

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ПОЯВЛЕНИЯ НЕГАТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2019 А.В. Балякин, Е.И. Жученко, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев

Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 28.01.2019

В статье приведены результаты исследования формирования негативной технологической наследственности у деталей изготовленных методом селективного лазерного сплавления. Проанализированы причины ее возникновения и появление характерного профиля шероховатости поверхности деталей. Приведены методы отделочно-зачистной и финишной обработки деталей, дана их классификация в зависимости от схемы обработки, вида инструменты и рабочей среды. В качестве примера финишной обработки, рассмотрен метод химического полирования образцов из титанового сплава ВТ6 изготовленных методом СЛС. Проведен анализ образцов по микроструктуре, дефектам, шероховатости поверхности, остаточным напряжениям возникающими в результате сплавления порошкового материала и влиянии термообработки.

*Ключевые слова:* селективное лазерное сплавление, технологическая наследственность, титановый сплав, финишная обработка, химическое полирование, шероховатость поверхности

*Исследования были проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003).*

*Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно - технологического комплекса России на 2014-2020 годы».*

### ВВЕДЕНИЕ

Во всех технологически развитых странах ведутся активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию методик и оборудования, основанных на подходе, получившем название «Аддитивное производство». В отличие от классического формообразования, где от заготовки «отсекается» все лишнее и за счет этого получается деталь, при аддитивном производстве деталь «выращивается» послойным добавлением/наложением материала. Такой подход позволяет создавать уникальные изделия и детали на основе трехмерных компьютерных моделей за один технологический цикл. Например, макеты сборочных узлов, криволинейные профили крыльев летательных аппаратов, теплообменники со сложной структурой каналов охлаждения, оснастка для изготовления корпусов двигателей и насосов, фильтрующие элементы, индивидуальные медицинские протезы и др.

*Балякин Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей.*

*E-mail: Balaykinav@ssau.ru*

*Жученко Евгений Игоревич, магистрант гр.2221Т.*

*E-mail: ZhuchenkoZhenya@yandex.ru*

*Смирнов Геннадий Владиславович, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: GVSmirnoff@yandex.ru*

*Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pdla@ssau.ru*

Широко известны и коммерчески успешны следующие методы аддитивного производства: трехмерная печать, лазерная стереолитография, послойная заливка экструдированным расплавом, трехмерная лазерная наплавка, селективное лазерное сплавление. Последний является наиболее перспективным методом, поскольку обладает рядом принципиальных преимуществ: безотходностью, универсальностью, возможностью изготовления с высокой точностью (до  $\pm 0,05$  мм) сложнопрофильных деталей, не уступающих, а иногда и превышающих по своим физико-механическим свойствам детали, полученные традиционным формообразованием.

Вопрос постобработки сложнопрофильных тонкостенных деталей, изготовленных по данной технологии, проявляется особенно остро, когда требуется обработка внутренних поверхностей деталей и очищение поверхностей от несплавленных частиц порошка. Методами механической обработки резанием не всегда удается достичь требуемого результата из-за сложного профиля, тонких стенок деталей и малых припусков на механическую обработку. Кроме того, при механической обработке тонкостенных деталей из титановых сплавов в поверхностном слое из-за его низкой теплопроводности могут произойти структурные и фазовые изменения, сопровождающиеся формированием растягивающих остаточных напряжений и короблением деталей.

Изменение свойств деталей в процессе их изготовления и эксплуатации, от заготовки

тельных и операций термической обработки, описывается технологической наследственностью. Перенос свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим операциям с сохранением свойств у деталей называют технологическим наследованием. Качество детали определяется не только последней, финишной операцией, но и особенностями всех предшествующих операций, начиная с получения заготовки. Носителями информации о технологической наследственности является материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей (шероховатость, волнистость, направление неровностей и изъяны). Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут менять свои свойства частично или полностью.

### ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Селективное лазерное сплавление (СЛС) - одно из направлений аддитивного производства, при котором происходит формирование трехмерного изделия путем последовательного сплавления слоев порошкового материала лучом лазера по заданной программе. Технология СЛС обеспечивает высокий коэффициент использования материала и позволяет получить у заготовки минимальный припуск на постобработку, что делает СЛС привлекательной альтернативой при производстве деталей сложной формы.

Технологический процесс изготовления детали данным методом состоит из четырех основных этапов: 1) разработка компьютерной модели детали; 2) формирование управляющей программы для СЛС-установки на основании компьютерной модели детали, выбор и назначение режимов селективного лазерного сплавления; 3) формообразование детали в СЛС-установке; 4) процессы постобработки. Как у любой технологии у СЛС есть технологические ограничения, указанные в табл. 1 [1].

### ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ХАРАКТЕРНОГО ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ У ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

На сегодняшний день существуют две группы причин появления характерного профиля шероховатости поверхности деталей, изготовленных методом СЛС:

- 1) Геометрические ошибки во время процесса селективного лазерного сплавления;
- 2) Возникновение шероховатости и волнистости вследствие протекания теплообменных процессов.

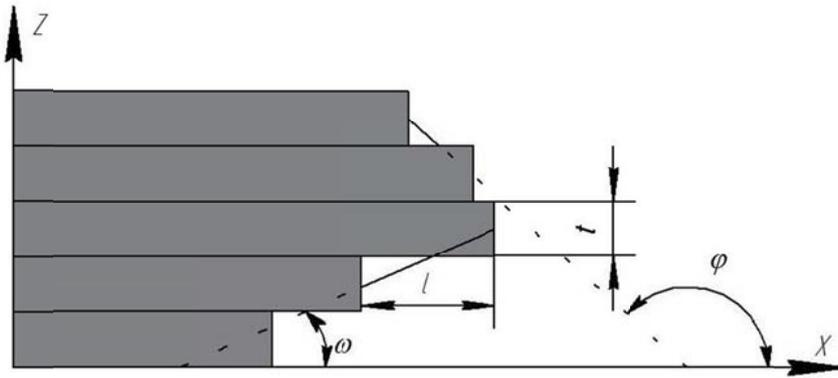
Процесс СЛС подразумевает под собой перемещение сфокусированного лазерного луча (диаметр перетяжки 150 мкм) [2] с заданной траекторией (координаты из модели) по установленной стратегии сканирования. Одна из причин возникновения геометрических ошибок связана с отклонением пятна сплавления от заданной координаты на 0,01-0,05 мм (конструкторские ограничения), что в свою очередь обязательно вызовет появления волнистости поверхности [3].

Так же одной из характерных черт возникновения больших значений шероховатости связывают с эффектом «лесенки». Эффект «лесенки» связан с процессом формообразования и обуславливается толщиной слоя. На рисунке 1 изображена схема наложения слоёв для создания наклонной поверхности. Чем больше угол наклона, тем больше волнистость и как следствие в этой технологии, шероховатость. Максимальный угол построения без использования поддержки 45 градусов.

Из-за дискретности формата STL может возникнуть ошибка при представлении исходных данных в CAD системе. Если исходные данные в CAD системе являются прямолинейные, дискретные грани STL представляют данные в CAD системе без ошибок. Если исходные данные в CAD системе криволинейные, то при конвертировании в STL CAD система включает некоторую ошибку приближения, эта ошибка уменьшается с увеличением числа граней [4]. Желательно минимизировать количество граней для сокраще-

Таблица 1. Таблица рекомендаций по технологическому процессу СЛС [1]

Требования к геометрии детали	Требования к режимам обработки	Технологические требования к установке
Угол свеса не более 45 град. (без поддержки)	Смесь порошков 1:7 больших и маленьких фракций порошка	Точность позиционирования сфокусированного пятна 0,01-0,05 мм
Шероховатость: Вертикальной поверхности Ra=15 мкм Зоны свеса Ra=30 мкм	Удовлетворения параметров мощности для сплавления	Допустимое содержание кислорода в камере не более 0,15%

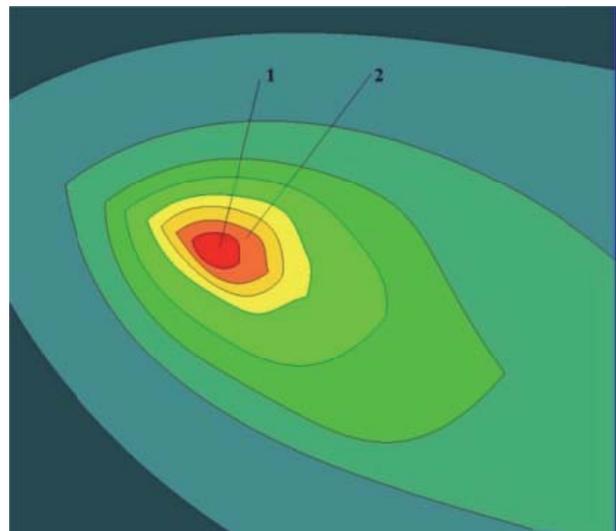


**Рис. 1.** Схема образования эффекта «лесенки» на наклонных поверхностях:  
 $\omega$  – острый угол наклона;  $\phi$  – тупой угол наклона

ния вычислительных потребностей; если возможно, число фасетов должно быть достаточно высоким, чтобы связанная ошибка представления STL была пренебрежимо мала.

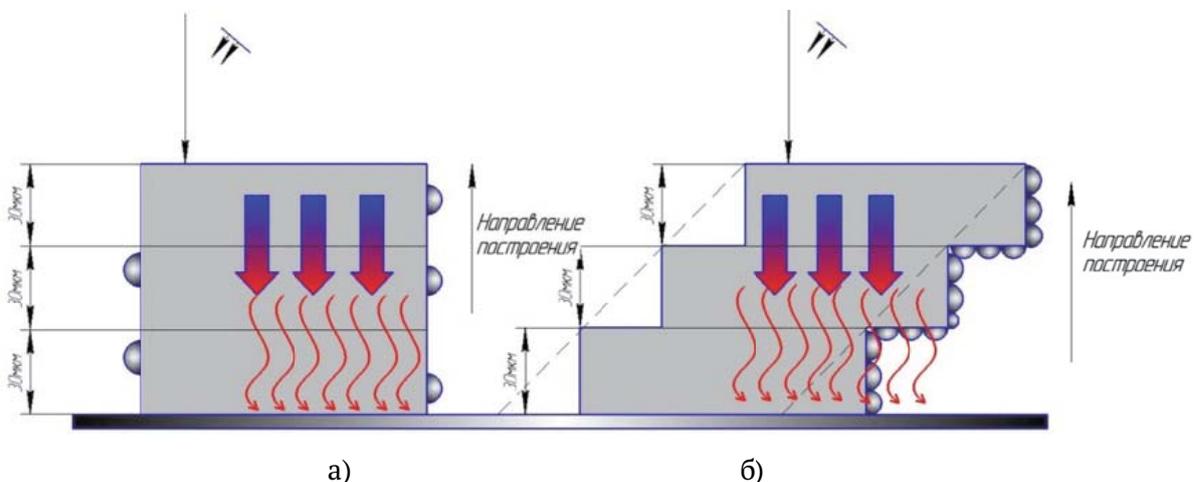
Причины возникновения шероховатости и волнистости вследствие протекания теплообменных процессов также имеют большое значение. Особенность локального лазерного воздействия и соответствующее ему распределение поля температур способствуют возникновению специфичного профиля поверхности, во время формообразование деталей методом селективного лазерного сплавления порошковых металлов.

На рисунке 2 показана модель распределения температуры при лазерном сплавлении единичным импульсом. Модель указывает, что в точке фокусировки 1 образуется ванна расплава, и фракции порошка в этом участке полностью переходят в жидкую фазу. В участке 2 частицы порошка не могут полностью перейти в жидкую фазу, в этом участке происходит частичное сплавление или их спекание [5]. Этот процесс влияет на образовании волнистости и пор. Особенно остро этот эффект выражается на наклонных поверхностях. Схема образования поверхностного слоя представлена на рисунке 3.



**Рис. 2.** Модель распределения градиента температур при селективном лазерном сплавлении:  
 1 – зона ванны расплава; 2 – зона сплавления

Технологические особенности селективного лазерного сплавления, описанные выше, влияют на процессы и способы последующей постобработки. От стратегии сканирования зависит распределение концентраторов остаточных напряжений и как следствие локальная неравно-



**Рис. 3.** Схема образования поверхностного слоя в зависимости от распределения теплоотвода:  
 а – вертикальная стенка; б – наклонная стенка

мерность механических свойств, влияющих на процессы химической полировки. Распределение теплоотвода и геометрические ошибки влияют на распределение расплавленных частиц порошка и завышенной волнистости, особенно на наклонных поверхностях. Все про-

цессы, описанные выше, ведут к формированию негативных параметров технологической наследственности и от них зависит подбор метода полировки, его адаптации и включения дополнительных операций в виде термообработки, пескоструйной обработки и т.д.

**Таблица 2.** Классификация методов полирования деталей

Группа	Подгруппа	Метод
Механические	Абразивные без СОЖ	Эластичный без СОТС Ленточный без СОТС Абразивный без СОТС Алмазный без СОТС
	Галтовочные без СОТС	Галтовочно-абразивный без СОТС Галтовочно обкатный без СОТС
	Центробежные без СОТС	Центробежно – абразивный без СОТС Центробежно обкатной без СОТС
	Турбуляционные без СОТС	Турбуляционно-абразивный без СОТС Турбуляционообкатной без СОТС
	Вибрационные без СОТС	Виброабразивный без СОТС Виброобкатной без СОТС
Химико-механические	Абразивные с СОТС	Эластичный с СОТС Ленточный с СОТС Абразивный с СОТС Алмазный с СОТС
	Гидродинамические	Гидроабразивный Гидрокавитационно-абразивный
	Галтовочные с СОТС	Подводное полирование Галтовочнообкатной с СОТС Галтовочно-абразивный с СОТС
	Вибрационные с СОТС	Виброабразивный с СОТС Виброобкатной с СОТС
	Центробежные с СОТС	Центробежно – абразивный с СОТС Центробежно обкатной с СОТС
	Турбуляционные с СОТС	Турбуляционно-абразивный с СОТС Турбуляционообкатной с СОТС
Физические	Электроконтактные	Электроконтактный непрерывный
Химические	Химическое	Химический с погружением
	Виброхимические	Виброхимический
	Галтовочно-химический	Галтовочно-химический
	Турбуляционно-химический	Турбуляционно-химический
Электрохимические	Электрохимические с погружением	Анодный Реверсивный
	Электрохимические локальные	Электрохимико-механический локальный
	Галтовочно-электрохимические	Галтовочно электрохимический
	Виброэлектрохимические	Виброэлектрохимический

### МЕТОДЫ ОТДЕЛОЧНОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Отделочно-зачистная и финишная обработка деталей может осуществляться различными методами, объединяемыми в группу и подгруппы (табл. 2). Методы классифицируются в зависимости от схемы обработки, вида инструменты и рабочей среды. Подгруппы определяются видом воздействия на материал деталей и схемой обработки.

К отделочным методам обработки, не вносящим структурно-фазовые изменения и проводящих обработку заготовок независимо от механических свойств материала, относятся химическое и электрохимическое полирование.

Метод химического полирования (ХП) металла заключается в том, что обрабатываемую деталь погружают на некоторое время в ванну с химически активным раствором, имеющим обычно повышенную температуру. При этом в результате протекающих химических реакций происходит растворение металла с поверхностей заготовки. В результате такой обработки происходит полирование поверхности, но негативная технологическая наследственность (треки дорожек сплавления) удаляется медленно и пропорционально толщине удаленного слоя, а в некоторых случаях вскрываются скрытые дефекты сплавленного материала в виде пор. Химическое полирование способно эффективно снижать волнистость при достаточном большом съеме слоя материала.

В качестве примера применения химического полирования деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления на установ-

ке SLM 280, нами были, использовали образцы из титанового сплава ВТ6, имеющего двухфазную структуру ( $\alpha+\beta$ ). Размеры образцов: длина - 35 мм, ширина - 10 мм, толщина - 2 мм. Выращивание осуществлялось на режиме: мощность лазерного излучения  $P = 275$  Вт, скорость сканирования  $S = 805$  мм/с. В начале эксперимента была измерена масса образца и шероховатость поверхности в продольном и поперечном направлении. Температура раствора  $25^\circ\text{C}$ , объем раствора - 50 мл. Раствор изготавливали в массовых процентах. Для химического полирования использовались полипропиленовые ёмкости. Результаты исследования шероховатости поверхности образцов в продольном и поперечном направлениях представлены в табл. 3 [6].

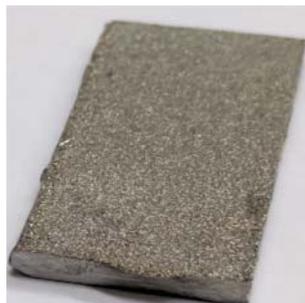
На рисунке 4 изображена поверхность титановых образцов полученных методом селективного лазерного сплавления до (а) и после химического полирования (б).

На поверхности образца после химического полирования в 10% растворе кислот HF и  $\text{HNO}_3$  без предварительной термообработки проявились слоистая структура, унаследованная от способа изготовления образца методом СЛС (Рисунок 4а), а так же неровности в виде пиков, которые не поддаются химическому травлению (Рисунок 4б). Для устранения выявленных проблем было принято решение по термообработке образцов.

Предшествующая термическая обработка влияет на качество поверхности образца в процессе химического полирования из-за вынужденной и контролируемой рекристаллизации внутренней структуры и как следствие устранения концентраторов остаточных напряжений. Пример поверхности образца из титанового

**Таблица 3.** Шероховатость поверхности образцов до и после химического полирования в растворах различных составов с содержанием HF равной 10%

Раствор для химического полирования	Шероховатость поверхности образца, мкм			
	До полирования		После полирования	
	Вдоль трека сканирования	Поперек трека сканирования	Вдоль трека сканирования	Поперек трека сканирования
10%HF+10% $\text{HNO}_3$	Ra = 4,13 Rz = 31,6	Ra = 4,46 Rz = 35,60	Ra = 0,08 Rz = 0,89	Ra = 0,15 Rz = 1,61

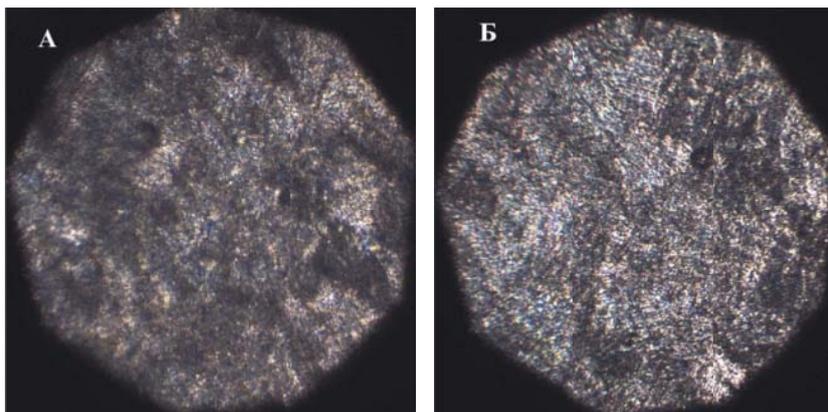


а)



б)

**Рис. 4.** Поверхность образцов до химической полировки а) и после б)



(Неполный отжиг 650° - 24 часа, охлаждение на воздухе с печкой с последующей закалкой 930° - 30 минут, охлаждение в воду) А – Zoom X10; Б – Zoom X20

**Рис. 5.** Поверхность образца прошедшего термическую обработку

сплава ВТ6, после химического полирования в растворе кислот 10%HF+10%HNO<sub>3</sub> и прошедших термообработку представлен на рисунке 5.

К достоинствам химической полировки относятся: простота использования, обработка поверхности независимо от сложности геометрии изделия. К недостаткам относятся: работа с сильными кислотами, отсутствие локализации процесса, и, как следствие, сложность обеспечения размеров при обработке, зависимость качества поверхности от микроструктуры изделия (появление «пиков»).

Наряду с химическим полированием металлов в промышленности широко применяется электрохимическая обработка металлических изделий. Электрохимическое полирование (ЭХП), так же как и химическое полирование позволяет заменить финишную механическую обработку, отличающуюся большой трудоемкостью. При механическом полировании, вследствие нагрева во время обработки, почти всегда изменяется поверхностный слой металла, его твердость и хрупкость повышаются. ХП и ЭХП не приводят к фор-

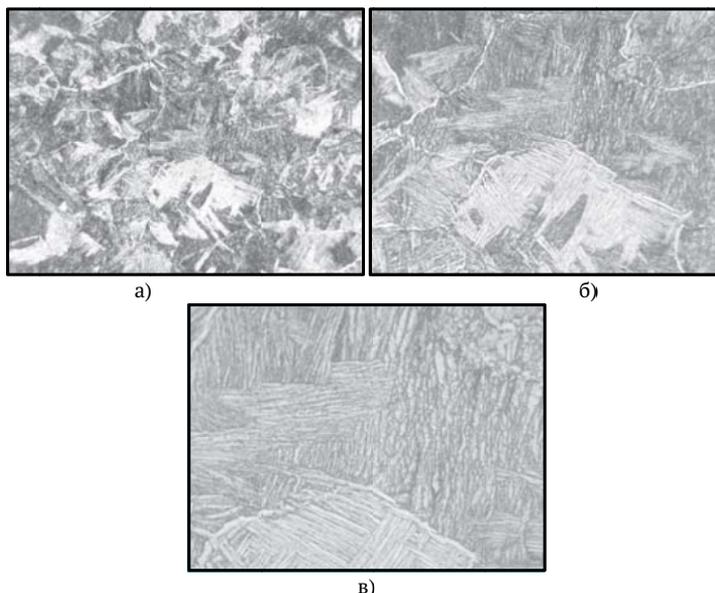
мированию подобных дефектов [7, 8].

К недостаткам электрохимического полирования относятся: необходимость применения сильных кислот, низкая локализация процесса, а также слабое влияние на волнистость поверхности в процессе обработки.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛС

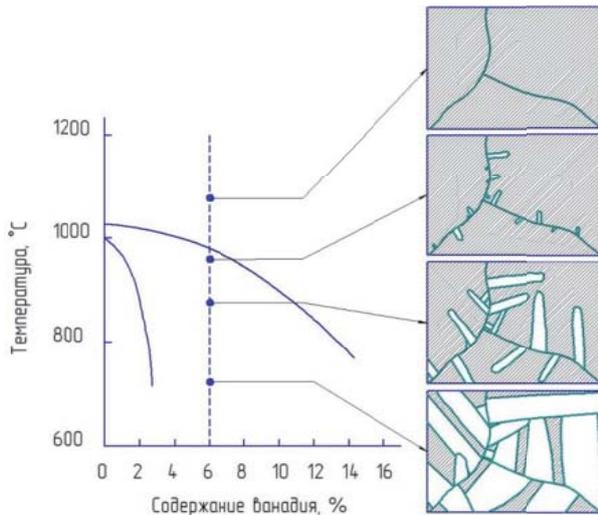
Исследование микроструктуры образцов осуществлялось с помощью оптического микроскопа МЕТАМ РВ. Травление образцов после полировки проводили 40%HF в течение 10 секунд, затем промывали в проточной воде, сушили фильтровальной бумагой.

Микроструктура традиционно изготовленного сплава ВТ6 представляет собой микроструктуру «Видманштеттова структура» характеризуется пластинами α-фазы, погруженной в матрицу β (рисунок 6).



**Рис. 6.** Микроструктура сплава ВТ6 полученного с помощью проката при увеличении: а) X150; б) X300; в) X650

Формирования микроструктуры сплава показано на рисунке 7. Когда ВТ6 нагревается выше температуры  $\beta$ -перехода, фиксируется  $\beta$ -фаза. После медленного охлаждения немного ниже границы  $\beta$ -превращения крошечные  $\alpha$ -пластины начинают зарождаться от границ предшествующего  $\beta$ -зерна. По мере дальнейшего охлаждения сплава ВТ6 большее количество  $\beta$ -зерен трансформируется в  $\alpha$ -зерна. Скорость охлаждения должна быть меньше  $1000^\circ\text{C}/\text{мин}$ , в противном случае образуются вторичные метастабильные фазы, такие как  $\alpha'$  и  $\alpha''$ .



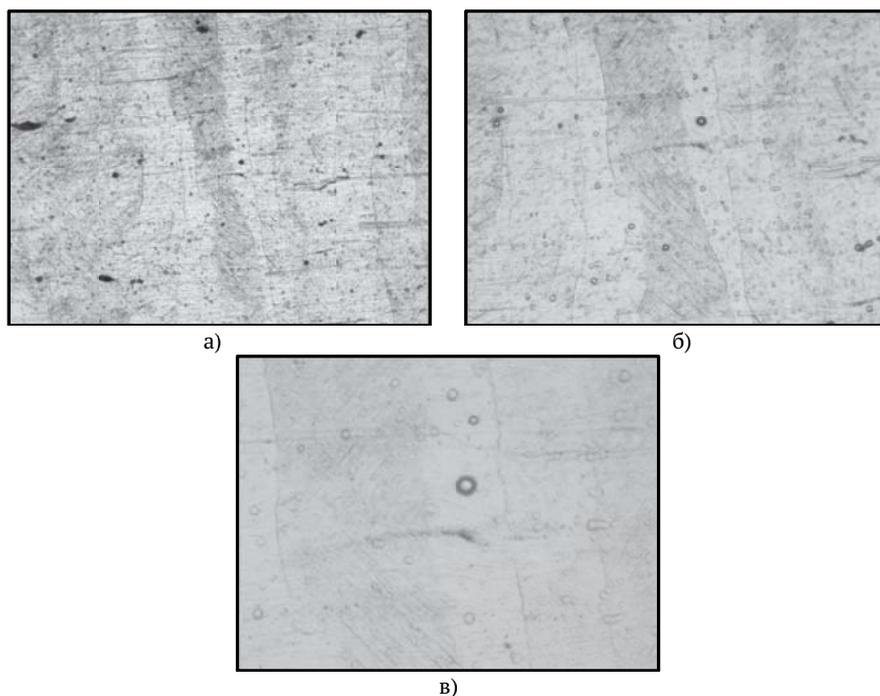
**Рис. 7.** Формирование микроструктуры сплава ВТ6 в зависимости от содержания (%) легирующего материала (V)

В работах [9-12] отмечается, что микроструктура сплава ВТ6, создаваемая посредством SLM, будет иметь несколько отличий от аналогичных вариантов изготовления. Примером такого отличия могут быть столбчатые зерна, которые появляются в микроструктуре образцов, изготовленных с использованием SLM. При изготовлении конечных изделий из металлических порошков методами SLM часто наблюдаются удлиненные столбчатые зерна вдоль границ  $\beta$ -зерен. Эти столбчатые зерна являются результатом процесса кристаллизации, который начинается примерно при  $1660^\circ\text{C}$ . Это связано, с особенностями протекания процесса кристаллизации. Размеры столбчатых зерен будут расти в соответствии с повышением температуры и может привести к кривизне зерен, вызванной смещением ванны расплава. В исследовании А. Antonysamy [13] утверждается, что трещины имеют склонность к распространению по телу столбчатых зерен. Проведение термической обработки сплавленных изделий в данном случае из титанового сплава ВТ-6, может привести к изменению микроструктуры, которое повлияет на механические свойства [14].

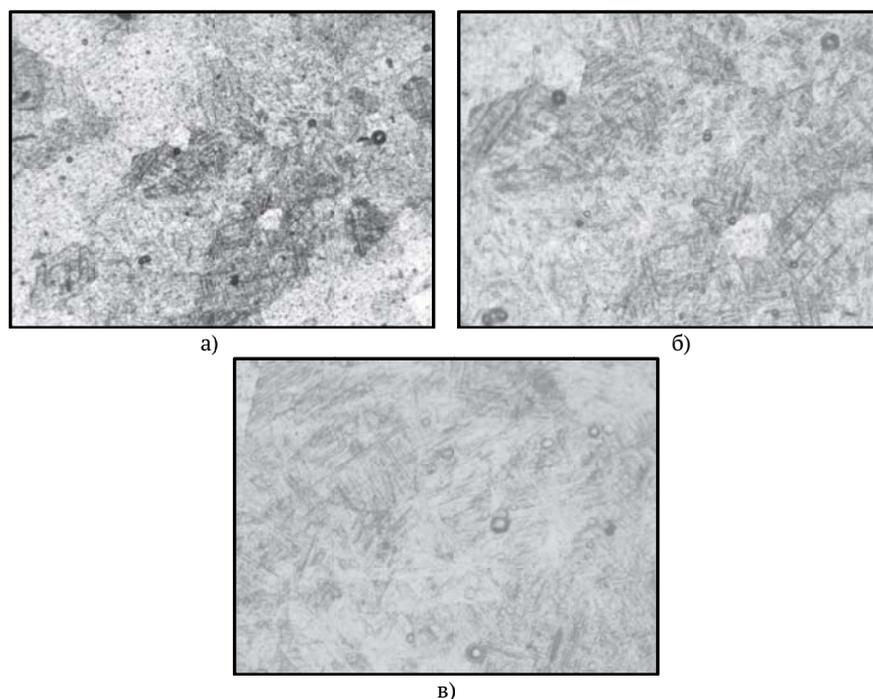
В исследованиях [10, 12] появление в структуре сплава ВТ6 изготовленного с помощью SLM мартенсита ( $\alpha'$ -фаза) объясняется высокими температурами нагрева и быстрого охлаждения, присущими процессу SLM. При кристаллизации скорость охлаждения превышает  $1000^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Данные условия обработки удовлетворяют требованиям к образованию мартенситных образований. При использовании термообработки удается улучшить механические характеристики и технологические свойства сплава. Многие исследования [9, 10, 12, 15] показали, что в первую очередь такая микроструктура приводит к снижению пластичности. Подвергая образцы термической обработке для разложения  $\alpha$ -фазы, можно добиться значительных улучшений свойств материала в сторону повышения его пластичности. Кроме того, термообработка позволяет снизить тепловые напряжения, которые формировались во время процесса SLM [16]. Авторы работ [9, 16] полагают, что наличие столбчатых зерен может привести к анизотропии механических свойств. Микроструктура SLM также может зависеть от ориентации из-за слоистого сплавления материалов и вертикальной теплопроводности [17, 18].

На рисунках 8 и 9 изображены микроструктуры образцов из сплава ВТ6, полученным вертикальным и горизонтальным сплавлением соответственно.

Анализируя полученные снимки, наблюдаем схожую с мартенситной структуру, характерную для изделий, полученных по технологии SLM. Этот вывод можно сделать сравнив с результатами исследований других авторов, а также изучив микроструктуру сплава ВТ6 полученного традиционными методами (рисунок 6). Микроструктура зерен вытянута вдоль направления сплавления [19], игольчатые  $\alpha'$  зерна заключены в пределах удлиненных  $\beta$  зерен, и аналогично вытянуты вдоль строения заготовки [20]. Следовательно, ориентация построения приводит к анизотропии в микроструктуре. Наличие четко выраженных гранул порошка связано с особенностью проведения травления и последующей питтинговой коррозией. На рисунке 8 можно увидеть «микросварные швы» образовавшиеся при сплавлении двух слоев. Следует отметить, что в исследованных образцах было отмечено наличие несплошностей, которые, например, можно видеть на рисунке 8а. На образце, выращенном при горизонтальной ориентации рисунок 9 «микросварные швы» в явном виде не видны. Не сплавленные участки также присутствуют (рисунок 9а). Образование пор в образцах с горизонтальной и вертикальной ориентацией можно объяснить тремя причинами. Первая, наличием в порошковом материале фракции порошка 15-20 мкм, который при их



**Рис. 8.** Микроструктура вертикально сплавляемого образца сплава ВТ6 при увеличении: а) X150; б) X300; в) X650



**Рис. 9.** Микроструктура горизонтально сплавляемого образца сплава ВТ6 при увеличении: а) X150; б) X300; в) X650

локальной группировки данных частиц вместе и воздействию на них лазерного излучения склонны к испарению. Вторая причина исходит из условия направления трека сплавления и перемещением ванны расплава. Третья причина - это влияние газоплазменного процесса проходящего во время лазерного сплавления [21]. Также наблюдается большее количество  $\beta$  фазы по сравнению с образцом, выращенным при вертикальной ориентации рисунок 8.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Химическое и электрохимическое полирование однозначно подходят для снижения шероховатости поверхностей сложнопрофильных деталей полученных по технологии SLM, но достижимый эффект не всегда удовлетворяет требованиям чертежа по волнистости поверхности.

Для эффективного устранения волнистости и снижения шероховатости предлагается ис-

пользовать электрохимическое или химическое полирование (ЭХП) в комбинации с ультразвуковой обработкой и абразивно-электролитными пастами в качестве рабочей среды.

Принцип работы комбинирования ЭХП и УЗО основан на интенсификации полировочных эффектов, при которых во впадинах поверхности образуется вязкий слой, который защищает поверхность, но даёт возможность абразиву воздействовать именно на выступающие участки. Такой подход поможет осуществить полирующие эффекты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен анализ образцов из титанового сплава ВТ6, полученных на установке SLM 280, по микроструктуре, дефектам, шероховатости поверхности и остаточным напряжениям, возникающими в результате сплавления порошкового материала. Следует особо отметить, что эти параметры взаимосвязаны. Таким образом, свойства получаемого изделия зависят от соотношения между этими параметрами, полученными в процессе SLM, а не от выбора только одного параметра.

Что касается микроструктурной композиции титанового сплава ВТ6, мартенситные структуры обладают определенными механическими свойствами, такими как высокие предел текучести и предел прочности, которые намного больше, чем те, которые производятся обычными способами производства [22], при значительно низкой пластичности которая составляет всего 6% [23]. Поэтому  $\alpha'$  мартенсит должен быть разложен на  $\alpha + \beta$ -структуру. Что касается этой эволюции от  $\alpha$ -мартенсита к  $\alpha + \beta$ -структурам, требуется дальнейшее развитие и исследование методов преобразования мартенсита, особенно при увеличении размеров образцов, для устранения необходимости в термической или термомеханической обработке.

Аналогично для микроструктурных дефектов требуется более глубокое понимание следующих вопросов:

1. Какой уровень пористости является допустимым;

2. Какие параметры процесса помогут достичь этого уровня пористости.

Управление плотностью энергии в ограниченных зонах процесса SLM используемых в настоящее время для прогнозирования пористости, является недостаточным с учетом сложности процесса. Кроме того, в то время как методика формирования остаточных напряжений при традиционных методах обработки широко изучена, параметры, которые приводят к этим напряжениям в процессе SLM, не совсем понятны. Разногласия между авторами относительно

влияния отдельных параметров процесса СЛС являются общими из-за разнородности материалов и методов исследования, которые используются. Таким образом, требуются комплексные исследования зависимости формирования остаточных напряжений от параметров процесса СЛС для титанового сплава ВТ6.

В работе также рассмотрены методы улучшения геометрических параметров качества поверхностного слоя, образцов полученных методом селективного лазерного сплавления. Рассмотрены достоинства и недостатки методов химического и электрохимического полирования, возможности их применения и комбинации электрохимических и электрофизических методов. Так же рассмотрены причины возникновения характерного профиля поверхности, а именно: волнистости, шероховатости и появления несплавленных частиц порошка на поверхности деталей, получаемых методом СЛС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapovichev A.V., Kokareva V.V., Smelov V.G. and Sotov A.V.* 2016 Selective laser melting of titanium alloy: investigation of mechanical properties and microstructure IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 156 pp 1-6
2. *Назаров А.П.* Особенности конструкции машин для селективного лазерного спекания // Вестник МГТУ «Станкин». 2013. № 1. С. 76-79.
3. *Тарасова Т.В., Назаров А.П.* Исследование процессов модификации поверхностного слоя и изготовления трехмерных машиностроительных деталей посредством селективного лазерного плавления // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 2(25). С. 17-21.
4. *Назаров А.П.* Области применения технологии селективного лазерного спекания // Материалы всероссийской молодежной конференции «Инновационные технологии в машиностроении». Москва. 2011. Октябрь. С. 252-259.
5. *Facchini, L., Vicente, N., Lonardelli, I., Magalini, E., Robotti, P., & Molinari, A.* (2010). Metastable Austenite in 17-4 Precipitation - Hardening Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Advanced Engineering Materials*, 12(3), 184-188.
6. Химическое полирование изделий из титанового сплава ВТ6, изготовленных методом селективного лазерного сплавления / Д.Л. Скуратов, А.В. Балякин, Е.И. Жученко, А.Н. Швецов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4. С. 61-69.
7. *Lutjering, G.* Titanium / G. Lutjering, J.C. Williams // Berlin – 2003.
8. *Pramanik, A.* Machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) - Theory to application. / A. Pramanik, G. Littlefair. // *Machining Science and Technology* – 2015. – №19. – 1-62 с.
9. *Leuders, S.* On The Mechanical Behaviour Of Titanium Alloy TiAl6V4 Manufactured By Selective Laser Melting: Fatigue Resistance And Crack Growth Performance // *International Journal of Fatigue*. –

2013. – №48. – 300-307 с.
10. Qiu, C. Microstructure And Tensile Properties Of Selectively Laser-Melted And Of Hiped Laser-Melted Ti-6Al-4V. / C. Qiu, N. Adkins, M. Attallah. // Materials Science and Engineering – 2013. – №578. – 230-239 с.
  11. Vandenbroucke, B. Selective Laser Melting Of Biocompatible Metals For Rapid Manufacturing Of Medical Parts. / B. Vandenbroucke, J.P. Kruth. // Rapid Prototyping Journal – 2007. – № 13.4. – 196-203 с.
  12. Simonelli, M. The Formation Of  $\alpha + \beta$  Microstructure In As-Fabricated Selective Laser Melting Of Ti-6Al-4V. / M. Simonelli, Y. Tse, C. Tuck. // Journal of Materials Research – 2014. – №29.17 – 2028-2035 с.
  13. Antonysamy, A.A. Effect of build geometry on the  $\beta$ -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting / A. A. Antonysamy, J. Meyer, P. B. Prangnell // Materials Characterization – 2013. – №84 – 153-168 с.
  14. Деменов, В.А. Исследование влияния термической обработки на поведение образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления, при испытаниях на одноосное растяжение / В. А. Деменов, А. В. Балякин, Е. А. Носова // Синергия наук – 2018. – №21 – 427-437 с.
  15. Aziz, I. Microstructure and Mechanical Properties of TiAl6V4 produced by Selective Laser Sintering of Prealloyed Powders. // Eng. University of Wikato. – 2010. – 81 с.
  16. Зарипова, Р.Г. Влияние интенсивной пластической деформации и режимов обработки на структуру и механические свойства титанового сплава BT-6. / Р. Г. Зарипова, В. А. Шундалов, А. В. Шарафутдинов // Вестник УГАТУ. – 2012. – №7(52). – 17-24 с.
  17. Туманов, А.Т. Авиационные материалы. Магниевые и титановые сплавы // М.: ОНТИ. – 1973. – 292 с.
  18. Матвиюк, В.А. Исследование влияния толщины полос из алюминиевых сплавов Д16 и АМц на их механические и технологические свойства. / В. А. Матвиюк, Е.А. Носова. // 1973. – 60 с.
  19. Попович, А.А. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов / А.А. Попович, В.Ш. Суфияров, Е.В. Борисов, И.А. Полозов, Д.В. Масайло, А.В. Григорьев // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия – 2016. – №3 – 4-11 с.
  20. Miltona, S. Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting / S. Miltona, A. Morandea, Fy Chalon, R. Leroy. // Procedia CIRP 45 – 2016. – 127-130 с.
  21. Yu Sun, Mark Aindow, Rainer J. Hebert, Comparison of virgin Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing, Additive Manufacturing, Volume 21, 2018, Pages 544-555, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.011>.
  22. H. Attar, M. Calin, L.C. Zhang, S. Scudino, J. Eckert, Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium, Mater. Sci. Eng. A 593 (2014) 170 – 177.
  23. B. Dutta, F.H. (Sam) Froes, The additive manufacturing (AM) of titanium alloys, Titan. Powder Metall. 0 (2016) 447 – 468.

## THE INVESTIGATION OF NEGATIVE TECHNOLOGICAL HEREDITY APPEARANCE DURING GTE PARTS MANUFACTURING BY SLM METHOD

© 2019 A.V. Balyakin, E.I. Zhuchenko, G.V. Smirnov, N.D. Pronichev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes the research results of negative technological heredity appearance during parts manufacturing. The causes of occurrence of part roughness profile were investigated. The methods and classification of finishing, grinding and post processing are described depending on the cut-map, type of tools and operating environment. We studied the chemical polishing of samples from titanium alloy VT6 manufactured by the SLM method as an example of finishing. The samples were analyzed by microstructure, defects, surface roughness, residual stresses caused by melting of the powder material and heat treatment.

**Keywords:** selective laser alloying, technological heredity, titanium alloy, final polishing, chemical polishing, surface roughness

Andrey Balyakin, Senior Lecturer of the Department of Engine Technology. E-mail: [balyakinav@ssau.ru](mailto:balyakinav@ssau.ru)

Evgeny Zhuchenko, Graduate Student gr.2221T.

E-mail: [ZhuchenkoZhenya@yandex.ru](mailto:ZhuchenkoZhenya@yandex.ru)

Gennadiy Smirnov, Doctor of Technics, Professor of the Department of Engine Technology.

E-mail: [GVSmirnoff@yandex.ru](mailto:GVSmirnoff@yandex.ru)

Nikolay Pronichev, Doctor of Technics, Professor of the Department of Engine Technology. E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru)