

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.715.002.68

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1580 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Сидельников С.Б.¹, **Загиров Н.Н.¹**, Иванов Е.В.¹, Чукин М.В.², Безруких А.И.¹, Лопатина Е.С.¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Разработка новых технологий изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов из вторичных отходов алюминиевых сплавов, исключаящих при их реализации плавильный передел, является актуальной задачей металлургического производства. Целью работы являлась оценка возможности получения и определения свойств деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580. Представлены результаты исследований способа получения прутков и проволоки из стружки опытного алюминиевого сплава 1580 с содержанием скандия 0,12 мас. %. В качестве основных применены методы порошковой металлургии (брикетирование), обработки металлов давлением (прессование и волочение) и термообработки (отжиг). С использованием разработанной общей технологической схемы термомеханической обработки сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов проведены экспериментальные исследования технологии получения брикетированных заготовок и горячего прессования прутков диаметром 4,9 и 6,8 мм из стружки сплава 1580. Установлено, что прочность прутков после горячей экструзии характеризуется значениями временного сопротивления 370–380 МПа, а пластичность значениями относительного удлинения 18–20%. Такой уровень механических свойств отпрессованных прутков обеспечил возможность безобрывного получения проволоки диаметром 3 мм без проведения промежуточных отжигов. Рассчитаны и экспериментально опробованы маршруты волочения проволоки диаметром до 1 мм из этих прутков. Определены механические свойства проволоки, а также изучено изменение структуры полуфабрикатов и изделий на всех технологических переделах термомеханической обработки. Исследования показали, что проволока, полученная из стружки сплава 1580, соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов, и может быть использована в качестве материала для наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивное производство, сыпучие стружковые отходы, алюминиевые сплавы со скандием, прессование, волочение, проволока, структура и свойства металла

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 25-19-20133.

© Сидельников С.Б., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Чукин М.В., Безруких А.И., Лопатина Е.С., 2025

Для цитирования

Исследование технологии получения проволоки из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580 для использования в аддитивном производстве / Сидельников С.Б., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Чукин М.В., Безруких А.И., Лопатина Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

RESEARCH ON THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING WIRE FROM ALUMINUM 1580 ALLOY CHIP WASTE FOR USE IN ADDITIVE MANUFACTURING

Sidelnikov S.B.¹, Zagirov N.N.¹, Ivanov E.V.¹, Chukin M.V.², Bezrukikh A.I.¹, Lopatina E.S.¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The development of new technologies for the manufacture of long-length deformed semi-finished products from recycled aluminum alloy waste, which exclude melting conversion during their implementation, is an urgent task of metallurgical production. The objective of the work was to evaluate the possibility of obtaining and properties of deformed semi-finished products from chip waste of aluminum 1580 alloy. The research results on a method for producing rods and wire from chips of an experimental aluminum 1580 alloy with a scandium content of 0.12 wt. % are presented. The main methods used are powder metallurgy (briquetting), metal forming (extrusion and drawing) and heat treatment (annealing). Using the developed general technological scheme for the thermal deformation treatment of bulk aluminum alloy chip waste, experimental studies have been conducted on the technology for producing briquetted blanks and hot extruded rods with diameters of 4.9 and 6.8 mm from 1580 alloy chips. It was found that the strength of the rods after hot extrusion is characterized by values of ultimate tensile strength of 370-380 MPa, and plasticity by values of elongation of 18-20 %. Such a level of mechanical properties of pressed rods ensured the possibility of continuous production of wire with a diameter of 3 mm without intermediate annealing. Drawing routes of a wire with a diameter of up to 1 mm from these rods have been calculated and experimentally tested. The mechanical properties of the wire were determined, and the change in the structure of semi-finished products and pieces at all technological stages of thermal deformation treatment were studied. Research has shown that the wire obtained from 1580 alloy chips meets the requirements for welding wire made of aluminum alloys and can be used as a material for surfacing products in the implementation of additive technologies.

Keywords: additive manufacturing, bulk chip waste, aluminum alloys with scandium, extrusion, drawing, wire, metal structure and properties

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science under grant No. 25-19-20133.

For citation

Sidelnikov S.B., Zagirov N.N., Ivanov E.V., Chukin M.V., Bezrukikh A.I., Lopatina E.S. Research on the Technology for Producing Wire from Aluminum 1580 Alloy Chip Waste for Use in Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30>

Введение

Технология проволочно-дугового аддитивного производства, в международном сообществе известна как Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) [1, 2], представляет собой новый метод непосредственного изготовления компонентов путем плавления и послойного нанесения на обложку присадочной проволоки из определенного материала с дугой в качестве источника питания. Высокие скорости наплавки, низкие затраты на материалы и оборудование, возможность осуществления наплавки с максимально точными геометрическими параметрами, соответствие свойств наплавляемого материала предъявляемым к изделию требованиям по механическим свойствам и химическому составу делают эти технологии подходящей альтернативой для замены существующих методов изготовления деталей малой и средней сложности.

В целях расширения области применения технологии WAAM проводятся исследования по использо-

ванию различных материалов в качестве присадочной проволоки из сплавов на основе титана [3], никеля [4], алюминия [5], стали [6]. Доказано, что для аддитивного производства с незначительными адаптациями могут быть применены многие стандартные сварочные сплавы, из которых одним из перспективных следует признать экспериментальный магнийсодержащий алюминидный сплав 1580, для повышения прочности дополнительно легированный скандием и цирконием [7]. Данный сплав имеет широкие перспективы применения в аэрокосмической и оборонной промышленности благодаря своим свойствам, а также оптимальному соотношению прочности и веса [8, 9]. При этом, как и в большинстве случаев промышленного применения, прочность наплавленного слоя указанного сплава должна соответствовать уровню, предъявляемому к деформируемому состоянию того же сплава [10].

Твердотельная переработка отходов в настоящее время представляет собой сферу, вызывающую по-

вышенный интерес исследователей, так как позволяет снижать себестоимость продукции, в особенности по сравнению с производством первичного алюминия, поскольку при этом снижаются энергозатраты, уменьшается количество вредных выбросов в атмосферу, упрощается производственный процесс [11].

Научная новизна работы заключается в разработке новых технических и технологических решений для создания технологии получения проволоки из стружковых отходов алюминиевых сплавов.

Анализ научно-технической литературы показал также, что для исследования технологии термомеханической обработки сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов, исключая при ее реализации плавильный передел, для сплава 1580 целесообразно использовать разработанную ранее общую технологическую схему [11].

Такая схема была неоднократно успешно опробована при исследовании аналогичных технологий для получения деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов различных сплавов алюминия (АД31, АК7 и др.) [11].

Целью работы являлась оценка возможности получения и определения свойств деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья для изготовления деформированных полуфабрикатов использовали стружку сыпучую (с длиной витка менее 100 мм) из

алюминиевого сплава 1580, образующуюся при обработке полуфабрикатов и изделий на металлорежущих станках. Химический состав опытного сплава [12] приведен в табл. 1.

Поскольку в нашем случае при токарной обработке литых заготовок смазочно-охлаждающую жидкость не использовали, образующиеся стружковые отходы по засоренности можно отнести к категории «чистых». Поэтому перед компактированием они не подвергались дополнительной подготовке в виде промывки и очистки от посторонних примесей. Не проводилось также и разделение стружки по размерам.

В качестве основных методов для получения прутков и проволоки из стружковых отходов сплава 1580 применяли методы порошковой металлургии (брикетирование), обработки металлов давлением (прессование и волочение) и термообработки (отжиг).

Полуфабрикаты и изделия получали в соответствии с разработанной схемой (рис. 1), минуя плавильный передел. Объектом исследований и конечным продуктом служила проволока диаметром 1,0 мм, которую опробовали в качестве наплавочной при реализации аддитивных технологий.

Брикетирование стружки проводили при комнатной температуре. Рабочий диаметр контейнера составлял 42 мм. Масса одновременно засыпаемой в пресс-форму стружки принималась равной 40–50 г, что при прикладываемом давлении брикетирования 180 МПа давало возможность получать брикеты высотой 15–20 мм. Плотность их при этом составляла 1,78–1,80 г/см³.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава, из которого получена стружка

Table 1. Chemical composition of the studied alloy from which the chips were obtained

Содержание элемента, мас. %											
Mg	Mn	Si	Sc	Zr	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Ni	Al
5,27	0,49	0,13	0,12	0,13	0,02	0,15	0,16	0,011	0,01	0,006	Основа

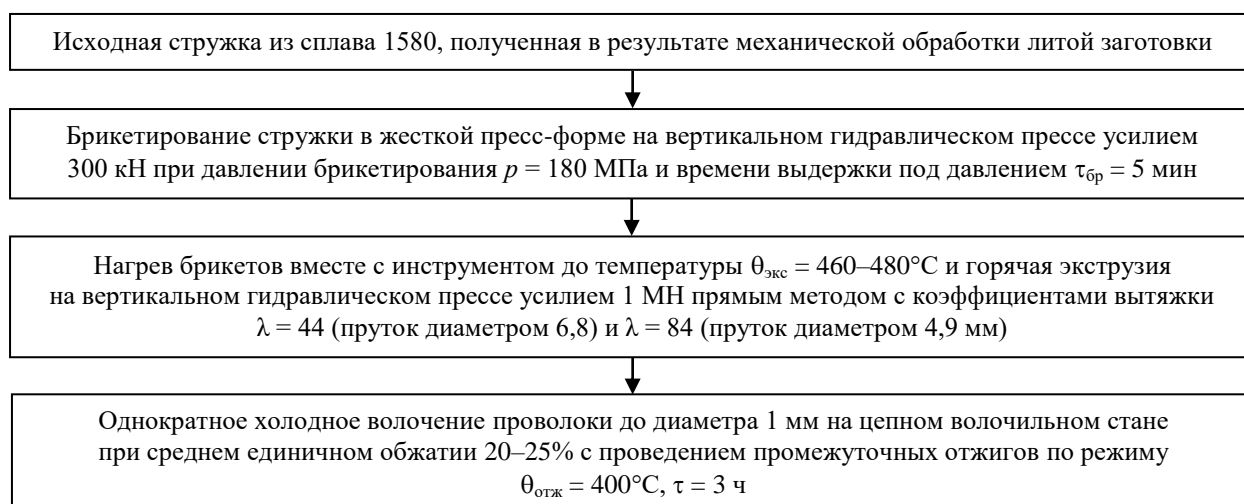


Рис. 1. Технологическая схема изготовления проволоки круглого поперечного сечения из стружки сплава 1580 с использованием традиционной схемы дискретной экструзии

Fig. 1. Flow chart for manufacturing wire of circular cross section from 1580 alloy chips using traditional discrete extrusion

Для получения экструдированных прутков применяли составные образцы, состоящие из двух брикетов, которые после нанесения на боковую контактную поверхность смазки в виде смеси графита с маслом располагали внутри контейнера инструментальной оснастки [11]. Ее, в свою очередь, размещали внутри свободного пространства установленной на столе вертикального прессы усилием 1 МН стационарной печи, нагревали до требуемой температуры, после чего производили непосредственно процесс экструзии. Диаметры рабочего отверстия матрицы были выбраны из имеющегося прессового инструмента равными 6,8 и 4,9 мм для того, чтобы оценить влияние вытяжки при экструзии на возможность осуществления процесса прессования. Коэффициенты вытяжки при экструзии варьировались от 44 до 84. Исследования показали, что в обоих случаях процесс прессования осуществим, однако получение прутка диаметром 4,9 мм позволяет снизить число операций при последующем волочении.

После окончания процесса экструзии отпрессованный пруток извлекали и отделяли от него прессостаток. Сам пруток делили на несколько частей, одна из которых служила для вытачивания образцов для проведения механических испытаний на растяжение, а другая шла на реализацию процесса холодного однократного волочения на цепном волочильном стане. При этом волочение осуществляли с диаметра прессованной заготовки 4,9 мм до диаметра 1,0 мм, с использованием промежуточных и конечного отжигов.

Методика расчета маршрутов и параметров волочения с использованием известных формул [13-16] включала следующие этапы:

1. Коэффициент вытяжки рассчитывают по формуле

$$\mu = \frac{F_0}{F_1}, \quad (1)$$

где F_0 и F_1 – площадь поперечного сечения изделия до волочения и после него соответственно.

2. Суммарное относительное обжатие ε_Σ определяют по формуле

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где d_0 – диаметр проволоки после осуществления очередного процесса отжига; d – диаметр проволоки, фрагменты которой подвергались испытанию на растяжение после проведения очередного этапа деформирования.

3. Силу волочения определяют по формуле А.П. Гавриленко:

$$P_b = \sigma_{bc} (F_0 - F_1) \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha), \quad (3)$$

где σ_{bc} – среднее значение временного сопротивления металла в пределах деформационной зоны; f – коэффициент трения на контакте заготовки с волокой; α – угол волоки.

4. Напряжение волочения рассчитывают по формуле

$$K_b = \frac{P_b}{F_1}. \quad (4)$$

5. Коэффициент запаса прочности определяют по формуле

$$\gamma = \frac{\sigma_b}{K_b}, \quad (5)$$

где σ_b – временное сопротивление металла после волочения.

После каждого из этапов термомеханической обработки проводили отбор образцов для проведения механических испытаний на растяжение, по результатам которых находили значения временного сопротивления σ_b , и относительного удлинения δ , отражающих изменение указанных показателей по технологическим переделам.

Механические свойства прутков и проволоки определяли на универсальных машинах LFM 400 и LFM 10, а микротвердость – с помощью цифрового микротвердомера DM8.

Микроструктуру образцов проволоки исследовали в продольном и поперечном направлениях на микроскопе фирмы CARL ZEISS Axio Observer A1m при увеличениях 200, 1000 крат, а наплавленный слой на световом микроскопе Stemi 2000-C.

Полученные результаты и их обсуждение

Для составления рационального маршрута и получения проволоки диаметром 1 мм был произведен расчет технологических параметров процесса волочения. Для этого использовали кривую упрочнения, полученную в результате аппроксимации данных по свойствам сплава 1580, приведенных в работах [9, 17], в результате чего получили формулу

$$\sigma_b = 386 + 2,45\varepsilon_\Sigma - 0,014\varepsilon_\Sigma^2. \quad (6)$$

Результаты расчетов технологических параметров процесса волочения проволоки из сплава 1580 диаметром 1,0 мм из прутка диаметром 4,9 мм, выполненные с использованием формул по представленной выше методике, приведены в табл. 2.

При проведении расчетов угол волоки принимали равным 8° , коэффициент трения на контакте – 0,1. Среднее значение коэффициента вытяжки было равно 1,31, а суммарное обжатие между двумя соседними отжигами не превышало 63 % (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета технологических и силовых параметров процесса волочения проволоки
Table 2. Calculation results of technological and power parameters of the wire drawing process

Параметры	Значения параметров по переходам волочения											
	1	2	3	4*	5	6	7*	8	9	10*	11	12
Коэффициент вытяжки μ_i	1,33	1,3	1,27	1,22	1,33	1,32	1,31	1,33	1,32	1,31	1,33	1,28
Диаметр до волочения D_{i-1} , мм	4,9	4,2	3,7	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1
Диаметр после волочения D_i , мм	4,2	3,7	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
Площадь поперечного сечения F_i , мм ²	14,2	10,9	8,6	7,0	5,3	4,0	3,1	2,3	1,7	1,3	1,0	0,8
Суммарное относительное обжатие до отжига ϵ_i , %	25	42	54	63	25	43	57	25	43	57	25	41
Сила волочения P_i , Н	3295	2523	1867	1273	1377	991	766	596	431	333	259	169
Напряжение волочения $K_{вi}$, МПа	232	231	217	181	260	247	250	259	247	250	259	216
Коэффициент запаса прочности γ_i	1,88	2,01	2,20	2,68	1,68	1,88	1,92	1,69	1,88	1,92	1,69	2,15

* Место проведения отжига.

Результаты испытаний на разрыв для проволоки различных диаметров в нагартованном и отожженном состоянии приведены в табл. 3. Каждая нанесенная точка соответствует среднему значению указанного показателя для трех испытанных образцов.

Таблица 3. Механические свойства деформированных полуфабрикатов из стружки сплава 1580
Table 3. Mechanical properties of deformed semi-finished products from 1580 alloy chips

Вид полуфабриката	Состояние	σ_b , МПа	δ , %
Пруток диаметром 4,9 мм	Горячепрессованное	370±5	19±1
Проволока диаметром 3,0 мм	Нагартованное	412±2	3±1
Проволока диаметром 3,0 мм	Отожженное	375±5	17±2
Проволока диаметром 1,0 мм	Отожженное	335±2	19±2

Результаты испытаний образцов на разрыв показали, что уровень механических свойств горячепрессованных прутков диаметром 4,9 мм достаточно высок (см. табл. 3) и обеспечил возможность безобрывного получения проволоки диаметром 3,0 мм без проведения промежуточных отжигов.

Исследование микроструктуры проволоки из стружки сплава 1580 (рис. 2) показало, что она представляет собой α -твердый раствор с равномерно распределенными мелкими частицами избыточных фаз. Причем микроструктура проволоки в продольном и поперечном направлениях практически идентична.

При оценке уровня механических свойств ориентировались на требования к проволоке по ГОСТ 7871-2019 [18], в котором указано, что проволока всех марок сплавов диаметром до 4 мм в нагартованном состоянии должна иметь временное сопротивление не менее 100 МПа. Из полученных данных (см. табл. 3) следует, что проволока, полученная из стружки сплава 1580, соответствует требованиям стандарта для сварочной проволоки.

В дальнейшем полученную проволоку использовали в качестве присадочного материала для его наплавки с помощью технологии холодного переноса металла на подложку из сплава АМг6 в виде пластины (рис. 3). Исследования проводились с применением роботизированного комплекса Fanuc ARC Mate 100iC со сварочным оборудованием Fronius TPS 3200 CMT. Режим наплавки был следующим: ток наплавки – 57 А; напряжение дуги – 19,5 В; скорость подачи проволоки – 800 мм/мин; защитный газ – аргон.

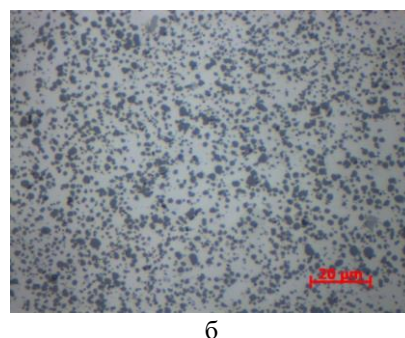
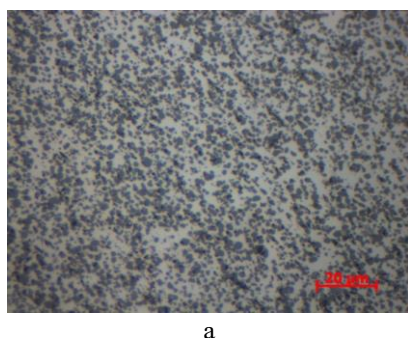


Рис. 2. Микроструктура полученной из стружки сплава 1580 проволоки диаметром 1 мм, $\times 1000$:
а – продольное сечение; б – поперечное сечение

Fig. 2. Microstructure of 1 mm diameter wire obtained from 1580 alloy chips, $\times 1000$: a is sectional view;
b is cross-sectional view

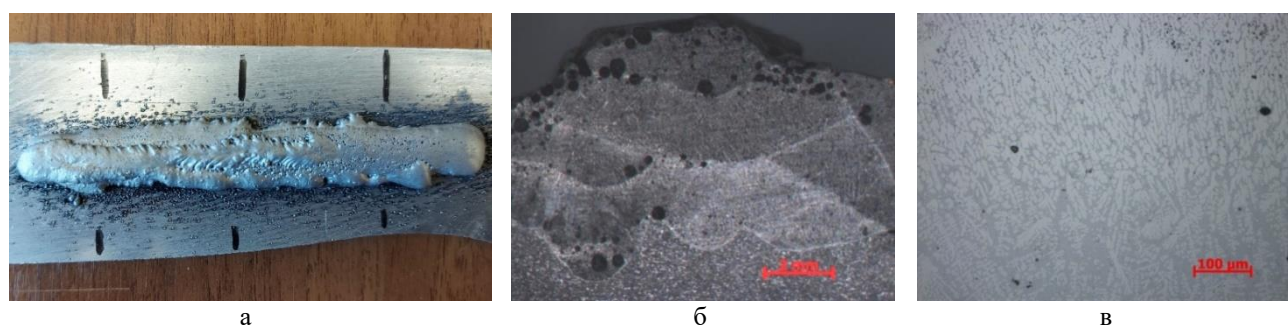


Рис. 3. Вид напавленного образца и структура напавленного слоя из проволоки, полученной из стружки сплава 1580: а – образец; б – макроструктура; в – микроструктура, $\times 200$
 Fig. 3. The view of the deposited sample and the structure of the deposited layer from wire obtained from 1580 alloy chips: a is sample, б is macrostructure; в is microstructure, $\times 200$

После проведения наплавки была изучена макро- и микроструктура полученных образцов. Исследование макроструктуры металла показало, что напавленные слои характеризуются достаточно хорошим взаимодействием друг с другом и с металлом основы (рис. 3, а). Но при этом в верхней части напавленного металла выявлено большое количество пор размерами до 0,5 мм (рис. 3, б). Единичные поры встречаются и в других частях напавленного металла. Микроструктура наплавки представляет собой литое строение сплава (рис. 3, в). Выявляются зоны как с крупным строением дендритов, так и с более мелкими размерами дендритной ячейки, что, по-видимому, связано с условиями охлаждения слоев металла при осуществлении наплавки металла.

Установлено также, что распределение механических свойств металла напавленного слоя носит достаточно равномерный характер. Таким образом, исследования показали, что проволока из стружки сплава 1580 диаметром 1 мм соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов ГОСТ 7871-2019 [18], что дает основание рекомендовать ее для использования в качестве материала для наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий.

Заключение

Таким образом, с применением методов термомеханической обработки проведены исследования технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов из стружки алюминиевого сплава 1580, экономно легированного скандием. Исследования возможности получения прутков прессованием из сбрикетированных из стружки заготовок дало возможность определиться с диаметром заготовки (4,9 мм) для последующего волочения проволоки диаметром от 3 до 1 мм. Исследования механических свойств показали, что проволока из стружки сплава 1580 диаметром 1 мм в отожженном состоянии соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов, и может быть использована в качестве материала для

наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий [18].

Данная статья является последней в научной деятельности и творческой биографии доцента кафедры «Обработка металлов давлением» института цветных металлов Сибирского федерального университета Загирова Николая Наильича

Список источников

1. Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou I. Additive manufacturing and its societal impact a literature review // Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, no. 5-6, pp. 1191-1203.
2. Fraizer E.W. Metal additive manufacturing: a review // Journal Mater. Eng. Perform. 2014, no. 23, pp. 1917-1929.
3. Wang F., Williams S., Colegrove H., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ni-6Al-4V // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012, no. 44, pp. 968-977.
4. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications // Journal of Materials Processing Technology. 2008, no. 203, pp. 439-448.
5. Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al-Si, Al-Mg-Si, and Al-Mg – Mn aluminum alloys produced by electric arc additive growth // Metal Science and Heat Treatment [Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov]. 2019, no. 60, pp. 749-754. (In Russ.)
6. Применение экструдированной наплавки для создания трехмерных объектов из стали / С.С. Жаткин, К.В. Никитин, В.Б. Деев и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. Вып. 6. С. 443-450.
7. Белов Н. А., Алабин А. Н. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия // Цветные металлы. 2007. № 2. С. 99-106.
8. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография. М.: Издательский дом МИСиС, 2010. 511 с.
9. Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава Р-1580, экономно легированного скандием, при горячей деформации / Н. Н. Довженко, С. В. Рушиц, И. Н. Довженко и др. // Цветные металлы. 2019. Вып. 9. С. 80-86.

10. Исследование влияния термообработки на микроструктуру и механические свойства образцов из алюминиевого магнийсодержащего сплава 1580, полученных способом многослойной наплавки / М.Ф. Карташев, А.Н. Юрченко, Р.Д. Гребенкин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. Вып. 2. С. 38-46.
11. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия: монография / Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Сидельников С.Б. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 204 с.
12. ГОСТ 4784-2019. Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.
13. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
14. Ерманок М.З., Ватрушин Л.С. Волочение цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1988. 288 с.
15. Константинов И.Л., Сидельников С. Б., Иванов Е.В. Прокатно-прессово-волочильное производство: учебник. М.: ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2022. 511 с.
16. Технологические основы производства проволоки из сплавов алюминия с переходными металлами с применением совмещенных методов термомеханической обработки: монография / Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Беспалов В.М. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. 208 с.
17. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium / Dovzhenko N. N., Rushchits S. V., Dovzhenko I. N., Sidelnikov S. B. [et al.]. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, 115(7-8), pp. 2571-2579.
18. ГОСТ 7871-2019. Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2019. 20 с.
- made of steel. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020;63(6):443-450. (In Russ.)
7. Belov N.A., Alabin A.N. Promising aluminum alloys with zirconium and scandium additives. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals]. 2007;(2):99-106. (In Russ.)
8. Belov N.A. *Fazoviy sostav promyshlennyyh i perspektivnyh alyuminiyevykh splavov: monografiya* [Phase composition of industrial and promising aluminum alloys: monograph]. Moscow: MISiS Publishing House, 2010, 511 p. (In Russ.)
9. Dovzhenko N.N., Rushchits S.V., Dovzhenko I.N., Yurev P.O. Understanding the behaviour of aluminium alloy P-1580 sparingly doped with scandium under hot deformation. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals]. 2019;(9):80-86. (In Russ.)
10. Kartashev M.F., Yurchenko A.N., Grebenkin R.D. et al. Studying the effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of aluminum magnesium-containing alloy 1580 samples obtained by multi-layer surfacing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(2):38-46. (In Russ.)
11. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B. et al. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdeliy iz syvuchih othodov splavov alyuminiya: monografiya* [Technological bases of obtaining materials and products from bulk aluminum alloy waste: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publishing House, 2019, 204 p. (In Russ.)
12. State standard GOST 4784-2019. Interstate standard. Aluminium and wrought aluminium alloys. Moscow: Standartinform, 2019, 31 p. (In Russ.)
13. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of drawing]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 448 p. (In Russ.)
14. Ermanok M.Z., Vatrushin L.S. *Volocheniye Tsvetnykh metallov i splavov* [Drawing of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 288 p. (In Russ.)
15. Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. *Prokatno-pressovo-volochilnoye proizvodstvo: uchebnik* [Rolling, pressing and drawing production: textbook]. Moscow: INFRA-M; Krasnoyarsk: SFU, 2022, 511 p. (In Russ.)
16. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Bepalov V.M. et al. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva provoloki iz splavov alyuminiya s perekhodnymi metallami s primeneniem sovmeshchennykh metodov termomekhanicheskoy obrabotki: monografiya* [Technological bases of wire production from aluminum alloys with transition metals using combined methods of thermal deformation treatment: monograph]. Krasnoyarsk: SFU, 2025, 208 p. (In Russ.)
17. Dovzhenko N.N., Rushchits S.V., Dovzhenko I.N., Sidelnikov S.B. et al. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;115(7-8):2571-2579.
18. State standard GOST 7871-2019. Filler wire of aluminium and aluminium alloys. Specifications. M.: Standartinform, 2019, 20 p. (In Russ.)

References

1. Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou I. Additive manufacturing and its societal impact a literature review. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;(5-6):1191-1203.
2. Fraizer E.W. Metal additive manufacturing: a review. *Journal Mater. Eng. Perform*. 2014;(23):1917-1929.
3. Wang F., Williams S., Colegrove H., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ni-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012;(44):968-977.
4. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;(203):439-448.
5. Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al-Si, Al-Mg-Si, and Al-Mg – Mnaluminum alloys produced by electric arc additive growth. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2019;(60):749-754. (In Russ.)
6. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B. et al. The use of extruded surfacing to create three-dimensional objects

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 17.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/06/2025; revised 17/10/2025; published 25/12/2025

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Загиров Николай Наильич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

Иванов Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0002-7585-6140

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, НИИ Наносталей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Безруких Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общая металлургия», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ai@bezru.ru. ORCID 0000-0002-0448-9793

Лопатина Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Sergey B. Sidelnikov – DrSc(Eng.), Professor, Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Nikolai N. Zagirov – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

Evgeniy V. Ivanov – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0002-7585-6140

Mikhail V. Chukin – DrSc(Eng.), Professor, Leading Researcher, Research Institute for Nanosteels, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Aleksandr I. Bezrukikh – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Metallurgy, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ai@bezru.ru. ORCID 0000-0002-0448-9793

Ekaterina S. Lopatina – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals named after V.S. Biront, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857