg3 composite after rolling with thickness reduction of 45 %

Предел текучести, МПа / Yield stress, MPa	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	Относительное удлинение, % / Elongation, %	Прочность сцепления на сдвиг, МПа / Shear bond strength, MPa
279	292	7,2	43



Зона сдвига со стороны сплава Д16 после испытания показана на рис. 6, б, на ней видны характерные «гребни пластической деформации», свидетельствующие о растрескивании оксидных пленок, выдавливании чистых металлов в трещины и образовании первичного соединения. Подобные гребни пластической деформации встречаются также в работах [6, 10], посвященных изучению прочности соединения листов из алюминия и алюминиевых сплавов. На рис. 6, б видно, что гребни пластической деформации расположены перпендикулярно направлению прокатки, следовательно, причиной их появления следует считать растягивающие напряжения, действующие вдоль направления прокатки. Видны отдельные частицы сплава АМгЗ, отслоившиеся в процессе испытания на сдвиг и оставшиеся в зоне соединения со стороны сплава Д16, что свидетельствует о соединении материалов на этих участках.

Исходя из результатов компьютерного и физического моделирования допустимо считать, что при прокатке с обжатием 45 % достигается первичное соединение между материалами слоев. С целью оценки влияния дальнейшего увеличения обжатия при прокатке на прочность со-

единения слоев были исследованы зависимости расширения поверхности  $Y$  и максимального давления в очаге деформации  $p_{\max}$  от обжатий; результаты сведены на рис. 7. Стоит отметить, что при обжатиях от 0,55 % и больше значения расширения  $Y$  несколько меньше значений обжатий, это означает растущую неоднородность деформации по толщине листов.

В целом графики зависимости на рис. 7 демонстрируют монотонное возрастание обоих параметров (расширение поверхности  $Y$  и максимальное давление  $p$ ), что будет способствовать увеличению прочности соединения материалов слоев. Этот вывод согласуется с результатами экспериментальных исследований совместной прокатки алюминия и алюминиевых сплавов [4, 6, 7, 10], где увеличение обжатий приводило к увеличению прочности соединения материалов.

Из полученных данных компьютерного моделирования следует вывод, что максимальную прочность обеспечит следующий технологический маршрут прокатки: обжатие в первом проходе 45 % → обжатие во втором проходе 50 % (общее обжатие достигает 75 %). Полученный результат подтверждается испытаниями на сдвиг композита, полученного через данный маршрут,

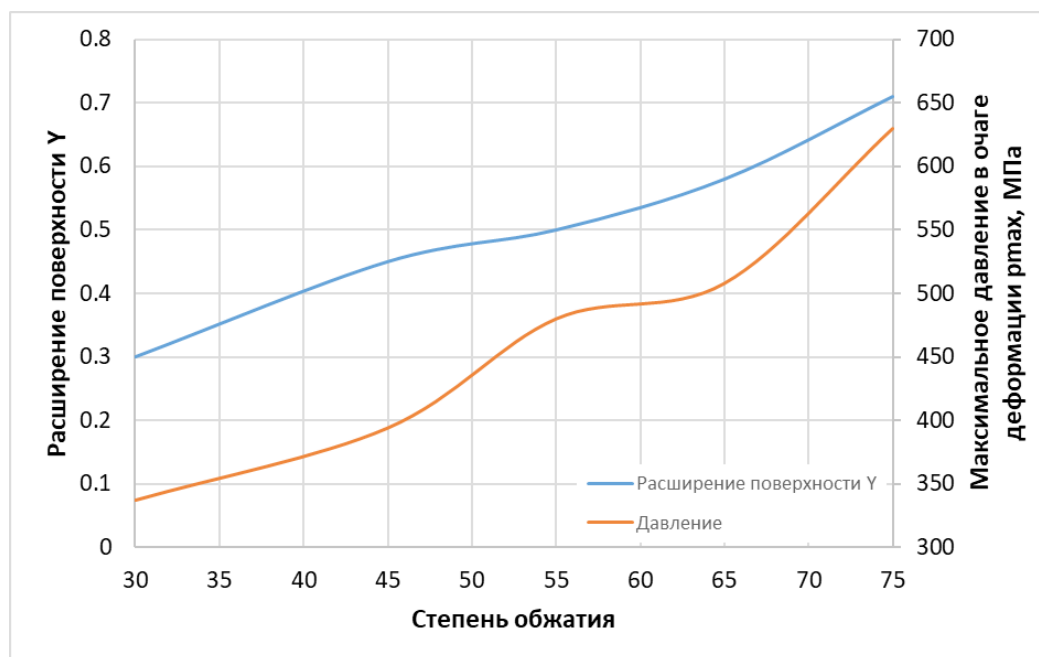


Рис. 7. Зависимость расширения поверхности  $Y$  и максимального давления в очаге деформации  $p_{\max}$  от обжатий при прокатке

Fig. 7. Dependence of the surface extend  $Y$  and the maximum pressure in the deformation zone  $p_{\max}$  on rolling reduction ratios

с прочностью сцепления 67 МПа, что в 1,5 раза выше прочности, полученной при первичном соединении слоев композита.

Таким образом, можно отметить, что предложенный подход отражает качественную зависимость прочности соединения от технологических факторов прокатки. Проблема предложенного подхода исследования образования соединения между разнородными материалами заключается в большой сложности установления критерия порогового расширения поверхности  $Y'$ , который необходимо определять для каждого вновь разрабатываемого композита. В связи с этим направление будущих исследований должно быть связано с развитием новых моделей процессов прокатки слоистых композитов и разработкой более надежных критериев формирования соединения между разнородными материалами.

### Заключение

В работе было выполнено моделирование процесса прокатки слоистого композита АМгЗ/Д16/АМгЗ и оценены параметры напряженно-деформированного состояния, влияющие на формирование соединения между слоями.

Было выявлено, что в процессе прокатки деформация распределяется неоднородно по материалам слоев: наружные слои текут интенсивнее по сравнению со средним слоем. Максимальный разброс интенсивности деформации  $\epsilon_i$  в поперечном сечении, наблюдаемый при максимальном обжатии 75 %, составляет 12 %, что позволяет принять для аналитических расчетов в первом приближении допущение об однородности деформации.

Установлена связь начала формирования соединения между слоями композита с пороговым расширением контактной поверхности и давлением. При прокатке с обжатием 30 % расширение контактной поверхности достигает порогового значения близко к выходу из очага деформации, в то время как нормальные давления резко падают, что приводит к отсутствию соединения. В случае прокатки с обжатием 45 % расширение контактной поверхности достигает порогового значения на относительном расстоянии от входа в очаг деформации 0,42. На оставшемся участке действуют приведенные

нормальные напряжения от 1,6 до 1,97, достаточные для формирования первичного соединения между сплавами АМгЗ и Д16.

### Список литературы

1. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51. – P. 5775–5799. – DOI: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.
2. Ghalehbandi S.M., Malaki M., Gupta M. Accumulative roll bonding – A Review // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 3627. – DOI: 10.3390/app9173627.
3. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation // *Comptes Rendus Mecanique*. – 2019. – Vol. 347. – P. 588–600. – DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.
4. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review // *Materials Science and Technology*. – 2011. – Vol. 27, iss. 7. – P. 1101–1108. – DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
5. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 9. – P. 023001. – DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
6. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20. – P. 191–197. – DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.
7. Madaah-Hosseini H.R., Kokabi A.H. Cold roll bonding of 5754-aluminum strips // *Materials Science and Engineering A*. – 2002. – Vol. 335. – P. 186–190. – DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01925-6.
8. Heydari Vini M., Sedighi M., Mondali M. Investigation of bonding behavior of AA1050/AA5083 bimetallic laminates by roll bonding technique // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2018. – Vol. 71, iss. 9. – P. 2089–2094. – DOI: 10.1007/s12666-017-1058-1.
9. Heydari Vini M., Daneshmand S., Forooghi M. Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique // *Technologies*. – 2017. – Vol. 5 (2). – P. 32. – DOI: 10.3390/technologies5020032.
10. Govindaraj N.V., Lauvdal S., Holmedal B. Tensile bond strength of cold roll bonded aluminium sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213. – P. 955–960. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.007.
11. Huang M.N., Tzou G.Y., Syu S.W. Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling // *Journal of*

Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 598–603. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00799-4.

12. *Danesh Manesh H., Karimi Taheri A.* Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 166. – P. 163–172. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.010.

13. An investigation of interface bonding of bimetallic foils by combined accumulative roll bonding and asymmetric rolling techniques / H. Yu, A. Kiet Tieu, Ch. Lu, A. Godbole // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 45A. – P. 4038–4045. – DOI: 10.1007/s11661-014-2311-4.

14. Joining by plastic deformation / K.-I. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, A.E. Tekkaya // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 62. – P. 673–694. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.

15. A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes / M. Bambach, M. Pietryga, A. Mikloweit, G. Hirt // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – P. 2156–2168. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015.

16. *Kebriaei R., Vladimirov I.N., Reese S.* Joining of the alloys AA1050 and AA5754 – Experimental characterization and multiscale modeling based on a cohesive zone element technique // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – P. 2146–2155. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014.

17. Modeling of joining by plastic deformation using a bonding interface finite element / K. Khaledi, Sh. Rezaei, S. Wulfinghoff, S. Reese // International Journal of Solids and Structures. – 2019. – Vol. 160. – P. 68–79. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.10.014.

18. *Khaledi K., Brepols T., Reese S.* A multiscale description of bond formation in cold roll bonding considering periodic cracking of thin surface films // Mechanics of Materials. – 2019. – Vol. 137. – P. 103142. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103142.

19. *Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N.* Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2023. – DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.

20. *Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В.* Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справочное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 344 с. – ISBN 978-5-321-01755-5.

21. *Bay N.* Mechanisms producing metallic bonds in cold welding // Welding Research Supplement. – 1983. – N 5. – P. 137–142.

22. A microscale finite element model for joining of metals by large plastic deformations / K. Khaledi, Sh. Rezaei, S. Wulfinghoff, S. Reese // Comptes Rendus Mecanique. – 2018. – Vol. 346. – P. 743–755. – DOI: 10.1016/j.crme.2018.05.005.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)







### Simulation of the rolling process of a laminated composite AMg3/D16/AMg3

Denis Salikhyanov<sup>1, 2, a, \*</sup>, Nikolay Michurov<sup>2, 3, b</sup>

<sup>1</sup> Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya Str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

<sup>3</sup> Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 22 Mira Str., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>,  [d.r.salikhyanov@urfu.ru](mailto:d.r.salikhyanov@urfu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>,  [n.michurov@ya.ru](mailto:n.michurov@ya.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 28 April 2023

Revised: 20 May 2023

Accepted: 13 June 2023

Available online: 15 September 2023

##### Keywords:

Laminated composites

Aluminum alloys

Accumulative roll bonding

Stress-strain state

Materials bonding

Finite element simulation

##### Funding

This study was performed in the frame of the grant No. 22-29-20243 “Multi-scale simulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation” funded by the Russian Science Foundation with the support of the government of Sverdlovsk region.

##### Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

#### ABSTRACT

**Introduction.** Over the past decades, laminated composites based on aluminum alloys have been increasingly used in the aerospace and automotive industries. Laminated composites are usually produced by accumulative roll bonding, which results in the metallurgical bonding of initially prepared sheets. Hence, the main task of accumulative roll bonding is to obtain a reliable bond between materials. However, at present, the process of joining similar or dissimilar materials by plastic deformation is still a poorly understood phenomenon. In this regard, in recent years, methods of finite element modeling of the processes of joining materials have begun to develop intensively. **The purpose of the work** is to establish a relationship between stress-strain state parameters and the formation of a stable bond between aluminum alloys of different compositions. To achieve this goal, the following **tasks** are formulated: 1. Simulation of the laminated composite “AMg3/D16/AMg3” rolling process using data corresponding to physical experiments carried out at the Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2. Selection and analysis of the most important stress-strain state parameters of the laminated composite “AMg3/D16/AMg3” rolling process. **Research methods.** Process simulation system *Deform-3D* was chosen as the main research tool. **Results and Discussion.** An analysis of the coordinate grid distortion and velocity vectors of material flow of layers revealed that the deformation is distributed inhomogeneously in the cross section after rolling: the outer layers flow more intensively compared to the middle layer. The maximum scatter of strain intensity  $\epsilon_i$  in the cross section, observed at a maximum reduction ratio of 75%, is 12%. This allows one to accept for analytical calculations in the first approximation the assumption of deformation uniformity. A relationship is established between the beginning of the formation of a bond between composite layers and the threshold expansion of the contact surface and normal pressure at the interlayer boundary. In the final part of the study, future directions for improving the approaches of simulation the laminated composites rolling processes are proposed.

**For citation:** Salikhyanov D.R., Michurov N.S. Simulation of the rolling process of a laminated composite AMg3/D16/AMg3. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 6–18. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-6-18. (In Russian).

#### References

1. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 5775–5799. DOI: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.

##### \* Corresponding author

Salikhyanov Denis R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Ural Federal University  
 named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
 28 Mira Str., Ekaterinburg,  
 620002, Russian Federation  
 Tel.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: [d.r.salikhyanov@urfu.ru](mailto:d.r.salikhyanov@urfu.ru)



2. Ghalehbandi S.M., Malaki M., Gupta M. Accumulative roll bonding – A Review. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, p. 3627. DOI: 10.3390/app9173627.
3. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation. *Comptes Rendus Mecanique*, 2019, vol. 347, pp. 588–600. DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.
4. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review. *Materials Science and Technology*, 2011, vol. 27, iss. 7, pp. 1101–1108. DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
5. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008, vol. 9, p. 023001. DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
6. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, pp. 191–197. DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.
7. Madaah-Hosseini H.R., Kokabi A.H. Cold roll bonding of 5754-aluminum strips. *Materials Science and Engineering A*, 2002, vol. 335, pp. 186–190. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01925-6.
8. Heydari Vini M., Sedighi M., Mondali M. Investigation of bonding behavior of AA1050/AA5083 bimetallic laminates by roll bonding technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, vol. 71, iss. 9, pp. 2089–2094. DOI: 10.1007/s12666-017-1058-1.
9. Heydari Vini M., Daneshmand S., Forooghi M. Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique. *Technologies*, 2017, vol. 5 (2), p. 32. DOI: 10.3390/technologies5020032.
10. Govindaraj N.V., Lauvdal S., Holmedal B. Tensile bond strength of cold roll bonded aluminium sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 955–960. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.007.
11. Huang M.N., Tzou G.Y., Syu S.W. Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140, pp. 598–603. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00799-4.
12. Danesh Manesh H., Karimi Taheri A. Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 166, pp. 163–172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.010.
13. Yu H., Kiet Tieu A., Lu Ch., Godbole A. An investigation of interface bonding of bimetallic foils by combined accumulative roll bonding and asymmetric rolling techniques. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45A, pp. 4038–4045. DOI: 10.1007/s11661-014-2311-4.
14. Mori K.-I., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, pp. 673–694. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.
15. Bambach M., Pietryga M., Mikloweit A., Hirt G. A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, pp. 2156–2168. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015.
16. Kebriai R., Vladimirov I.N., Reese S. Joining of the alloys AA1050 and AA5754 – Experimental characterization and multiscale modeling based on a cohesive zone element technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, pp. 2146–2155. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014.
17. Khaledi K., Rezaei Sh., Wulfinghoff S., Reese S. Modeling of joining by plastic deformation using a bonding interface finite element. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 160, pp. 68–79. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.10.014.
18. Khaledi K., Brepols T., Reese S. A multiscale description of bond formation in cold roll bonding considering periodic cracking of thin surface films. *Mechanics of Materials*, 2019, vol. 137, p. 103142. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103142.
19. Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N. Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023. DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.
20. Burkin S.P., Babailov N.A., Ovsyannikov B.V. *Soprotivlenie deformatsii splavov Al i Mg* [Deformation resistance of Al and Mg alloys]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010. 344 p. ISBN 978-5-321-01755-5.
21. Bay N. Mechanisms producing metallic bonds in cold welding. *Welding Research Supplement*, 1983, no. 5, pp. 137–142.
22. Khaledi K., Rezaei Sh., Wulfinghoff S., Reese S. A microscale finite element model for joining of metals by large plastic deformations. *Comptes Rendus Mecanique*, 2018, vol. 346, pp. 743–755. DOI: 10.1016/j.crme.2018.05.005.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.