

Ю. П. Бунчук, канд. техн. наук Б. О. Усенко, Р. Г. Бабенко

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ИЗ ПОРОШКОВОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА 316L

Рассмотрены результаты изготовления деталей (образцов) инновационным методом селективного лазерного плавления из порошкового металлического материала 316L, сравнительных исследований его структуры и физико-механических свойств, совместного влияния термической обработки и ориентации образцов относительно плиты построения на физико-механические свойства и структуру образцов из его сплава. Представлены результаты сравнительных исследований физико-механических свойств и структуры образцов, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления с горизонтальным и вертикальным размещением относительно плиты построения; зависимость предела прочности и относительного удлинения от температуры отжига; приведена оценка возможности и целесообразности применения технологии селективного лазерного плавления для изготовления деталей и изделий ракетно-космической техники. Экспериментальные исследования режимов термической обработки образцов после селективного лазерного плавления позволили определить оптимальный режим для сплава 316L и показали, что проведение операции термической обработки изготовленных образцов по режиму нагрева 1230°C с последующим отпуском при температуре 510°C способствует приобретению однородной структуры материалом образцов, исчезает дендритность, присущая материалу образцов в исходном состоянии после селективного лазерного плавления. Результаты механических испытаний полученных образцов показали, что технология селективного лазерного плавления обеспечивает создание изделий из порошкового металлического материала 316L с оптимальным комплексом физико-механических свойств. Показано, что переход к технологии селективного лазерного плавления позволит изготавливать изделия ракетно-космической техники, в частности сложнопрофильные детали, за один технологический цикл, исключив операции раскроя на заготовки, штамповки, доводки, обрезки, сварки, изготовления специальной оснастки или штампов.

**Ключевые слова:** образцы, термическая обработка, сплав, физико-механические свойства, технологический цикл.

Розглянуто результати виготовлення деталей (зразків) інноваційним методом селективного лазерного плавлення з порошкового металевого матеріалу 316L, порівняльних досліджень його структури та фізико-механічних властивостей, спільного впливу термічного оброблення й орієнтації зразків відносно плити побудови на фізико-механічні властивості та структуру зразків з його сплаву. Подано результати порівняльних досліджень фізико-механічних властивостей і структури зразків, виготовлених за технологією селективного лазерного плавлення з горизонтальним і вертикальним розміщенням відносно плити побудови; залежність границі міцності і відносного подовження від температури відпалу; наведено оцінку можливості та доцільності застосування технології селективного лазерного плавлення для виготовлення деталей і виробів ракетно-космічної техніки. Експериментальні дослідження режимів термічного оброблення зразків після селективного лазерного плавлення дали змогу визначити оптимальний режим для сплаву 316L і показали, що проведення операції термічного оброблення виготовлених зразків за режимом нагрівання 1230°C з подальшим відпуском за температури 510°C сприяє набуттю однорідної структури матеріалом зразків, зникає дендритність, властива матеріалу зразків у вихідному стані після селективного лазерного плавлення. Результати механічних випробувань одержаних зразків свідчать, що технологія селективного лазерного плавлення забезпечує створення виробів з порошкового металевого матеріалу 316L з оптимальним комплексом фізико-механічних властивостей. Показано, що перехід до технології селективного лазерного плавлення дасть змогу виготовляти вироби ракетно-космічної техніки, зокрема складнопрофільні деталі, за один технологічний цикл, виключивши операції розкроявання на заготовки, штампування, доведення, обрізання, зварювання, виготовлення спеціального оснащення або штампов.

**Ключові слова:** зразки, термічне оброблення, сплав, фізико-механічні властивості, технологічний цикл.

*This article considers the practical data on parts (specimens) manufacturing from powder metal material 316L using the innovative method of selective laser melting; the comparative study of the structure and physical and mechanical properties of 316L material, the combined influence of heat treatment and specimen orientation relative to the arrangement plate on the physical and mechanical properties and structure of specimens made of 316L alloy. Results are presented of the following: comparative study of the physical and mechanical properties and structure of specimens, manufactured using the selective laser melting technologies with horizontal and vertical placement relative to the arrangement plate; dependence of the ultimate strength and unit elongation on the annealing temperature. The possibility and suitability of the selective laser melting technology to manufacture parts and space-rocket hardware are evaluated. Experimental study of the specimens heat treatment conditions after selective laser melting enabled the definition of the optimal condition for the 316L alloy and have shown that heat treatment of the manufactured specimens under the heating at 1230 °C with the subsequent tempering at the temperature of 510 °C gives the homogeneous structure to the material of specimens made of alloy 316L, its dendritic structure, inherent in the specimen material in its initial condition, disappears after selective laser melting. Results of the mechanical tests of the obtained specimens have shown that the technology of selective laser melting provides development of products made of powder metal material 316L with optimal complex of physical and mechanical properties. It is shown that transition to the selective laser melting technology will enable production of the aerospace products, in particular geometrically-complex parts made of powder metal material 316L, in one technological cycle, excluding cutting, punching, refinement, cropping, welding, manufacturing of special tools or stamps.*

**Key words:** specimens, heat treatment, alloy, physical and mechanical properties, technological cycle.

## **Введение**

В производстве современных ЖРД применяются сложнопрофильные узлы и агрегаты. В последнее время при их изготовлении наблюдается значительный рост применения аддитивных технологий. Одним из направлений аддитивных технологий является селективное лазерное плавление (СЛП). Применение данной технологии позволяет сократить определенные технологические процессы или же убрать их совсем, а также уменьшить влияние человеческого фактора при производстве деталей.

Развитие аддитивных технологий в космической промышленности является одним из важнейших направлений на ближайшие десятилетия. Это перспективное направление в космической промышленности, так как стоимость производства изделий ракетно-космической техники весьма высока, а сокращение сроков изготовления изделий, исключение проектирования и изготовления специальной оснастки, уменьшение количества операций и производственных отходов представляет значительный интерес при разработке изделий РКТ.

Наибольший интерес с точки зрения прямого получения изделий из металлического порошкового материала на сегодняшний день представляет технология селективного лазерного плавления за счет возможности изготовления сложнопрофильных изделий

по трехмерной компьютерной модели 3D CAD из широкого спектра металлических порошков (цинка, бронзы, стали, титана и титановых сплавов, алюминия и алюминиевых сплавов, драгоценных металлов и др.) [1, 2]. Технология СЛП состоит из нескольких этапов: на поверхность платформы (плиты построения) при помощи рекотера (устройства для равномерного распределения слоя порошка) наносится слой порошкового металлического материала заданной толщины. Лазерный луч, направляемый сканирующим зеркалом, расплавляет частицы порошка на участках порошкового слоя согласно трехмерной модели 3D CAD. Расплавленный слой «приваривается» к нижележащему слою. Далее платформа опускается на высоту слоя при помощи поршня – и цикл повторяется до полного формирования изделия. По окончании процесса изготовления несплавленный порошок удаляют из камеры для дальнейшего просеивания и повторного использования. Огромное значение для изделий, получаемых по технологии селективного лазерного плавления, имеет характеристика применяемого порошкового материала.

Значительное количество исследований [3-5] посвящено изучению влияния технологических характеристик порошковых материалов на свойства получаемых изделий. Для производства изделий ракетно-космической техники, к качеству которых

предъявляются высокие требования, применяемый металлический порошковый материал должен иметь однородный химический состав. Качественные характеристики порошкового материала в процессе селективного лазерного плавления обеспечивают бесперебойную его подачу и стабильное нанесение в виде тонких слоев. Кроме технологических характеристик порошковых материалов, применяемых в технологии СЛП, на качество изделий влияют мощность лазера, распределение энергии в лазерном пятне, толщина слоя порошкового материала, тип и качество защитного газа.

Целью данной работы были оценка возможности получения по инновационной технологии СЛП сложнопрофильных изделий разработки ГП «КБ «Южное» для работы в условиях повышенных температур и агрессивных сред, сравнение их физико-механических характеристик и структуры с характеристиками изделий, получаемых по традиционной технологии, изучение влияния режимов термической обработки и ориентации изделий (образцов) относительно плиты построения в процессе изготовления на физико-механические свойства и структуру.

#### Технологии, материалы и методики

#### Выбор металлического порошкового материала для изготовления изделий по технологии селективного лазерного плавления

В настоящее время для изготовления целого ряда сварных и несварных деталей и сборочных единиц ракетно-космических изделий применяется хромоникельтитанистая сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т, обладающая высокими технологическими, механическими и антикоррозионными свойствами.

С целью оптимизации процесса изготовления данных сборок, т. е. получения практически полностью готовых деталей по технологии селективного лазерного плавления, минуя операции раскроя на заготовки, штамповки, доводки, обрезки, изготовления специальной оснастки или штампов, был проведен анализ всех порошковых металлических материалов, применяемых для печати на установке SLM 280<sup>HL</sup>. В ходе анализа было установлено, что наиболее удовлетворяют требованиям, предъявляемым к полуфабрикатам из стали 12Х18Н10Т для изделий, изготавливаемых по традиционной технологии, показатели физико-механических свойств образцов, полученных методом СЛП из металлического порошкового материала марки 316L (табл. 1, 2).

Таблица 1

Механические свойства материалов

Марка материала	Предел прочности $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль упругости $E$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
Сталь 12Х18Н10Т	55,0	22,0	18800	40,0	55,0
Сталь 316L*	66,6±4,9	56,0±3,9	17335±3161	35,0±4	59,0±3
Сталь 316L**	64,5±2,8	52,9±2,5	18762±2039	31,0±6	49,0±11

\* При печати порошком с толщиной слоя 30 мкм.

\*\* При печати порошком с толщиной слоя 50 мкм.

Таблица 2

Физические свойства материалов

Марка материала	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)
Сталь 12Х18Н10Т	7,9	15
Сталь 316L	7,95	15
Сталь 1.4410	7,8	15

Для подтверждения возможности использования изделий из стали 316L, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления на установке SLM 280<sup>HL</sup>, были выполнены расчеты на прочность изделий РКТ:

- штатного изделия из стали 12X18H10T;
- изделия штатной конфигурации из стали 316L;
- изделия с измененной конфигурацией из стали 12X18H10T;
- изделия с измененной конфигурацией из стали 316L.

Изделие с измененной конфигурацией – это изделие с увеличенной толщиной в местах, в которых возникают максимальные напряжения во время эксплуатации, и уменьшенной толщиной в наименее нагруженных местах.

При традиционном изготовлении изделий, например, из листа можно получать детали только постоянной толщины, при этом в наиболее нагруженных местах конструкции, как правило, имеются утонения, обусловленные технологией штамповки. При использовании технологии СЛП изделия можно изготавливать с переменной толщиной.

Расчеты проведены методом конечных элементов в нелинейной стационарной постановке на максимальные значения рабочих давлений и температур.

На основании расчетов доказано, что исследуемое изделие обладает достаточным запасом прочности (допустимый запас по нормам прочности  $\eta_s > 1,5$ ). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов изделий РКТ

Анализируемый параметр	Изделие с измененной конфигурацией		Штатное изделие	
	Сталь 12X18H10T	Сталь 316L	Сталь 12X18H10T	Сталь 316L
Масса, кг	0,095	0,096	0,109	0,110
Максимальные эквивалентные напряжения (в районе сварки), МПа	290	281	328	310
Максимальные относительные пластические деформации, %	1,9	1,7	3,5	3,1
Коэффициент запаса прочности	1,78	1,96 (1,66)*	1,57	1,78 (1,51)*
Суммарные деформации, мм	0,23	0,19	0,41	0,34

\* При разработке конструкции изделия, адаптированного под СЛП-технология, предполагалось, что механические свойства материала могут отличаться на 15%. Однако даже в этом случае результаты расчета соответствуют нормам прочности.

Расчеты на прочность показали, что сталь 316L подходит для изготовления изделий РКТ.

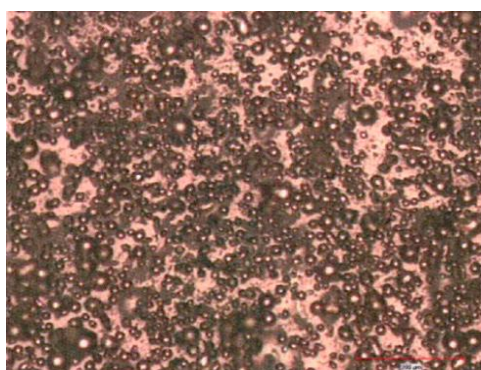
Исходя из всего вышеизложенного, для изготовления изделий РКТ был выбран металлический порошковый материал из сплава марки 316L.

**Объект исследования, методика получения образцов для испытаний и изделий РКТ по технологии селективного лазерного плавления**

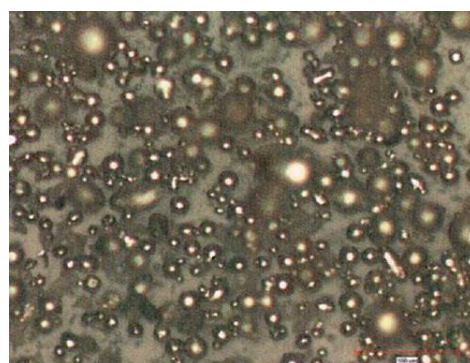
В качестве объектов исследования использовали образцы, изготовленные мето-

дом селективного лазерного плавления из порошкового металлического материала марки 316L. Химический состав металлического порошкового материала 316L (вес. %: С – 0,01; Si – 0,63; Mn – 1,14; P – 0,026; S – 0,014; Cr – 17,34; Ni – 10,74; Mo – 2,28; N – 0,1; Fe – основа).

Порошок получен методом атомизации (распыление потоком аргона в среде аргона), его частицы имеют сферическую форму (рис. 1) и диаметр 10-45 мкм.



а x100



б x200

Рис. 1. Форма частиц металлического порошкового материала 316L

Для создания образцов по технологии СЛП использовали установку SLM 280<sup>HL</sup> производства компании SLM Solutions GmbH (Германия), внешний вид которой показан на рис. 2. Установка оснащена двумя иттербиевыми волоконными лазерами мощностью 400 и 1000 Вт. Внешний

контур детали и тонкие стенки «прорабатывает» первый лазер мощностью 400 Вт, а основное тело детали – второй лазер мощностью 1000 Вт. Установка имеет камеру построения с рабочим пространством зоны построения 280×280×350 мм.



Рис. 2. Общий вид установки SLM 280<sup>HL</sup>

Перед началом процесса в системе создается вакуум – удаляются воздух и влага, после чего камера заполняется 600 л аргона высокой чистоты. Во время работы под-

держивается атмосфера с концентрацией кислорода  $\leq 0,1\%$ , потребление аргона обычно составляет от 5 до 30 л/ч. Схема процесса СЛП приведена на рис. 3.

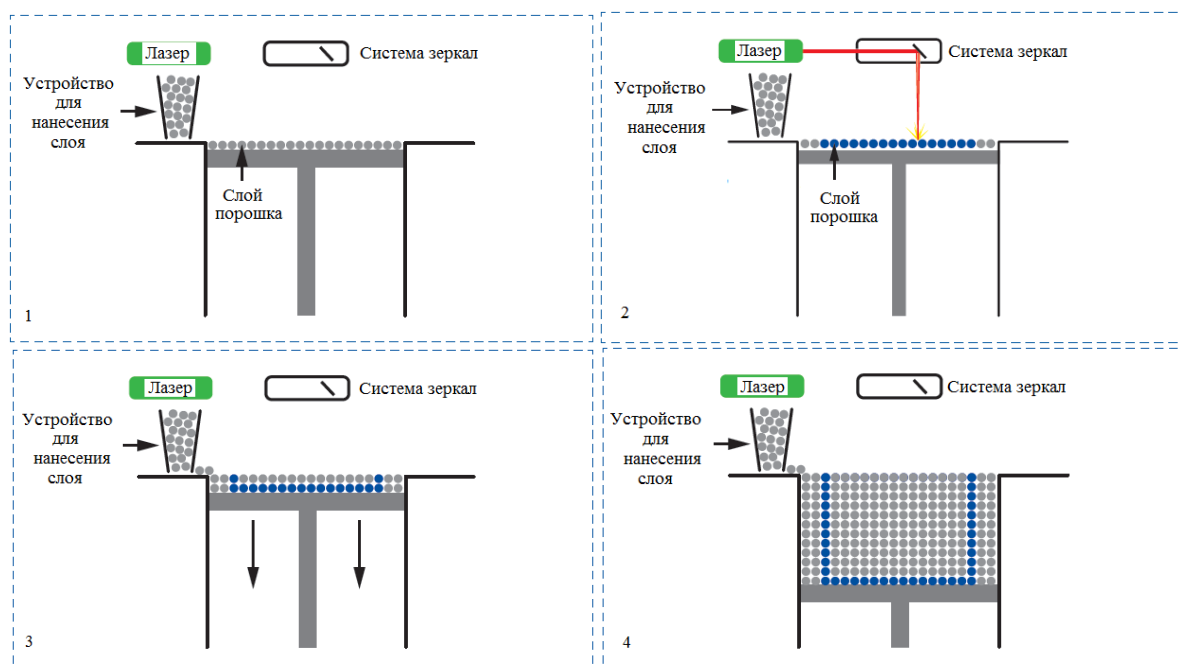


Рис. 3. Схема процесса селективного лазерного плавления на установке SLM 280<sup>HL</sup>

Суть же процесса заключается в следующем:

- CAD-модель изделия разбивается на слои от 30 до 100 мкм;

- на первом этапе проводится подача металлического порошкового материала в камеру построения с дальнейшим распределением тонкого слоя материала рекотером на плите построения;

- на втором этапе лазерный луч, сфокусированный на слое порошка, выборочно расплавляет его частицы, которые при последующей кристаллизации формируют твердую массу в соответствии с геометрией текущего сечения изделия;

- на третьем этапе выполняются опускание плиты построения на один слой и новый цикл подачи, распределения и расплавления порошкового металлического материала. Процесс происходит до тех пор, пока не будут изготовлены все слои изделия;

- на завершающем этапе готовое изделие, полученное из расплавленных слоев, некоторое время находится в порошковом слое в атмосфере инертного газа. Это необходимо для релаксации структуры изделия после завершения его построения.

#### Методика исследования

Химический состав металлического порошкового материала определялся спектральным методом с помощью растрового электронного микроскопа ZEISS EVO 50, а изготовленных образцов – на спектрометре ДФС-500.

Микроструктуру порошка, гранулометрический состав и форму частиц определяли с помощью растрового электронного микроскопа ZEISS EVO 50.

Проверку металлического порошкового материала на предмет отсутствия посторонних примесей проводят в просеивающем шкафу перед загрузкой в установку.

Определяли механические свойства образцов на разрывной машине при комнатной температуре. Для испытаний были изготовлены пропорциональные цилиндрические образцы типа III №7  $l_0=5d_0$  ГОСТ 1497-84.

Исследования плотности образцов проводили методом гидростатического взвешивания с использованием аналитических весов.

Микроструктуру образцов изучали с помощью металлографического микроскопа модели НЕОРНОТ-21 на шлифах, протравленных электролитически в 10%-ном растворе щавелевой кислоты.

#### Результаты и их обсуждение

Для изучения влияния ориентации образцов относительно плиты построения (горизонтальной и вертикальной) на меха-

нические свойства (табл. 4) и структуру материала были изготовлены четыре образца (по два каждого вида) (рис. 4, а, б).



Рис. 4. Внешний вид образцов с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением относительно плиты построения

Таблица 4

Результаты механических испытаний образцов

№ образца	Расположение относительно плиты построения	Механические свойства			
		Предел прочности $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
1	Вертикальное	59,0	50,0	54,0	64,5
2		61,0	50,5	50,0	67,5
3	Горизонтальное	72,0	58,5	41,2	59,5
4		72,5	59,0	40,0	56,0

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что ориентация образцов относительно плиты построения оказывает влияние на механические свойства материала: при горизонтальном расположении образцы имеют более высокие прочностные свойства, но происходит снижение пластичности.

В микроструктуре исследованных образцов в сечении, параллельном плите построения и под углом 90° к ней, наблюдается ярко выраженное различие. В первом случае она сформирована из составляющих продолговатой эллипсовидной формы, перекрывающих друг друга (рис. 5, а, в), во втором – имеет направленный характер строения, по виду похожа на чешую (рис. 5, б, г).



а x100



б x100



в x500



г x500

Рис. 5. Вид микроструктуры образцов из сплава 316L, полученных по технологии СЛП, в сечении, параллельном плите построения (а, в) и под углом 90° к ней (б, г)

В целом микроструктура образцов из сплава 316L, полученных по технологии СЛП, представляет собой совокупность микросварных швов – следов сплавления порошкового металлического материала лазерным лучом и эллипсообразных составляющих, и составляющих типа чешуи, которые имеют четкие границы раздела, т. е. они являются границами области кристаллизации каждой отдельной составляю-

щей. В них хорошо просматривается дендритное строение.

Для исследования совместного влияния термической обработки и размещения образцов на плите построения на физико-механические свойства и микроструктуру образцов из сплава 316L образцы были подвергнуты термической обработке по режимам, приведенным в табл. 5.



Таблица 5

Режимы термической обработки изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления, с охлаждением на воздухе

Режим	Операция	Температура, °С	Время выдержки, мин
I	Нагрев	490±10	80
II	Нагрев	940±10	25
	Отпуск	510±10	80
III	Нагрев	1230±10	25
	Отпуск	510±10	80

Результаты механических испытаний образцов из сплава 316L как с горизонтальным, так и с вертикальным размещением относительно плиты построения, прошедших отжиг после СЛП при температурах

490, 940 и 1230°С, приведены в табл. 6, на рис. 6 построены зависимости предела прочности и относительного удлинения от температуры отжига.

Таблица 6

Результаты механических испытаний образцов из сплава 316L

№ образца	Размещение относительно плиты построения	Температура отжига $t$ , °С	Предел прочности $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Твердость, ед. НВ
1	Вертикальное	–	60,5	45,5	45,2	75,5	207
2		490	62,5	45,0	44,0	57,5	207
3		940	56,5	36,0	56,0	60,0	164
4		1230	56,5	35,5	56,0	63,0	170
5	Горизонтальное	–	71,0	58,0	35,0	57,0	207
6		490	72,5	55,0	32,0	46,5	219
7		940	66,5	40,0	38,0	53,5	177
8		1230	65,0	39,0	42,0	56,0	170

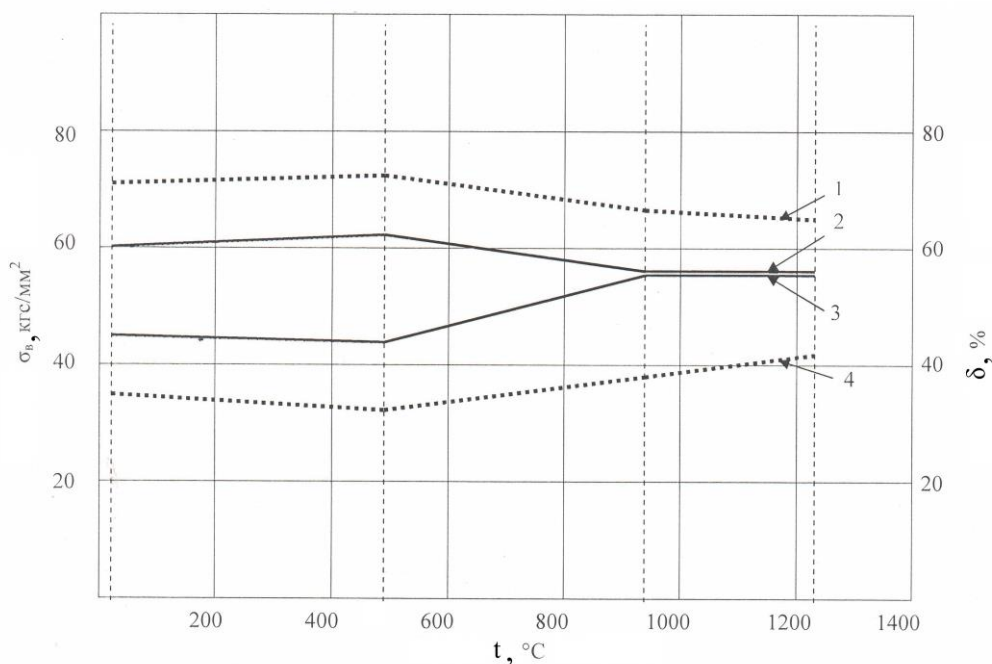


Рис. 6. Зависимости предела прочности и относительного удлинения от температуры отжига для сплава 316L:  
 1 и 4 – прочность и пластичность (соответственно) для горизонтально ориентированных образцов;  
 2 и 3 – прочность и пластичность (соответственно) для вертикально ориентированных образцов



а



б



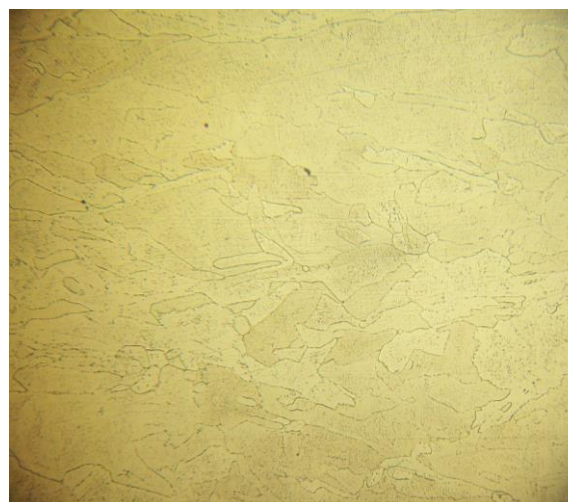
в



г



д



е

Рис. 7. Вид микроструктуры образцов СЛП-сплава 316L после отжига при различных температурах в сечении, параллельном плите построения (а, в, д) и под углом  $90^\circ$  к ней (б, г, е),  $\times 100$ :

а, б –  $490^\circ\text{C}$ ;

в, г –  $940^\circ\text{C}$ ;

д, е –  $1230^\circ\text{C}$

Видно, что предел прочности образцов, размещенных как вертикально, так и горизонтально относительно плиты построения, в диапазоне температур 25-490°C незначительно увеличивается, 490-940°C – стадия уменьшения, 940-1230°C – предел прочности горизонтально ориентированных образцов несколько снизился, а для вертикально – остался без изменения. Значение относительного удлинения также имеет трехстадийный характер изменения: в диапазоне температур 25-490°C его значение уменьшается для образцов обоих видов, затем в диапазоне 490-940°C увеличивается, а в диапазоне 940-1230°C относительное удлинение горизонтально размещенных образцов несколько повысилось, а для вертикально размещенных – осталось без изменения.

Анализируя полученные данные и вид диаграммы, можно сделать вывод, что образцы, размещенные горизонтально, более прочные, но менее пластичные, чем образцы, размещенные вертикально.

В целом же термообработка при значительных температурах отжига приводит к повышению пластических свойств материала 316L, полученного по технологии селективного лазерного плавления. Результаты исследований влияния режимов термообработки, представленных в табл. 5, на структуру образцов показаны на рис. 7.

После низкотемпературной обработки (режим I) при микроисследовании заметных изменений в структуре образцов по сравнению с исходной структурой не выявлено. Структура в обоих сечениях по-прежнему представляет собой совокупность «микросварных швов» (рис. 7, а, б). После обработки по режиму II вид формирования структуры, характерный для сечения, параллельного плите построения и под углом 90° к ней, сохранился, но дендритность исчезла (рис. 7, в, г). После термической обработки по режиму III структура в обоих сечениях стала практически одинаковой (рис. 7, д, е).

## Выводы

1. Показано, что технология селективного лазерного плавления является предпочтительной с точки зрения получения изделий из сплава 316L с высокими прочностными и пластическими характеристиками.

Технология СЛП позволит обеспечить создание изделий РКТ разработки ГП «КБ «Южное» из сплава 316L с оптимальным комплексом физико-механических свойств.

2. После проведения термической обработки по режиму – нагрев 1230°C с последующим отпуском при температуре 510°C материал образцов из сплава 316L приобретает однородную структуру, исчезает дендритность, присущая материалу образцов в исходном состоянии после селективного лазерного плавления.

3. Термическая обработка в интервале температур отжига 490-1230°C приводит к повышению пластических свойств материала 316L, полученного по технологии селективного лазерного плавления.

4. Показано что переход к технологии селективного лазерного плавления позволит изготавливать изделия ракетно-космической техники за один технологический цикл, исключив операции раскроя на заготовки, штамповки, доводки, обрезки, сварки, изготовления специальной оснастки или штампов.

## Список использованной литературы

1. Довбыш В. М., Забеднев П. В., Зеленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла // Библиотечка литейщика. – №8–9. – 2014. – С. 33–38.
2. Kempen K., Thijs L., Van Humbeeck J., Kruth J.-P. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by SLM // Physics Procedia. – №39. – 2012. – P. 439–446.
3. Olakanmi E. O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties // Journal of Materials Processing Technology. – №213. – 2013. – P. 1387–1405.
4. Eleftherios Louvis, Fox Peter, Sutcliffe Christopher J. Selective laser melting of aluminum components // Journal of Materials Processing Technology. – №211. – 2011. – P. 275–284.
5. Aboulkhair Nesma T., Everitt Nicola M., Ashcroft Ian, Tuck Chris. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting // Additive Manufacturing Journal. – №1–4. – 2014. – P. 77–86.

Статья поступила 11.07.2018