

УДК 62-405.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯСимич-Лафицкий Ненад Драганович⁽¹⁾, Александрова Анастасия Андреевна⁽²⁾, Базалева Ксения Олеговна⁽³⁾*Студент 6 курса⁽¹⁾, студентка 4 курса⁽²⁾, доцент⁽³⁾
кафедры «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана**Научный руководитель: К.О. Базалева**кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»***Введение**

В настоящее время большой интерес представляют аддитивные технологии изготовления машиностроительных деталей, в том числе технология лазерной перекристаллизации порошковых материалов. Эти технологии дают возможность создавать детали сложной формы за счет 3d-компактирования, а также формировать изделия с градиентом пористости, изменяя технологические параметры процесса. Помимо уникальных технологических возможностей, эти методы представляют интерес с точки зрения формирования необычных структурных состояний. Особые условия кристаллизации, а именно, высокие скорости нагрева и охлаждения (порядка 10^5 °/с), приводят к возникновению неравновесных структур, что позволяет надеяться на наличие у них особых свойств.

Данная работа направлена на изучение особенностей структуры и свойств жаропрочного никелевого сплава ЖС6-ВИ, полученного методом селективного лазерного плавления.

Материалы и методики

В данной работе перекристаллизации подвергался порошок жаропрочного никелевого сплава ЖС6-ВИ. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав сплава ЖС6-ВИ

Ni,%	Cr,%	Co,%	Al,%	Ti,%	Mo,%	W,%	C,%	B,%
Основа	10,6	4,7	5,6	2,7	4	5,2	0,16	0,02

Одним из методов лазерной перекристаллизации порошковых материалов является селективное лазерное плавление (СЛП). На рисунке 1 представлена схема метода. Сканирование лазера воспроизводит одно из сечений будущей детали. Далее, подача порошкового материала, его распределение и обработка лазером повторяется многократно до получения готовой детали заданной формы. Следует отметить, что при определенном подборе параметров данного метода лазерной обработки каждый участок объема материала подвергается многократной переплавке, т.к. глубина зоны плавления превышает толщину одного слоя порошка, а при сканировании лазера по поверхности, зоны плавления перекрываются по ширине.

В данной работе селективное лазерное плавление осуществлялось с помощью установки Concept Laser M2 Cusing. Мощность лазера составляла 170 Вт, скорость сканирования по поверхности – 800 мм/с, диаметр сфокусированного пятна лазера – 150 мкм.

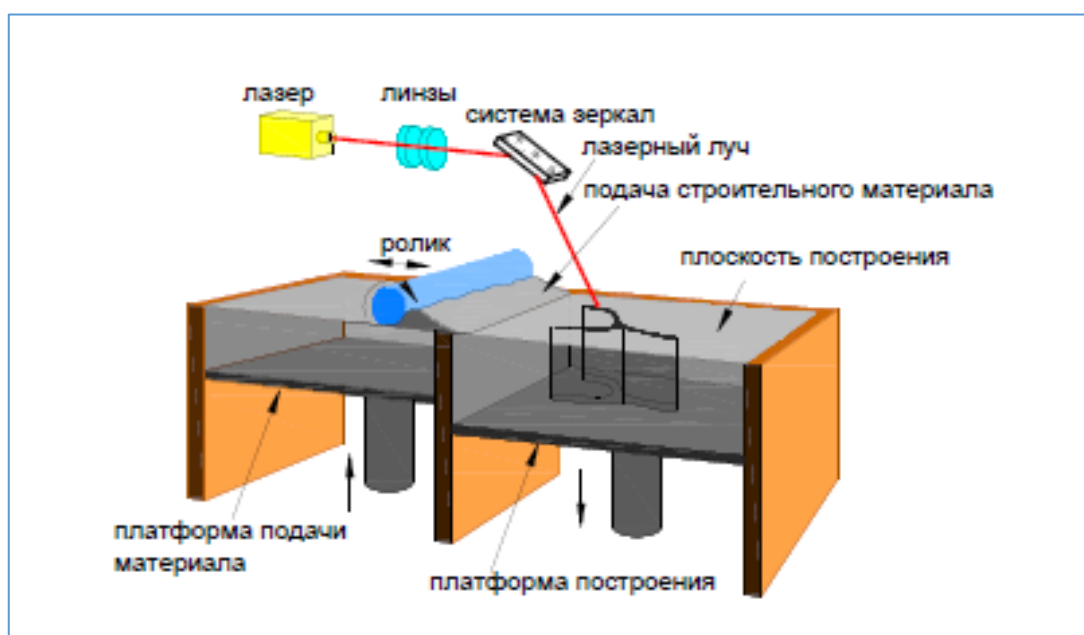


Рис. 1. Схема установки для селективного лазерного плавления

Структура никелевого сплава после СЛП исследовалась методом металлографического анализа, а также с помощью растровой электронной микроскопии. Исследования структуры проводились как в продольном, так и в поперечном сечениях. Методом рентгеноструктурного анализа определялся фазовый состав сплава и физическое уширение рентгеновских линий. Также проводились замеры микротвёрдости сплава.

Исследования проводились как в исходном состоянии, так и после обработок: термической и газостатической (ГИП) при температуре 1220 °С в течение 3 ч и охлаждении на воздухе, при ГИП давление аргона составляло 170 МПа.

На рисунке 2 а представлена схема стратегии плавления никелевого сплава при СЛП. Методом растровой электронной микроскопии показано, что направления треков на поверхности образца соответствует схеме данной плавления (см. рис. 2 б).

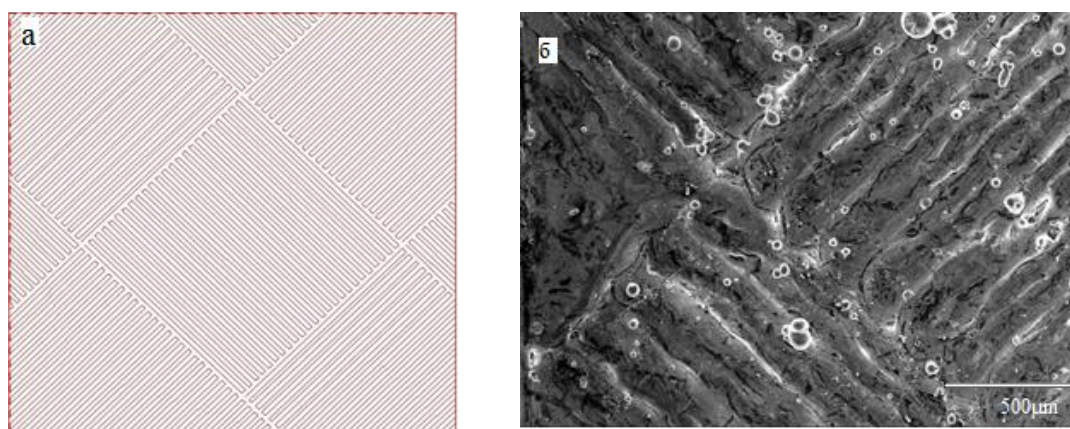


Рис. 2. Технологии стохастического экспонирования: а – схема стратегии плавления; б – треки на поверхности образца (РЭМ)

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 представлена микроструктура никелевого сплава, полученного методом СЛП. В сечении, параллельном поверхности сканирования (продольное сечение), отчетливо видны треки, соответствующие направлению движения лазерного луча. В одном слое сканирование ведется в одном направлении (юго-восток – северо-запад), в соседнем слое перпендикулярно предыдущему направлению.

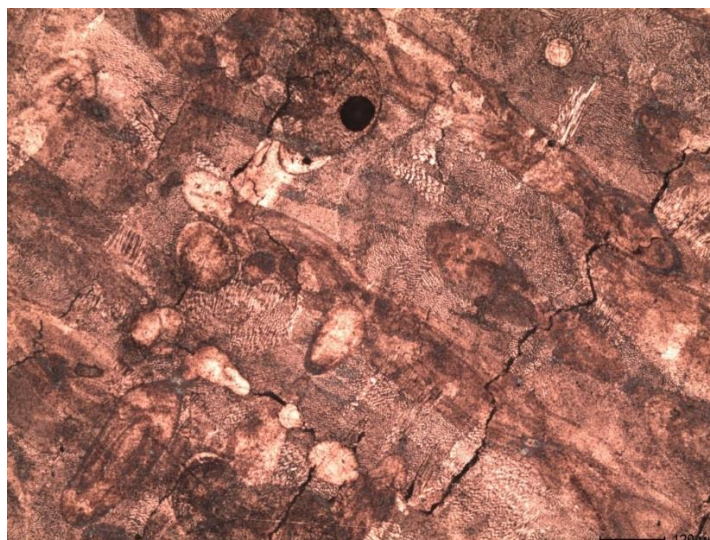


Рис.3. Металлографическая структура в продольном сечении

В сечении, перпендикулярном плоскости сканирования (поперечное сечение) видны так называемые ванны расплава. Средняя ширина ванн расплава составляет 200-220 мкм, а глубина 60-80 мкм (рис. 4).

При большем увеличении (см. рис. 5) видно, что структура ванн расплава неоднородна: она разбита на мелкие ячейки кристаллизации диаметром около микрона. Из литературы известно, что после лазерного воздействия в металлах и сплавах формируется ячеистая структура [1, 2].

Также ячеистая структура была исследована с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

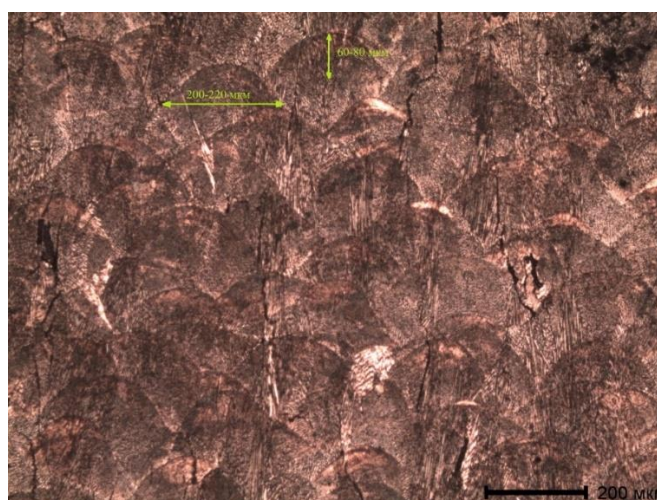


Рис. 4. Металлографическая структура в поперечном сечении

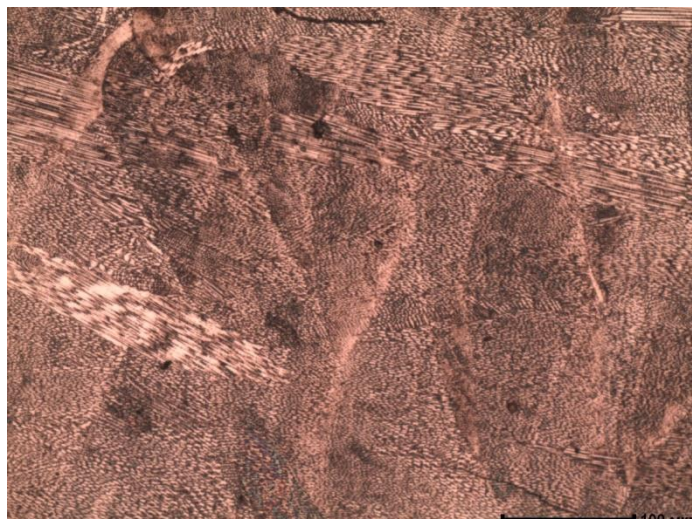


Рис. 5. Ячеистая структура

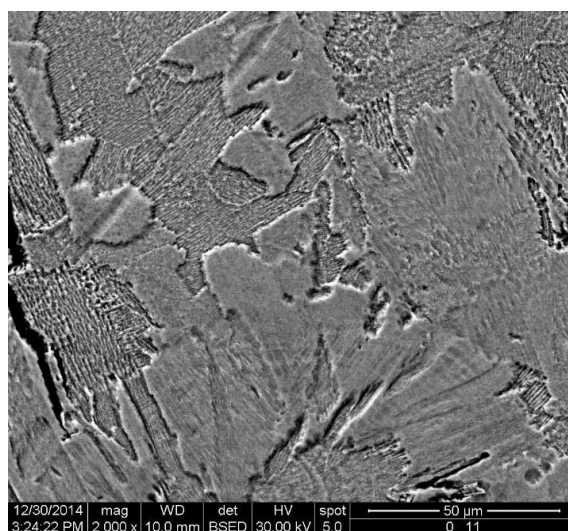


Рис. 6. Ячеистая структура, РЭМ

На рисунке 7 приведена микроструктура жаропрочного никелевого сплава, полученная после дополнительных обработок (РЭМ). Наблюдаемая структура является характерной для никелевых жаропрочных сплавов после литья и термической обработки. Здесь видно области γ' -фазы близкой к кубической формы и прослойки γ -твердого раствора. Следует отметить, что размер γ' -областей совпадает с размером исходных ячеек кристаллизации.

Измерения микротвердости показали, что значение микротвердости сплава в исходном состоянии после СЛП находится в пределах от 420 до 480 $HV_{0.05}$, после дополнительной обработки твердость падает до нижней границы и составляет 410-420 $HV_{0.05}$.

Методом рентгеновского фазового анализа показано, что в структуре сплава, полученного методом СЛП, присутствуют γ -твердый раствор на основе никеля и изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), которая представляет собой упорядоченный γ -твердый раствор. Также в структуре сплава обнаружены карбидные частицы типа MeC с ГЦК кристаллической решеткой и Me_2C с ГПУ решеткой, где ($Me = Ti, Mo, W$) и фазы Ni_3Ti и Ni_4B_3 .

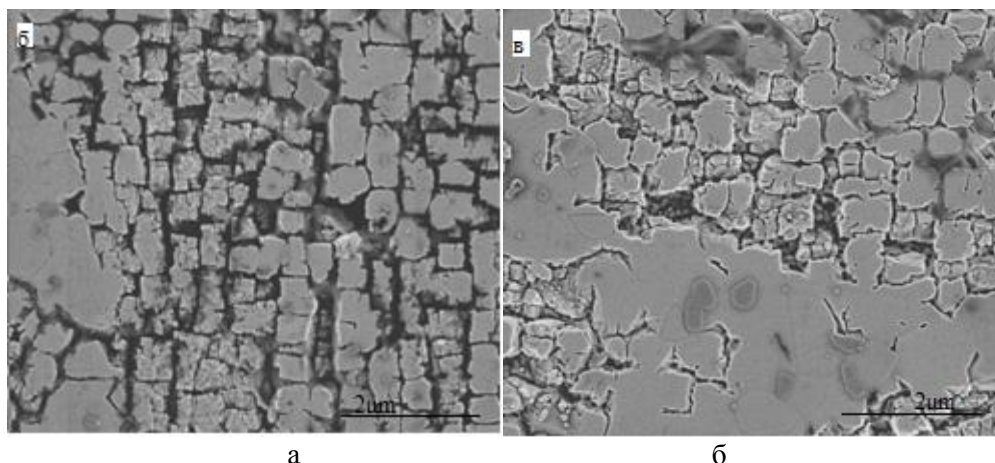


Рис. 7. Структура сплава после дополнительной обработки:
а - термической; б - газостатической

На рисунке 8 представлены рентгенограммы никелевого сплава после СЛП в продольном и поперечном сечениях.

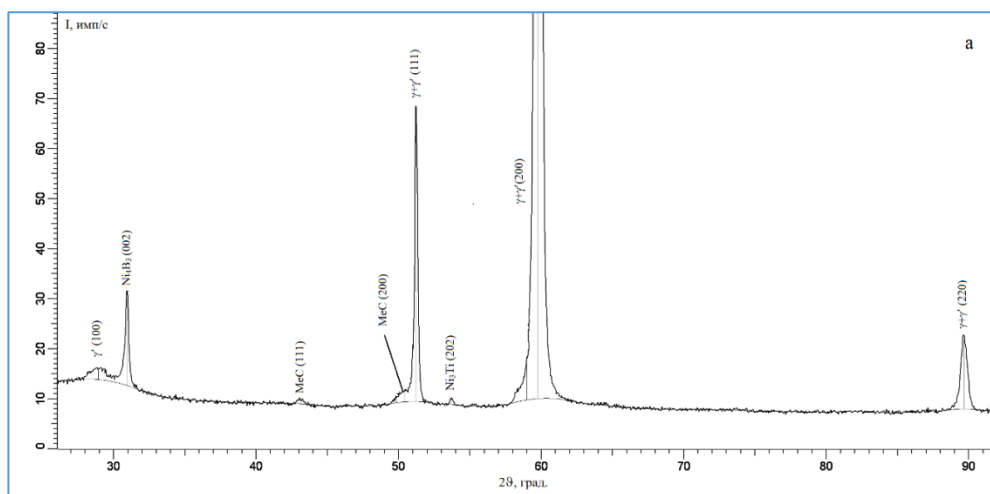
После обработки в структуре сплава обнаружены γ -твердый раствор на основе никеля, изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбиды типа Me_6C и MeC и фаза Ni_3Ti . После термической обработки выделяется большое количество карбидов типа Me_6C и MeC , об этом мы можем судить по появлению большего количества пиков, соответствующих этим фазам. Рентгенограмма никелевого сплава после термической обработки представлена на рисунке 9.

Выводы

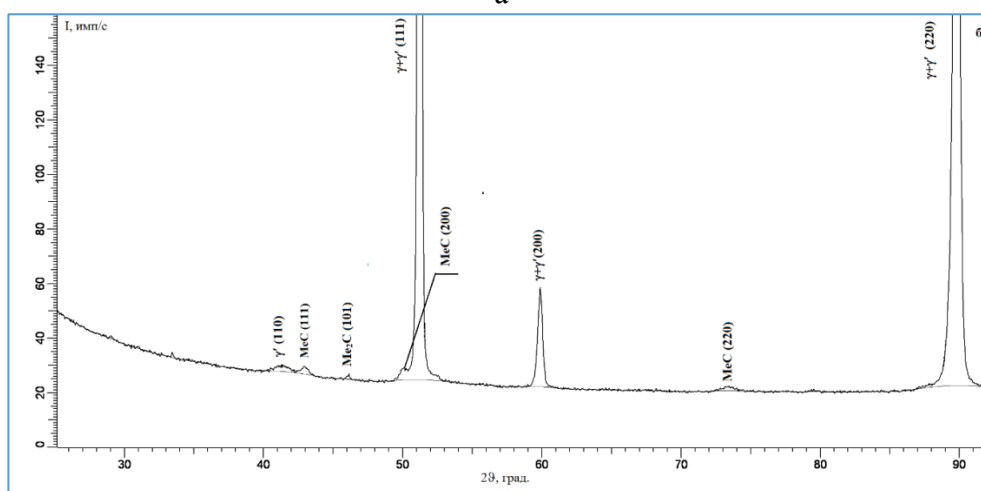
1. Методами металлографического анализа и растровой электронной микроскопии исследована структура никелевого сплава ЖС6-ВИ после СЛП. Показано, что в продольном сечении наблюдается трековая структура, в поперечном видны ванны расплава, разбитые на ячейки кристаллизации.

2. Методом рентгенодифракционного фазового анализа показано, что в сплаве после СЛП присутствуют γ -твердый раствор на основе никеля и изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбидные частицы типа MeC с ГЦК кристаллической решеткой и Me_2C с ГПУ решеткой, где ($\text{Me} = \text{Ti}, \text{Mo}, \text{W}$) и фазы Ni_3Ti и Ni_4V_3 . После термической обработки в сплаве обнаружены γ -твердый раствор на основе никеля, изоморфная γ' -фаза (Ni_3Al), а также карбиды типа Me_6C и MeC и фаза Ni_3Ti .

3. Показано, что твердость никелевого сплава ЖС6-ВИ уменьшается после дополнительных обработок.



а



б

Рис. 8. Рентгенограмма никелевого сплава после СЛП: а – продольное сечение, б – перпендикулярное сечение

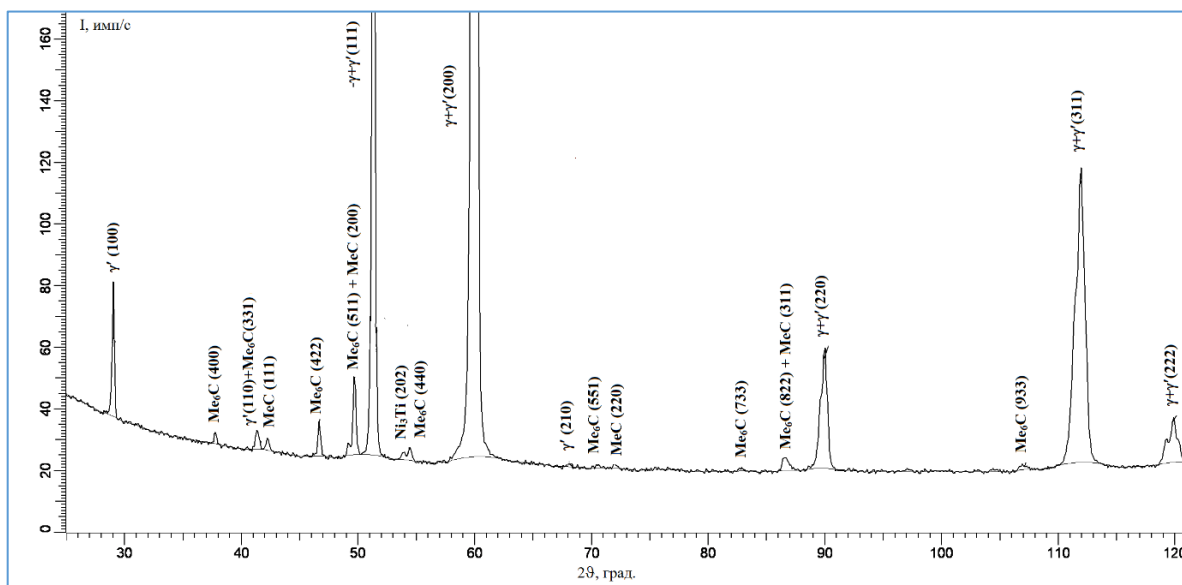


Рис. 9. Рентгенограмма сплава ЖС6-ВИ после термической обработки

Литература:

1. *Lore Thijs, Frederik Verhaeghe, Tom Craeghs, Jan Van Humbeeck, Jean-Pierre Kruth.* A Study Of The Microstructural Evolution During Selective Laser Melting of Ti–6Al–4V // *Acta Materialia*, 2010.
2. *Евгенов А. Г., Роголев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С.* Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ»*, 2015.- № 2.
3. *Chunlei Qiu, Nicholas J.E. Adkins, Moataz M. Attallah.* Microstructure And Tensile Properties Of Selectively Laser-Melted And Of Hiped Laser-Melted Ti–6Al–4V // *Materials science and engineering*, 2013.