



Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

*А.О. Курышев, И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, В.В. Астафьев,
С.В. Афанасьев, Г.А. Беленко, Е.П. Заварзина.*

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

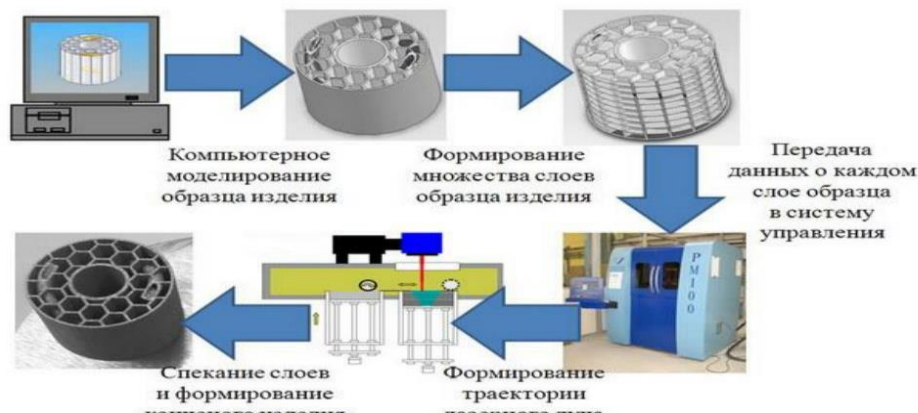
Аддитивные технологии на сегодняшний день – это один из основных драйверов развития российской промышленности

Использование аддитивных технологий в различных областях экономики

Аддитивные технологии или 3D-печать — метод создания трёхмерных объектов, деталей или вещей путём послойного добавления материала. Такие трёхмерные объекты создаются с помощью 3D-принтеров



Региональный инжиниринговый центр Схема технологии селективного лазерного сплавления





- Разработки аддитивных технологий (АТ) получения Al сплавов являются приоритетными направлениями исследований в России и за рубежом .
- Изготовления по компьютерным моделям деталей сложной формы, обладающих высокими механическими свойствами, имеют хорошие перспективы для развития современных технологий в аэрокосмической и машиностроительной отрасли
- Среди материалов, для которых разрабатываются аддитивные технологии, Al сплавы, а в том числе силумины, занимают одно из первых мест. .
- SLM технология имеет большие преимущества перед традиционными способами производства отливок из силуминов, позволяя экономить материал, и получать изделия с дисперсной структурой и повышенными эксплуатационными характеристиками.
- Метод SLM позволяет создавать детали сложной формы с внутренними отверстиями и перегородками из конструкционных материалов, подвергающихся экстремальным нагрузкам. Такие объекты, сочетающие низкую массу и высокие удельные механические характеристики, имеют преимущества перед монолитными аналогами.



ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ:

- Изучить закономерности структурообразования Al-Si –Mg сплава (силумина) при селективном лазерном сплавлении (SLM);
- Определить влияние геометрии построения цилиндрических образцов на структурные характеристики сплава;
- Провести испытания механических свойств SLM сплава;
- Сравнить структуру и свойства материалов, полученных аддитивной технологией и традиционными способами литья.

План доклада :

Введение

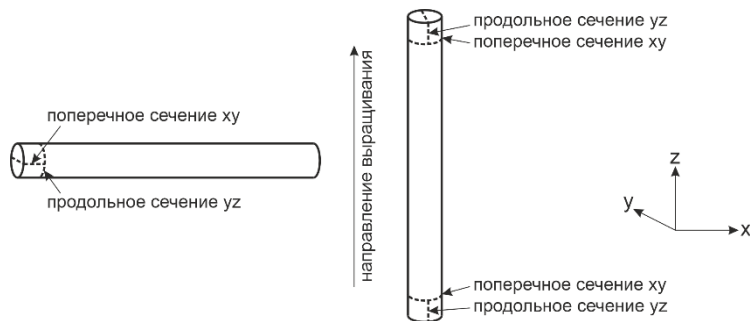
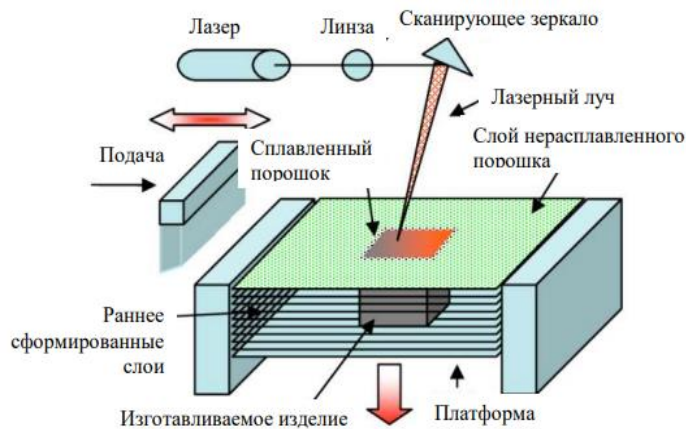
Часть первая – структурные исследования;

Часть вторая – измерение механических свойств;

Заключение



Метод SLM



Схемы расположения образцов относительно подложки и разрезки образцов для исследования

Химический состав сплава AlSi10Mg (АК 9ч) (масс.%)

	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Zn	Mn
основа	9,00-11,00	0,25-0,45	<0,25	<0,15	<0,10	<0,10	<0,10

Режим SLM образцов .

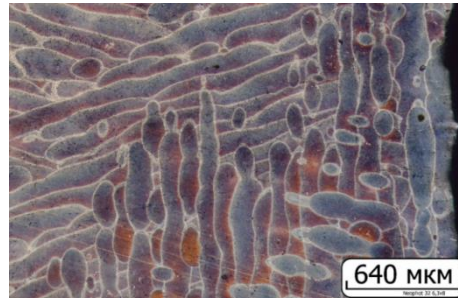
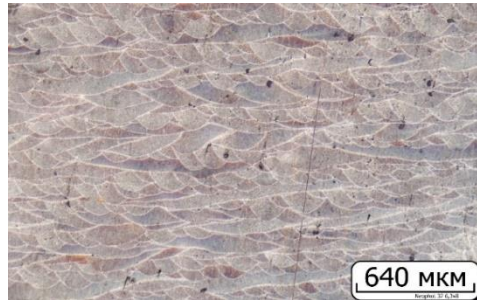
Цилиндры диаметром 8 мм и высотой 70 мм с разной геометрией построения (разной ориентацией оси цилиндра относительно подложки - горизонтальный и вертикальный) .	
Толщина слоя за один проход, мм	0,06
Скорость сканирования (перемещения источника тепла), мм/с	500
Мощность лазера, Вт	325
Диаметр пятна нагрева лазерным лучом, мм	0,065
Диаметр ванны расплава, мм	0,15-0,20
Коэффициент поглощения (доля тепла от лазерного излучения, поглощённая образцом)	$\epsilon=0,1$



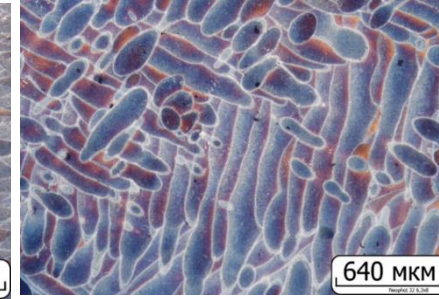
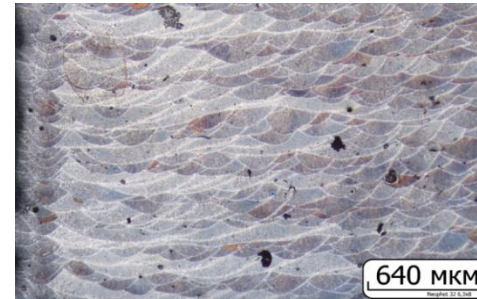
Часть I. Результаты структурных исследований

МАКРОСТРУКТУРА

горизонтальный образец



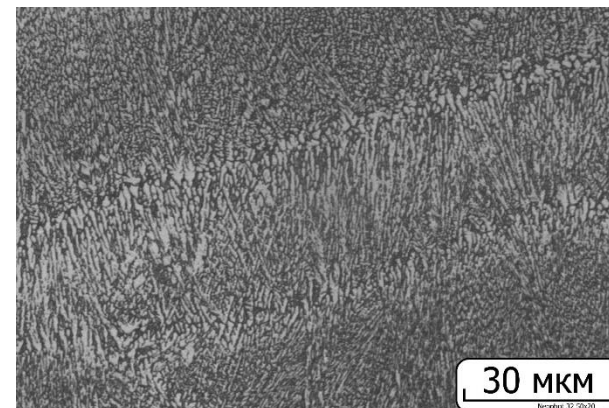
вертикальный образец



Продольное сечение Поперечное сечение

Продольное сечение Поперечное сечение

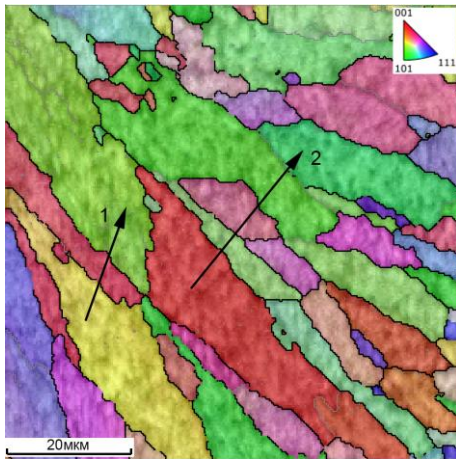
Треки, образованные ванной расплава, имеют разную форму и размеры. Длина треков изменяется от 400 до 100 мкм, а высота ~ 150 мкм. Границы между треками имеют столбчатую дендритоподобную структуру, более грубую, чем структура внутри треков



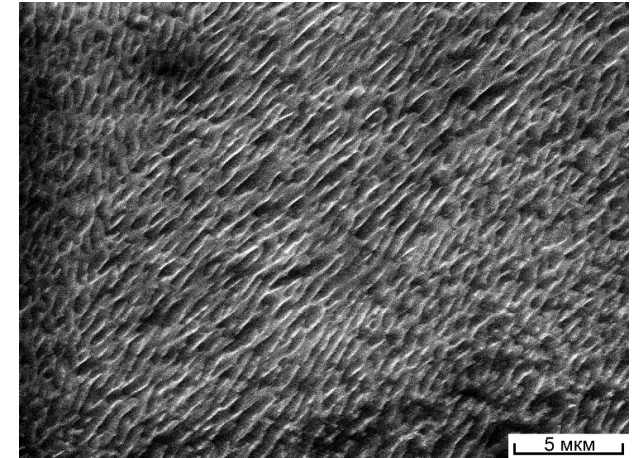


Тонкая структура SLM образцов (СЭМ)

горизонтальный образец

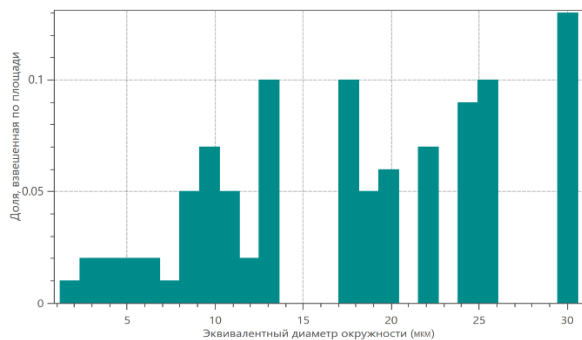


Методом EBSD анализа получена ориентационная карта микроструктуры, состоящая из зёрен, имеющих разную кристаллографическую ориентацию. Наличие широкой цветовой палитры свидетельствует об отсутствии текстуры. Зёрна разделены большеугловыми границами, а их доля в микроструктуре составляет $\sim 80\%$. Размер зерна . Средний размер зёрен равен 7 - 8 мкм, а разброс размеров составляет 2 -25 мкм.

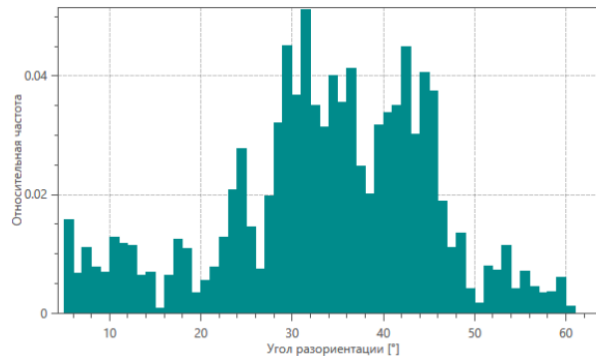


Продольное сечение

Тонкая структура представлена сверхтонкой сеткой ячеистой субструктуры со средним диаметром 500-600 нм. Ячейки в этом сечении имеют вытянутую форму и ориентированы в направлении, обратном теплоотводу.



Размер зерна



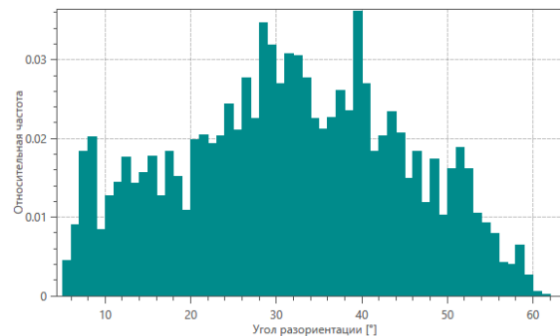
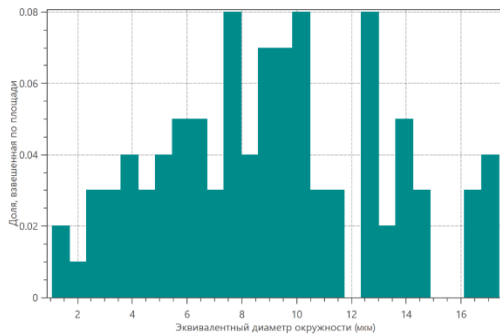
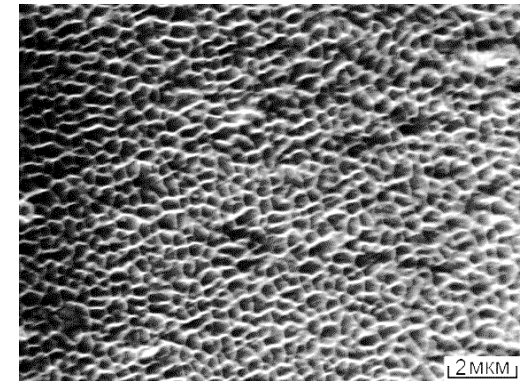
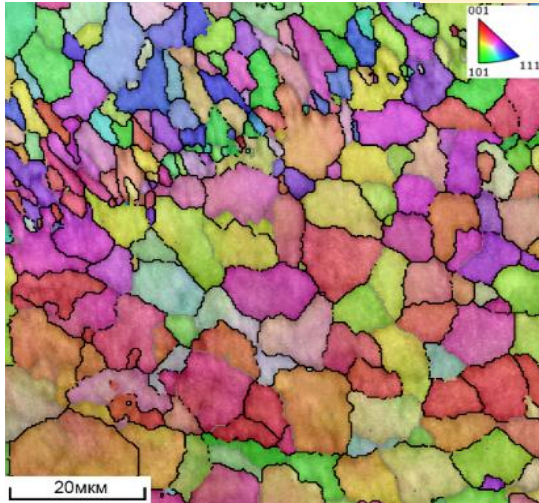
Углы разориентировки границ зёрен



СЭМ структура горизонтального образца

Поперечное сечение

Средний размер зерна ~ 4 мкм. На фоне более крупных зёрен ($\sim 15-20$ мкм) встречаются полосы с меньшим размером зерна (~ 1 мкм) Доля БУГ=82%



Спектры размеров зёрен и углов разориентировки границ зёрен

Сетка ячеистой субструктуры, ячейки имеют более правильную форму, ближе к шестиграннику, и меньший размер. Средний диаметр ячеек колеблется от 300 до 500 нм.

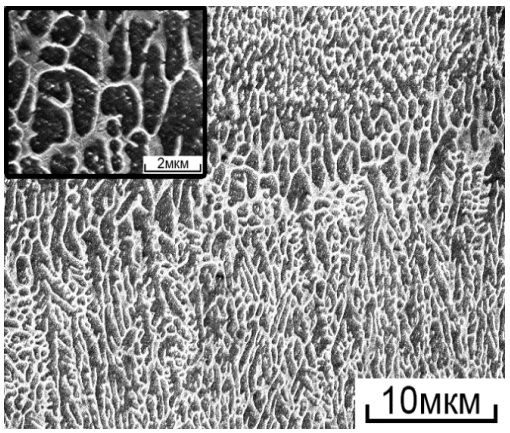
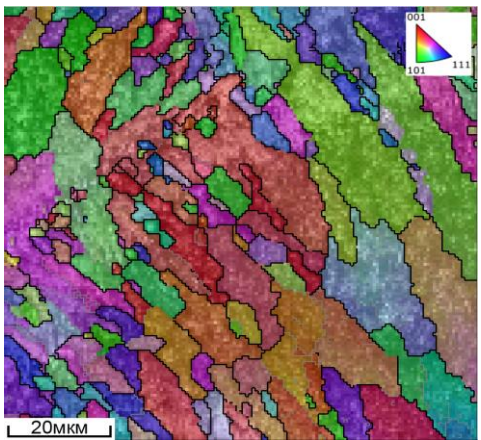


Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

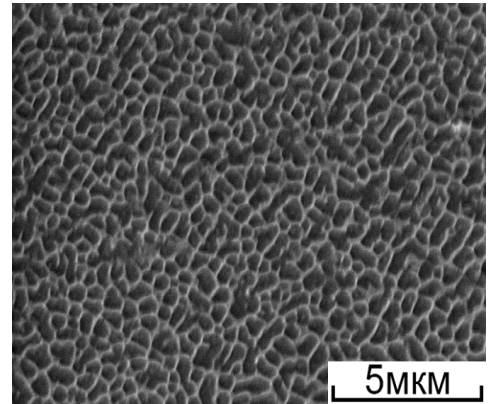
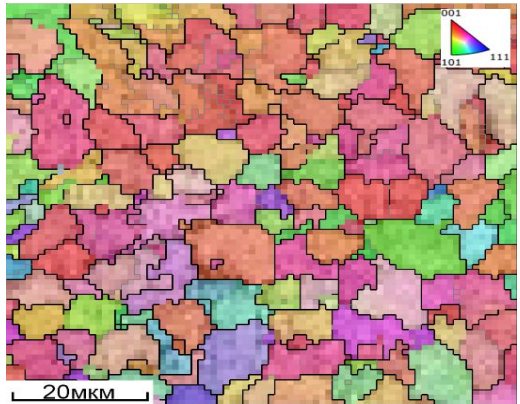
$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(r) \Psi = \epsilon \Psi$$

$$\Psi_{\text{ст}}(r + \lambda, \sigma) = \Psi_{\text{ст}}(r)$$

СЭМ структура вертикального образца



Продольное сечение

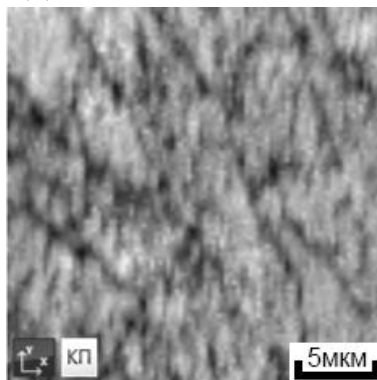
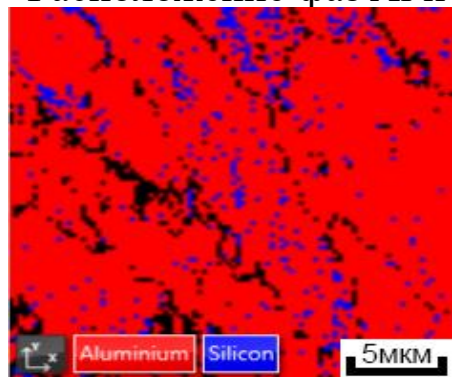


Поперечное сечение



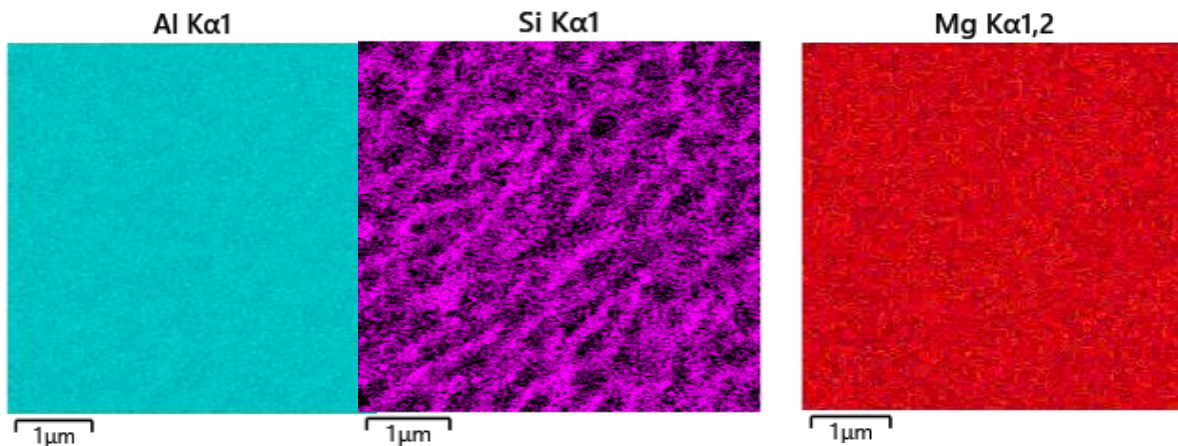
Элементный и фазовый составы SLM образцов (данные EDS анализа вертикального образца)

Расположение фаз Al и Si в продольном сечении



Карта контраста полос
иллюстрирует, что границы зёрен
и ячеек, которые экранируются
(Al-Si) эвтектикой, более
напряжены.

Структура в характеристическом излучении элементов

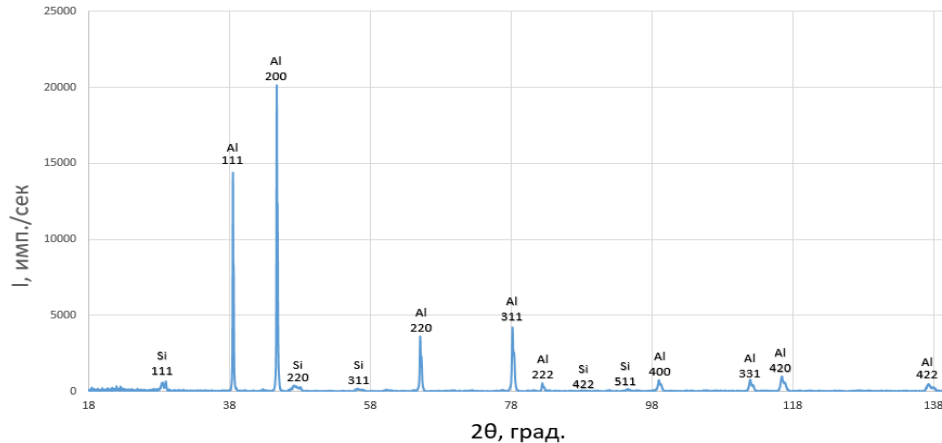


**Si по границам зёрен и ячеек,
Mg в Al –твёрдом растворе**

Поперечное сечение



Результаты дифракционного рентгеноструктурного анализа

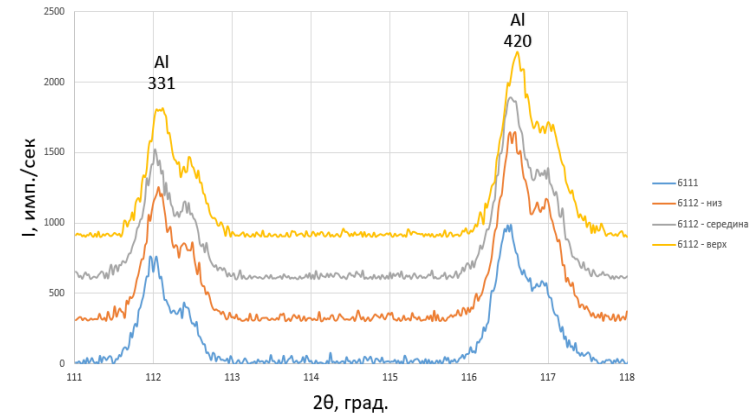


*Формула для расчета количества Si в Al пересыщенном твердом растворе в сплаве AlSi10Mg.

$$a = -0,0174X_{Si} + 0,40515,$$

где X_{Si} – содержание Si в ат. %, 0,40515 – параметр Al в равновесном (отожженном) сплаве AlSi10Mg, а - средний параметр решетки Al, полученный из анализа профиля всех брэгговских максимумов от различных атомных плоскостей

Фазовый состав SLM горизонтального и вертикального образцов Al и Si одинаков и не зависит от их расположения относительно подложки.

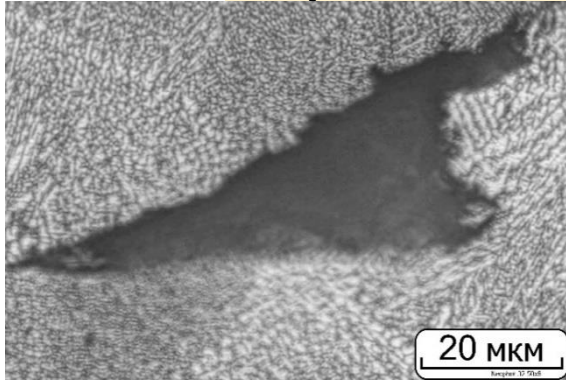


Уровень внутренних (термических) напряжений зависит от геометрии построения образцов и больше в вертикальном образце. Т/о для снятия напряжений - отжиг 300°C, 2 ч

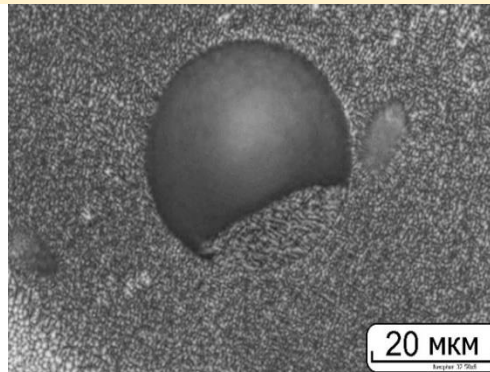
Концентрация кремния в SLM Al твердом растворе ~ 3,5 ат. %.



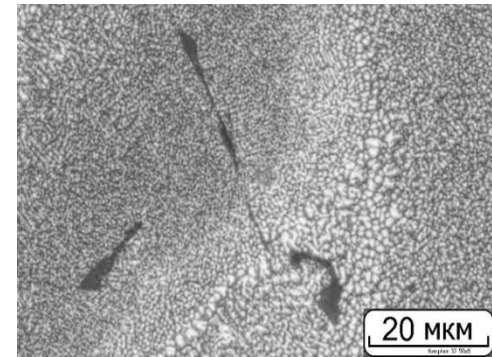
Пористость и плотность SLM образцов



а



б



в

Макродефекты литейного происхождения: а - усадочные поры; б - газовые поры; в - единичные трещины

Образец	Пористость	Плотность, г/см ³
Горизонтальный	0,3	2,66
Вертикальный верх	0,2	2,58
Вертикальный низ	0,5	

Если за 100% принять табличную плотность сплава $\rho = 2,67 \text{ г/см}^3$, то плотность горизонтального образца составит ~99%, а вертикального – 96%



Краткие выводы по первой части:

1. Фазовый состав и структура SLM образцов не зависит от геометрии построения образцов;
2. Фазовый состав SLM образцов – пересыщенный Si и Mg твердый раствор на основе Al и Al+Si эвтектика;
3. SLM образцы имеют иерархическую структуру, состоящую из зерен Al твердого раствора размером ~ 4-8 мкм и сверхтонких ячеек – 0,4-0,6 мкм. По границам зерен и ячеек располагается Al-Si эвтектика; Такая структура образуется за счёт реализации неравновесных условий кристаллизации - высоких температурных градиентов и скоростей охлаждения расплава,
4. Дефекты в SLM образцах имеют литейное происхождение, в основном, это газовые и усадочные поры и кристаллизационные трещины. Количество дефектов больше в вертикальном образце, его плотность ~ 96%. Плотность горизонтального образца – 99%;
5. Уровень термических напряжений зависит от геометрии построения и больше в вертикальном образце.



II часть. Свойства SLM сплава

Микротвёрдость и твёрдость

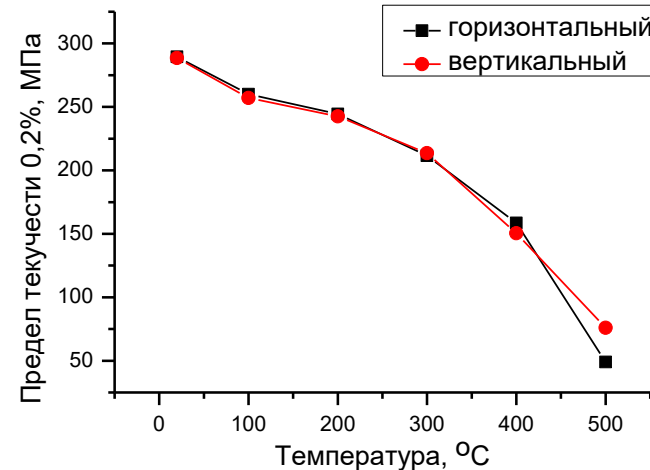
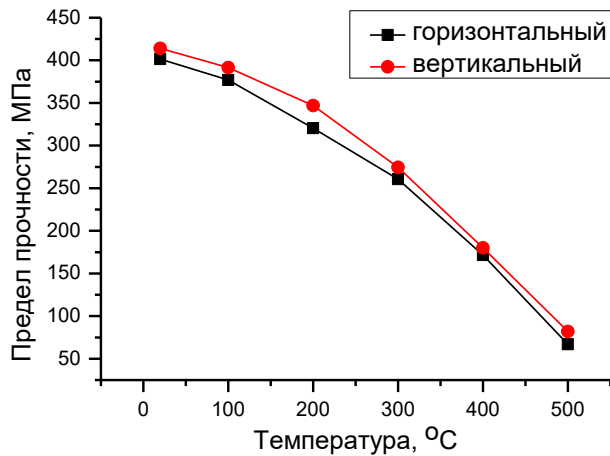
Образец	Сечение	Hv, МПа	HB 5/250
горизонтальный	Продольное	1150±70	119
	Поперечное	1120±70	
вертикальный верх	Продольное	1250±70	120
	Поперечное	1290±100	
вертикальный низ	Продольное	1240±70	118

Твёрдость литого сплава AlSi10Mg равна **50 HB 5/250**, а после обработки Т6 (закалка и старение) увеличивается до **75 HB 5/250**.

Твёрдость SLM образцов в 2,4 выше, чем сплава, отлитого по традиционной технологии, и в 1,6 раза превышает твёрдость сплава после его обработки по режиму Т6.



Температурные зависимости предела прочности и предела текучести



Предел прочности SLM образцов - **400 МПа**

Предел текучести SLM образцов - **285 МПа**

Согласно ГОСТ 1583-93, свойства литого сплава

$\sigma_B = 196$ МПа, $\delta = 1,5$; т/о $\sigma_B = 235$ МПа, $\delta = 3\%$

**Прочностные свойства SLM образцов в 1.5 - 2
раза превышают стандартные свойства сплава
данного состава.**



Краткие выводы по II части

1. Механические свойства являются структурно-чувствительными свойствами, поэтому основной причиной отличия свойств сплава AlSi10Mg, полученного по технологии SLM и по традиционным технологиям, является разное структурно-фазовое состояние материала;
2. Формирование модифицированной структуры, состоящей из зёрен микронных размеров ячеисто-дендритного строения и наноразмерной Al-Si эвтектики, а также образование аномально пересыщенного Al-твёрдый раствора обеспечивают прирост прочностных свойств SLM сплава за счёт зернограничного и твердорастворного упрочнения в 2 раза;
3. Механические характеристики σ_B и $\sigma_{0,2}$ горизонтального и вертикального образцов практически одинаковые, т.е. при данных параметрах печати они не зависят от геометрии построения.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

