

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Н.Н. Загиров, С.Б. Сидельников, Ю.Н. Логинов, Р.Е. Соколов

Реферат

Реализованы и проанализированы два варианта технологии изготовления проволоки из сплава АК12, предназначенной для пайки и сварки алюминиевых конструкций. Каждый из них предполагает применение на этапе получения промежуточного полуфабриката в виде прутка метода совмещенной прокатки-прессования. Отличие состояло в том, что в одном случае для производства исходной заготовки использовали метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, а в другом – формирование заготовки производили путем компактирования в закрытой пресс-форме сортных сыпучих стружковых отходов металла. Практическое опробование упомянутых вариантов было произведено с использованием специализированных установок и стандартного оборудования, схемы и технические характеристики которых приведены в тексте статьи. Окончательные размеры проволоки получали с помощью холодного волочения, где основными задачами были определение возможности деформации металла без обрывов и выбор режимов отжига в случае необходимости. На основании результатов проведенных исследований дана сравнительная оценка уровня механических характеристик полуфабрикатов после выполнения каждого из этапов разработанной технологической схемы. При этом акцент сделан на особенностях реализации начальных этапов указанных схем, определяющих поведение и свойства металла при последующем осуществлении операций горячей и холодной обработки давлением. Отмечено, что полученные по разработанным технологиям полуфабрикаты имеют различные прочностные и пластические свойства, однако их уровень позволил получить сварочную проволоку, которая прошла промышленную апробацию и была рекомендована для пайки волноводных трактов узлов космической техники.

Ключевые слова: сварочная проволока, алюминиевый сплав, электромагнитный кристаллизатор, стружка, брикетирование, совмещенная прокатка-прессование, волочение, механические свойства.

Введение

Алюминиево-кремниевые сплавы (силумины) с содержанием кремния 12–13 % в литом состоянии обладают структурной стабильностью в широком диапазоне температур эксплуатации, приемлемым уровнем физико-механических и коррозионных характеристик, высокой жидкотекучестью, свариваемостью, а также хорошей износостойкостью [1, 2]. Производство деформированных полуфабрикатов из указанных силуминов относится к узкоспециализированным направлениям развития металлургической промышленности, что связано в основном с их низкой пластичностью при традиционных методах литья и ограниченной информацией о механических свойствах, технологических возможностях модифицирования расплавов, о применении операций термообработки в сочетании с холодной и горячей пластической деформацией металла [3, 4]. Область их применения может быть расширена за счет изготовления сварочной проволоки марки СвАК12, предназначенной для высокотемпературной пайки, сварки и газотермического напыления алюминия и его сплавов, которая к тому же может быть произведена не только из литой заготовки, но и из стружки [5].

Отечественная промышленность, используя традиционные методы (литье слитков, прессование на гидравлических прессах и волочение), такую проволоку практически не производит. В работе [6] доказана возможность получения из силуминов крупногабаритных литых заготовок с уровнем пластичности, обеспечивающим их дальнейшее горячее формоизменение с высокими степенями деформации. При этом применение комплексного легирования алюминиево-кремниевых сплавов в сочетании с повышенными скоростями охлаждения при литье заготовок, находящимися в пределах 10–15 °С/с, обеспечивает формоизменение литых заготовок в диапазоне температур 400–500 °С экструдированием с вытяжками до 625 единиц при сохранении высокого уровня пластических характеристик получаемых заготовок и способности их к последующему формоизменению в холодном состоянии. Однако такая технология обладает высокой трудо- и энергоемкостью, поэтому ее использование может быть экономически выгодно только при больших объемах промышленного производства. Поиск технических и технологических решений, позволяющих максимально эффективно решить указанную задачу, представляется с практической точки зрения весьма актуальным.

Одним из таких решений является применение на этапе получения промежуточного полуфабриката в виде прутка метода совмещенной прокатки-прессования (СПП), многократно опробованного применительно к получению прутково-проволочной продукции из различных деформируемых алюминиевых сплавов [7, 8]. В

случае со сплавом АК12 задача усложняется тем, что традиционные методы литья заготовок в изложницы для дальнейшей их обработки давлением здесь не подходят, поскольку сам сплав относится к литейным термически неупрочняемым сплавам [9].

В качестве объекта исследования, таким образом, была выбрана технология получения сварочной проволоки из сплава АК12. Требования к проволоке сформулированы в технических условиях ТУ 1-808-274-2003 «Проволока тянутая из сплава СвАК12», согласно которым ее диаметр не должен превышать 2,0 мм, при этом ее механические свойства не оговариваются.

Основными этапами (переделами) данной технологии являлись следующие:

- формирование заготовки заданных формы и размеров поперечного сечения;
- нагрев и деформация заготовки методом совмещенной прокатки-прессования для получения прутка диаметром 7 мм;
- волочение проволоки до заданного диаметра с применением, при необходимости, промежуточного отжига.

Целью исследования было экспериментальное опробование двух вариантов технологии изготовления проволоки марки СвАК12, отличающихся способом формирования заготовки под последующую деформацию методом СПП, и сравнительный анализ свойств полученной прутково-проволочной продукции.

Методика проведения исследований

Первый способ формирования заготовки заключался в использовании для ее изготовления метода непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) [10]. Экспериментальная плавно-литейная установка для получения слитков малого поперечного сечения из алюминия и его сплавов [11], основным элементом которой является ЭМК, представлена на рис. 1. На ней получали литые длинномерные заготовки из сплава АК12 диаметром 16,7 мм.

Структура заготовок, отливаемых в электромагнитный кристаллизатор, в основном подчиняется известным закономерностям формирования структуры при непрерывном литье в кристаллизатор скольжения. Однако примененный в работе способ отливки вносит и некоторые особенности в условия формирования структуры слитка.

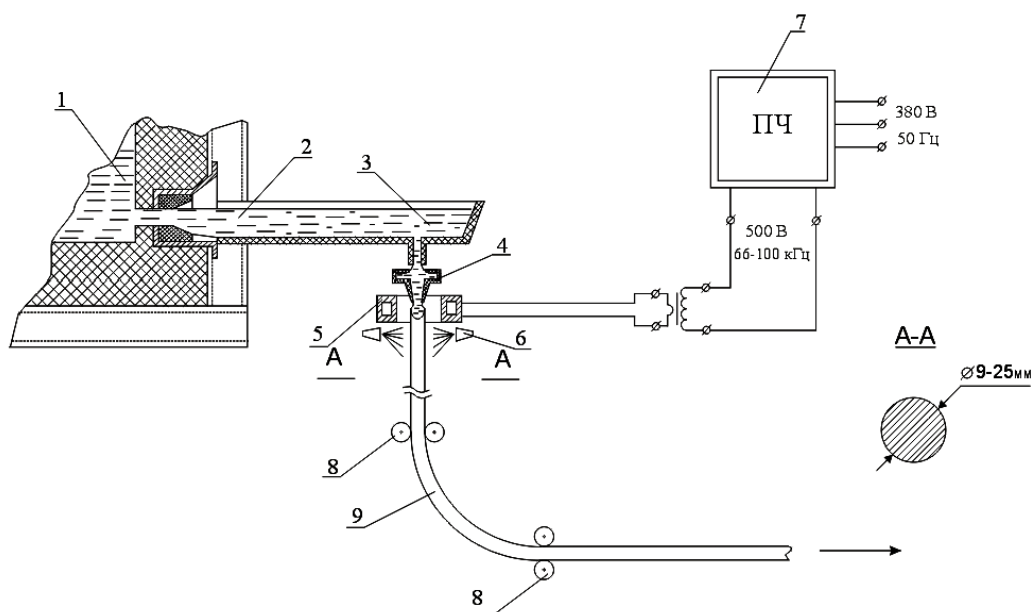


Рис. 1. Общий вид литейной установки с электромагнитным кристаллизатором:

1 – миксер; 2 – расплав металла; 3 и 4 – литейная оснастка, 5 – электромагнитный кристаллизатор, 6 – устройство охлаждения, 7 – источник питания повышенной частоты, 8 – тянущий механизм, 9 – литая заготовка

Эти отличия объясняются влиянием таких факторов, как:

- отсутствие непосредственного контакта кристаллизующегося слитка с поверхностью теплопроводного кристаллизатора-формообразователя;
- максимальное приближение пояса охлаждения к поверхности затвердевания слитка с обеспечением непрерывного теплоотвода;
- принудительные тепло- и массообменные процессы в лунке, инициируемые воздействием электромагнитного поля на расплав.

В результате влияния этих факторов поверхность слитков становится гладкой, а структура более мелкозернистой. Кроме того, достигаются высокая плотность и мелкодисперсная внутридendrитная структура в периферийных зонах.

Металлографические исследования полученных литых заготовок, проведенные на световом микроскопе Axio Observer A1.m. (Carl Zeiss), подтвердили, что макроструктура слитка мелкозернистая и однородная по сечению. Микроструктура его мелкодисперсна, представляет собой дендриты алюминиевого твердого раствора и эвтектику Si+Al, причем эвтектика имеет тонкодифференцированное строение, а частицы кремния в ней настолько дисперсные, что неразличимы даже при увеличении 1500 крат.

Такая структура обусловила высокие прочностные и пластические свойства металла литой заготовки. Испытания на универсальной машине LFM400 усилием 400 кН

методом растяжения показали, что средняя величина временного сопротивления разрыву металла литых заготовок составила около 290 МПа (по ГОСТ Р 50511-93 – 160 МПа), а относительного удлинения – около 15 % (по ГОСТ Р 50511-93 – 5 %).

Второй способ формирования заготовки базировался на применении метода термомодеформационной обработки сортных стружковых сыпучих отходов [12], из которых горячим брикетированием на вертикальном прессе в разъемной пресс-форме получали заготовки удлиненной формы и требуемых размеров поперечного сечения.

При получении заготовок-брикетов из сыпучей стружки основное условие, наряду с достижением требуемого уровня интегральной плотности, сводится к формированию прямоугольной в плане заготовки (прессовки) с определенным соотношением размеров по высоте и ширине. Такая особенность обусловлена спецификой протекания деформации на начальном этапе осуществления процесса СПП при задаче заготовки в закрытый ящичный калибр, образованный валками и перекрытый на выходе матрицей.

В работе брикетирование стружки производили в пресс-форме, схема которой показана на рис. 2.

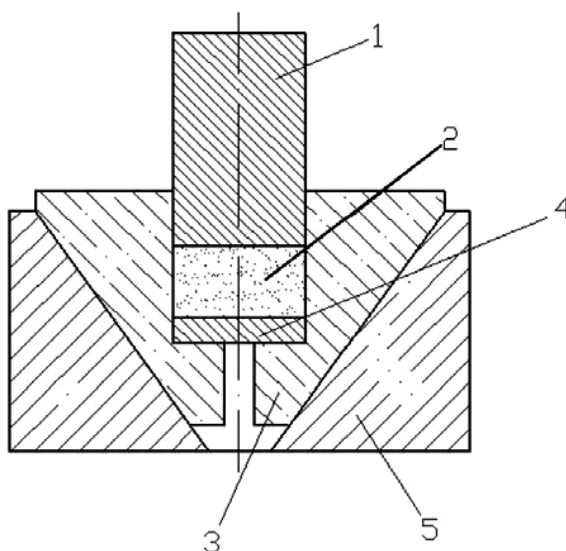


Рис. 2. Схема пресс-формы для получения брикетов под последующую совмещенную прокатку-прессование: 1 – верхний пуансон, 2 – стружка, 3 – матрица, 4 – нижний пуансон, 5 – обойма

Собранную пресс-форму с засыпанной навеской стружки размещали внутри рабочего пространства печи и в таком виде устанавливали на рабочем столе вертикального гидравлического пресса усилием 1 МН. После нагрева пресс-формы до температуры $\theta_{бр} = 350$ °С через верхний пуансон прикладывали давление брикетирования $p_{бр} = 160$ МПа и давали выдержку при этом давлении в течение $\tau_{бр} = 0,5$ мин. После снятия

давления брикетирования элементы разъемной матрицы под действием бокового давления раздвигали, осуществляя скольжение их вверх по наклонным поверхностям обоймы. При такой схеме брикет разгружается равномерно, давление на него снимается одновременно со всех сторон, что исключает трещинообразование в момент извлечения его из пресс-формы.

Таким образом, экспериментальное опробование технологии изготовления сварочной проволоки из сплава АК12 проводили с использованием литой компактной заготовки, полученной с применением ЭМК, и некомпактной заготовки, полученной горячим брикетированием стружки. В обобщенном виде схемы изготовления проволоки диаметром 2 мм с использованием двух описанных выше способов формирования заготовки представлены на рис. 3.



Рис. 3. Обобщенная схема вариантов технологии изготовления проволоки из сплава АК12

Для изготовления прутков использовали лабораторную установку СПП-200, схема которой приведена на рис. 4. Валковый узел ее расположен в горизонтальной плоскости, что упрощает конструкцию и способ прижима матрицы к валкам. Установка зазора между валками осуществлялась с помощью специального механизма, позволяющего производить совместное и раздельное вращение нажимных винтов. Технические характеристики установки приведены в табл. 1. Сам процесс СПП по обоим вариантам осуществлялся при одинаковых температурно-скоростных условиях.

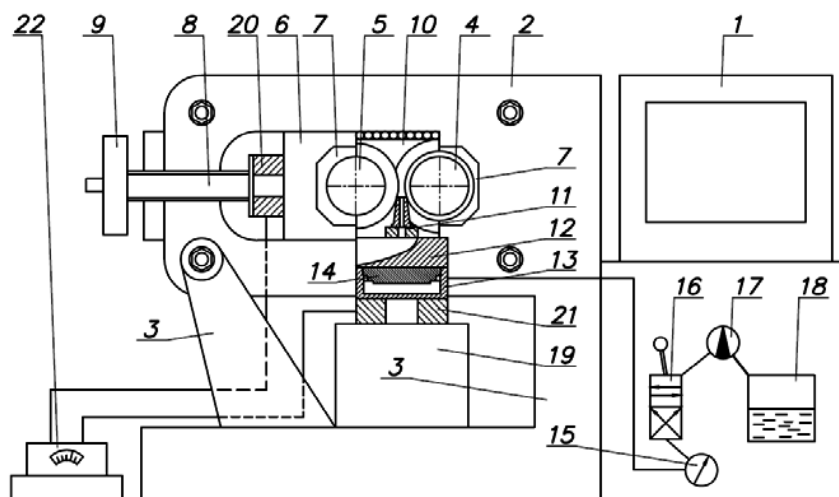


Рис. 4. Схема лабораторной установки СПП-200:

1 – печь для нагрева заготовки; 2 – станина; 3 – стальные опоры; 4 – валок с выступом; 5 – валок с канавкой; 6 – подушки; 7 – подшипники скольжения; 8 – нажимные винты; 9 – штурвал-шестерня; 10 – направляющее устройство; 11 – матрица; 12 – подставка; 13 – гидравлический цилиндр; 14 – плунжер; 15 – насос; 16 – гидрораспределитель; 17 – манометр; 18 – бак; 19 – опора; 20, 21 – мездозы; 22 – тензостанция

Заготовки (не менее трех) непосредственно перед задачей в валки нагревали до температуры 500 ± 20 °С в печи, входящей в состав установки СПП. Параллельно проводили подогрев валков вместе с установленной матрицей до температуры 80–100 °С. Подачу заготовок в закрытый калибр, образованный валками, осуществляли последовательно одна за одной, стремясь с целью сварки к сокращению до минимума пауз между их поступлением в очаг деформации. Минимальный зазор между валками составлял 7 мм, а диаметр рабочего отверстия матрицы, используемой для получения прутков, был равен 7 мм. Процесс совмещенной прокатки-прессования при таком уровне деформации (50 % обжатия при прокатке и коэффициенте вытяжки порядка $\mu = 7$ при прессовании) шел достаточно устойчиво. При этом диаметр полученных прутков лежал в поле заданных инструментом допусков $\pm 0,05$ мм. Энергосиловые параметры

совмещенной обработки соответствовали расчетным и для принятых условий эксперимента не превышали следующих значений: усилие, действующее на валки – 345 кН; усилие, действующее на матрицу – 275 кН.

Таблица 1

Технические характеристики установки СПП-200

Параметры	Значения
Базовый диаметр валков	200
Диаметр валка с выступом, мм	214
Диаметр валка с канавкой, мм	164
Базовая длина бочки валка, мм	240
Диаметр шейки вала, мм	100
Размеры калибра в наименьшем сечении, мм	7 × 15
Количество оборотов валка, об/мин	4, 8, 14
Передаточное число редуктора, ед.	40
Мощность электродвигателя, кВт	20
Момент на выходном валу, кНм	10
Рабочее давление гидростанции, кгс/см ²	200–500
Максимальное усилие прижима, кН	300

Холодное волочение отпрессованных прутков диаметром 7 мм для получения проволоки требуемого диаметра 2 мм осуществлялось на цепном волочильном стане усилием 50 кН (табл. 2) со средним обжатием $\epsilon_{\text{ср}} = 10\text{--}15\%$.

Таблица 2

Технические характеристики цепного волочильного стана

Параметры	Значения
Скорость волочения, м/с	0,17
Сила волочения, кН	50
Ход тележки, м	2
Количество ниток, шт.	1
Потребляемая мощность электродвигателя, кВт	25
Габаритные размеры, мм	3000 × 1800 × 1300

При составлении маршрута волочения учитывалось, что кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия лишь в элементарном виде. Имея переменную растворимость, кремний в то же время не влияет на способность алюминия к деформационному упрочнению, что связано с неблагоприятным характером распада твердого раствора алюминия. Присутствуя в алюминии, кремний только несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства.

Для отслеживания изменения уровня механических характеристик металла в ходе волочения осуществляли отбор соответствующих образцов проволоки, которые испытывали методом растяжения. Сообщаемая проволоке к этому моменту суммарная величина деформации оценивалась показателем ε_{Σ} .

Результаты и их обсуждение

Анализ механических свойств полученных из разных заготовок прутков (табл. 3) показал, что, несмотря на одинаковые температурно-скоростные условия совмещенной прокатки-прессования, пластические и прочностные характеристики (σ_b – временное сопротивление разрыву, δ – относительное удлинение и ψ – относительное сужение) металла имеют существенные различия. Значения относительного удлинения прутков, полученных из некомпактной заготовки ($\delta = 5-7\%$), оказались в два раза меньше значений удлинения для изготовленных из компактной заготовки. В связи с этим в технологический процесс получения проволоки из некомпактной заготовки для восстановления пластических свойств пришлось вводить промежуточный отжиг при температуре $\theta_{отж} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч, который был проведен на диаметре 6 мм.

Из представленных в табл. 3 данных также следует, что, независимо от способа формирования заготовки для обработки методом СПП, горячедеформированные прутки имеют повышенные прочностные и пластические свойства по сравнению с теми, что регламентируются стандартом на литое состояние. Объяснить это явление можно сохранением уровня нагартовки материала, полученной в процессе СПП, и заторможенностью протекания процессов рекристаллизации в алюминиевых сплавах, в том числе содержащих кремний. При этом прутки, изготовленные из заготовки, отлитой в ЭМК, обладают повышенным (практически в 2 раза) ресурсом пластичности, что делает нецелесообразным проведение для него промежуточного отжига при последующем холодном волочении. В ходе волочения металл проволоки заметно упрочняется, одновременно теряя в пластичности, что с точки зрения потребительских характеристик, предъявляемых к сварочной проволоке, не совсем желательно. Поэтому, по мере

приближения к конечным размерам или после последнего перехода, проволоку рекомендуется подвергать отжигу.

Таблица 3

Результаты сравнительных испытаний на растяжение прутков и проволоки из сплава АК12, полученных с использованием отлитой в ЭМК заготовки (способ 1) и скомпактированного из стружки брикета (способ 2)

Наименование сопоставляемого объекта	Способ 1		Способ 2	
	Технология	Основные характеристики	Технология	Основные характеристики
исходная заготовка	литье в ЭМК заготовки диаметром 16,7 мм	$\sigma_B = 285\text{--}295$ МПа $\delta = 14,0\text{--}16,0$ % $\psi = 18,0\text{--}20,0$ %	горячее брикетирование заготовки размерами $h \times b \times l = 13 \times 15 \times 200$ мм	$\rho = 85\text{--}87$ %
пруток диаметром 7 мм	совмещенная прокатка-прессование ($\mu = 7$)	$\sigma_B = 245\text{--}255$ МПа $\delta = 12,0\text{--}14,0$ %	совмещенная прокатка-прессование ($\mu = 7$)	$\sigma_B = 220\text{--}230$ МПа $\delta = 5,0\text{--}7,0$ % $\psi = 8,0\text{--}10,0$ %
проволока диаметром 4 мм	волочение без отжига $\varepsilon_\Sigma = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} 100\% = 67\%$	$\sigma_B = 350\text{--}360$ МПа $\delta = 9,5\text{--}11,5$ %	волочение с отжигом на диаметре 6 мм $\varepsilon_\Sigma = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} 100\% = 56\%$	$\sigma_B = 180\text{--}185$ МПа $\psi = 3,0\text{--}4,0$ %
проволока диаметром 3 мм	волочение без отжига $\varepsilon_\Sigma = 82\%$	$\sigma_B = 420\text{--}430$ МПа $\delta = 3,5\text{--}5,0$ %	волочение с отжигом на диаметре 6 мм $\varepsilon_\Sigma = 75\%$	$\sigma_B = 190\text{--}195$ МПа $\psi = 2,5\text{--}3,0$ %
проволока диаметром 2 мм	волочение без отжига $\varepsilon_\Sigma = 92\%$	$\sigma_B = 455\text{--}470$ МПа $\delta = 1,0\text{--}2,0$ %	волочение с отжигом на диаметре 6 мм $\varepsilon_\Sigma = 89\%$	$\sigma_B = 200\text{--}210$ МПа $\psi = 1,5\text{--}2,0$ %

При реализации варианта, заключающегося в применении в качестве заготовок стружковых брикетов с относительной плотностью $\rho = 85\text{--}87$ % (см. табл. 3), наличие промежуточного отжига (в рассматриваемом примере технологии на диаметре 6 мм) является неотъемлемым условием дальнейшего устойчивого проведения процесса холодного волочения проволоки с целью исключения ее обрывов. При этом после проведения отжига, несмотря на существенное снижение прочности до уровня значений $\sigma_B = 100\text{--}110$ МПа и незначительное повышение пластичности металла, ее ресурса, наряду

со снижающейся интенсивностью упрочнения, вполне хватает для получения проволоки заданного диаметра (см. табл. 3). Данный вариант технологии отличается еще и тем, что себестоимость такой проволоки оказалась ниже по сравнению с себестоимостью проволоки, произведенной из литой заготовки на ЭМК, так как в качестве исходного сырья использовались отходы машиностроительного производства в виде стружки.

Следует отметить, что приемы подготовки стружки к переработке в настоящее время разрабатываются применительно к конкретным условиям производства [13]. В работе [14] выполнена оценка процентного соотношения стружки, возникающей в различных отраслях промышленности. В исследованиях, выполненных в США и Германии [15-17], была показана возможность производства прессованных профилей непосредственно из стружки алюминиевых сплавов, однако эти работы были направлены на переработку стружки лишь из деформируемых сплавов, например, марки 6061. Реализация такой возможности для литейных сплавов не очевидна. Доказательство такой возможности применительно к литейному сплаву АК12 приведено в данной работе.

Практическая ценность выполненной работы показана поставкой проволоки, полученной по разработанным и описанным выше вариантам технологии, для пайки специальных конструкций из алюминиевых сплавов (согласно ТУ 1-808-274-2003) на ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва. С использованием этой проволоки были произведены опытные партии волноводных трактов из алюминиевых сплавов и получено заключение, что качество пайки соответствует требованиям конструкторской документации для узлов космической техники.

Заключение

Таким образом, обобщая всё вышеизложенное, можно сделать следующие выводы по работе.

1. Доказана возможность получения заготовки из литейного силумина для последующей обработки по двум вариантам технологии: литьем заготовки в электромагнитный кристаллизатор и получением этой заготовки компактированием стружки.
2. Доказана возможность применения метода СПП для получения промежуточной заготовки с целью последующей ее холодной обработки.
3. Выявлено, что уровень механических свойств полученного полуфабриката позволяет вести его дальнейшую обработку методами холодной деформации.
4. Показана возможность безобрывного волочения проволоки из полученного материала с достижением диаметра до 2 мм.

5. Свойства полученной проволоки позволяют применить ее в качестве сварочного электрода независимо от схемы производства, при этом по схеме производства проволоки из стружки возникает экономия энергозатрат за счет исключения операции переплава.
6. Технологические схемы реализованы на практике и рекомендованы для промышленного применения.

Библиографический список

1. Aktarer S.M., Sekban D.M., Saray O., Kucukomeroglu T., Ma Z.Y., Purcek G. Effect of two-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of as-cast binary Al–12Si alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 636. P. 311–319.
2. El Sebaie O., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al–Si casting alloys // *Materials Science and Engineering: A*, 2008. V. 486. Iss. 1–2. P. 241–252.
3. Hu H.E., Wang Xin-yun, Deng L. High temperature deformation behavior and optimal hot processing parameters of Al-Si eutectic alloy // *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 576, P. 45-51.
4. Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. и др. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: Сиб.федер. ун-т, 2012.- 196 с.
5. Загиров Н.Н., Константинов И.Л., Иванов Е.В. Разработка технологии изготовления сварочной проволоки СВАК12 из стружковой заготовки // *Известия вузов. Цветная металлургия* №2, 2012, С. 36-41.
6. Горбунов Д.Ю., Ровенский Г.В. Стайнова Т.В. Исследование параметров деформации модифицированных алюминиево-кремниевых сплавов и механических свойств тонкостенных холоднодеформированных полуфабрикатов из них // *Технология легких сплавов*, 2004, №6. С. 29-32.
7. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. - 344 с.
8. Sokolov Ruslan E., Sidelnikov Sergey B. Application of Methods Combined Treatment for Obtaining Welding Wire from Silumins // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2015, №2 (2015 8), С. 180-184.
9. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. - 272 с.

10. Довженко Н. Н. Сидельников С. Б., Тимофеев В.Н. и др. Новые технологии и оборудование для обработки цветных металлов и сплавов // Моделирование и развитие процессов ОМД. Межрегиональный сб. науч. трудов. - Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. - С. 259 -262.
11. Первухин М.В., Тимофеев В.Н., Христинич Р.М и др. Патент РФ № 48836. Устройство для непрерывного литья слитков в электромагнитном поле. Опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31.
12. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением. Монография / Красноярск: СФУ. 2015. 171 с.
13. Ровин Л.Е., Валицкая О.М. Ресурсосбережение при брикетировании стружки. Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2016. Т. 1. № 2 (65). С. 27-35.
14. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process. Procedia CIRP. 2015. V. 26. P. 761 – 766.
15. Güley V., Güzel A., Jäger A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., Misiolak W.Z. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion. Material Science and Engineering A, 2012. V. 574. P. 163-175.
16. Matthias Haase, A. Erman Tekkaya. Recycling of Aluminum Chips by Hot Extrusion with Subsequent Cold Extrusion. Procedia Engineering. 2014. V. 81. P. 652-657.
17. Haase M., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., Misiolak W.Z. Improving mechanical properties of chip-based aluminum extrudates by integrated extrusion and equal channel angular pressing (ECAP). Materials Science and Engineering A, 2012. V. 539. P. 194-204.