

Щицын Ю.Д., Кривоносова Е.А., Неулыбин С.Д., Ольшанская Т.В., Никулин Р.Г., Федосеева Е.М., Терентьев С.А. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 63–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.08

Shchitsin Yu.D., Krivonosova E.A., Neulubin S.D., Olshanskaya T.V., Nikulin R.G., Fedoseeva E.M., Terentyev S.A. Use of plasma surface for additive formation of aluminum alloys blade // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 63–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 2, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.08

УДК 621.791.755

**Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, С.Д. Неулыбин, Т.В. Ольшанская,
Р.Г. Никулин, Е.М. Федосеева, С.А. Терентьев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ
ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Разработка новых технологий изготовления изделий из алюминиевых сплавов, обеспечивающих улучшенные эксплуатационные характеристики и высокие экономические показатели, является актуальной задачей. Использование аддитивных технологий, или технологии послойного синтеза для изготовления металлических конструкций позволяет значительно ускорить решение задач технологической подготовки производства и выпуска готовой продукции. Применение присадочной проволоки в качестве рабочего материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленных использованием порошковых систем.

Применение метода послойного синтеза позволяет использовать деформируемые алюминиевые сплавы для получения сложно-профильных изделий. Использование новых сплавов для аддитивного производства обеспечит получение сложных ответственных конструкций с повышенными эксплуатационными характеристиками. Высокие служебные характеристики обеспечиваются формированием заданной структуры и свойств металла конструкции (определяются временем пребывания металла в расплавленном состоянии, величиной зоны сплавления между слоями, скоростью нагрева и охлаждения металла в нижних слоях и др.). Постоянный подогрев формируемого изделия при наложении слоев может затруднять получение требуемых размеров наплавляемых слоев и желательной структуры получаемого металла.

Решить многие проблемы наплавки алюминиевых сплавов, повысить производительность при высоком качестве позволяет плазменная наплавка постоянным током обратной полярности. Плазменная наплавка током обратной полярности обеспечивает очистку поверхности предыдущего слоя от загрязнений за счет эффекта катодного распыления, хорошее смачивание и растекание жидкого металла при минимальном нагреве поверхности. При этом обеспечивается получение слоистых материалов с благоприятной структурой без внутренних дефектов. Представлены результаты исследования аддитивного формирования изделий из алюминиевого сплава 1580 системы алюминий–магний–скандий с использованием плазменной наплавки током обратной полярности. Подобраны режимы наплавки, обеспечивающие формирование слоистых заготовок без внутренних дефектов. Установлено, что плазменная наплавка обеспечивает относительную стабильность структурного и фазового состава материала слоев под воздействием термических циклов по мере формирования заготовки. Зафиксировано незначительное увеличение объемной доли упрочняющих и избыточных фаз. Отмечена потеря цинка в наплавленном металле при сохранении содержания остальных элементов. Установлено, что прочностные характеристики наплавленного металла находятся на уровне свойств литого материала, уступая деформированному; при этом пластичность наплавленного металла существенно превосходит как пластичность отливок – в 2–3 раза, так и пластичность отожженных прокатанных полуфабрикатов – в 1,5 раза.

Ключевые слова: аддитивные технологии, наплавка, плазменная наплавка, плазмотрон, обратная полярность, алюминиевые сплавы, микроструктура, металлографические исследования, микротвердость, механические свойства.

**Yu.D. Shchitsin, E.A. Krivonosova, S.D. Neulubin, T.V. Olshanskaya,
R.G. Nikulin, E.M. Fedoseeva, S.A. Terentyev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

USE OF PLASMA SURFACE FOR ADDITIVE FORMATION OF ALUMINUM ALLOYS BLADE

The development of new technologies for the manufacture of products from aluminum alloys, providing improved performance and high economic performance, is an urgent task. The use of additive technologies (AT) or technologies of layer-by-layer synthesis for the manufacture of metal structures makes it possible to significantly accelerate the solution of problems of technological preparation of production and production of finished products. The use of filler wire as a working material allows you to get rid of the problems associated with the low productivity of existing methods, the high cost of the equipment used, the limited types of materials used, due to the use of powder systems.

The use of the layer-by-layer synthesis method allows the use of wrought aluminum alloys for the preparation of complex shaped products. The use of new alloys for additive production will provide complex critical structures with improved performance characteristics. High performance characteristics are provided by the formation of a given structure and metal properties of the structure (determined by the residence time of the metal in the molten state, the size of the fusion zone between the layers, the rate of heating and cooling of the metal in the lower layers, etc.). Constant heating of the molded product when applying layers may make it difficult to obtain the required dimensions of the deposited layers and the desired structure of the metal obtained

To solve many problems of surfacing aluminum alloys, to improve performance with high quality allows plasma surfacing with direct current of reverse polarity. Plasma surfacing with reverse polarity current provides cleaning of the surface of the previous layer from contamination due to the effect of cathode sputtering, good wetting and spreading of the liquid metal with minimal surface heating. This ensures the production of layered materials with a favorable structure without internal defects. The paper presents the results of the study of the additive formation of products from an aluminum alloy 1580 system aluminum-magnesium-scandium using plasma surfacing current of reverse polarity. Selected modes of welding, ensuring the formation of layered blanks without internal defects. It is established that plasma surfacing provides the relative stability of the structural and phase composition of the material of the layers under the influence of thermal cycles as the blank is formed. A slight increase in the volume fraction of hardening and excess phases was recorded. Marked loss of zinc in the weld metal while maintaining the content of the remaining elements. It has been established that the strength characteristics of the deposited metal are at the level of the properties of the cast material, yielding to the deformed; at the same time, the ductility of the weld metal significantly exceeds the ductility of castings - by 2-3 times, and the ductility of annealed rolled semi-finished products - by 1.5 times.

Keywords: additive technologies, surfacing, plasma surfacing, plasmatron, reverse polarity, aluminum alloys, microstructure, metallographic studies, microhardness, mechanical properties.

Объем применения конструкций из алюминиевых сплавов в различных отраслях постоянно растет. Разработка новых технологий изготовления изделий из алюминиевых сплавов, обеспечивающих улучшенные эксплуатационные характеристики и высокие экономические показатели, является актуальной задачей. Исследователи идут по двум направлениям: разработка новых сплавов и совершенствование технологий изготовления готовых изделий. Для изготовления сложнопрофильных габаритных изделий используют литейные и сварочные технологии или их комбинацию. Изделия в зависимости от назначения изготавливаются из различных сплавов, которые могут значительно отличаться по составу и свойствам. Алюминиевые сплавы делятся на две большие группы: деформируемые и литейные. Литейные сплавы по совокупности механических характеристик, как правило, уступают деформируемым сплавам. Деформируемые и литейные сплавы, в свою очередь, подразделяют на упрочняемые термической обработкой и не упрочняемые термической обработкой.

Аддитивные технологии (АТ), или технологии послойного синтеза – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Использование таких технологий для изготовления металлических конструкций позволяет значительно ускорить решение задач технологической подготовки производства и выпуска готовой продукции. Большими возможностями для выращивания металлических заготовок обладают наплавочные технологии. Для этих целей могут использоваться дуговые, лазерные, электронно-лучевые, плазменные и другие технологии¹ [1–3]. Материал для наплавки может быть в виде порошка или проволоки (прутков).

Получение заготовок с минимальным припуском на механическую обработку определяется точностью траектории движения рабочего инструмента и поддержанием заданного поперечного сечения наплавляемой дорожки. Высокие служебные характеристики обеспечиваются формированием заданной структуры и свойств металла конструкции (определяются временем пребывания металла в расплавленном состоянии, величиной зоны сплавления между слоями, скоростью нагрева и охлаждения металла в нижних слоях и др.). Постоянный подогрев формируемого изделия при наложении слоев может затруднять получение требуемых размеров наплавляемых слоев и желательной структуры получаемого металла.

Широкие возможности для решения перечисленных задач предоставляют технологии наплавки с использованием концентрированных источников энергии [3–6]. В настоящее время делаются успешные попытки использования лазерной порошковой наплавки для изготовления ответственных конструкций из различных материалов. Наряду с неоспоримыми преимуществами лазерные аддитивные технологии имеют ряд существенных недостатков: низкий КПД процесса, остаточная пористость, особенно при работе с активными металлами, высокие требования к дисперсности порошка, высокая стоимость оборудования [6]. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в существующих аддитивных технологиях остается низкой, что ставит под сомнение перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий. Особенно это касается конструкций из алюминиевых сплавов, для которых общей проблемой аддитивных технологий является обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение дефектности. В ряде исследований [7–9] показано, что пористость зависит как от материала, так и от параметров режима

¹ Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013; F2792-12a.

сплавления. Например, для алюминиевых сплавов пористость может достигать 15 %.

Использование присадочной проволоки в качестве рабочего материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной использованием порошковых систем. В качестве дополнительного преимущества присадочная проволока имеет значительно меньшую удельную площадь поверхности, чем порошковые материалы, и менее склонна к окислению и поглощению влаги или загрязняющих веществ. Важным является доступность весьма широкого по составу спектра проволок, стоимость которых существенно ниже, чем стоимость материалов в порошковой форме. При аддитивном формировании заготовок возможно использование деформируемых алюминиевых сплавов, которые в силу низких литейных свойств не используются для отливок.

Наибольшее применение при использовании проволок в качестве присадочных материалов находят дуговые технологии наплавки: аргодуговая плавящимся и неплавящимся электродами. Использование дуговых технологий для алюминиевых сплавов сопровождается рядом проблем, обусловленных как особенностями свариваемого материала, так и ограниченными возможностями указанных процессов. Среди них низкая производительность при наплавке сечений повышенных значений толщины, дефектность наплавленного металла, особенно по границам сплавления, анизотропия свойств наплавленного металла, трудность удержания жидкой ванны из-за высокой жидкотекучести расплавленного металла. Характерными дефектами при дуговой наплавке алюминиевых сплавов являются: газовая пористость, оксидные пленки, вольфрамовые и другие включения, горячие и холодные трещины, несплавления, раковины и ряд других. Причины их возникновения достаточно широко освещены в технической литературе [10, 11]. Необходимо отметить высокие требования к качеству подготовки свариваемого и присадочного материалов, а также к производственным условиям (температура, влажность, скорость движения воздуха и проч.), которые необходимо соблюдать при производстве ответственных конструкций. При изготовлении габаритных изделий с повышенной толщиной наплаиваемых стенок (больше 10–15 мм) сталкиваются с проблемой поддержания требуемых тепловых параметров, при которых обеспечивается надежное сплавление металла слоев и удержание жидкой ванны от растекания.

Среди дуговых способов СМТ процесс применительно к аддитивным технологиям имеет ряд

неоспоримых преимуществ [12, 13]. СМТ – это модифицированный вариант сварки плавящимся электродом в защитном газе, основанный на механизме управляемого режима передачи металла в сварочную ванну за счет использования импульсного тока и возвратно-поступательного движения проволоки. Система обратной подачи проволоки синхронизирована с высокоскоростным цифровым управлением, которое определяет длину дуги, короткую замыкающую фазу и теплопередачу в зону сварки [12]. Этот процесс обеспечивает отсутствие разбрызгивания металла, стабильность формирования шва, минимальную теплопередачу в зону обработки и может найти применение при изготовлении заготовок из различных металлов.

Однако СМТ-процесс имеет свои недостатки: сравнительно низкая производительность из-за использования проволоки малых диаметров, наличие внутренней дефектности (поры, включения).

Использование плазменной наплавки обеспечивает ряд преимуществ как с технологической, так и с экономической точки зрения [11, 14, 15]. К ним можно отнести высокую производительность, регулирование в широких пределах теплопередачи в основной и наплаиваемый материалы и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала. Решить многие проблемы наплавки алюминиевых сплавов, повысить производительность при высоком качестве позволяет плазменная наплавка постоянным током обратной полярности. Плазменная наплавка током обратной полярности обеспечивает очистку поверхности предыдущего слоя от загрязнений за счет эффекта катодного распыления, хорошее смачивание и растекание жидкого металла при минимальном нагреве поверхности. При этом обеспечивается получение слоистых материалов с благоприятной структурой без внутренних дефектов. Кроме того, сравнительная простота и невысокая стоимость оборудования для плазменной наплавки должны обеспечить интерес производителей к использованию.

Применение метода послойного синтеза позволяет использовать деформируемые алюминиевые сплавы для получения сложнопрофильных изделий. Использование новых сплавов для аддитивного производства обеспечит получение сложных ответственных конструкций с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В данной работе представлены результаты исследования аддитивного формирования изделий из алюминиевого сплава 1580 с использованием плазменной наплавки током обратной полярности.

Таблица 1

Химический состав наплавочной проволоки 1580

Марка алюминиевого сплава	Содержание элементов, мас. %								
	Mg	Mn	Cr	Zr	Sc	Fe	Zn	Прочие	Al
Сплав 1580	4,815	0,515	0,156	0,115	0,079	0,179	0,205	0,086	Основа

При послойной наплавке изделий с вертикальными элементами достаточной высоты необходимо обеспечивать квазистатическую устойчивость жидкой ванны, определяемую балансом гравитационных, капиллярных сил и силового воздействия сжатой дуги. Размеры ванны жидкого металла, а следовательно, гравитационные и капиллярные силы определяются тепловой обстановкой в зоне воздействия сжатой дуги. Теплоотвод от рабочей зоны зависит от многих факторов: мощности сжатой дуги, скорости наплавки, диаметра и скорости подачи присадочной проволоки, расстояния наплавляемого слоя от подкладной плиты, поперечного сечения наплавляемой стенки, химического состава проволоки, качества защиты и ряда других. Поддержание равновесного теплового и силового баланса в зоне обработки – достаточно сложная задача. Для ее решения необходима текущая корректировка режимных параметров наплавки или периодическая остановка процесса для охлаждения наплавляемого изделия. Корректировкой режимных параметров можно выйти на режим теплового равновесия, при котором обеспечивается стабильность процесса послойной наплавки. Необходимо учитывать то, что размеры ванны жидкого и перегретого металлов в конечном итоге определяют структуру и свойства металла, а также качество защиты поверхности, которое влияет на дефектность наплавляемых слоев.

Описание тепловых процессов и определение условий равновесного удержания ванны расплавленного металла при послойной наплавке остались за пределами данной статьи.

Технологии, исследовательские методики и материалы

В результате предварительных исследований были подобраны режимы наплавки, позволяющие формировать сложные изделия с различным пространственным расположением элементов. Исходным материалом для наплавки была выбрана проволока 1580 (химический состав наплавочных материалов представлен в табл. 1).

Подготовка проволоки была выполнена электрохимической полировкой, диаметр проволоки 1,2 мм. Наплавка выполнялась током обратной полярности. Производительность наплавки составила 3 кг/ч.

После наплавки были проведены структурные исследования наплавленного материала, зон сплав-

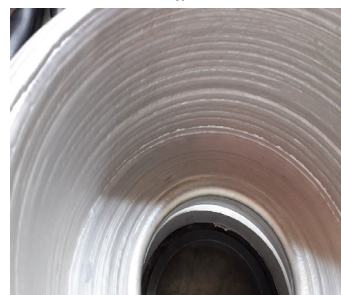
ления между слоями с применением световой микроскопии (металлографический микроскоп «Альтами-587»). Испытания прочностных свойств проводили в соответствии с ГОСТ 9454–78, испытательный комплекс INSTRON 5982, анализ химического состава проводили методом спектрального анализа по ГОСТ 7727–81.

Заготовки и изделия, полученные аддитивной технологией плазменной наплавки на токе обратной полярности

Внешний вид диска автомобильного колеса и переходника, полученных плазменной аддитивной наплавкой, до и после механической обработки показаны на рис. 1, 2.



а



б



в

Рис. 1. Изготовление диска автомобильного колеса: а – внешний вид, б – вид внутренней полости, в – внешний вид после механической обработки



a



б

Рис. 2. Переходник: *a* – внешний вид после наплавки, *б* – после токарной обработки внешней поверхности

Формирование заготовки производилось без остановов на охлаждение. Для обеспечения бездефектной боковой поверхности припуск на механическую обработку составлял 1,5 мм.

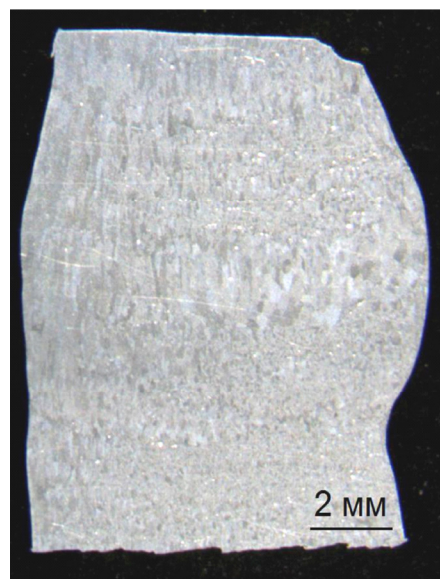
Исследования микроструктуры и механических свойств наплавленного металла

Для проведения исследований механических характеристик наплавленного металла, макро- и микроструктурных исследований были наплавлены заготовки в виде плоской стенки, из которой были вырезаны образцы для испытаний.

На рис. 3 показана макроструктура наплавленных слоев верхней (*a*) и нижней (*б*) частей стенки. На макрошлифах просматриваются участки усиленного роста дендритов, причем преимущественно в нижней части наплавки. В верхней части наплавки это менее выражено, что объясняется снижением влияния эффекта термоциклирования и повторного нагрева металла по мере выращения стенки.



a



б

Рис. 3. Макроструктура наплавленных слоев верхней (*a*) и нижней (*б*) частей стенки

На рис. 4 показана микроструктура наплавленных слоев верхней (*a*) и нижней (*б*) частей стенки при разном увеличении. Структура представляет собой алюминий-магниевый твердый раствор, отдельные частицы первичной β -фазы (Al_3Mg_2) на границах зерен, где также встречаются скопления первичных интерметаллидов $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Ti})$, $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Zr})$, Al_3Sc .

Участки с разной травимостью на микроструктуре нижней части наплавки (см. рис. 4, *б*) еще раз свидетельствуют о том, что многократно повторяющиеся циклы нагрева металла предыдущих слоев при наложении последующих приводят к эффекту усиления направленного роста дендри-

тов или целых колоний дендритов, причем тем сильнее, чем чаще это повторяется.

Микроструктура верхней части наплавки (см. рис. 4, *a*) более мелкодисперсная, с большей объемной долей выделения β -фазы по границам зерен – до 2,5 %.

Кроме того, очевидно, что изменилась морфология β -фазы и упрочняющих интерметаллидных фаз типа $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$. Этот вывод согласуется

с данными работы [16], в которой установлено, что выдержка при температуре 450–500 °С приводит к коагуляции (укрупнению) размеров частиц $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$. Особенно хорошо это видно из сравнения фрагментов структур с частицами сопоставимых размеров (около 5 мкм) у металлов, полученных при аддитивной плазменной наплавке (рис. 5, *a*) и по традиционным технологиям (рис. 5, *б*).

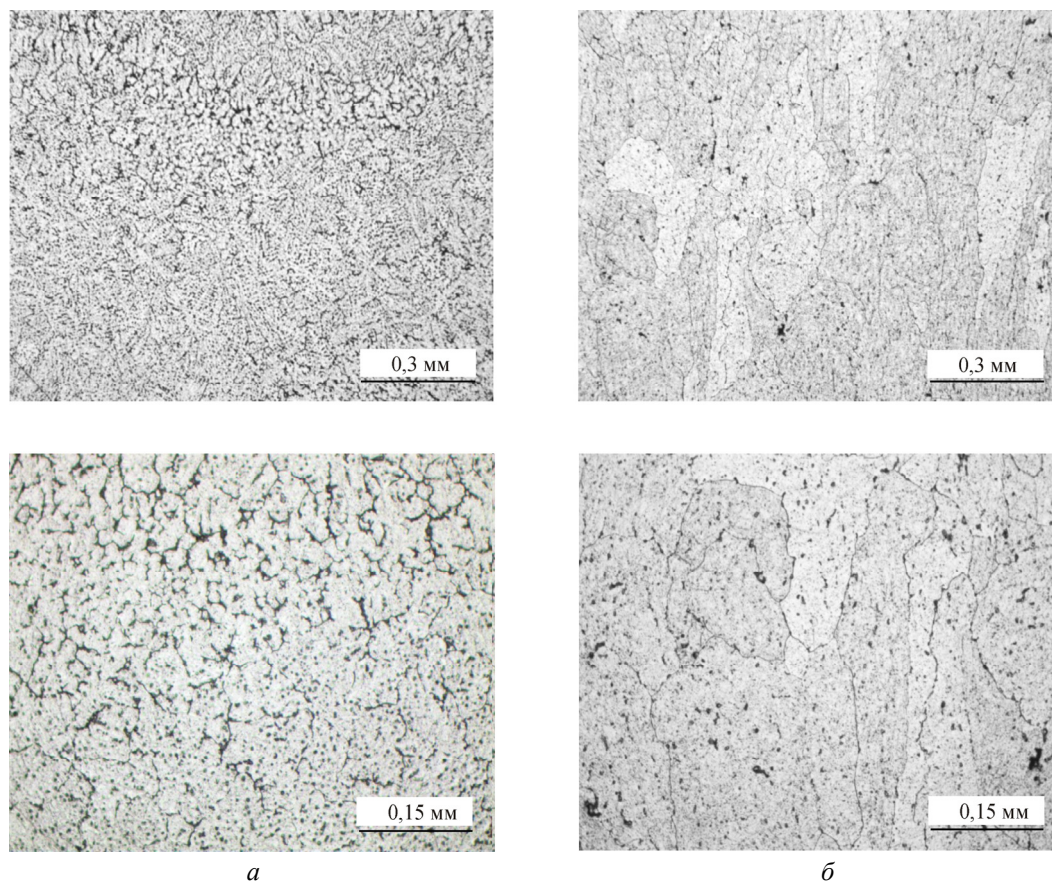


Рис. 4. Микроструктура наплавленных слоев верхней (*a*) и нижней (*б*) частей стенки при увеличении $\times 100$ и $\times 200$

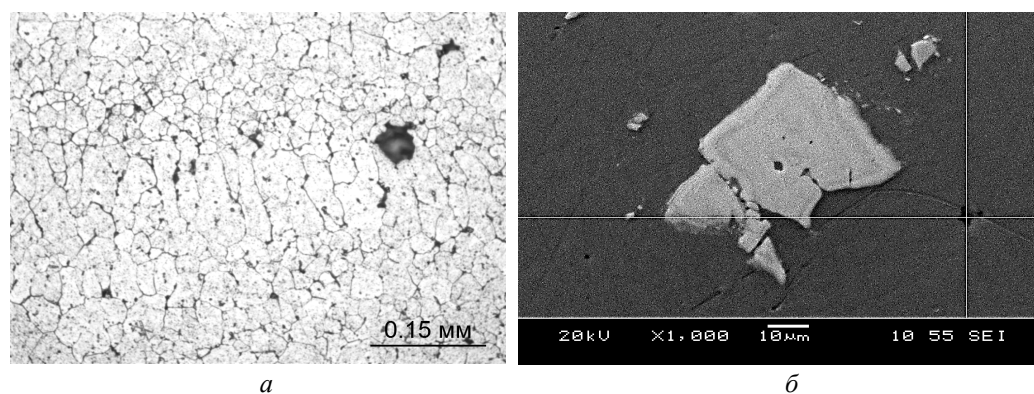


Рис. 5. Укрупнившаяся частица интерметаллидной фазы $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$: *a* – в наплавленном слое нижней части стенки, *б* – в деформированном и отожженном металлах [16]

Таблица 2

Химический состав наплавленного металла 1580

Наименование образца	Содержание элементов, мас. %								
	Mg	Mn	Cr	Zr	Sc	Fe	Zn	Прочие	Al
Стружка наплавленного материала 1580	4,80–5,21	0,526	0,118	0,063	0,065	0,123	<0,001	0,60	Основа

Таблица 3

Механические свойства наплавленных материалов

Материал и состояние образца		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	φ , %
Сплав 1580, плазменная наплавка	Наплавка 1	294	192	24,5	33,5
	Наплавка 2	296	193	25,0	27,0
Сплав P-1580, литье [21]	Литой пруток	312	183	9,1	–
Сплав P-1580, прокатка [21]	Горячедеформированное	369	266	16	–
	Холоднодеформированное	453	429	5	–
Сплав P-1580, прокатка + отжиг [21]	Отожженное	390	277	14	–

Существенная коагуляция интерметаллидных фаз при наплавке отмечается только в нижних слоях заготовок, и, скорее всего, она может привести к снижению положительного эффекта дисперсионного упрочнения в этих зонах. В связи с этим целесообразно предусмотреть несколько начальных технологических проходов, которые будут удаляться окончательной механической обработкой.

Химический анализ наплавленного металла, выполненный на образце в виде стружки, приведен в табл. 2. Пониженное содержание циркония и скандия в наплавленном металле, по сравнению с проволокой, объясняется тем, что эти металлы из твердорастворной фазы перешли в интерметаллидные включения.

Основные механические свойства наплавленных материалов приведены в табл. 3.

Сравнение по механическим свойствам образцов, полученных послойной плазменной наплавкой, с металлом, полученным традиционными технологиями литья и ОМД [16–21], показывает, что предел прочности наплавки находится на уровне свойств литого материала, уступая деформированному; предел текучести наплавки превосходит характеристики литого на 2–5 %; пластичность наплавленного металла существенно превосходит как пластичность отливок – в 2–3 раза, так и пластичность отожженных прокатанных полуфабрикатов – в 1,5 раза.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что метод послойного синтеза с применением плаз-

менной наплавки позволяет использовать деформируемые алюминиевые сплавы типа 1580 для получения сложнопрофильных изделий.

2. Установлено, что плазменная наплавка обеспечивает относительную стабильность структурного и фазового состава материала предшествующих слоев под воздействием термических циклов, последующих по мере формирования заготовки. Зафиксировано незначительное увеличение объемной доли упрочняющих и избыточных фаз.

3. Установлено, что прочностные пределы наплавки находятся на уровне свойств литого материала, уступая деформированному; пластичность наплавленного металла существенно превосходит как пластичность отливок – в 2–3 раза, так и пластичность отожженных прокатанных полуфабрикатов – в 1,5 раза.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Пермского края в рамках соглашения С-26/795 от 21.12.2017.

Список литературы

1. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing / W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos // J. Clean Prod. – 2007. – Vol. 15. – P. 932–943.
2. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – Vol. 81(1–4). – P. 465–481.
3. Смирнов В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в россий-

ской промышленности. Опыт ФГБОУ УГАТУ // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 2(14). – С. 23–27.

4. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable: интернет-издание / A. Techel [et al.]; Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), Laser Institute of America. – URL: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing> (accessed 15 August 2017).

5. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti–6Al–4V powders / M.N. Ahsan [et. al.] // *Inn. Develop in Virtual and Phys. Prototyp.* – London: Taylor & Francis Group, 2012. – P. 10–18.

6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

7. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM). – URL:<http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf> (accessed 5 July 2018).

8. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // *J. of Materials Proc. Technol.* – 2014. – Vol. 214, no. 5. – P. 1102–1110.

9. Selective laser melting of aluminium components / E. Louvis [et. al.] // *J. of Materials Proc. Technol.* – 2011. – Vol. 211. – P. 275–284.

10. Николаев В.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.

11. Plasma welding of aluminium alloys / Yu.D. Shcitsin, V.Yu. Shcitsin, H. Herold, W. Weingart. // *Welding Int.* – 2003. – No. 17(10). – P. 825–832.

12. Almeida P., Williams S. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) // *Solid Free. Fabr. Symp.* – June 2010. – P. 25–36.

13. Dwivedi R., Kovacevic R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding // *J. Manuf. Syst.* – 2004. – Vol. 23, no. 4. – С. 278–291.

14. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // *Сварка. Диагностика.* – 2009. – № 2. – С. 42–45.

15. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr₁₈Ni₈Ti on low-alloy steel 09Mg₂Si // *Int. J. of Appl. Eng. Res.* – 2015. – Vol. 10, no. 20. – P. 41103–41109.

16. Корягин Ю.Д. Структура, свойства и термическая стабильность легких сплавов и сталей, подвергнутых деформационной и термомеханической обработкам: дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2003. – 320 с.

17. Research of rolling regimes and mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from experimental alloys of Al–Mg system, economically alloyed by scandium / S.B. Sidelnikov, V.N. Baranov, A.I. Bezrukih, E.Y. Zenkin // *Tsvetnye Metally (Non-ferrous metals).* – 2017. – No. 9. – P. 91–96.

18. Сайт об алюминии. Проект компании RUSAL, лидера мировой алюминиевой отрасли. – URL: <https://aluminiumleader.ru/application/transport/> (accessed 15 March 2019).

19. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия и изделие из него: пат. 2387725 Рос. Федерация: МПК С22С21/06 / Овсянников Б.В., Филатов Ю.А., Захаров В.В. [и др.]. – № 2008128104/02, заявл. 09.07.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 12.

20. Состав сварочной проволоки на основе алюминия: пат. 2393073 Рос. Федерация: МПК С22С21/06, В23К35/28 / Павлова В.И., Орыщенко А.С., Осокин Е.П. [и др.]. – № 2009109736/02, заявл. 17.03.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18.

21. Исследование механических свойств полуфабрикатов из алюминиево-скандиевого сплава / О.В. Якивчук, В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников, Ю.А. Зенкин, А.И. Безруких [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2017. – Вып. 11, ч. 1. – С. 147–153.

References

1. Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal Cleaner Production*, 2007, vol. 15, pp. 932–943.

2. Ding D.H., Pan Z.X., Cuiuri D., Li H.J. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 81(1–4), pp. 465–481.

3. Smirnov V.V., Barzali V.V., Ladnov P.V. Perspektivy razvitiia additivnogo proizvodstva v rossiiskoi promyshlennosti [Prospects for the development of additive production in the Russian industry]. *Opyt FGBOU UGATU. Novosti materialovedeniia. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 2(14), pp. 23–27.

4. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable: internet-izdanie; Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), Laser Institute of America. URL: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing> (accessed 15 August 2017).

5. Ahsan M.N. et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti–6Al–4V powders. *Innovative Develop in Virtual and Phys. Prototyp.* London: Taylor & Francis Group, 2012, pp. 10–18.

6. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N, Misiurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoii obrabotki [Technological processes of laser processing]. Ed. A.G. Grigor'iant-sa. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, 664 p.

7. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM). URL:<http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf> (accessed 5 July 2018).

8. Jhavar S., Jain N.K., Paul S.P. Development of microplasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.

9. E. Louvis et. al. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, pp. 275–284.

10. Nikolaev V.A., Fridliander I.N., Arbuzov Iu.P. Svarivaemye aluminievye splavy [Aluminum alloys to be welded]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 296 p.

11. Shchitsyn Yu.D., Shchitsyn V.Yu., Herold H., Weingart W. Plasma welding of aluminium alloys. *Welding International*, 2003, no. 17(10), pp. 825–832.

12. Almeida P., Williams S. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). *Solid Freeform Fabrication Symposium*, June. 2010, pp. 25–36.

13. Dwivedi R., Kovacevic R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding // *Journal of Manufacturing Systems*, 2004, vol. 23, no. 4, pp. 278–291.

14. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma treatment of metals with current reverse polarity]. *Svarka. Diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42–45.

15. Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr₁₈Ni₈Ti on low-alloy steel 09Mg₂Si. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 41103–41109.

16. Koriagin Iu.D. Struktura, svoystva i termicheskaia stabil'nost' legkikh splavov i stali, podvergnutykh deformatsionnoi i termomekhanicheskoi obrabotkam [Structure, properties and thermal stability of light alloys and steels subjected to deformation and thermomechanical treatment]. Abstract of Ph.D. thesis. Cheliabinsk, 2003, 320 p.

17. Sidelnikov S.B., Baranov V.N., Bezrukih A.I., Zenkin E.Y. Research of rolling regimes and mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from experimental alloys of Al–Mg system, economically alloyed by scandium. *Tsvetnye Metally (Non-ferrous metals)*, 2017, no. 9, pp. 91–96.

18. Sait ob aliuminii. Proekt kompanii RUSAL, lidera mirovoi aluminievoy otrasli [Project by RUSAL, the world's leading aluminium producer]. URL: [https:// aluminium-leader.ru/application/transport/](https://aluminium-leader.ru/application/transport/) (accessed 15 March 2019).

19. Ovsiannikov B.V., Filatov Iu.A., Zakharov V.V. et al. Deformiruemyi termicheski neuprochniaemyi splav na osnove aliuminiia i izdelie iz nego [Deformable thermally unstable aluminium-based alloy and its product]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2387725 (2010).

20. Pavlova V.I., Oryshchenko A.S., Osokin E.P. et al. Sostav svarочноi provoloki na osnove aliuminiia [Composition of aluminum-based welding wire]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2393073 (2010).

21. Iakiv'iuk O.V., Baranov V.N., Sidel'nikov S.B., Zenkin Iu.A., Bezrukih A.I. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv polu-fabrikatov iz aluminievo-skandievogo splava [Investigation of mechanical properties of semi-finished aluminum-scandium alloy]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, iss. 11, ch. 1, pp. 147–153.

Получено 30.04.19

Опубликовано 20.06.19

Сведения об авторах

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Кривоносова Екатерина Александровна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Никулин Роман Германович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Федосеева Елена Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: elena.fedoseeva.79@mail.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: serg150189@mail.ru.

About the authors

Yury D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Ekaterina A. Krivonosova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Sergey D. Nelyubin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Junior Researcher, Department of Welding, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Roman G. Nikulin (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University.

Elena M. Fedoseeva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of

Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: elena.fedoseeva.79@mail.ru.

Sergey A. Terentyev (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: serg150189@mail.ru.