

УДК 621.771.8

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-37-49>

Научная статья

Research article



Конечно-элементное моделирование и анализ технологической возможности применения новой схемы плакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441

А.М. Песин¹, А.В. Разинкин², В.А. Замараев², Д.О. Пустовойтов¹

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

² ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод»
Россия, 623405, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Заводская, 5

✉ Денис Олегович Пустовойтов (pustovoytov_den@mail.ru)

Аннотация: С использованием программы «QForm» проведен конечно-элементный анализ технологической возможности применения новой схемы плакирования слитков толщиной 360 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 в условиях ПАО «КУМЗ». Взамен традиционной схемы плакирования, предусматривающей приварку планшето́в к слитку за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм, предложено укладывать планшеты в специальные углубления, предварительно выполненные фрезерованием на верхней и нижней поверхностях слитка, а приварку осуществлять за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм. Показано, что новая схема плакирования позволяет предотвратить выдавливание планшето́в с поверхности слитка при высоких абсолютных обжатиях. Это дает возможность использовать более тонкие планшеты (толщиной 10 мм) взамен традиционных (15 мм). Установлено, что по новой схеме плакирования существенно сокращается общее количество проходов и междеформационных пауз при черновой прокатке и за счет этого улучшается тепловое состояние раската перед чистовой прокаткой. При сокращении 3 проходов и 3 междеформационных пауз среднее повышение температуры составляет ≈ 23 °С. Исследовано деформированное состояние основного металла (сплав 1441) и плакирующего слоя (сплав АЦпл). Показано, что средняя накопленная деформация в слитке (математическое ожидание) после прокатки по новой схеме в 2 раза выше в сравнении с традиционной схемой. При этом характер деформации плакирующего слоя при прокатке по новой схеме более равномерный. Результаты могут быть использованы для совершенствования и оптимизации технологических режимов горячей прокатки плакированных листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441 в условиях ПАО «КУМЗ».

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав 1441, горячая прокатка, плакирование, режимы деформации, моделирование методом конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, температура.

Благодарности: Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-79-30015) и в рамках договора о софинансировании № КК0987F-2023.

Для цитирования: Песин А.М., Разинкин А.В., Замараев В.А., Пустовойтов Д.О. Конечно-элементное моделирование и анализ технологической возможности применения новой схемы плакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(4):37–49. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-37-49>

Finite element modeling and analysis of the technological feasibility of a new cladding scheme for aluminum-lithium alloy 1441 ingots

A.M. Pesin¹, A.V. Razinkin², V.A. Zamaraev², D.O. Pustovoitov¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University

38 Lenin Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russia

² PJSC “Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant”

5 Zavodskaya Str., Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region 623405, Russia

✉ Denis O. Pustovoitov (pustovoitov_den@mail.ru)

Abstract: Using the QForm software package, a finite-element analysis was conducted to assess the technological feasibility of implementing a new cladding scheme for 360-mm-thick aluminum–lithium alloy 1441 ingots under the production conditions of PJSC “KUMP”. Instead of the traditional cladding scheme, in which the cladding plates are roll-bonded to the ingot over four passes with an absolute reduction of 6 mm per pass, the cladding plates are seated in pre-machined recesses milled into the top and bottom surfaces of the ingot and roll-bonded in a single pass with an absolute reduction of 24 mm. The analysis showed that the new cladding scheme prevents extrusion of the cladding plates from the ingot surface at high reductions, enabling the use of thinner plates (10 mm instead of the conventional 15 mm). The new approach also significantly reduces the total number of passes and inter-deformation pauses during rough rolling, thereby improving the thermal condition of the workpiece before finish rolling. A reduction of three passes and three pauses (10 s each) leads to an average temperature increase of approximately 23 °C. The deformation behavior of the base metal (alloy 1441) and the cladding layer (ACpl alloy) was analyzed. The mean accumulated strain in the ingot after rolling according to the new scheme was found to be twice as high as under the traditional scheme, while the deformation distribution within the cladding layer was more uniform. The obtained results can be used to enhance and optimize hot-rolling parameters for clad sheets and strips of aluminum–lithium alloy 1441 at PJSC “KUMP”.

Keywords: aluminum-lithium alloy 1441, hot rolling, cladding, deformation state, finite-element modeling, stress-strain state, temperature.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 23-79-30015) and co-funded under Agreement No. KK0987F-2023.

For citation: Pesin A.M., Razinkin A.V., Zamaraev V.A., Pustovoitov D.O. Finite element modeling and analysis of the technological feasibility of a new cladding scheme for aluminum-lithium alloy 1441 ingots. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(4):37–49.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-37-49>

Введение

Алюминий-литиевые сплавы, в сравнении с традиционными сплавами типа Д16, обладают уникальными свойствами — пониженной плотностью, повышенной жесткостью, высокими прочностными характеристиками и сопротивлением усталостным нагрузкам, а также хорошей коррозионной стойкостью и удовлетворительной свариваемостью [1–7]. Полный технологический цикл изготовления листов и полос из алюминий-литиевых сплавов освоен на Каменск-Уральском металлургическом заводе (ПАО «КУМЗ»), являющемся единственным производителем и поставщиком таких сплавов в России. Алюминий-литиевый сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li относится к сплавам второго поколения, его производство ведется в ПАО «КУМЗ» с 1990 г. [8] Этот конструкционный

сплав находит широкое применение в авиастроении и космической технике [9–13].

Плакирование — это самостоятельная технологическая операция горячей прокатки, в ходе которой обеспечивается покрытие слитков из алюминиевых сплавов тонким слоем чистого алюминия ($\geq 99,3\%$) или сплава АЦпл с целью обеспечения дополнительной коррозионной защиты [14; 15] производимых листов и полос. Плакирование при производстве алюминий-литиевых сплавов обеспечивает также значительное повышение выхода годного, поскольку способствует улучшению качества кромки и поверхности листов и полос [16].

Различают три вида плакировок [17]:

— технологическая плакировка Б, предназначенная для создания более благоприятных усло-

вий деформирования при прокатке листов из малопластичных сплавов (толщина лакирующего слоя — не более 1,5 % от толщины листа);

— нормальная лакировка А для коррозионной защиты листов (толщина лакирующего слоя — не менее 2 % для листов толщиной более 1,9 мм, и не менее 4 % — для листов толщиной менее 1,9 мм);

— утолщенная лакировка У для улучшенной коррозионной защиты (толщина лакирующего слоя — не менее 4 % для листов толщиной более 1,9 мм, и не менее 8 % — для листов толщиной менее 1,9 мм).

Для производства лакированных листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441 используют плоские слитки сечениями 225×950 мм, 275×1100 мм, 300×1100 мм, 390×1360 мм [8]. Перед прокаткой проводится специальный комплекс мероприятий по подготовке как слитка (заготовка основного металла), так и планшета (заготовка лакирующего металла). С целью удаления дефектов литья и обеспечения качественной двусторонней (сверху и снизу) приварки планшетов слитки фрезеруют по широким граням на величину от 5 до 15 мм с каждой стороны [17]. Перед укладкой соприкасающиеся поверхности планшетов и слитка обезжиривают. Толщина планшета ($h_{пл}$) рассчитывается, исходя из толщины слитка ($H_{сл}$) и требуемой толщины лакирующего слоя [17]:

$$h_{пл} = H_{сл} \delta / 100a + 2\delta, \quad (1)$$

где $a = 0,8$ — коэффициент, учитывающий разницу в деформации слитка и планшета в первых проходах; δ — верхний предел толщины лакирующего слоя по нормативной документации.

Перед горячей прокаткой слитки из алюминий-литиевого сплава 1441 с уложенными планшетами нагревают до температуры не выше 460 °С. Приварка планшетов осуществляется при горячей прокатке в первых 4 проходах с абсолютным обжатием за проход не более 6 мм в цилиндрических валках без подачи смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). Подача СОЖ в первых 4 проходах не используется для исключения попадания СОЖ под планшеты и образования дефекта типа «подпланшетный пузырь». В качестве СОЖ применяют водно-масляный раствор с содержанием прокатного масла от 1 до 2,5 %. При дальнейших черновых и чистовых проходах горячая прокатка ведется с подачей СОЖ.

Согласно работе [4], рекомендованный температурный интервал горячей прокатки алюми-

ний-литиевого сплава 1441 составляет $t = 460 \div \pm 390$ °С. Однако в условиях действующего производства фактические температурные интервалы горячей прокатки составляют: 460—340 °С — при черновой прокатке, 340—300 °С и даже ниже — при чистовой прокатке. Снижение фактических температур горячей прокатки обусловлено теплопотерями в ходе большого количества черновых проходов (до 19) и, соответственно, междеформационных пауз, во время которых происходит охлаждение раската на воздухе. Возможности интенсификации режима обжатий на черновой стадии ограничены операцией приварки планшетов, где абсолютные обжатия за проход не должны превышать 6 мм (это соответствует относительному обжатию $\approx 1,5$ %), иначе происходит «выдавливание» материала планшета с поверхности слитка.

В технической литературе имеется значительное количество работ [18—27], посвященных изучению и совершенствованию процесса лакирования листов из алюминиевых сплавов при горячей прокатке. Однако вопрос повышения эффективности приварки планшетов к слиткам остается актуальным.

Цель настоящей работы — конечно-элементное моделирование и анализ технологической возможности применения новой схемы лакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441 для сокращения количества проходов и междеформационных пауз при черновой прокатке.

Методы и материалы исследования

Моделирование и анализ процесса совместной горячей прокатки слитка (заготовка основного металла) с двумя уложенными сверху и снизу планшетами (заготовки лакирующего металла) проводили методом конечных элементов в программном комплексе «QForm 11.0.1» в двумерной постановке задачи (плоская деформация) (лицензия № R0-U2497-170719U197, лицензиат — МГТУ им. Г.И. Носова). В качестве материала слитка использовался алюминий-литиевый сплав 1441 (Al—1,7Cu—0,8Mg—1,8Li). Исходное состояние слитка — после одноступенчатого гомогенизационного отжига ($t = 450$ °С, 8 ч).

Экспериментальные данные о сопротивлении деформации сплава 1441 были получены методом кручения на симуляторе термомеханических процессов «Gleeble 3800» с применением модуля «Torsion». Использовались цилиндрические образцы общей длиной 165 мм и диаметром 14 мм.

Длина рабочей зоны $L = 20$ мм, радиус $R = 5$ мм. Один конец образца неподвижно фиксировался в захватах, ко второму (подвижному) концу прикладывался скручивающий момент. Испытания проводились при температурах 450, 400, 350, 300, 250 °С со скоростями деформации 0,01; 1; 10; 50 с⁻¹. Кривые сопротивления деформации сплава 1441, описываемые уравнением

$$\sigma_s = f(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, t), \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}$ — эквивалентная деформация; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации, с⁻¹; t — температура, °С, были аппроксимированы в виде табличной функции.

В качестве материала плакирующего слоя использовался алюминиевый сплав марки АЦпл (97,8 %) с химическим составом в соответствии с ГОСТ 4784-2019. На рис. 1 в качестве примера показаны кривые сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 и алюминиевого сплава АЦпл при скорости деформации 10 с⁻¹ и различных температурах.

Моделирование выполняли для условий черновой клетки «Кварто 4600» стана горячей прокатки ПАО «КУМЗ». Согласно традиционной технологии, приварка планшето́в осуществляется в первых 4 проходах по поперечной схеме прокатки, когда после кантовки длина слитка становится шириной. Поэтому для 2D конечно-элементной модели были приняты следующие начальные размеры слитка после фрезеровки: 360×1360 мм

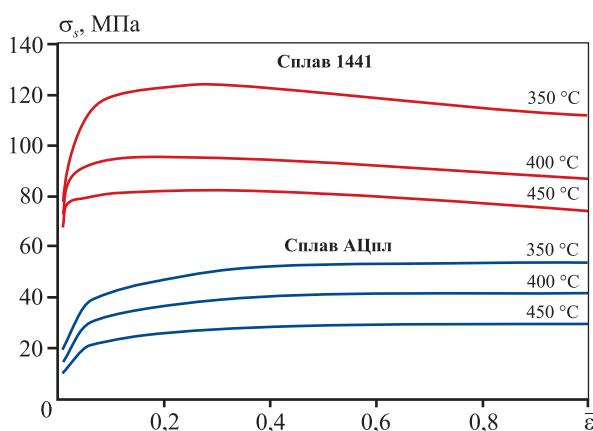


Рис. 1. Кривые сопротивления деформации алюминий-литиевого сплава 1441 и алюминиевого сплава АЦпл при скорости деформации 10 с⁻¹ и различных температурах

Fig. 1. Flow-stress curves of aluminum–lithium alloy 1441 and ACpl alloy at a strain rate of 10 s⁻¹ and different temperatures

(толщина×длина). Слиток имел прямоугольную форму (без скосов и скруглений). Исходные размеры планшето́в: 15×1100 мм (толщина×длина). Общие размеры слитка с уложенными сверху и снизу планшетами: 390×1360 мм (толщина×длина). Горячая прокатка осуществлялась в рабочих валках диаметром 1150 мм. Температура нагрева слитка с планшетами в печи составляла 450 °С. Время транспортирования от нагревательной печи до рабочей клетки по эмпирическим данным принимали равным 8 мин. Скорость прокатки в каждом черновом проходе принимали равной 1 м/с, а время пауз между проходами — 10 с.

Для описания условий трения на контакте с рабочими валками использовали закон Леванова:

$$\tau = mk(1 - e^{-1,25\sigma_n/\sigma_s}), \quad (3)$$

где τ — напряжение трения; m — показатель трения; σ_n — контактное нормальное напряжение, МПа; σ_s — сопротивление деформации, МПа; k — максимальное касательное напряжение при сдвиге, МПа (величина k пропорциональна сопротивлению деформации (σ_s) материала согласно соотношению $k = \sigma_s/\sqrt{3}$).

Приварка планшето́в осуществляется без использования СОЖ. Поэтому показатель трения на контакте с рабочими валками принимался $m = 0,95$.

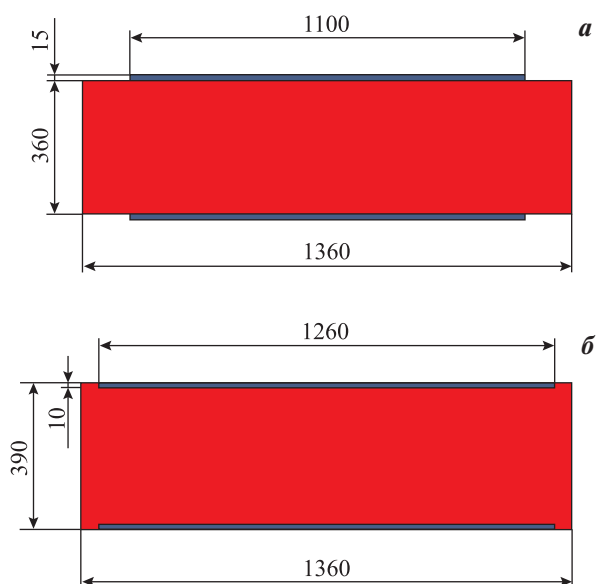


Рис. 2. Традиционная (а) и новая (б) схемы укладки планшето́в на слиток

Fig. 2. Traditional (a) and new (b) schemes cladding plate placement schemes on the ingot

Для описания условий контактного трения между слитком (алюминий-литиевый сплав 1441) и планшетами (алюминиевый сплав АЦпл) на этапе приварки также использовали закон Леванова (3), но с показателем трения $m = 1$.

По результатам конечно-элементного моделирования сравнивали две схемы плакирования: 1) традиционную (рис. 2, а), при которой верхний и нижний планшеты укладываются, соответственно, на верхнюю и нижнюю плоские поверхности слитка, а приварка осуществляется за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм; 2) новую (рис. 2, б), когда верхний и нижний планшеты укладываются в специальные углубления, предварительно выполненные фрезерованием на верхней и нижней поверхностях слитка, а приварка

осуществляется за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм.

Результаты и их обсуждение

За время транспортирования (8 мин) слитка с планшетами от нагревательной печи, где температура нагрева составляла 450 °С, до рабочей клетки происходило охлаждение на воздухе. Рассчитанное температурное поле слитка с планшетами перед началом прокатки показано на рис. 3.

Ввиду большого различия в геометрических размерах слитка и планшетов особое внимание уделялось качеству разбиения моделируемых объектов на конечные элементы. На рис. 4 показан об-

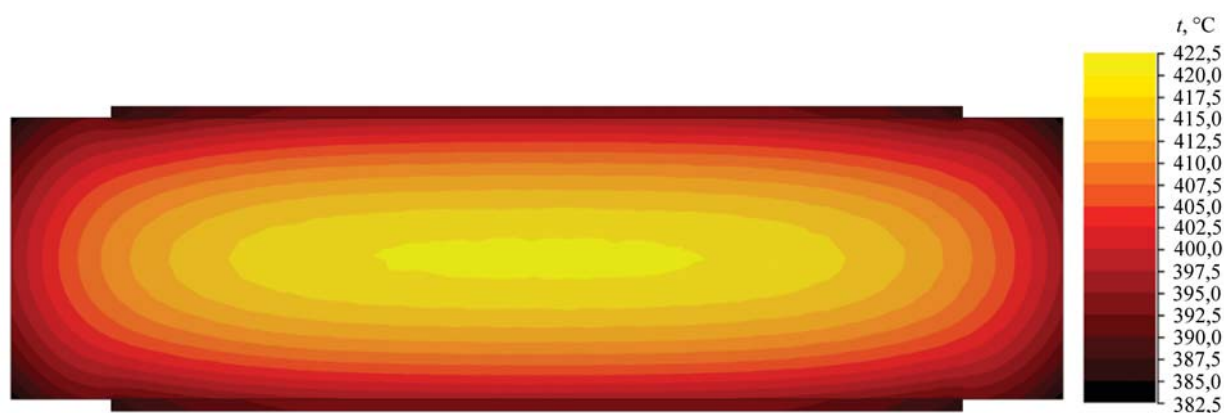


Рис. 3. Температурное поле слитка с планшетами перед началом прокатки

Fig. 3. Temperature field of the ingot with cladding plates before rolling

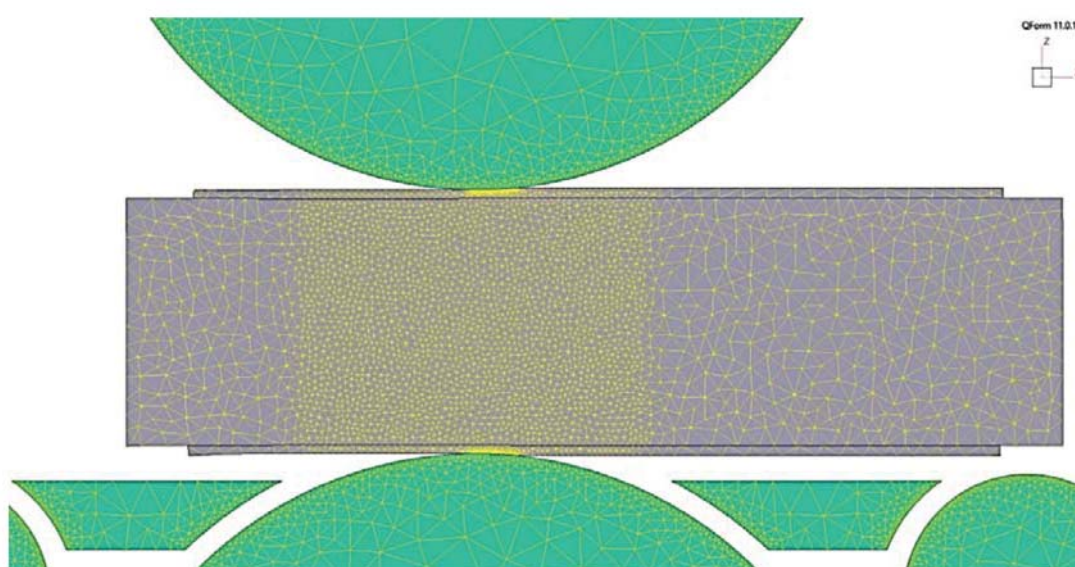


Рис. 4. Общий вид сетки конечных элементов

Fig. 4. General view of the finite-element mesh

ший вид сетки конечных элементов. Принимались следующие максимальные размеры элементов для слитка и планшето: глобальные — не более 30 мм; локальные — не более 10 мм; в контактной зоне (рис. 5) — не более 1 мм. Для инструментов на дуге 90° задавалось минимальное количество элементов — 180.

Температурное поле после приварки планшето к слитку по различным схемам представлено

на рис. 6. Средняя температура слитка (математическое ожидание) после прокатки за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм составила 399 °С (рис. 7, а). Средняя температура слитка (математическое ожидание) после прокатки за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм составила 422 °С (рис. 7, б).

Таким образом, при сокращении 3 проходов и, соответственно, 3 междеформационных пауз по

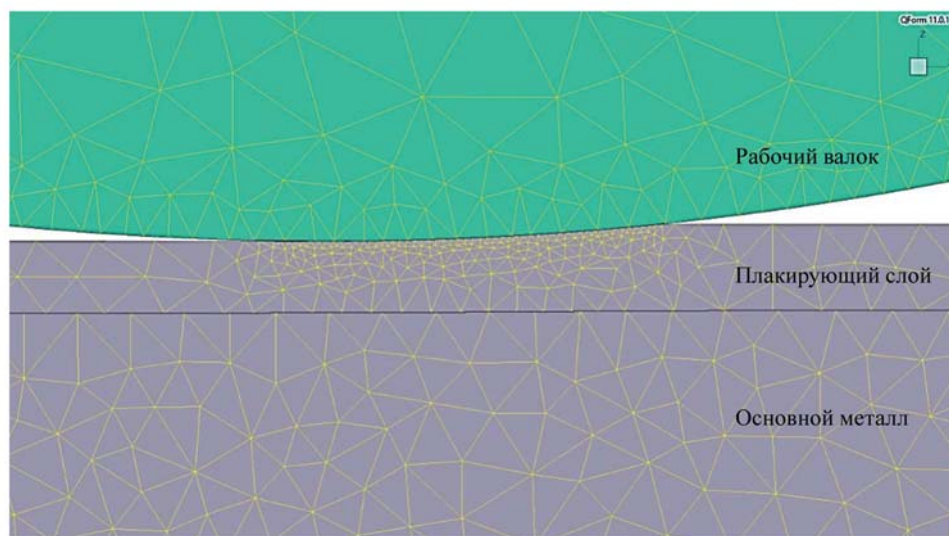


Рис. 5. Сетка конечных элементов в зоне контакта

Fig. 5. Finite-element mesh in the contact zone

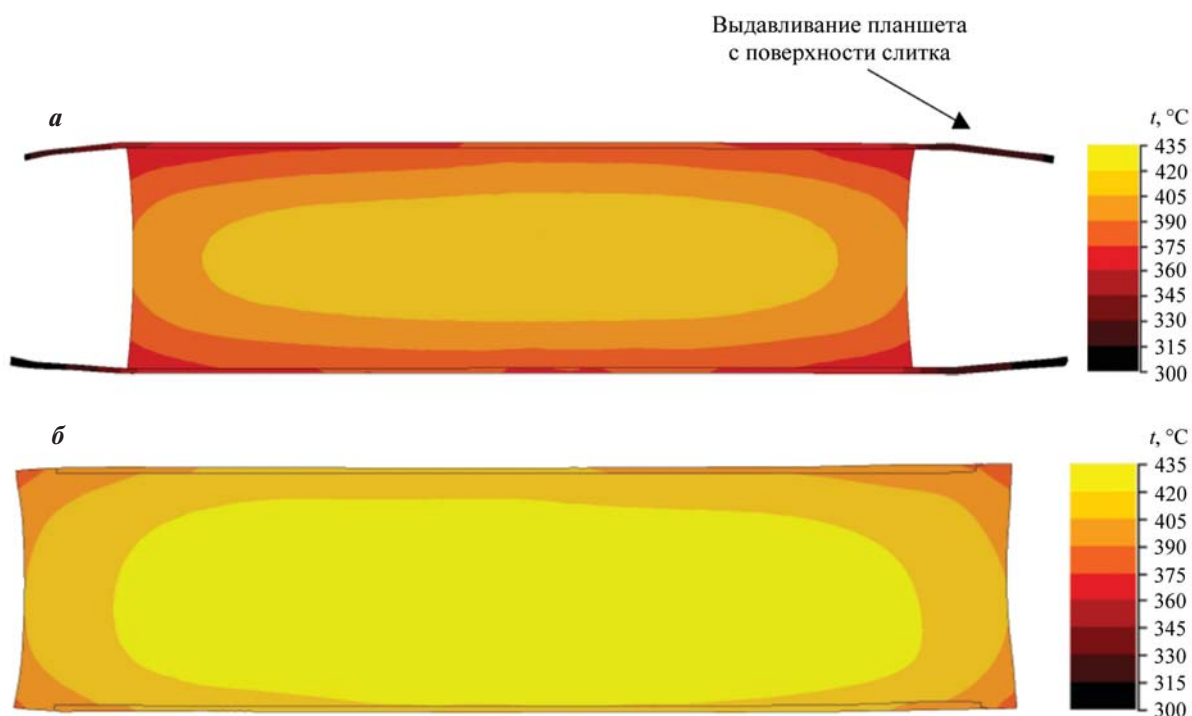


Рис. 6. Температурное поле после приварки планшето к слитку по традиционной (а) и новой (б) схемам

Fig. 6. emperature field after roll-bonding of cladding plates to the ingot for the traditional (а) and the new (б) schemes

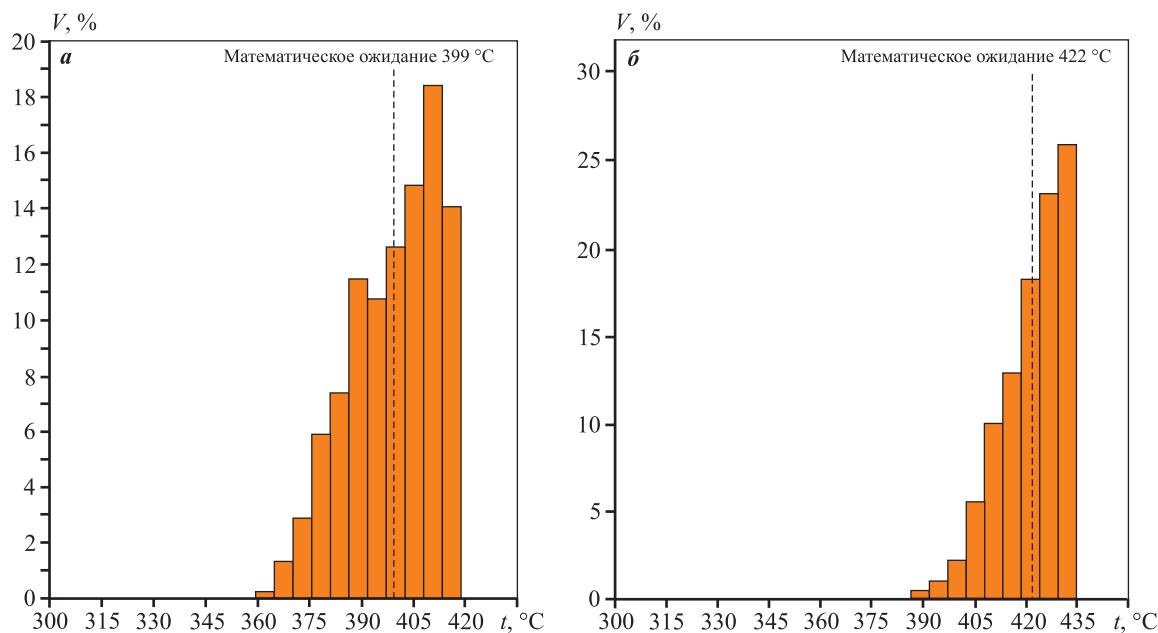


Рис. 7. Гистограммы распределения температуры по объему (V) слитка после приварки планшето́в по традиционной (*а*) и новой (*б*) схемам

Fig. 7. Temperature distribution histograms over the ingot volume (V) after roll-bonding according to the traditional (*a*) and the new (*b*) schemes

10 с среднее повышение температуры чернового раската составляет ≈ 23 °C.

Несмотря на то, что по традиционной схеме абсолютные обжатия за проход очень низкие и составляют всего 6 мм, тем не менее в ходе приварки планшето́в происходит их выдавливание с поверхности слитка (рис. 6, *а*). Это объясняется тем, что при прокатке деформация практически не проникает во внутренние слои более прочного слитка (сплав 1441), а локализуется в мягком плакирующем слое (алюминиевый сплав АЦпл).

Характер изменения толщины плакирующего слоя по проходам при прокатке по традиционной и новой схемам существенно различается (рис. 8). После прокатки за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм толщина плакирующего слоя снижается с начальных 15 мм до 8,8 мм. После прокатки по новой схеме за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм толщина плакирующего слоя снижается с начальных 10 мм до 9,3 мм. Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что новая схема плакирования позволяет предотвратить выдавливание планшето́в с поверхности слитка, в том числе при высоких абсолютных обжатиях. И благодаря этому возможно использование более тонких (уменьшенных на 1/3) планшето́в — толщиной 10 мм взамен традиционных 15 мм.

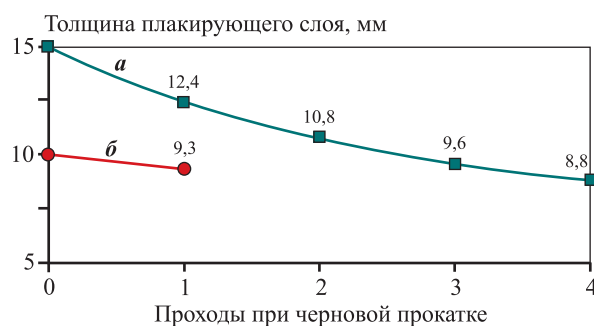


Рис. 8. Изменение толщины плакирующего слоя по проходам после прокатки по традиционной (*а*) и новой (*б*) схемам

Fig. 8. Variation in cladding-layer thickness after rolling according to the traditional (*a*) and the new (*b*) schemes

Общая начальная толщина слитка с планшетами (390 мм) и суммарное абсолютное уменьшение толщины (24 мм) в традиционной и новой схемах было одинаковым. Однако деформированное состояние основного металла (сплав 1441) и плакирующего слоя (чистый алюминий) в этих схемах прокатки существенно различается (рис. 9).

Для описания деформированного состояния металла использовали безразмерную интегральную характеристику $\bar{\epsilon}$, называемую накопленной пластической деформацией. В программе «QForm»

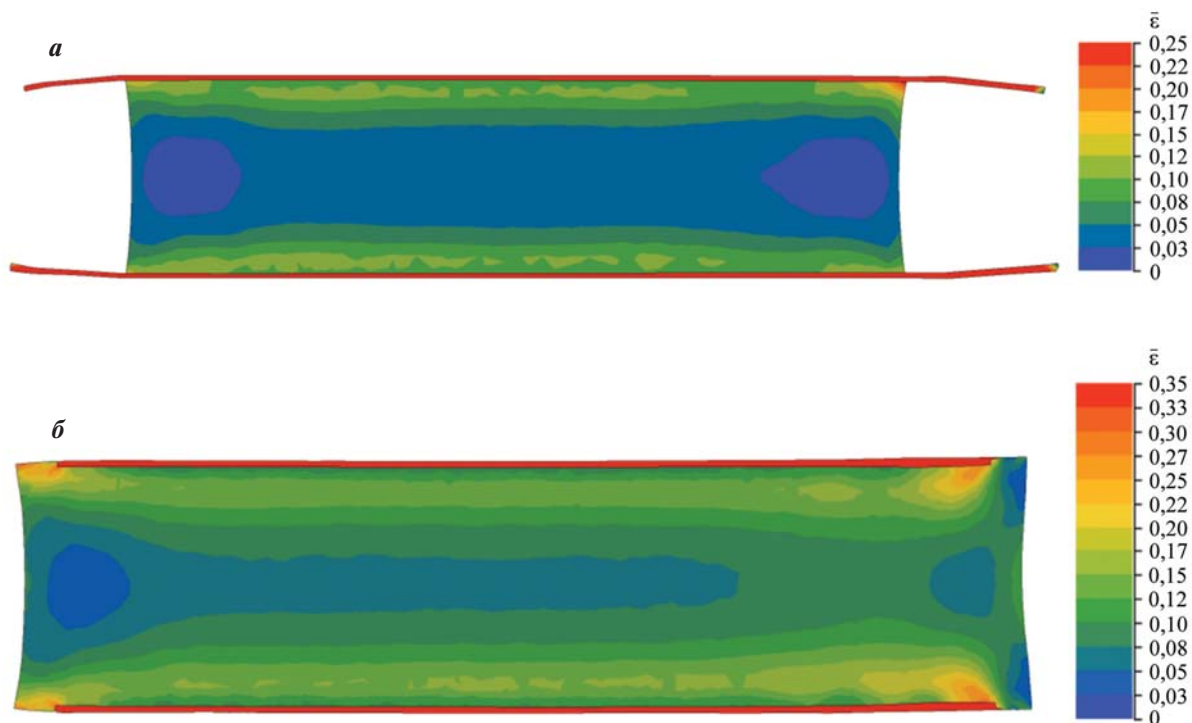


Рис. 9. Поле деформаций после прокатки по традиционной (а) и новой (б) схемам

Fig. 9. Strain field after rolling according to the traditional (a) and the new (b) schemes

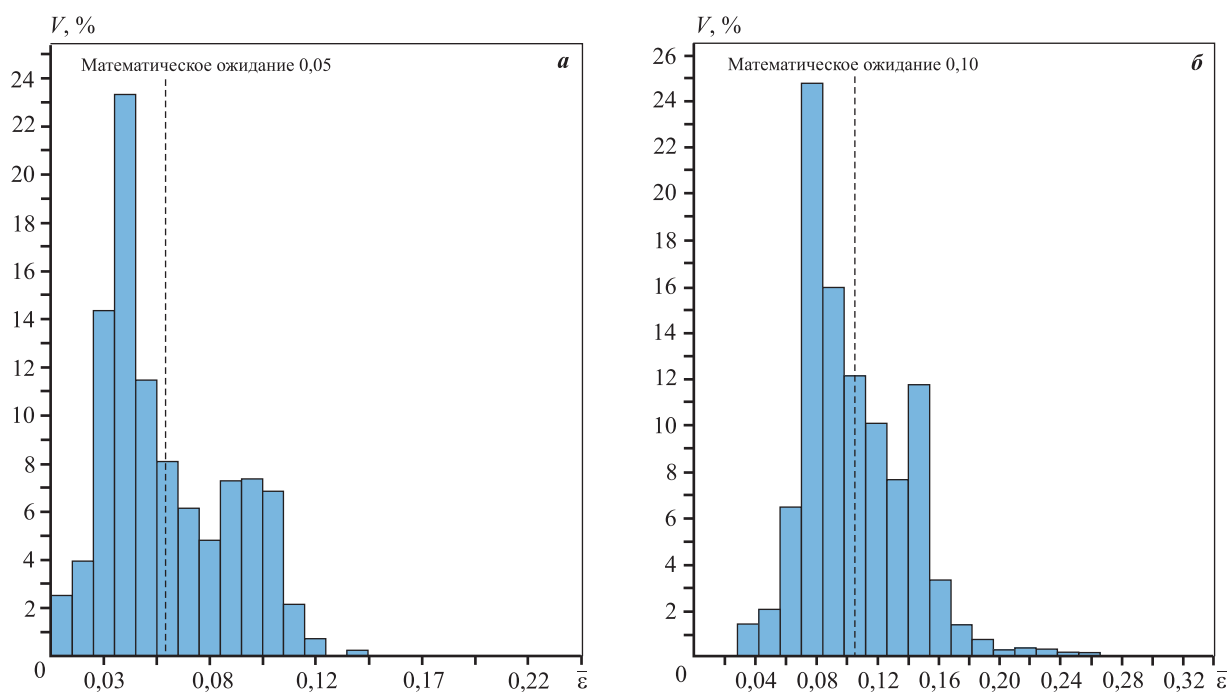


Рис. 10. Гистограммы распределения накопленной деформации ($\bar{\epsilon}$) по объему (V) слитка (основного металла) после прокатки по традиционной (а) и новой (б) схемам

Fig. 10. Distribution histograms of accumulated strain ($\bar{\epsilon}$) over the ingot volume (V) (base metal) after rolling according to the traditional (a) and the new (b) schemes

для определения $\bar{\epsilon}$ применялось численное интегрирование интенсивности скоростей деформации для каждого узла [28]:

$$\bar{\epsilon} = \sum_n \dot{\epsilon}^n \Delta b_n, \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}^n$ — интенсивность скорости деформации в узле, с^{-1} ; Δb_n — шаг расчета по времени, с ; n — номер шага расчета по времени.

Средняя накопленная деформация в слитке (математическое ожидание) после прокатки за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм составила 0,05 (рис. 10, а). Средняя накопленная деформация в слитке (математическое ожидание) после прокатки за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм оказалась в 2 раза более высокой и составила 0,10 (рис. 10, б).

В плакирующем слое, напротив, средняя накопленная деформация (математическое ожидание) после прокатки по традиционной схеме была выше и составила 0,98 (рис. 11, а) в сравнении с 0,66 после прокатки по новой схеме (рис. 11, б). Сравнивая гистограммы распределения деформаций на рис. 11, следует отметить более равномерный характер деформации плакирующего слоя при прокатке по новой схеме.

Для условий черновой клетки «Кварто 4600» стана горячей прокатки ПАО «КУМЗ» выполнена оценка энергосиловых параметров реализации процесса по различным схемам. При этом следует отметить, что при 2D-моделировании уширение не учитывалось, а общая ширина слитка с планшетами принималась постоянной и равной 3300 мм. На основе моделирования получено, что при прокатке по традиционной схеме за 4 прохода с обжатиями по 6 мм максимальные усилия изменяются от ≈ 21200 кН в 1-м проходе до ≈ 25100 кН в 4-м проходе (рис. 12). При прокатке по новой схеме за 1 проход с обжатием 24 мм максимальные усилия составляют ≈ 34000 кН (рис. 12).

Следует отметить, что расчетные значения усилий прокатки по обеим схемам не превышают допустимый уровень 80000 кН, соответствующий характеристикам черновой клетки «Кварто 4600» ПАО «КУМЗ».

Таким образом, конечно-элементный анализ показал технологическую возможность применения новой схемы плакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441. При этом при использовании плоских слитков сечением 390×1360 мм должна быть скорректирована схема фрезерования по широким граням (рис. 13).

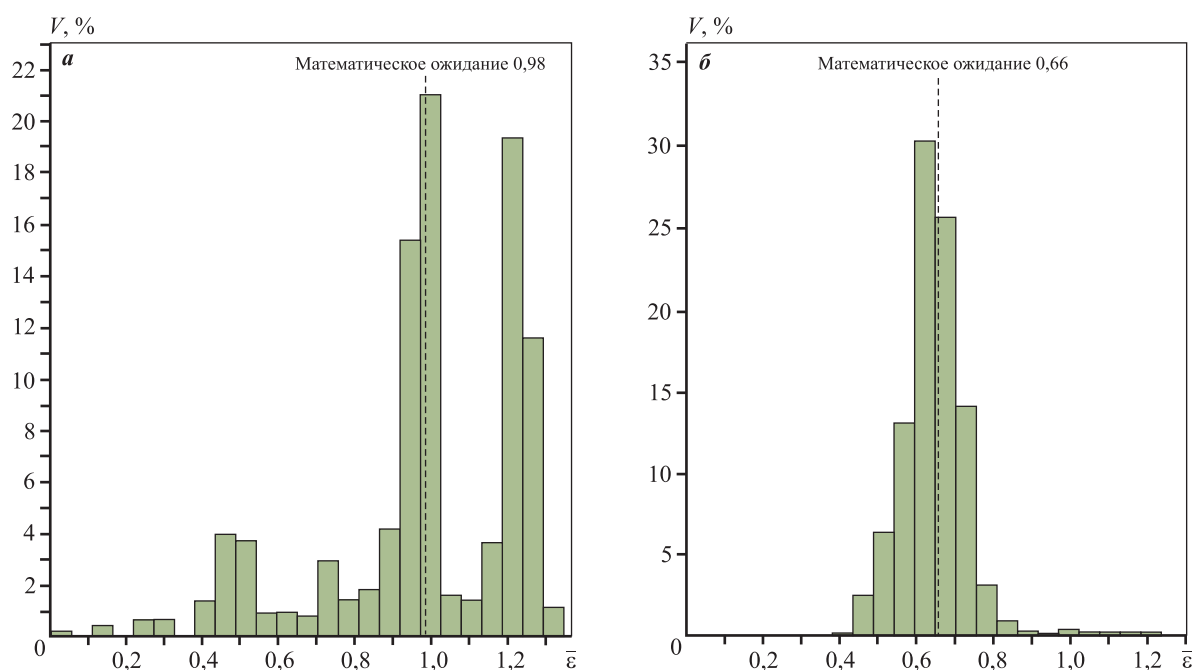


Рис. 11. Гистограммы распределения накопленной деформации (ϵ) по объему (V) плакирующего слоя после прокатки по традиционной (а) и новой (б) схемам

Fig. 11. Distribution histograms of accumulated strain over the cladding-layer volume (V) after rolling according to the traditional (а) and the new (б) schemes

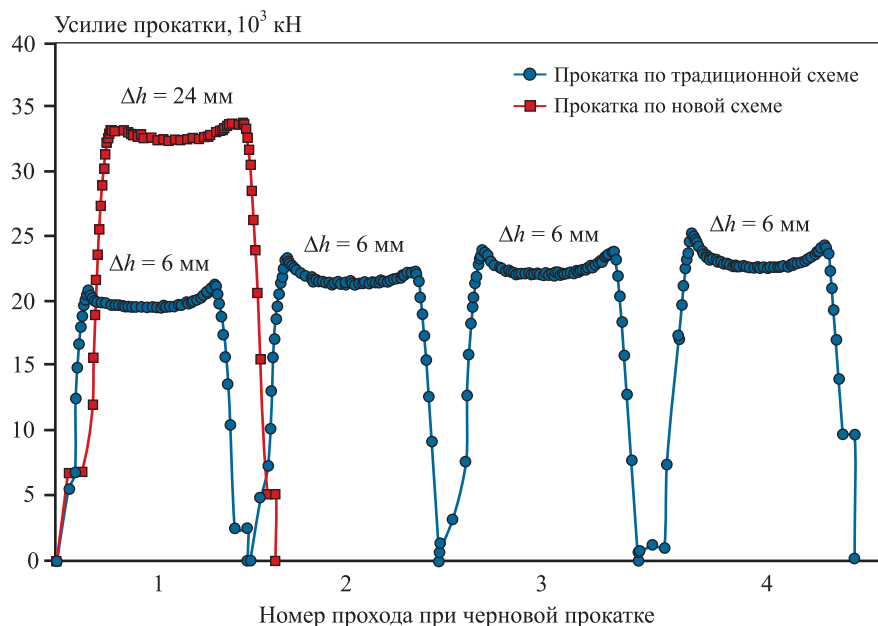


Рис. 12. Усилия при прокатке по традиционной и новой схемам

Fig. 12. Rolling forces in the traditional and new cladding schemes

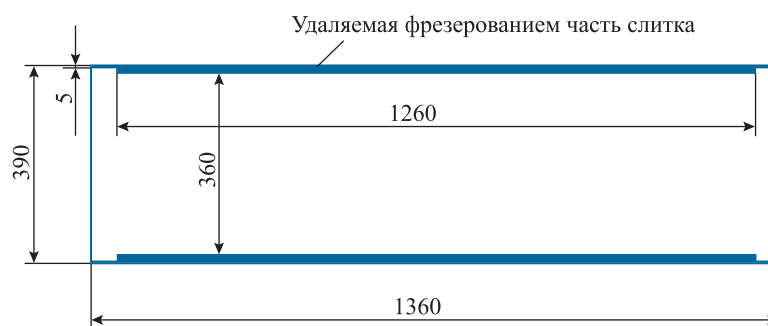


Рис. 13. Удаляемая фрезерованием часть слитка при реализации новой схемы плакирования

Fig. 13. Portion of the ingot surface to be removed by milling in the new cladding scheme

Выводы

1. Проведен конечно-элементный анализ технологической возможности применения новой схемы плакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441. Взамен традиционной схемы плакирования, предусматривающей приварку планшето́в к слитку за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм, предложено укладывать планшеты в специальные углубления, предварительно выполненные фрезерованием на верхней и нижней поверхностях слитка, а приварку осуществлять за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм.

2. Новая схема плакирования дает возможность существенно сократить общее количество проходов и междеформационных пауз при черновой

прокатке и улучшить за счет этого тепловое состояние раската перед чистовой прокаткой. Предполагается, что более высокая температура позволит снизить вероятность образования прикромочных трещин при чистовой прокатке. При сокращении 3 проходов и, соответственно, 3 междеформационных пауз по 10 с среднее повышение температуры составляет $\approx 23^\circ\text{C}$.

3. Новая схема плакирования предотвращает выдавливание планшето́в с поверхности слитка, в том числе при высоких абсолютных обжатиях. Благодаря этому возможно использование более тонких планшето́в — толщиной 10 мм взамен традиционных 15 мм.

4. Деформированное состояние основного металла (сплав 1441) и плакирующего слоя (алюми-

ниевый сплав АЦпл) в двух рассматриваемых схемах прокатки существенно различается. Средняя накопленная деформация в слитке (математическое ожидание) после прокатки за 4 прохода с абсолютными обжатиями по 6 мм составила 0,05, а после прокатки по новой схеме за 1 проход с абсолютным обжатием 24 мм оказалась в 2 раза более высокой — 0,10. При этом характер деформации плакирующего слоя при прокатке по новой схеме был более равномерным.

5. Результаты конечно-элементного моделирования могут быть использованы для совершенствования и оптимизации технологических режимов горячей прокатки плакированных листов и полос из алюминий-литиевого сплава 1441 в условиях ПАО «КУМЗ».

Список литературы/References

1. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Knyazev M.I. Al—Cu—Li and Al—Mg—Li alloys: Phase composition, texture, and anisotropy of mechanical properties (Review). *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016;2016:326—341. <https://doi.org/10.1134/S0036029516040042>
2. Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al—Li base products for aerospace and space applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012;43:3325—3337. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>
3. El-Aty A.A., Xu Y., Guo X., Zhang S.-H., Ma Y., Chen D. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al—Li alloys: A review. *Journal of Advanced Research*. 2018;10:49—67. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.12.004>
4. Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства слитков из алюминий-литиевого сплава 1441. *Труды ВИАМ*. 2019;3(75):44—52. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52>
Antipov V.V., Tkachenko E.A., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Ovsyannikov B.V. Influence of homogenization annealing modes on the structural-phase state and mechanical properties of ingots made of aluminum-lithium alloy 1441. *Trudy VIAM*. 2019;3(75):44—52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52>
5. Li H., Zou Z., Li J., Xu G., Zheng Z. Correlation between grain structures and tensile properties of Al—Li alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2023;33(12):3597—3611. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(23\)66357-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66357-5)
6. Овсянников Б.В. Новый алюминиево-литиевый сплав системы А—Cu—Mg—Li(Ag,Sc), предназначенный для изготовления тонких листов и профилей. *Цветные металлы*. 2014;(11):90—94.
Ovsyannikov B.V. New aluminum-lithium alloy of the Al—Cu—Mg—Li(Ag,Sc) system intended for the production of thin sheets and profiles. *Non-Ferrous Metals*. 2014;(11):90—94. (In Russ.).
7. Коковин П.Л., Мальцева Т.В., Овсянников Б.В. Освоение технологии литья крупногабаритных плоских слитков из алюминиево-литиевого сплава нового поколения. *Литейщик России*. 2023;(1):21—24.
Kokovin P.L., Maltseva T.V., Ovsyannikov B.V. Mastering the technology of casting large-sized flat ingots from a new generation aluminum-lithium alloy. *Liteishchik Rossii*. 2023;(1):21—24. (In Russ.).
8. Овсянников Б.В., Комаров С.Б. Развитие производства деформированных полуфабрикатов из алюминиево-литиевых сплавов в ОАО «КУМЗ». *Технология легких сплавов*. 2014;(1):97—103.
Ovsyannikov B.V., Komarov S.B. Development of production of deformed semi-finished products from aluminum-lithium alloys at JSC “KUMZ”. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2014;(1):97—103. (In Russ.).
9. Hajjioui E.A., Bouchaala K., Faqir M., Essadiqi E. A review of manufacturing processes, mechanical properties and precipitations for aluminum lithium alloys used in aeronautic applications. *Heliyon*. 2023;9(3):e12565. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12565>
10. Duan S.Y., Huang L.K., Yang S.H., Zhou Z., Song S.J., Yang X.B., Chen Y.Z., Li Y.J., Liu G., Liu F. Uncovering the origin of enhanced strengthening in Li-added Al—Cu—Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;827:142079. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142079>
11. Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al—Li base products for aerospace and space applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012;43(9):3325—3337. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>
12. First-principles insights into solute partition among various nano-phases in Al—Cu—Li—Mg alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024;34(6):1734—1744. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66503-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66503-9)
13. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций. *Технология легких сплавов*. 2007;(2):35—38.
Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Antipov V.V. Promising aluminum-lithium alloys for aircraft structures. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007;(2):35—38. (In Russ.).
14. Pantelakis S.G., Chamos A.N., Setsika D. Tolerable corrosion damage on aircraft aluminum structures:

- Local cladding patterns. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2012;58(1):55–64.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2012.02.008>
15. Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов. Под ред. Д.Р. Дэйвиса. Пер. с англ. Ю.И. Кузнецова, М.З. Локшина. М.: НП «АПРАЛ», 2016. 333 с.
16. Разинкин А.В., Мальцева Т.В., Овсянников Б.В., Левина А.В. Типовые дефекты в слитках и полуфабрикатах из алюминиевых деформируемых сплавов. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2023. 144 с.
17. Дегтярев А.В., Мальцева Т.В., Глинских П.И., Яковлев С.И. Технологические особенности производства плакированных листов из твердых алюминиевых сплавов в ОАО «КУМЗ». *Технология легких сплавов*. 2024;(2):40–46.
<https://doi.org/10.24412/0321-4664-2024-2-40-46>
Degtyarev A.V., Maltseva T.V., Glinskikh P.I., Yakovlev S.I. Technological features of production of clad sheets from hard aluminum alloys at JSC “KUMZ”. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2024;(2):40–46 (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/0321-4664-2024-2-40-46>
18. Орлов В.К., Дрозд В.Г., Сарафанов М.А. Особенности прокатки плит из алюминиевых сплавов. *Производство проката*. 2016;(4):11–16.
Orlov V.K., Drozd V.G., Sarafanov M.A., Specific features of aluminum alloy plates rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2016;(4):11–16. (In Russ.).
19. Яшин В.В., Беглов Э.Д., Арышенский Е.В., Латушкин И.А. Влияние толщины плакирующего слоя на распределение деформации по сечению слитка. В сб.: *IX Международный конгресс «Цветные металлы и минералы-2017»* (Красноярск, 11–15 сент. 2017). Красноярск, 2017. С. 735–744.
20. Torikai G., Yoshida Y., Asano M., Niikura A. Visualization of metal flow and adhering of aluminum alloy in three-layer clad rolling. *Procedia Manufacturing*. 2018;15: 144–151.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.188>
21. Пучкова Л.М. Особенности совместной прокатки высоких слоистых полос разнопрочных металлов. *Производство проката*. 2014;(9):3–10.
- Puchkova L.M. Features of joint rolling of high layered strips of different-strength metals. *Proizvodstvo prokata*. 2014;(9):3–10. (In Russ.).
22. Khan H.A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B. Roll bonding processes: State-of-the-art and future perspectives. *Metals*. 2021;11(9):1344.
<https://doi.org/10.3390/met11091344>
23. Zixuan L., Shahed R., Tao W., Han J., Shu X., Pater Z., Huang Q. Recent advances and trends in roll bonding process and bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023;36(4):36–74.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
24. 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;214(10):2146–2155.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014>
25. Салихьянов Д.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния на границе между материалами при прокатке слоистого композита. *Черные металлы*. 2023;(9):34–39.
Salikhyanov D.R. Investigation of the stress-strain state at the boundary between materials during rolling of a layered composite. *Ferrous Metals*. 2023;(9):34–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.09.06>
26. Koshmin A., Zinoviev A., Cherkasov S., Ali Alhaj A.M., Tsydenov K., Churyumov A. Finite element modeling and experimental verification of a new aluminum Al–2%Cu–2%Mn alloy hot cladding by flat rolling. *Metals*. 2024;14(8):852. <https://doi.org/10.3390/met14080852>
27. Zinyagin A.G., Borisenko N.R., Muntin A.V., Kryuchkova M.O. Features of finite element modeling for hot rolling process of clad sheets and strips. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;26(2):51–57.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2023.02.08>
28. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: Учеб. пос. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 384 с.

Информация об авторах

Александр Моисеевич Песин — д.т.н., профессор, гл. науч. сотрудник лаборатории «Механика градиентных материалов им. А.П. Жилиева» Магнитогорского государственного технического университета (МГТУ) им. Г.И. Носова.

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

E-mail: pesin@bk.ru

Александр Викторович Разинкин — к.т.н., директор по производству ПАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ПАО «КУМЗ»).

<https://orcid.org/0009-0006-2851-227X>

E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

Владимир Андреевич Замараев — инженер-технолог ПАО «КУМЗ».

<https://orcid.org/0009-0006-6743-9212>

E-mail: zamaraevva@kumw.ru

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

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

E-mail: pustovoitov_den@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr M. Pesin — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials n.a. A.P. Zhilyaev, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU).

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

E-mail: pesin@bk.ru

Aleksandr V. Razinkin — Cand. Sci. (Eng.), Director of Production, PJSC “Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant” (PJSC “KUMP”).

<https://orcid.org/0009-0006-2851-227X>

E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

Vladimir A. Zamaraev — Engineer, PJSC “KUMP”.

<https://orcid.org/0009-0006-6743-9212>

E-mail: zamaraevva@kumw.ru

Denis O. Pustovoitov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials n.a. A.P. Zhilyaev, NMSTU.

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

E-mail: pustovoitov_den@mail.ru

Вклад авторов

А.М. Песин — предложение новой схемы плакирования слитков из алюминий-литиевого сплава 1441, участие в обсуждении результатов.

А.В. Разинкин — определение цели работы, задание начальных и граничных условий для моделирования процесса плакирования слитков, участие в обсуждении результатов.

В.А. Замараев — приготовление образцов и получение экспериментальных данных о сопротивлении деформации сплава 1441, участие в обсуждении результатов.

Д.О. Пустовойтов — моделирование процесса плакирования слитков методом конечных элементов в программе «QForm», участие в обсуждении результатов, написание статьи.

Contribution of the authors

A.M. Pesin — proposed the new cladding scheme for aluminum–lithium alloy 1441 ingots, participated in the discussion of the results.

A.V. Razinkin — defined the aim of the study, specified the initial and boundary conditions for modeling the ingot cladding process, participated in the discussion of the results.

V.A. Zamaraev — prepared specimens and obtained experimental flow-stress data for alloy 1441, participated in the discussion of the results.

D.O. Pustovoitov — performed finite-element modeling of the ingot cladding process in QForm, participated in the discussion of the results, wrote the manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.09.2024, доработана 11.03.2025, подписана в печать 13.03.2025

The article was submitted 13.09.2024, revised 11.03.2025, accepted for publication 13.03.2025