

СРАВНЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ МАРКИ АСП-40 СО СПЛАВОМ АНАЛОГОМ

Босалыго Кирилл Алексеевич

Инженер-технолог 1 кат. Аддитивного производства АО «НПО

Лавочкина,

Россия, г. Химки

Тимошин Антон Андреевич

Инженер-электроник бортовых и наземных электрических комплексов

средств выведения АО «НПО Лавочкина,

Россия, г. Химки

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена технологическим аспектам производства фасонных заготовок из алюминиевых синтезированных сплавов методом селективного лазерного сплавления (СЛС), исследованию их свойств и сравнительному анализу с литейными сплавами – аналогами. В частности, представлены результаты исследований механических свойств образцов из порошка марки АСП-40, полученных методом СЛС, до и после термообработки, а также образцов изготовленных из переплавленных отходов после получения изделий методом СЛС из порошка той же марки. Результаты химического анализа синтезированного сплава позволили определить литейный сплав -аналог, близкий по химическому составу, а именно АК9ч.

Были проведены механические испытания образцов, на основе полученных результатов провели сравнительный анализ и дали количественную оценку, отображающую преимущества и недостатки каждого из методов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, синтезированный сплав, сплав из отходов после СЛС,

механические свойства, химический состав, образец, пористость, 3D модель, алюминиевый порошок.

Изготовление образцов с помощью процесса СЛС

Образцы для механических испытаний, с помощью процесса СЛС из порошка АСП-40, были получены на системе селективного лазерного сплавления SLM 280 HL.

С использованием метода селективного лазерного сплавления (SLM) возможно создание 3D изделия при помощи послойного сплавления из исходного металлического порошка. Энергия лазерного луча приводит к точечному плавлению металлического порошка. С использованием этой технологии, на основе 3D проекта, может быть создана практически любая трехмерная структура.

Изготовление образцов из отходов после СЛС, литьем в песчано-глиняную форму

Изначально предполагалось получить образцы из порошка АСП-40, но из-за толстой оксидной пленки на поверхности мельчайших гранул сплава, расплавить порошок не удалось, даже при температуре $\approx 900^{\circ}\text{C}$, которая в значительной мере превышала температуру плавления сплава аналога АК9ч 638°C . С целью получения литых образцов было взято 1,5 кг алюминиевого синтезированного сплава из порошка АСП-40. В качестве исходного материала выступили отходы после процесса СЛС. К отходам относятся части поддерживающих структур синтезированных деталей и забракованные изделия, которые по разным причинам не были выращены до конца, либо на них были обнаружены дефекты, не позволяющие эксплуатировать их в дальнейшем. Переплав отходов осуществлялся в печи сопротивления. Температура сплава на момент заливки в форму $\approx 730^{\circ}\text{C}$. Перед заливкой сплава проводили его дегазацию аргоном и выстаивание. Заливка осуществлялась в песчано-глиняную форму. После получения отливки, от образцов была отрезана литниково-питающая система (ЛПС). Все образцы подверглись исследованию

на микропористость и часть из них была направлена на термическую обработку.

Определения процента пористости в образцах из синтезированного и литого сплава из порошка АСП-40 на системе компьютерной томографии. Для каждого из образцов подбирался оптимальный режим его просвечивания и в последующем, на станции обработки данных, осуществлялась реконструкция кадров, полученных при сканировании образца, в 3D модель. По полученной 3D модели определялся процент микропористости внутри тела образца. Для каждого из способов получения образцов оценивался процент микропористости, для этого все образцы проходили сканирование и реконструкцию с последующей оценкой.

Термическая обработка образцов

Термическая обработка (Т/О) образцов осуществлялась сотрудниками цеха термической обработки АО НПО им. Лавочкина в печах для термической обработки металлов в течение 4 часов при 300°C с последующим охлаждением на воздухе. Для этих целей из каждой партии полученных образцов отбиралась половина, которые проходили Т/О. После прохождения термической обработки они отправлялись на механические испытания.

Механические испытания

Образцы, полученные с помощью процесса СЛС проходили механические испытания на растяжение в механической лаборатории АО «НПО Лавочкина» с использованием разрывной машины.

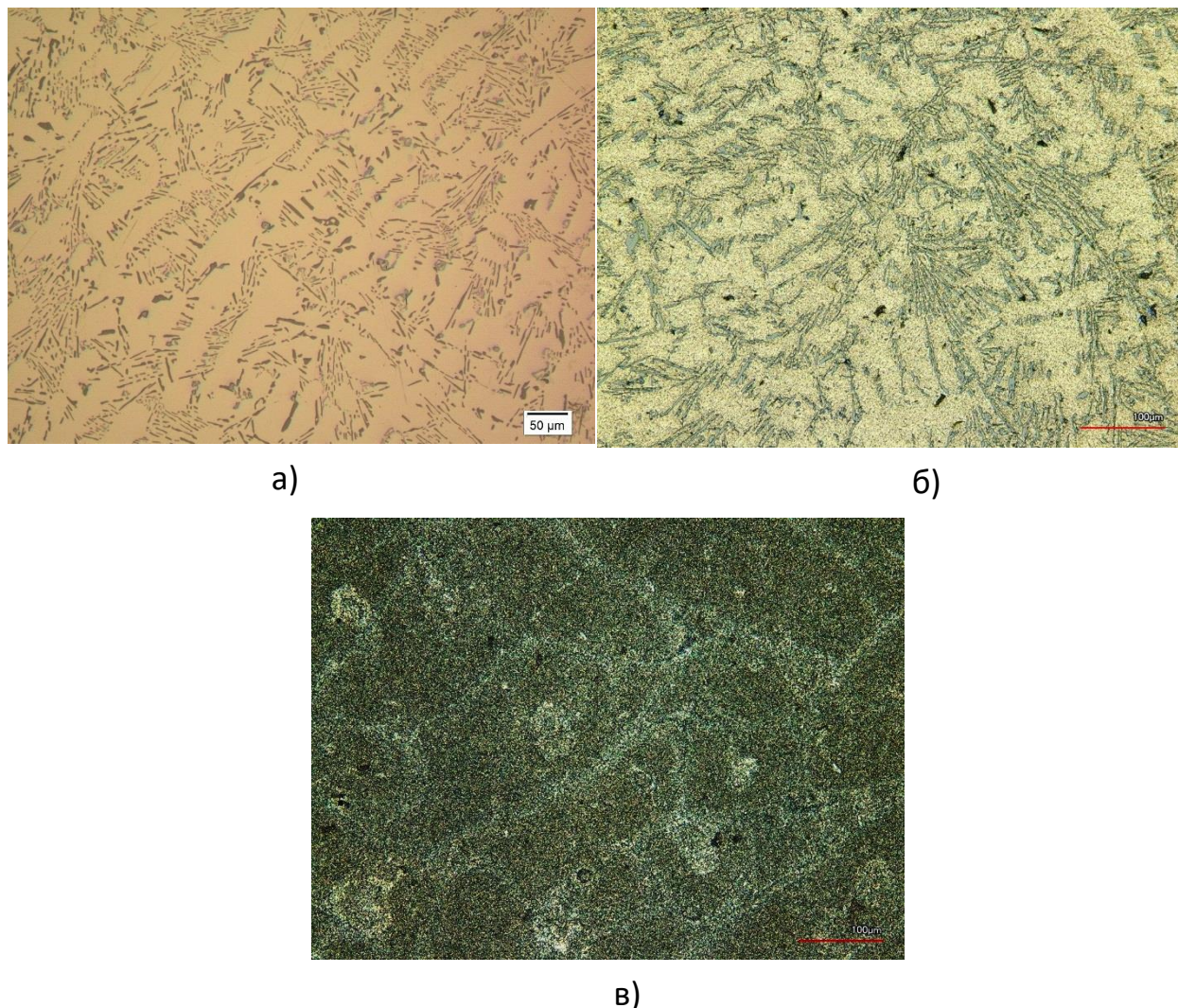
Испытания образцов, полученных с помощью литья в песчано-глиняную форму, осуществлялись в лаборатории НИУ МАИ сотрудниками кафедры Т и САПР МП.

Расчеты условного предела упругости и условного предела текучести производились согласно ГОСТ 12004-81.

Сравнение микроструктуры

На рисунке 1 и 2 представлены снимки микроструктуры в горизонтальных сечениях для образцов полученных методом СЛС из порошка

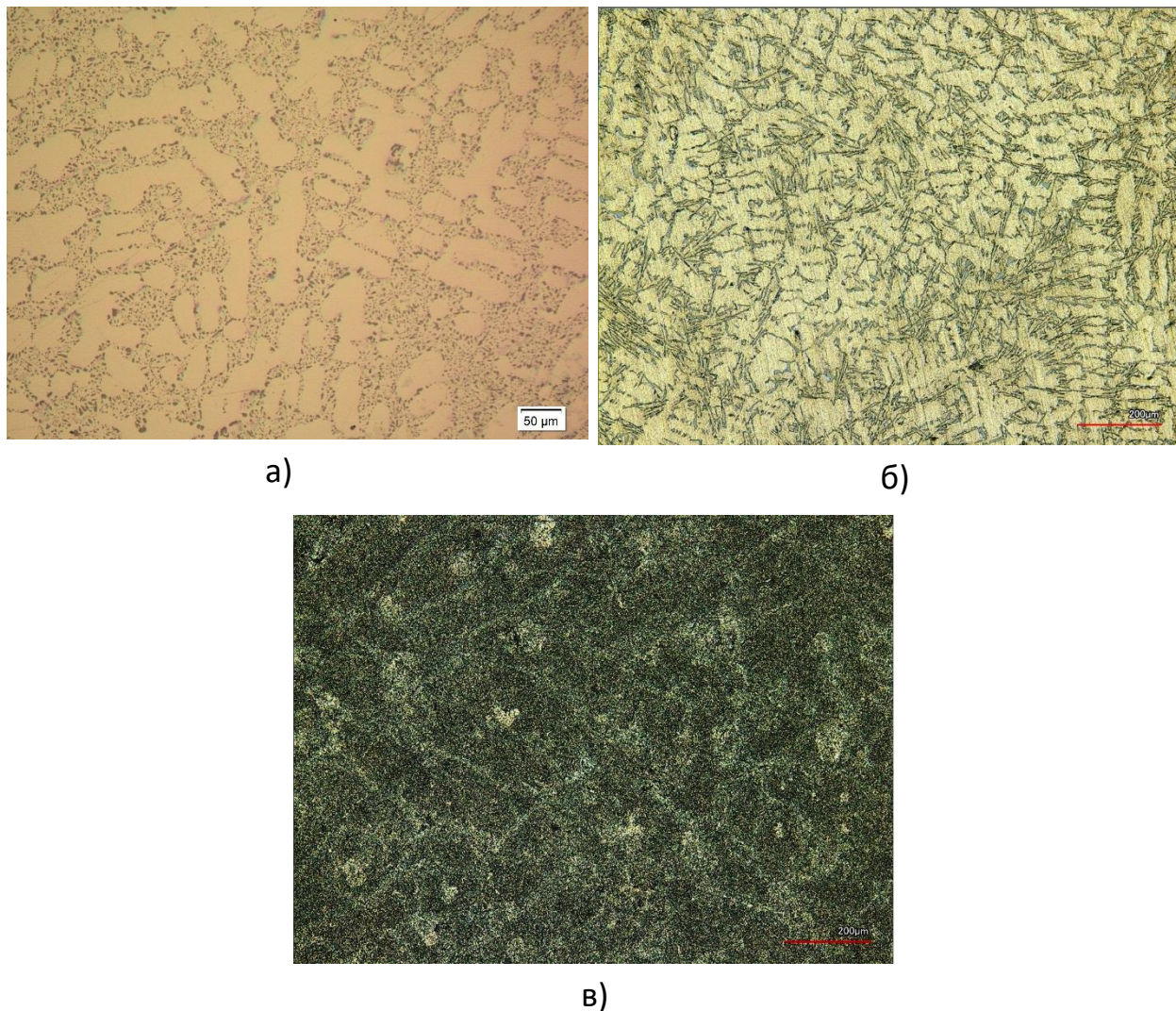
марки АСП 40, литых в песчано-глиняную форму из отходов после получения изделий методом СЛС порошка аналогичной марки и близкого по химическому составу литейного сплава АК9ч.



а – не модифицированный сплава АК9ч; б – литой сплав из отходов после СЛС; в – синтезированный сплав из порошка АСП-40

Рисунок 1. – Снимки микроструктуры на увеличении $\times 200$

Микроструктура сплава не модифицированного АК9ч и литого сплава из отходов после СЛС идентичны друг другу и имеют характерное строение для силуминов. Она представляет собой твердый раствор алюминия и эвтектику Al-Si между ними, с формой частиц, имеющих дендритное строение. В структуре синтезированного сплава, в отличие от литой, отсутствуют крупные включения эвтектической составляющей на основе алюминия и кремния. [8]



а – модифицированный сплав АК9ч, увеличение $\times 200$; б – литой сплав из отходов после СЛС, увеличение $\times 100$; в – синтезированный сплав из порошка АСП-40, увеличение $\times 100$

***Рисунок 2. – Снимки микроструктуры
увеличение $\times 100$***

Одним из основных факторов, определяющих качество полученных изделий методом СЛС и литьем, является пористость материала и наличие в нем несплошностей. Для обоих методов наличие или повышенный процент пористости вызван разными факторами, как и механизм ее образования, но в отдельных случаях они могут быть схожи. Пористость в теле изделия имеет важное значение оказывающие прямое влияние на механические свойства материала и его герметичность, поэтому в таблице 1 представлены результаты

исследования образцов на наличие данных дефектов, а на диаграмме (рис. 3) для сравнения показан средний ее процент для каждого из методов.

Таблица 1

Результаты исследования образцов на наличие и процент пористости в материале

Образцы полученные методом СЛС		Образцы полученные литьем	
№ образца	Пористь, %	№ образца	Пористь, %
1	2	3	4
A1	0,17	1	2,34
A2	0,19	2	2,45
A3	0,16	3	2,39
A4	0,18	4	2,27
B1	0,20		
B2	0,27		
B3	0,16		
B4	0,46		
C1	0,18		
C2	0,36		
C3	0,32		
C4	0,34		
D1	0,26		
D2	0,35		
D3	0,35		

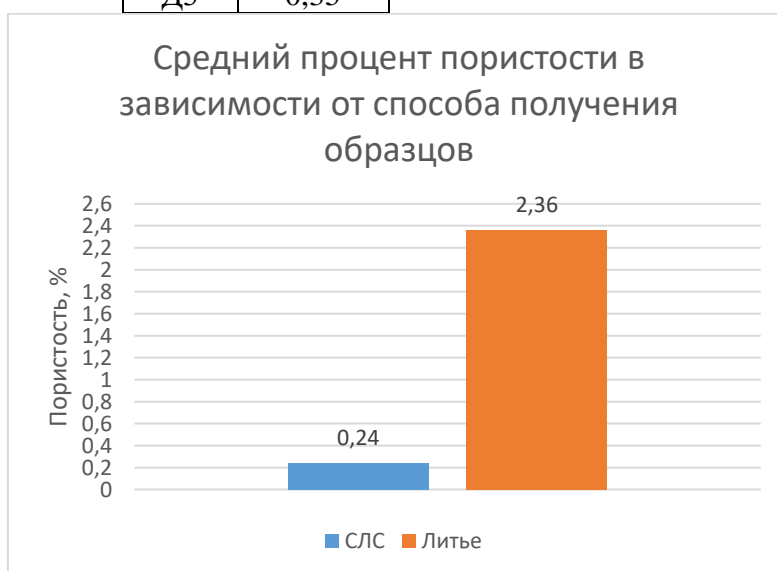


Рисунок 3. – Средний процент пористости для образцов, полученных методом СЛС и литьем в песчано-глиняную форму

В случае с образцами полученными методом СЛС микропористость является достаточно низкой. Вызвано это тем, что процесс плавления порошка происходит в герметичной камере (из которой предварительно был откачан кислород до 0,4% и ниже) в среде защитного газа аргона, поэтому образование водородной пористости в таких изделиях представляется мало возможным.

Высокий процент микропористости в образцах, полученных при литье в песчано-глиняную форму, характеризуется наличием в них газовой пористо и газовоусадочной пористости.

Сравнение результатов механических испытаний образцов, полученных методом СЛС, подвергавшихся и термической обработке и не проходивших ее, представлены на рисунке 4. После термообработки прочностные характеристики синтезированного сплава снижаются: σ_B на 46,3%, $\sigma_{0,2}$ на 51,04%, $\sigma_{0,05}$ на 60,43%. Но материал обретает высокую пластичность, так как относительное удлинение (δ) увеличивается на 45,52%.

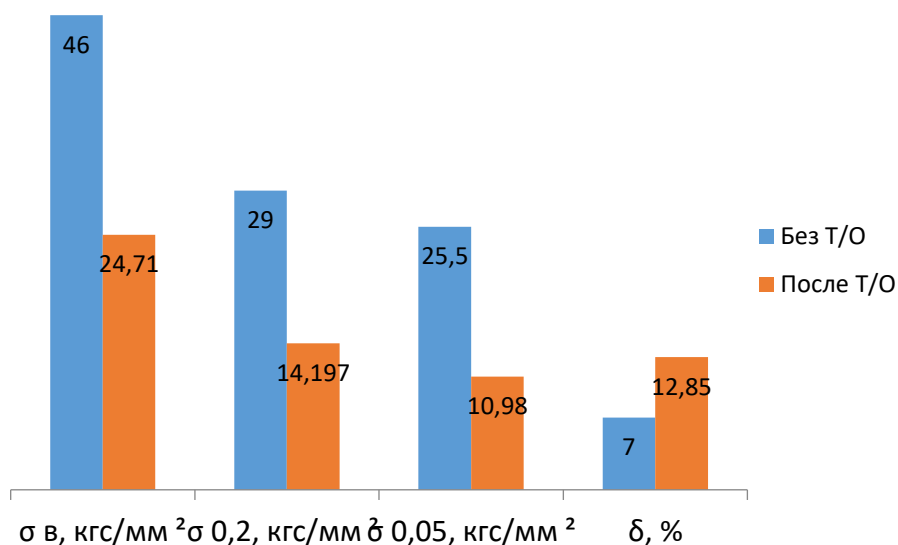


Рисунок 4. – Диаграмма сравнения результатов механических испытаний образцов из синтезированного сплава до и после Т/О

Сравнение механических свойств образцов, полученных литьем в песчано-глиняную форму, до и после термообработки представлены на рисунке 5.

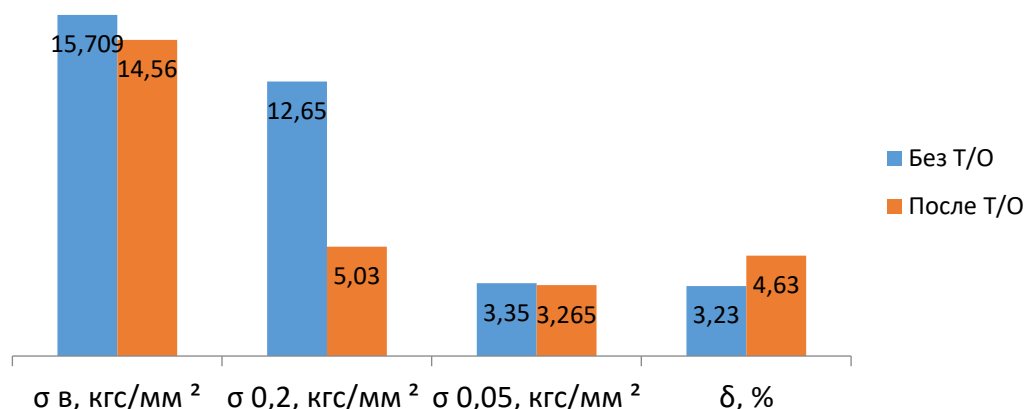


Рисунок 5. – Диаграмма сравнения результатов механических испытаний литых образцов до и после T/O

Как и в случае с синтезированным сплавом, пластичность материала после термической обработки увеличилась, в сопровождении с его разупрочнением, за счет снижения прочностных характеристик.

Сравнение результатов механических испытаний образцов с литейным сплавом аналогом АК9ч

На диаграммах приведены данные для сравнения механических свойств синтезированного и литого сплава из отходов после СЛС, до (рис. 6) и после (рис. 7) термической обработки. Они визуализируют преимущества метода СЛС перед литьем в песчано-глиняные формы. Количественная оценка преимущества для каждого из методов представлена в таблице 2.

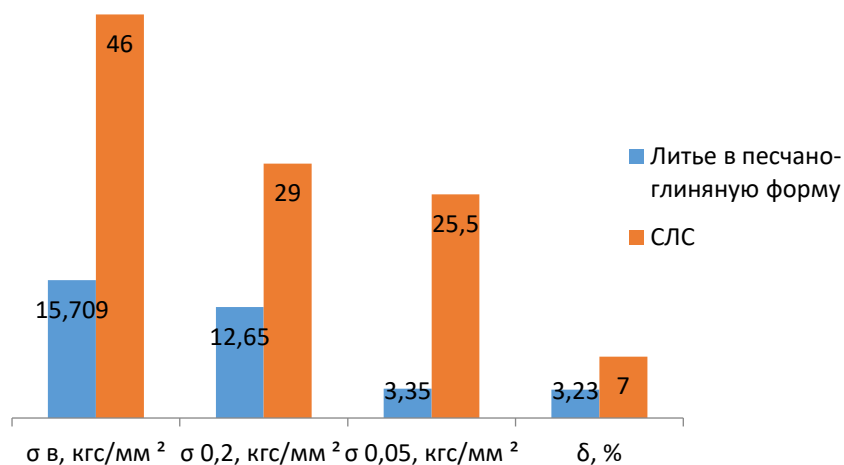


Рисунок 6. – Диаграмма сравнения результатов механических испытаний литого и синтезированного сплава до T/O

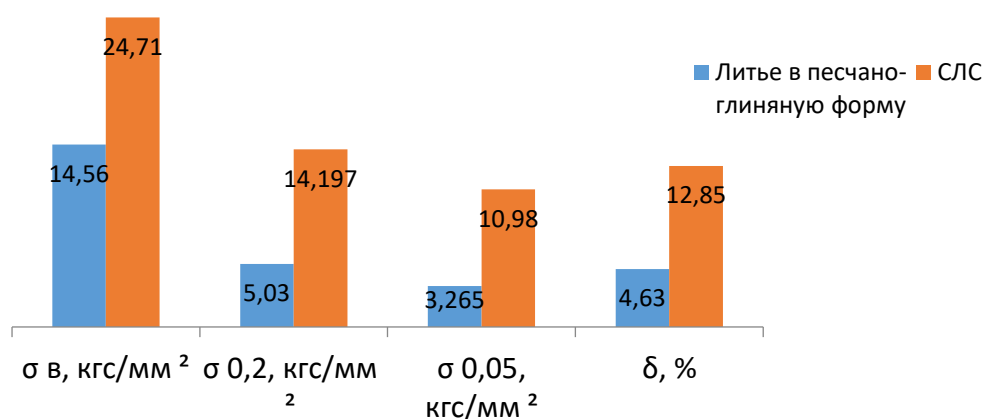


Рисунок 7. – Диаграмма сравнения результатов механических испытаний литого и синтезированного сплава после Т/О

Из диаграмм на рисунках 6 и 7 видно, что прочностные показатели синтезированного сплава из алюминиевого порошка АСП-40 превосходят практически вдвое, а по некоторым показателем и в несколько раз, механические свойства сплава из отходов после СЛС, полученного литьем в песчано-глиняную форму. Поэтому более правильным будет сравнить временное сопротивление разрыву и относительное удлинение синтезированного сплава и его ближайшего аналога, литейного сплава АК9ч. Сравнение показателей будет осуществляться для материалов прошедших термическую обработку (рис. 8): для синтезированного сплава, это отжиг в течении 4 часов при 300°C и охлаждение на воздухе; для литейного сплава АК9ч термическая обработка по режиму Т6 (закалка: нагрев до 535°C, время выдержка 2-6 ч, охлаждение в воде при температуре 20-100°C; полное искусственное старение при температуре 175°C в течении 10-15 ч).

При модифицировании сплава АК9ч стандартным флюсом его предел прочности и относительное удлинение ниже, чем у синтезированного сплава, на 0,85% и 73,68% соответственно. Не модифицированный сплав АК9ч обладает еще более низкими механическими свойствами, это можно наблюдать на диаграмме рисунка 3.36. При модифицировании расплава Rb и Cs его предел прочности возрастает и становится выше, чем у СЛС-сплава, на 12,64% и 3,09% соответственно. Несмотря на подобную обработку расплава, относительное

удлинение АК9ч не превышает это значение при его модифицировании стандартным флюсом. Поэтому, основной отличительной чертой синтезированного сплава от его литейного аналога АК9ч является его высокая пластичность, при схожих показателях предела прочности.

Таблица 2

Количественная оценка преимущества синтезированного сплава перед литым из отходов после СЛС

Показатели механической прочности	Сплав					
	Без Т/О			После Т/О		
	Литой	Синтезированный	Разница	Литой	Синтезированный	Разница
σ_B , кгс/мм ²	15,709	46	Больше на 65,85% чем у литого	14,56	24,71	Больше на 41,07% чем у литого
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	12,65	29	Больше на 56,37% чем у литого	5,03	14,197	Больше на 64,57% чем у литого
$\sigma_{0,05}$, кгс/мм ²	3,35	25,5	Больше на 86,86% чем у литого	3,265	10,98	Больше на 70,26% чем у литого
δ , %	3,23	7	Больше на 53,85% чем у литого	4,63	12,58	Больше на 63,2% чем у литого

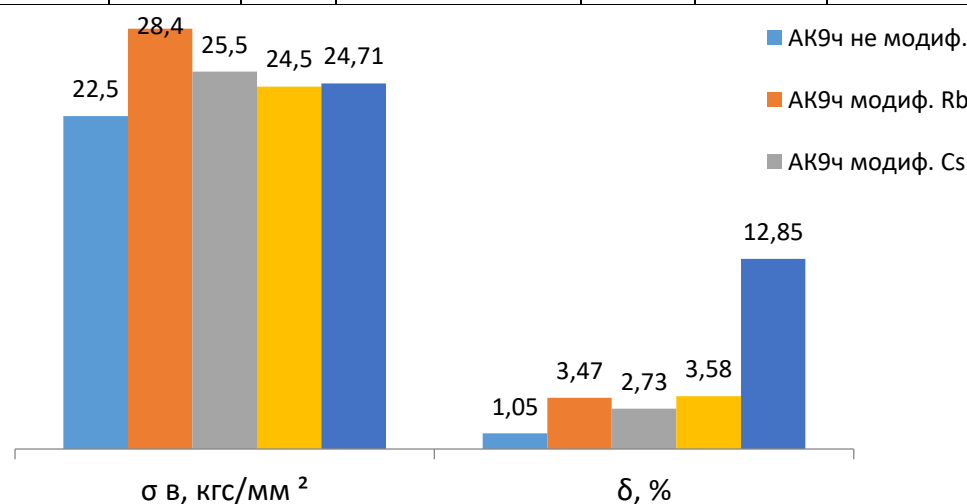


Рисунок 8. – Диаграмма сравнения механических показателей литейного сплава АК9ч и синтезированного сплава из порошка АСП-40 после Т/О

Список литературы:

1. Гибсон Я., Розен Д., Старкер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 стр.
2. Keyence VK-X100/X200. Лазерный сканирующий 3D микроскоп [Электронный ресурс] // Российская национальная нанотехнологическая сеть: Карточка оборудования – 2008. – Режим доступа: http://www.rusnanonet.ru/equipment/vk_x100_200_3d/ (Дата обращения 19.11.2019)
3. ВЛР-200 - Лабораторные механические весы [Электронный ресурс] // Мир весов: Описание технических характеристик – 2005. – Режим доступа <https://www.mirvesov.ru/laboratornye-vesy-mehanicheskie/711.htm>, свободный (Дата обращения 19.11.2019)
4. Сушильный шкаф SNOL 58/350 [Электронный ресурс] // SNOL: Описание технических характеристик – 2008. – Режим доступа <https://snol-term.ru/products/laboratornye-sushilnyie-shkafyi-snol/s-prinuditelnoj-konvekcziej-vozduxa/snol-58-350/> свободный (Дата обращения 19.11.2019)
5. Вибропривод ВП 30Т [Электронный ресурс] // ООО «ВИБРОТЕХНИК»: Описание технических характеристик – 2020. – Режим доступа http://vt-spb.ru/catalog/spetsialnoe_tekhnologicheskoe_oborudovanie/vibroprivody/vibroprivod_vp_30t/ свободный (Дата обращения 19.11.2019)
6. Спектральный анализатор. Лазерный атомный-эмиссионный спектрометр LAES Matrix [Электронный ресурс] // ЗАО Спектроскопические системы: Описание технических характеристик – 2008. – Режим доступа <http://www.spectrosystems.ru/analytical/laes.shtml> свободный (Дата обращения 5.12.2019)
7. Инструкция оператора к системе селективного лазерного сплавления SLM 280 HL. – Германия: SLM Solutions GmbH. – 2013. – 141 стр.
8. Изменение структуры сплава АК9ч., полученного селективным лазерным спеканием, в процессе термической обработки / Д. К. Рябов [и др.] /

[Электронный ресурс] // Электронный научно-технический журнал «Труды ВИАМ». – 2016. – №9. – М.: Труды ВИАМ – Режим доступа: <http://viam-works.ru/ru/dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-3-3>, свободный (Дата обращения 16.03.2020)

9. Микропористость сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления. / Ананьев А. И. и др. // Технология машиностроения. – 2017. – №12. – С. 5-9.

10. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции предприятия / Шимохин А.В. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – №4 – С. 13-19