

Схема получения композиционного материала на основе конструкционного алюминиевого сплава методом прямого прессования

Бушуева Наталья Игоревна^{*1}, аспирант,
инженер-исследователь научной лаборатории «Обработка металлов давлением»

Логинов Юрий Николаевич², доктор технических наук,
профессор кафедры обработки металлов давлением

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)

*E-mail: n.i.bushueva@urfu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>

Поступила в редакцию 30.06.2025

Пересмотрена 19.08.2025

Принята к публикации 01.09.2025

Аннотация: Исследование посвящено разработке технологии получения биметаллического прутка из высокопрочного сплава 7075 с плакирующим слоем из алюминия 1100, которая направлена на улучшение коррозионной стойкости при сохранении механических свойств. Особенностью предложенной технологии является применение дополнительной передней заготовки из чистого алюминия для процесса прямого прессования прутка из сплава 7075. Проведено численное моделирование процесса прямого прессования композитной заготовки в программном комплексе DEFORM с использованием метода конечных элементов. Проведен анализ влияния температурно-скоростных условий процесса на формирование плакирующего слоя. Для этого была выполнена постановка четырех задач с варьированием режимов нагрева заготовок и инструментов. Установлено, что получить тонкий плакирующий слой удастся при температуре нагрева основного сплава 7075, равной 360 °С, и температуре плакирующего слоя, равной 20 °С, что обеспечивает равномерное распределение покрытия по длине прутка без признаков расслоения. Анализ напряженно-деформированного состояния материалов в ходе прессования показал, что вариант использования дополнительной заготовки в холодном состоянии позволяет сохранять достаточную сплошность для формирования непрерывного плакирующего покрытия, в то время как нагрев до 300 °С и выше приводит к его разрыву из-за локализации деформации. Разработанный подход может быть использован для снижения себестоимости изделий за счет уменьшения расхода дорогостоящего сплава 7075 при одновременном повышении коррозионной стойкости за счет применения плакировки из чистого алюминия. Перспективы развития дальнейших исследований связаны с оптимизацией режимов прессования для различных типоразмеров прутков.

Ключевые слова: прессование; метод конечных элементов; композиционные материалы; алюминиевый сплав 7075; плакирующий слой.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников XII Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2025), Тольятти, 15–19 сентября 2025 года.

Для цитирования: Бушуева Н.И., Логинов Ю.Н. Схема получения композиционного материала на основе конструкционного алюминиевого сплава методом прямого прессования // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 3. С. 27–37. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-2.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к повышению топливной эффективности, снижению массы конструкций и минимизации вредных выбросов углекислого газа обосновывают поиск и разработку перспективных легких материалов и технологий их обработки. В данном аспекте алюминий и его сплавы представляют интерес как перспективные конструкционные материалы, что обусловлено оптимальным сочетанием их физико-механических характеристик [1; 2]. Однако для разработки новых видов продукции, работающих, например, в экстремальных условиях, необходимо точное прогнозирование их поведения на различных стадиях изготовления (в частности, в ходе обработки давлением).

Актуальность прогнозирования свойств на этапе проектирования технологий изготовления изделий также обуславливается продолжающимся ростом цен на

металлы. По источникам зарубежной базы данных Fastmarkets, индикаторы которой используются в контрактах, биржевой торговле и финансовых расчетах, стоимость литого слитка из сплавов серии 5000 и 6000 варьируется в диапазоне \$ 2,5–4 за кг. Для сплавов серии 7000 цена оказывается значительно выше, поскольку эти сплавы относятся к классу высокопрочных и труднодеформируемых. Несмотря на высокие прочностные характеристики сплава 7075, его широкое применение в аэрокосмической отрасли сдерживается необходимостью дальнейшего улучшения комплекса эксплуатационных свойств, в частности коррозионной стойкости и усталостной долговечности.

Производители заинтересованы в сокращении расходов, особенно в сферах производства изделий из дорогостоящих металлов, где даже небольшая экономия на тонне материала дает значительную финансовую

выгоду. Для изготовления сплавов 6061, 6065 и 7075 в качестве сырья традиционно используется первичный алюминий с минимальным содержанием примесей. В текущих реалиях существует проблема поставки такого вида сырья из-за геополитической обстановки в мире. В частности, речь идет о вводе новых повышенных тарифов таможенных пошлин на товары. Производители металлопродукции выражают обеспокоенность, поскольку теперь им придется платить значительно более высокую сумму за высокочистый материал. Независимо от того, является ли предприятие производителем, например, обрабатывающего инструмента или листового проката, это негативно сказывается на всех видах производства, поскольку таможенные тарифы в конечном итоге включаются в стоимость металла. Для случая, рассматриваемого в данной работе, в стоимость изделия входит как изготовление литого металла, так и дальнейшее производство прессованного полуфабриката, что оказывает значительное влияние на конечную стоимость продукции. К тому же динамика цен на алюминиевую продукцию продолжает сохранять растущий характер. По данным за 2024 г., цены на сплав 7075 стабильно превышают \$ 20 за кг¹, что диктуется в том числе высоким спросом в аэрокосмическом секторе. Одним из решений, направленных на улучшение производительности при сохранении качества продукции, может быть применение композиционных заготовок, в которых функционально нагруженные участки содержат дорогостоящие металлы, а остальные части изготовлены из более дешевых алюминиевых сплавов или самого алюминия.

Хотя экспериментальные методы остаются основным инструментом исследования, численное моделирование предоставляет значительные преимущества, включая экономию времени и средств, а также более глубокий анализ по сравнению с экспериментальными подходами [3]. Это обуславливает актуальность изучения свойств дорогостоящих сплавов, таких как сплавы серии 7000.

Недавние исследования коррозионного поведения алюминиевого сплава 7075 выявили его восприимчивость к различным агрессивным средам: в растворах NaCl наблюдается интенсивная межкристаллитная коррозия с образованием шероховатостей поверхности и охрупчиванием зерен на глубину до 150 мкм [4]. Скорость коррозии минимальна при нейтральном параметре pH благодаря формированию защитного оксидного слоя, тогда как кислые и щелочные среды ускоряют процесс [5]. Биологические факторы также оказывают существенное влияние. Например, грибок *Aspergillus niger* увеличивает скорость равномерной и локальной коррозии в 3,7 и 22,4 раза соответственно по сравнению с абиотическими условиями [6], а сульфатовосстанавливающие бактерии в морской воде ускоряют коррозию, полностью разрушая защитную пленку через 14 дней [7]. Эти данные демонстрируют сложное взаимодействие факторов окружающей среды, влияющих на коррозионное поведение сплава 7075, и подчеркивают необходимость разработки специализированных методов защиты для различных условий эксплуатации.

Из-за высоких показателей прочности сплавов серии 7000, обуславливающих их затрудненную деформацию в ходе обработки давлением [8], традиционный

метод прессования, как правило, ограничен скоростью 1–2 м/мин из-за риска возникновения поверхностных дефектов [9].

В зарубежной практике разработка новых способов прессования имеет высокую популярность. Так, например, учеными из Тихоокеанской Северо-Западной национальной лаборатории (PNNL, США) была создана технология Shear Assisted Processing and Extrusion (ShAPE), позволяющая достигать скорости прессования 12,2 м/мин для сплава 7075 без образования разрывов поверхности, обеспечивая после термической обработки T6 высокие показатели механических свойств [10].

Учитывая выявленную высокую чувствительность сплава 7075 к различным видам коррозии, особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку композитных модификаций этого материала. Например, известны технологии получения композитов из алюминиевых сплавов с помощью прокатки. Такой способ является более экономичной альтернативой нанесению защитных покрытий химическими или гальваническими методами. В [11; 12] разработана математическая модель эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия (Al 99,5 %) и сплава 7075 в режиме интенсивной пластической деформации.

Исследования показали, что армирование сплава 7075 керамическими частицами, такими как SiC и Al₂O₃, значительно повышает коррозионную стойкость в различных средах [13]. Метод литья с перемешиванием подтвердил свою эффективность для изготовления металломатричных композитов на основе сплава 7075 с керамическими наночастицами, обеспечивая значительное улучшение механических свойств [14], что особенно актуально в свете растущего спроса аэрокосмической отрасли на легкие материалы.

В производственной практике принято применять плакировку чистым алюминием для снижения вероятности образования трещин и повышения коррозионной стойкости. Известны следующие способы нанесения плакировки на алюминиевые сплавы: совместная горячая прокатка, если речь идет о листовом продукте, сварка трением с перемешиванием для аэрокосмических сплавов [15], прокатка алюминиевого порошка на подложку [16], а также метод, предполагающий обжатие цилиндра из алюминиевого сплава в полую оболочку из чистого алюминия с последующей ковкой, прокаткой и холодным волочением [17]. При этом процесс плакировки позволяет получить композит с улучшенными характеристиками. Например, проволока с плакировкой демонстрирует более высокую электропроводность по сравнению с расчетными значениями при сохранении прочностных свойств.

Цель исследования – разработка способа получения композитного прутка на основе сплава 7075 с плакирующим слоем из алюминия марки 1100 методом прямого прессования для повышения устойчивости к коррозии.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для прогнозирования возможности реализации технологии получения прутка из сплава 7075 с плакирующим слоем из чистого алюминия марки 1100 решалась задача численного моделирования с использованием

¹ *Aluminium reliant industries not spared from the impact of tariffs // Fastmarkets. URL: <https://www.fastmarkets.com/insights/us-aluminium-tariffs-impact-prices/>.*

специализированного программного комплекса, основанного на методе конечных элементов DEFORM-2D.

Использован пластический тип деформируемого материала. Количество элементов сетки для основной заготовки – 12 000; для дополнительной – 1 700 (размер сетки подобран с учетом размера элемента в соответствии с объемом заготовки). На рис. 1 представлена CAD-модель исходной геометрии в 3D-визуализации. Исходный диаметр заготовки равен 750 мм. Конечный диаметр прутка – 360 мм. Диаметр контейнера – 800 мм. Угол конусности матрицы – 75°. Размеры и другие параметры выбраны из практики работы одного из предприятий.

На рис. 2 представлены кривые упрочнения материалов для рассматриваемых интервалов температур.

Был назначен показатель трения по Зибелю, равный 0,5 на контакте заготовки с матрицей, и 1 – для остальных контактных пар². Скорость прессования составляла 4,27 мм/с. При решении задач в DEFORM был включен параметр учета теплообмена материалов заготовок с инструментом. Теплопроводность в соответствии с данными из библиотеки материалов DEFORM для рассматриваемых материалов составляла 180 Вт/(м·°C). Теплоемкость материала – 2,43 МДж/(м³·°C).

Согласно информации базы данных MatWeb, чистый алюминий обладает следующими термодинамическими параметрами: удельная теплота плавления $q_f=387$ кДж/кг, удельная теплоемкость $c=900$ Дж/(кг·°C), температура плавления $t_m=660$ °C.

Для каждой серии сплавов характерны определенные диапазоны термодинамических свойств, что обусловлено непостоянством химического состава даже в пределах одной марки. Например, сплавы серии 1000 содержат свыше 99 % алюминия, но из-за наличия микропримесей их фазовые диаграммы могут демонстрировать не только линию ликвидус, но и линию солидус, что в некоторых случаях приводит к снижению температуры плавления по сравнению с чистым алюминием. Наименьшие значения температуры плавления характерны для сплавов серии 7000, что объясняется присутствием в их составе легкоплавкого цинка.

Для упрощения инженерных расчетов в таблице 1 приведены средние значения удельной теплоемкости c_m и температуры плавления t_m [18]. Дополнительно вычислен параметр Δ (%), характеризующий отклонение средней температуры плавления сплава от температуры плавления алюминия серии 1000. Наибольшее расхождение (до 13 %) наблюдается у сплавов серии 7000. Этот показатель позволяет оценить потенциальную погрешность при расчете энергозатрат, если в качестве основы принимаются параметры чистого алюминия, а фактически обрабатывается сплав.

Учет специфики термодинамических свойств алюминиевых сплавов различных серий является критически важным для точного моделирования технологических процессов и минимизации ошибок в инженерных расчетах.

Для реализации технологии нанесения плакировки в процессе прессования прутка с использованием дополнительной передней заготовки из чистого алюминия необходимо подобрать корректные граничные условия процесса. В частности, сложность представляет подбор тем-

пературных режимов, поскольку чистый алюминий, очевидно, обладает большей пластичностью, чем сплав 7075.

Было выбрано несколько вариаций температурных режимов процесса (таблица 2). Выбор температурных режимов для сплава 7075 осуществлялся в соответствии с рекомендациями из пособия³, где отмечается, что оптимальным температурным режимом является интервал 360–430 °C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе моделирования для температурных режимов № 1–3 (таблица 2) были получены неудачные результаты. При выходе изделия из калибрующей зоны матрицы наблюдается отрыв материала плакировки от основной заготовки. Для режимов № 1 и 3 наблюдается аналогичный эффект отслоения плакировки.

При температурном режиме № 2 материал плакировки интенсивно разогревается в очаге деформации – более чем на 100 °C от изначальной температуры, равной 300 °C. Скорость разогрева материала дополнительной заготовки не позволяет достичь желаемого результата. При этом понижать температуру нагрева инструментов нерационально, поскольку сплав 7075 является труднодеформируемым и такое решение, очевидно, приведет к негативному результату.

Исходя из результатов, представленных на рис. 3 и 4, было принято решение осуществить попытку прессования без нагрева дополнительной заготовки (таблица 2, вариант № 4). Для этого варианта температурного режима удалось получить прутки с тонким равномерным плакирующим слоем. При этом отслоения материала дополнительной заготовки не происходит.

Как можно видеть из рис. 5, плакирующий слой из чистого алюминия наносится на прутки на протяжении всего процесса прессования. На установившейся стадии процесса прессования толщина плакирующего слоя равна 5 мм, что составляет 1,38 % от диаметра полученного изделия. Скорость истечения металла плакировки сдерживается за счет наличия больших сил трения на контакте с контейнером, характерных для процесса прямого прессования, что также проиллюстрировано на рис. 6.

Из рис. 7 видно, что при отсутствии нагрева дополнительной заготовки теплопередача происходит с умеренной интенсивностью. Напряжения течения материала дополнительной заготовки незначительно ниже (рис. 2 б), чем у основного металла (рис. 2 а), что предотвращает его отрыв от основной заготовки в процессе прессования.

Исходя из распределения скорости деформации (рис. 8), можно сделать вывод о том, что наибольшее значение скорости деформации характерно для зоны, прилегающей к калибрующему пояску матрицы. Здесь скорость деформации достигает значения $\xi=0,5$ с⁻¹.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результат прессования композитного прутка, представленный на рис. 3, был получен для первых трех вариантов постановки задачи (таблица 2, № 1–3). Для варианта № 2 была выбрана максимально возможная температура прессования сплава 7075 – 470 °C. Такой

² Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 156 с.

³ См. 2.

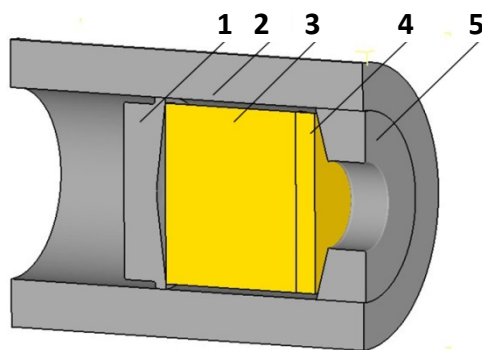
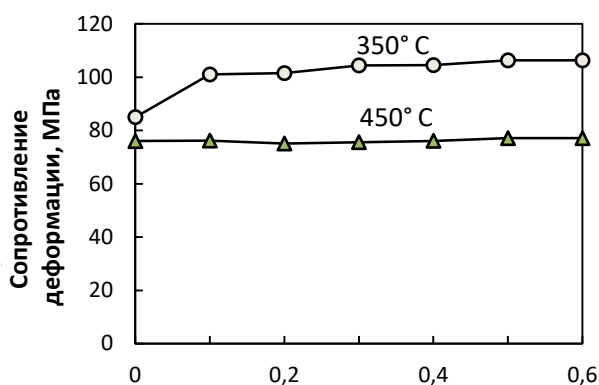


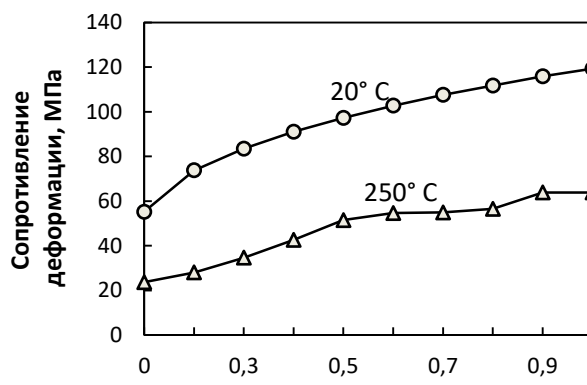
Рис. 1. Сборка для постановки задачи в 3D-визуализации: 1 – пресс-шайба; 2 – контейнер; 3 – основная заготовка; 4 – дополнительная заготовка; 5 – матрица

Fig. 1. Assembly for setting the task in 3D visualization: 1 – pressing disk; 2 – container; 3 – main workpiece; 4 – additional workpiece; 5 – matrix extrusion die



Истинная деформация

a



Истинная деформация

b

Рис. 2. Кривые упрочнения для материалов при скорости деформации $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ c}^{-1}$:

a – для сплава 7075; *b* – для алюминия 1100

Fig. 2. Hardening curves for materials at a strain rate of $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ c}^{-1}$:

a – for 7075 alloy; *b* – for 1100 aluminum

Таблица 1. Теплотехнические свойства сплавов алюминия по сериям [Привод. по: 18, с. 68]

Table 1. Thermal properties of aluminum alloys by series [Reference: 18, p. 68]

Серия сплава	Система	c , Дж/(кг·град)	c_m , Дж/(кг·град)	t_m , °C	t_{mm} , °C	Δ , %
1000	Al	900–904	902	643–660	652	0
7000	Al–Zn–Mg	856–960	858	476–657	567	–13

выбор обусловлен существованием работ, где описан процесс прессования прутков из сплава 7075 при температуре нагрева 450 °C и выше [19]. При выборе такого температурного режима был сделан расчет на возможное захлаживание металла основной заготовки в процессе прессования. Температура нагрева дополнительной заготовки из сплава 1100 была назначена рав-

ной 300 °C с целью попытаться создать условия для более интенсивного деформирования сплава 7075.

В результате проведенных расчетов установлены оптимальные параметры процесса: температура нагрева основного сплава 7075 равна 360 °C, температура плакирующего слоя – 20 °C, температура нагрева инструментов – 430 °C (таблица 2, № 4).

Таблица 2. Температурные режимы для постановки задач
Table 2. Temperature modes for setting problems

№	Температура нагрева основной заготовки (AL7075), °C	Температура нагрева дополнительной заготовки (AL1100), °C	Температура нагрева инструментов, °C
1	450	430	360
2	470	300	430
3	430	430	430
4	360	20	430

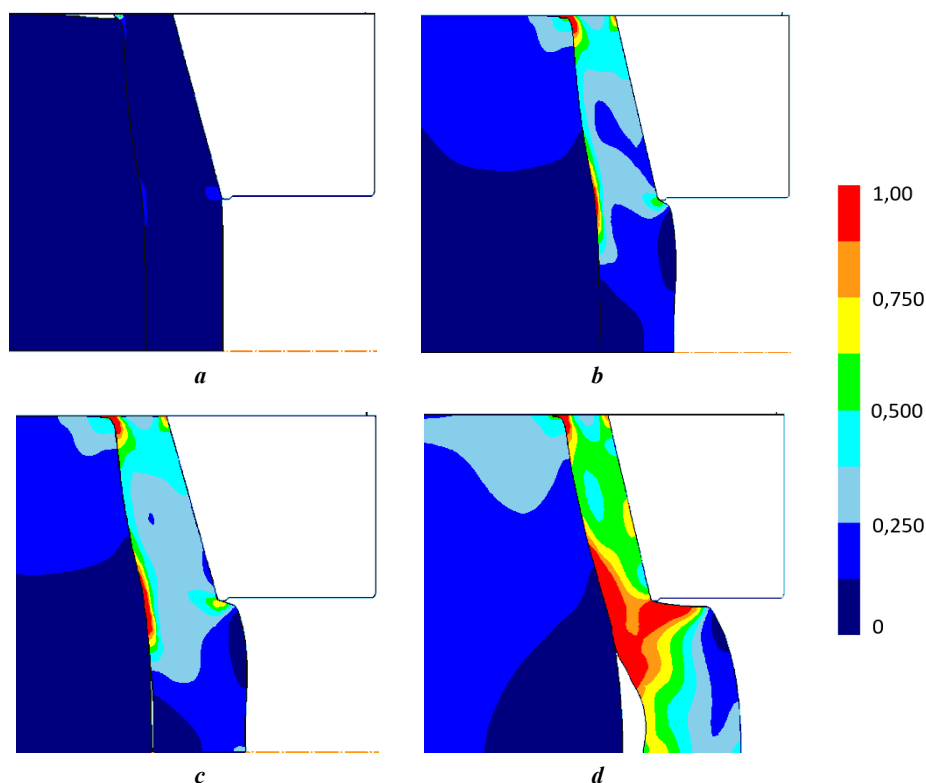


Рис. 3. Ход процесса прессования с отображением цветовых уровней эффективной деформации для температурного режима № 2:

a – стадия распрессовки; *b* – начало прессования; *c* – начало отслоения плакировки; *d* – развитие хода отслоения плакировки

Fig. 3. The course of the extrusion process with the display of effective strain color levels for temperature mode No. 2: *a* – the stage of pressing out; *b* – the beginning of extrusion; *c* – the beginning of cladding peeling off; *d* – the development of the process of cladding peeling off

Разница температур нагрева заготовок создает оптимальный баланс пластичности компонентов, что является критически важным фактором. Нагрев инструмента до 430 °C поддерживает пластичность сплава 7075, но, если сплав 1100 начать нагревать, он прилипает к инструменту, поэтому подходящий результат обеспечивает только комбинация холодного сплава 1100 и горячего 7075.

Дополнительным преимуществом предложенной технологии может являться возможность использования

технологических отходов в виде пресс-остатков в качестве передней заготовки, что повышает ресурсоэффективность производства. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация технологии для прутков различного диаметра. Такой материал мог бы найти применение в аэрокосмической отрасли, где сочетание высокой прочности и коррозионной стойкости является критически важным требованием к конструкционным материалам.

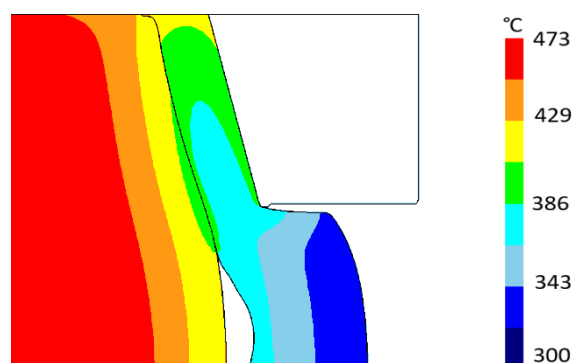


Рис. 4. Температурное поле на этапе отслоения дополнительной заготовки для варианта прессования № 2, °C

Fig. 4. Temperature field at the stage of additional workpiece peeling off for the extrusion option No. 2, °C



Рис. 5. График зависимости толщины плакирующего слоя h от координаты по длине отпрессованной части изделия x

Fig. 5. Graph of the dependence of the cladding layer thickness h on the coordinate along the length of the extruded part of the product x

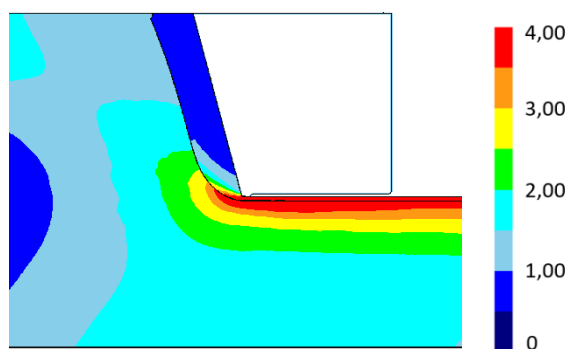


Рис. 6. Цветовые уровни эффективной деформации для температурного режима № 4

Fig. 6. The effective strain color levels for the temperature mode No. 4

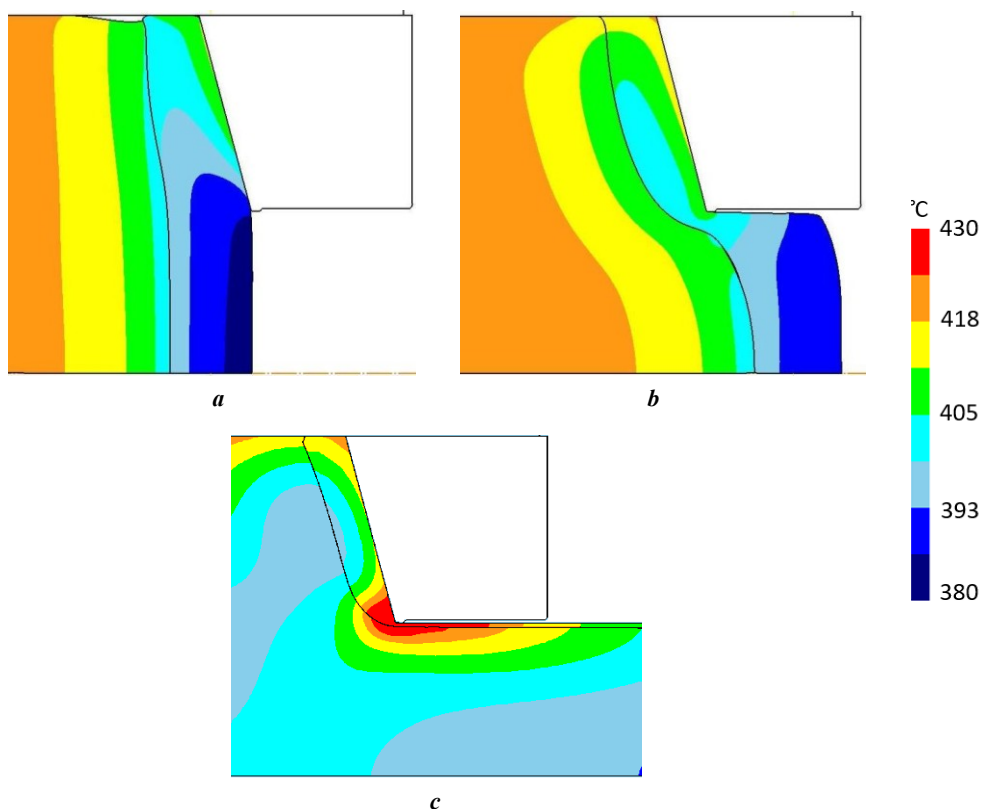


Рис. 7. Температурное поле по ходу процесса прессования, °C:
a – стадия распрессовки; *b* – начало прессования; *c* – стационарная стадия
Fig. 7. Temperature field during the extrusion process, °C:
a – pressing out stage; *b* – beginning of extrusion; *c* – steady state stage

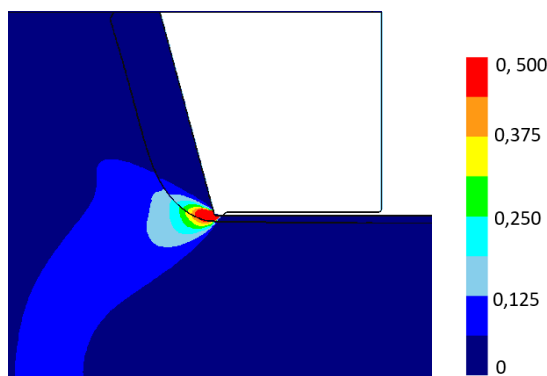


Рис. 8. Цветовые уровни эффективной скорости деформации для температурного режима № 4, s^{-1}
Fig. 8. Color levels of effective strain rate for the temperature mode No. 4, s^{-1}

С целью верификации полученных результатов были рассмотрены другие работы, связанные с данной тематикой. В работе [20] рассматривается схема прессования прутка из алюминиевого сплава серии 6000 с применением дополнительной задней заготовки из менее дорогостоящего сплава с целью уменьшения потерь основного металла. Было исследовано три температурных режима реализации процесса прессования. Выявлено, что оптимальным является режим, где отсутствует подогрев пресс-шайбы и дополнительной заготовки. Это подтверждает результат, полученный в ходе теку-

щего исследования, где было выявлено, что реализовать технологию прессования композитного прутка удастся при отсутствии нагрева дополнительной заготовки.

В работе [21] при реализации схожей технологии получения композитного прутка из алюминиевых сплавов был выбран режим горячего прессования, где обе заготовки нагреваются до температуры 380 °C. Предложенная в этой работе технология подразумевает возможность использования в качестве дополнительной передней заготовки технологических отходов в виде пресс-остатков, что призвано обеспечить снижение потерь основного металла.

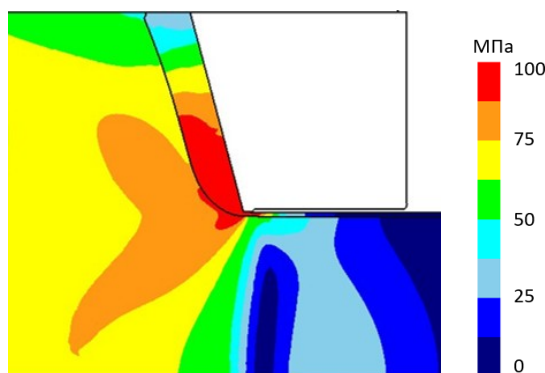


Рис. 9. Цветовые уровни эффективных напряжений для температурного режима № 4, $\sigma_{\text{effective}}$, МПа
Fig. 9. Color levels of effective stresses for the temperature mode No. 4, $\sigma_{\text{effective}}$, MPa

Для прогнозирования возможности реализации технологии было выполнено численное моделирование процесса прямого и обратного прессования крупногабаритного прутка из алюминиевого сплава 6061 с применением дополнительной заготовки из более мягкого алюминиевого сплава. С использованием функции трассирующих точек выполнено сравнительное исследование скоростей течения материалов основной и дополнительной заготовок в процессе пластического формоизменения. Для обоих вариантов прессования построены графические зависимости толщины плакирующего слоя от длины отпрессованной части прутка. Установлено, что для решения задачи получения биметаллического прутка предпочтительным является метод прямого прессования. Проведено экспериментальное моделирование процесса прессования на модельных материалах. В результате получен биметаллический прутки с тонким плакирующим слоем.

При этом был выявлен дефект локального отслоения материала дополнительной заготовки после выхода из калибрующего пояска матрицы. В проведенном в рамках данной работы исследовании эффекта отслоения материала плакирующего слоя не наблюдается.

Важно отметить, что ключевой задачей исследования являлась выработка рекомендаций для оценки условий проведения эксперимента с целью экономии ресурсов, поскольку эксперимент на промышленном оборудовании, для которого производился расчет, оказался бы слишком дорогим.

Подтверждение верифицируемости полученных данных обосновывается в литературе. Например, в справочном пособии⁴ представлены кривые упрочнения для чистого алюминия при различных видах испытаний. В зависимости от состояния материала, для которого приведены кривые, значения сопротивления деформации варьируются в интервале 50–100 МПа. В ходе решения задачи в DEFORM было получено распределение эффективных напряжений, представленное на рис. 9.

Как видно из рисунка, какой-либо аномальный рост напряжений в очаге деформации не наблюдается, следо-

вательно, можно сделать вывод о том, что экстраполяция значений напряжений для рассматриваемых материалов (рис. 2) в ходе решения задачи происходит корректно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование позволило спрогнозировать возможность реализации разработанной технологии получения биметаллических прутков из высокопрочного сплава 7075 с плакирующим слоем из алюминия 1100 методом прямого прессования с применением дополнительной передней заготовки. Был выявлен оптимальный температурный режим прессования, при котором удастся осуществить получение прутка с тонким равномерным плакирующим слоем, составляющим 1,38 % от диаметра конечного прутка. Для этого режима температура нагрева сплава 7075 составляет 360 °С, а температура чистого алюминия – 20 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елагин В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 9. С. 3–11. EDN: [KVXJZB](#).
2. Parveez B., Kittur M.I., Badruddin I.A., Kamangar S., Hussien M., Umarfarooq M.A. Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review // Polymers. 2022. Vol. 14. № 22. Article number 5007. DOI: [10.3390/polym14225007](#).
3. Lei Kong. Computer Simulation Study on the Relationship between the Tensile Fracture Behavior of Aircraft Composites and the Fiber Strength Distribution // 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). 2022. P. 664–667. DOI: [10.1109/ICICCS53718.2022.9788372](#).
4. Dzakyprasetyo R.Q., Anawati A. Corrosion Behaviour of Aluminum Alloy AA7075-T651 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 541. Article number 012006. DOI: [10.1088/1757-899X/541/1/012006](#).
5. Raza S.A., Karim M.R.A., Shehbaz T., Taimoor A.A., Ali R., Khan M.I. Effect of pH and Concentration on Electrochemical Corrosion Behavior of Aluminum Al-7075 T6

⁴ Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 344 с.

- Alloy in NaCl Aqueous Environment // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 2022. Vol. 13. № 2. P. 213–226. DOI: [10.33961/jecst.2020.01214](https://doi.org/10.33961/jecst.2020.01214).
6. Wang Junlei, Xiong Fuping, Liu Hongwei, Zhang Tiansui, Li Yanyan, Li Chenjing, Xia Wu, Wang Haitao, Liu Hongfang. Study of the corrosion behavior of *Aspergillus niger* on 7075-T6 aluminum alloy in a high salinity environment // *Bioelectrochemistry*. 2019. Vol. 129. P. 10–17. DOI: [10.1016/j.bioelechem.2019.04.020](https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.020).
 7. Feng Zhiyuan, Li Jiao, Ma Jincai, Su Yongjin, Zheng Xiaoyuan, Mao Yu, Zhao Zilong. EBSD Characterization of 7075 Aluminum Alloy and Its Corrosion Behaviors in SRB Marine Environment // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. № 6. Article number 740. DOI: [10.3390/jmse10060740](https://doi.org/10.3390/jmse10060740).
 8. Rajamuthamilselvan M., Ramanathan S. Hot deformation behaviour of 7075 alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. № 3. P. 948–952. DOI: [10.1016/j.jallcom.2010.09.139](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.139).
 9. Whalen S., Reza-E-Rabby Md., Wang Tianhao, Ma Xiaplong, Roosendaal T., Herling D., Overman N., Taysom B. Shear Assisted Processing and Extrusion of Aluminum Alloy 7075 Tubing at High Speed // *The Minerals, Metals & Materials Series*. 2021. Vol. 6. P. 277–280. DOI: [10.1007/978-3-030-65396-5_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65396-5_41).
 10. Whalen S., Olsza M., Reza-E-Rabby Md., Roosendaal T., Wang Tianhao, Herling D., Taysom B.S., Suffield S., Overman N. High speed manufacturing of aluminum alloy 7075 tubing by Shear Assisted Processing and Extrusion (ShAPE) // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 71. P. 699–710. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.003).
 11. Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Свердлик М.К. Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 4. С. 81–87. EDN: [VAUJJP](https://elibrary.ru/VAUJJP).
 12. Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Вафин Р.К. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 4. С. 75–81. EDN: [VAUJJE](https://elibrary.ru/VAUJJE).
 13. Karthikraja M., Ramanathan K., Loganathan K.T., Selvaraj S. Corrosion behaviour of SiC and Al₂O₃ reinforced Al 7075 hybrid aluminium matrix composites by weight loss and electrochemical methods // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2023. Vol. 100. № 5. Article number 101002. DOI: [10.1016/j.jics.2023.101002](https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.101002).
 14. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloys and metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. Article number 101372. DOI: [10.1016/j.rineng.2023.101372](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372).
 15. Stelt A.A., Bor T.C., Geijselaers H.J.M., Akkerman R., Boogaard A.H. Cladding of Advanced Al Alloys Employing Friction Stir Welding // *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 554–557. P. 1014–1021. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1014](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1014).
 16. Otsubo F., Era H. Cladding of Al Layer onto Mild Steel Substrate Using Al Powder and Its Structure and Properties // *Materials Transactions*. 2018. Vol. 59. № 10. P. 1585–1590. DOI: [10.2320/matertrans.P-M2018835](https://doi.org/10.2320/matertrans.P-M2018835).
 17. Hou Jiapeng, Chen Qingyin, Wang Qiang, Yu Hongyun, Zhang Zhenjun, Li Rui, Li Xiaowu, Zhang Zhefeng. Interface Characterization and Performances of a Novel Pure Al Clad Al Alloy Wire // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20. № 8. Article number 1800082. DOI: [10.1002/adem.201800082](https://doi.org/10.1002/adem.201800082).
 18. Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В. Энергоэффективность переработки стружки из алюминия и его сплавов без применения переплава // *Технология легких сплавов*. 2023. № 4. С. 66–72. DOI: [10.24412/0321-4664-2023-4-66-72](https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-4-66-72).
 19. Дерябин А.Ю., Каргин В.Р. Моделирование заключительной стадии прессования крупногабаритных прутков при малых вытяжках в момент образования центральной пресс-утяжины // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20. № 1. С. 5–10. EDN: [OUSTNP](https://elibrary.ru/OUSTNP).
 20. Логинов Ю.Н., Разинкин А.В., Шимов Г.В., Бушуева Н.И. Схема и модель прессования алюминиевого сплава с уменьшением потерь основного металла // *Цветные металлы*. 2023. № 11. С. 83–88. DOI: [10.17580/tsm.2023.11.11](https://doi.org/10.17580/tsm.2023.11.11).
 21. Бушуева Н.И., Логинов Ю.Н., Шимов Г.В. Прессование плакированных прутков из алюминиевых сплавов с применением передней деформируемой шайбы // *Цветные металлы*. 2024. № 7. С. 89–95. DOI: [10.17580/tsm.2024.07.12](https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.12).

REFERENCES

1. Elagin V.I. Ways of developing high-strength and high-temperature structural aluminum alloys in the 21st century. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, vol. 49, no. 9–10, pp. 427–434. DOI: [10.1007/s11041-007-0081-y](https://doi.org/10.1007/s11041-007-0081-y).
2. Parveez B., Kittur M.I., Badruddin I.A., Kamangar S., Hussien M., Umarfarooq M.A. Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 22, article number 5007. DOI: [10.3390/polym14225007](https://doi.org/10.3390/polym14225007).
3. Lei Kong. Computer Simulation Study on the Relationship between the Tensile Fracture Behavior of Aircraft Composites and the Fiber Strength Distribution. *2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 2022, pp. 664–667. DOI: [10.1109/ICICCS53718.2022.9788372](https://doi.org/10.1109/ICICCS53718.2022.9788372).
4. Dzakyprasetyo R.Q., Anawati A. Corrosion Behaviour of Aluminum Alloy AA7075-T651. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 541, article number 012006. DOI: [10.1088/1757-899X/541/1/012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012006).
5. Raza S.A., Karim M.R.A., Shehbaz T., Taimoor A.A., Ali R., Khan M.I. Effect of pH and Concentration on Electrochemical Corrosion Behavior of Aluminum Al-7075 T6 Alloy in NaCl Aqueous Environment. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 213–226. DOI: [10.33961/jecst.2020.01214](https://doi.org/10.33961/jecst.2020.01214).
6. Wang Junlei, Xiong Fuping, Liu Hongwei, Zhang Tiansui, Li Yanyan, Li Chenjing, Xia Wu, Wang Haitao, Liu Hongfang. Study of the corrosion behavior of *Aspergillus niger* on 7075-T6 aluminum alloy in a high salinity environment. *Bioelectrochemistry*, 2019, vol. 129, pp. 10–17. DOI: [10.1016/j.bioelechem.2019.04.020](https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.020).

7. Feng Zhiyuan, Li Jiao, Ma Jincai, Su Yongjin, Zheng Xiaoyuan, Mao Yu, Zhao Zilong. EBSD Characterization of 7075 Aluminum Alloy and Its Corrosion Behaviors in SRB Marine Environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, vol. 10, no. 6, article number 740. DOI: [10.3390/jmse10060740](https://doi.org/10.3390/jmse10060740).
8. Rajamuthamilselvan M., Ramanathan S. Hot deformation behaviour of 7075 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 3, pp. 948–952. DOI: [10.1016/j.jallcom.2010.09.139](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.139).
9. Whalen S., Reza-E-Rabby Md., Wang Tianhao, Ma Xiaplong, Roosendaal T., Herling D., Overman N., Taysom B. Shear Assisted Processing and Extrusion of Aluminum Alloy 7075 Tubing at High Speed. *The Minerals, Metals & Materials Series*, 2021, vol. 6, pp. 277–280. DOI: [10.1007/978-3-030-65396-5_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65396-5_41).
10. Whalen S., Olszta M., Reza-E-Rabby Md., Roosendaal T., Wang Tianhao, Herling D., Taysom B.S., Suffield S., Overman N. High speed manufacturing of aluminum alloy 7075 tubing by Shear Assisted Processing and Extrusion (ShAPE). *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 71, pp. 699–710. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.003).
11. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Sverdlik M.K. Mathematical simulation of grain evolution during asymmetric rolling of pure aluminum and 7075 alloy. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 81–88. EDN: [VAUJJP](https://www.edn.ru/VAUJJP).
12. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Vafin R.K. Simulation of temperature fields in a deformation zone during asymmetric rolling of aluminum alloys. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 75–81. EDN: [VAUJJE](https://www.edn.ru/VAUJJE).
13. Karthikraja M., Ramanathan K., Loganathan K.T., Selvaraj S. Corrosion behaviour of SiC and Al₂O₃ reinforced Al 7075 hybrid aluminium matrix composites by weight loss and electrochemical methods. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2023, vol. 100, no. 5, article number 101002. DOI: [10.1016/j.jics.2023.101002](https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.101002).
14. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloys and metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, article number 101372. DOI: [10.1016/j.rineng.2023.101372](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372).
15. Stelt A.A., Bor T.C., Geijselaers H.J.M., Akkerman R., Boogaard A.H. Cladding of Advanced Al Alloys Employing Friction Stir Welding. *Key Engineering Materials*, 2013, vol. 554–557, pp. 1014–1021. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1014](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1014).
16. Otsubo F., Era H. Cladding of Al Layer onto Mild Steel Substrate Using Al Powder and Its Structure and Properties. *Materials Transactions*, 2018, vol. 59, no. 10, pp. 1585–1590. DOI: [10.2320/matertrans.P-M2018835](https://doi.org/10.2320/matertrans.P-M2018835).
17. Hou Jiapeng, Chen Qingyin, Wang Qiang, Yu Hongyun, Zhang Zhenjun, Li Rui, Li Xiaowu, Zhang Zhefeng. Interface Characterization and Performances of a Novel Pure Al Clad Al Alloy Wire. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 20, no. 8, article number 1800082. DOI: [10.1002/adem.201800082](https://doi.org/10.1002/adem.201800082).
18. Loginov Yu.N., Zagirov N.N., Ivanov E.V. Energy efficiency of processing of chips from aluminum and its alloys without the use of remelting. *Technology of light alloys*, 2023, no. 4, pp. 66–72. DOI: [10.24412/0321-4664-2023-4-66-72](https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-4-66-72).
19. Deryabin A.Yu., Kargin V.R. Final stage modeling of large-size bars extrusion by low stretch ratio while creation of central back-end extrusion defect. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 5–10. EDN: [OUSTNP](https://www.edn.ru/OUSTNP).
20. Loginov Yu.N., Razinkin A.V., Shimov G.V., Bushueva N.I. Aluminum alloy extrusion scheme and model with reduction of basis metal waste. *Non-ferrous metals*, 2023, no. 11, pp. 83–88. DOI: [10.17580/tsm.2023.11.11](https://doi.org/10.17580/tsm.2023.11.11).
21. Bushueva N.I., Loginov Yu.N., Shimov G.V. Pressing of clad rods from aluminum alloys using a front deformable washer. *Non-ferrous metals*, 2024, no. 7, pp. 89–95. DOI: [10.17580/tsm.2024.07.12](https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.12).

UDC 669.715

doi: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-2

Scheme for producing composite material based on structural aluminum alloy by the direct extrusion method

Natalia I. Bushueva^{*1}, postgraduate student, research engineer of scientific laboratory “Metal Forming”

Yury N. Loginov², Doctor of Science (Engineering), professor of Chair of Metal Forming

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (Russia)

^{*}E-mail: n.i.bushueva@urfu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>

Received 30.06.2025

Revised 19.08.2025

Accepted 01.09.2025

Abstract: The work covers the development of a technology for producing a bimetallic rod from high-strength 7075 alloy with a cladding layer of 1100 aluminum, which is aimed at improving corrosion resistance while maintaining mechanical properties. A special feature of the proposed technology is the use of an additional front pure aluminum workpiece for the process of direct extrusion of a rod from 7075 alloy. The direct extrusion process for a composite workpiece was simulated with the DEFORM software package's finite element method. The influence of process temperature and speed on the formation of the cladding layer was analyzed. For this purpose, four problems were formulated with varying heating modes of workpieces

and tools. It was found that it is possible to produce a thin cladding layer at a heating temperature of the base 7075 alloy equal to 360 °C and a cladding layer temperature equal to 20 °C, which ensures a uniform distribution of the coating along the length of the rod without signs of delamination. Stress-strain analysis during extrusion showed that a cold additional workpiece ensures continuity for cladding coating formation. However, heating above 300 °C leads to rupture from deformation localization. The developed approach can be used to reduce the cost of products by reducing the consumption of expensive 7075 alloy while simultaneously increasing corrosion resistance due to the use of pure aluminum cladding. Prospects for the development of further research are associated with the optimization of extrusion modes for various rod sizes.

Keywords: extrusion; finite element method; composite materials; 7075 aluminum alloy; cladding layer.

Acknowledgments: The paper was written on the reports of the participants of the XII International School of Physical Materials Science (SPM-2025), Togliatti, September 15–19, 2025.

For citation: Bushueva N.I., Loginov Yu.N. Scheme for producing composite material based on structural aluminum alloy by the direct extrusion method. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 3, pp. 27–37. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-2.