

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта

На правах рукописи

ВИЛЬДАНОВ АРТУР МАРАТОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ
МАКРОДЕФЕКТОВ ПРИ ОБЪЕМНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ
НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ**

Направление подготовки 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность 15.06.01_07 «Сварка, родственные процессы и технологии»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Вильданов А.М.

Научный руководитель: доцент

доктор технических наук,

Туричин Глеб Андреевич

Санкт-Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШФиТМ Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШФиТМ

Семенча А.В., к.х.н., доцент

Научный руководитель

Туричин Г.А., д.т.н., доцент

Рецензент

Логачев И.А., к.т.н.

Начальник отдела – заместитель

начальника отделения

АО «Композит»

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1. Исследование свойств материалов, изготовленных методом прямого лазерного выращивания | 8 |
| 1.1 Влияние технологических параметров на механические свойства | 8 |
| 1.2 Измерение термических циклов во время процесса выращивания..... | 11 |
| 2. Исследование влияния технологической паузы на термическую историю тонкостенного изделия из жаропрочного сплава Inconel 625 | 15 |
| 3. Определение минимального уровня мощности, при котором образуются несплавления в технологических пробах в зависимости от мощности лазерного излучения | 22 |
| 3.1 Эксперименты с нержавеющей сталью 316L | 24 |
| 3.2 Эксперименты с титановым сплавом Вt6 | 39 |
| ВЫВОД..... | 44 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 45 |

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технические отрасли современного машиностроения, такие как авиационное и ракетное двигателестроение, приближаются к технологическому барьеру, препятствующему дальнейшему улучшению характеристик и уменьшению себестоимости продукции. Эффективность традиционных двигательных систем находится на пределе, основной тенденцией развития является повышение рабочей температуры, ограничиваемая эксплуатационными характеристиками применяемых материалов. Альтернативой является снижение веса двигателя, повышение топливной эффективности и развитие новых схем горения (детонации) топлива, что влечет за собой повышение сложности геометрии узлов и деталей двигателей до уровня, ограничивающего возможность применения традиционных технологий обработки металлов в производстве. Решением является использование аддитивных технологий производства металлических деталей.

На данный момент классификацию методов аддитивного производства производят по различным критериям. Основные из них это используемый источник энергии (лазер, электрическая дуга, электронный луч, плазма и т.д.), способ нанесения (прямой или послойный), используемый материал (порошок, проволока, жидкость, листы). По мере развития классификации добавляются новые параметры.

Степень использования аддитивных технологий в промышленном производстве является индикатором индустриального развития государства. В настоящее время с помощью аддитивных технологий упрощаются производственные процессы в авиационной промышленности, энергомашиностроении, приборостроении, где есть потребность в изделиях сложной геометрии и «выращивании» металлических деталей. По-прежнему российские потребители зависят как от поставок импортных высококачественных металлических порошков, так и от импорта оборудования.

В ряде отраслей - авиационной промышленности, в судостроении, энергетическом машиностроении, а также дентальной медицине и восстановительной хирургии внедрение аддитивных технологий наиболее заметно. Имеется также положительный опыт использования аддитивных технологий для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов и т. д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий. Безусловно, аддитивные технологии имеют огромное преимущество перед традиционными за счет сокращения времени и стоимости при проведении НИОКР. Авиационная и автомобильная отрасли США и Европы являются главными заказчиками и потребителями АМ-технологий. В последнее время эти технологии привлекают крупные промышленные компании: Boeing, Mercedes, General Electric, Lockheed Martin, Mitsubishi, General Motors. Активно применяются эти технологии в бытовой электронике и медицине, в том числе стоматологии [1,2].

Аддитивные технологии имеют множество преимуществ перед традиционными. Благодаря прямому построению деталей становится возможным получение изделий любых форм и размеров. При переходе от детали с одной геометрией к деталям с другой геометрией не требуется дополнительной дорогостоящей оснастки. Становится возможным получение изделий с топографическим дизайном, с градиентной структурой. При этом происходит значительный рост производительности и снижение затрат исходного сырья.

Основной технологией, активно внедряемой в двигателестроение, является технология послойного лазерного сплавления металлических порошков, которая позволяет получать недоступные ранее формы, использовать новые материалы, значительно сократить время изготовления, объем последующей обработки и себестоимость деталей. Но ограниченный максимальный размер получаемых деталей и низкая производительность не позволяют этой технологии покрыть все потребности двигателестроения. Востребована технология аддитивного производства крупногабаритных

изделий, размером до 2 м диаметром, позволяющая получать сложнопрофильные, точные заготовки деталей двигателей. Для решения таких технологических задач технология прямого лазерного выращивания является одной из наиболее перспективных[3-7].

Технология прямого лазерного выращивания изделий из металлических сплавов является дальнейшим развитием технологий лазерной порошковой наплавки. Принцип построения изделий строится на формировании отдельных наплавочных валиков и наложении их друг на друга в определенном порядке [8].

Для выращивания конкретного изделия необходимо создать траекторию перемещения технологического инструмента относительно подложки, двигаясь по которой технологический инструмент проведет наплавку отдельных валиков, формирующих изделие. Траектория перемещения включает в себя координаты точек в пространстве, указания на тип интерполяции и скорость движения инструмента, а также вспомогательную информацию – места включения и выключения лазера, технологические параметры процесса. Количество точек при выращивании крупногабаритных изделий может составлять несколько миллионов, таким образом ручное программирование подобных систем представляет определенную сложность, если вообще возможно. Для автоматизации процесса необходимо использовать специализированное программное обеспечение для создания траекторий и как следствие – управляющих программ для контроллера робота. В основе подобных САПР, которые широко применяются для подготовки управляющих программ для систем ЧПУ, лежат отдельные стратегии обработки – алгоритмы построения траекторий обработки исходя из геометрии изделия. Каждая стратегия обработки призвана совершать определенную операцию и оптимальна для работы с какой-либо типичной геометрией. Теоретически возможно работать только с одной, простейшей стратегией обработки, например, скопировать стратегию струйного принтера, когда в каждом слое технологический инструмент проходит над каждой

точкой пространства и либо производит, либо не производит обработку. Но применительно к реальному, сложному технологическому процессу результат будет плачевный. Даже в более простом, чем ПЛВ, послойном сплавлении стратегии обработки слоев отличаются от стратегии принтера, они учитывают проходу по контурам изделия для улучшения качества поверхности, обработку в разбежку, для равномерного тепловложения и т.д. Специализированная стратегия обработки позволяет увеличить скорость обработки, повысить качество получаемых изделий и создать прежде недоступную форму изделия.

Прямое лазерное выращивание является сложным процессом, включающим в себя множество технологических параметров (ширина валки, скорость процесса, мощность лазерного излучения, расход подаваемого порошка, смещение по высоте и др.). Следовательно, важнейшим этапом перед изготовлением заготовок, является определение технологических параметров. Для того чтобы заготовки обладали высокими эксплуатационными характеристиками необходимо предотвратить образование внутренних дефектов при выращивании (поры, несплавления) [9], которые, в свою очередь, могут снизить механические свойства получаемых заготовок.

1. Исследование свойств материалов, изготовленных методом прямого лазерного выращивания

В связи с активным развитием технологии прямого лазерного выращивания проводятся активные исследования по определению механических характеристик изготавливаемых образцов. Как правило, изготавливаются плиты, из которых потом вырезаются заготовки под образцы для механических испытаний на растяжение.

1.1 Влияние технологических параметров на механические свойства

Технологические параметры прямого лазерного выращивания влияют не только на стабильность выращивания и формирование отдельных валиков, но и, что очень важно, на свойства изготавливаемых изделий. Стратегия заполнения массивного элемента является важным параметром в процессе выращивания, т.к. в зависимости от геометрии она может отличаться. Заполнение растром является одной из самых используемых стратегий, поскольку позволяет за короткое время заполнить необходимой объем различных элементов. В [10] проводят исследование на влияние угла поворота заполнения на механические свойства, рисунок 1.1:

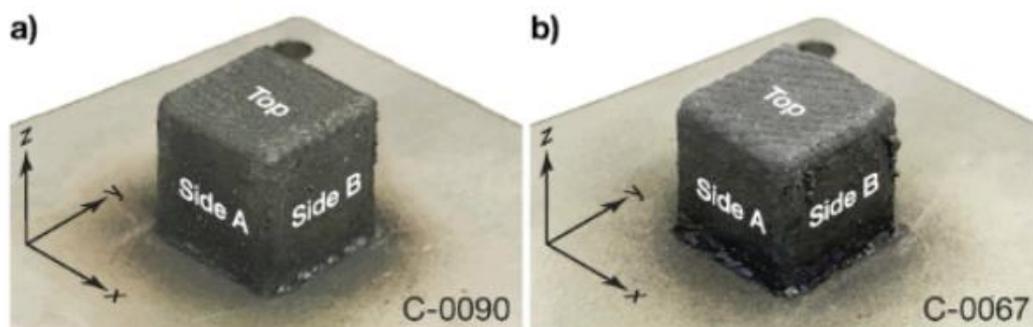


Рисунок 1.1 – Образцы для механических свойств из нержавеющей стали 316L, где а) угол поворота раstra 90°; б) угол поворота раstra 67°

В результате, образец С-0067 (рисунок 1.1) показал на 7 % ниже относительное удлинение, чем образец С-0090.

Помимо способов заполнения важным моментом является изменение свойств в зависимости от удаления рабочей точки от подложки, в результате

чего изменяется состояние теплоотвода. По мере отдаления рабочей точки выращивания, влияние подложки становится небольшим, другими словами термическая история выращиваемого объекта стабилизируется. В [11] провели исследование на определение механических характеристик в зависимости от высоты образца (рисунок 1.2):

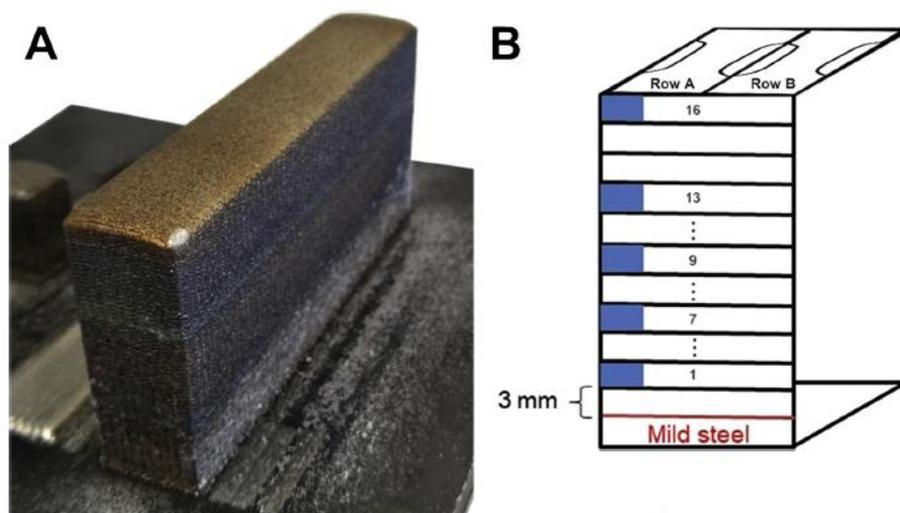


Рисунок 1.2 – Образец для определения механических свойств, где а) выращенный образец из 316L, б) секции для металлографических и механических исследований

В результате проведенного исследования, оказалось, что несмотря на значительное изменение морфологии зерен в нижней (крупные зерна), средней (зигзагообразные столбчатые зерна) и верхней (крупные столбчатые зерна, параллельные направлению роста) части образца, значительной разницы в механических свойствах не обнаружены.

В процессе прямого лазерного выращивания происходит послойное наплавление валиков, в связи с этим в изготавливаемых данными методами изделиях, присутствует анизотропия свойств. В работе [12] собраны основные исследования по анизотропии свойств образцов, изготавливаемых различными методами аддитивных технологий, в том числе и прямого лазерного выращивания. Основные факторы, влияющие на анизотропию являются: 1) морфология зерен, которые формируются во время выращивания, 2) кристаллографическая структура, 3) дефекты, а именно несплавления, как между соседними валиками, так и между слоями. В большей части

проводимых исследований, не предоставляется особого внимания к методике изготовления образцов, зачастую, для ускорения процесса образцы изготавливаются без остановок, а, иногда и спиралью. Так, в [13] для исследования анизотропии свойств, в качестве образца, изготовили профильную трубу с длиной грани 60 мм из нержавеющей сплава 316 L, рисунок 1.3:

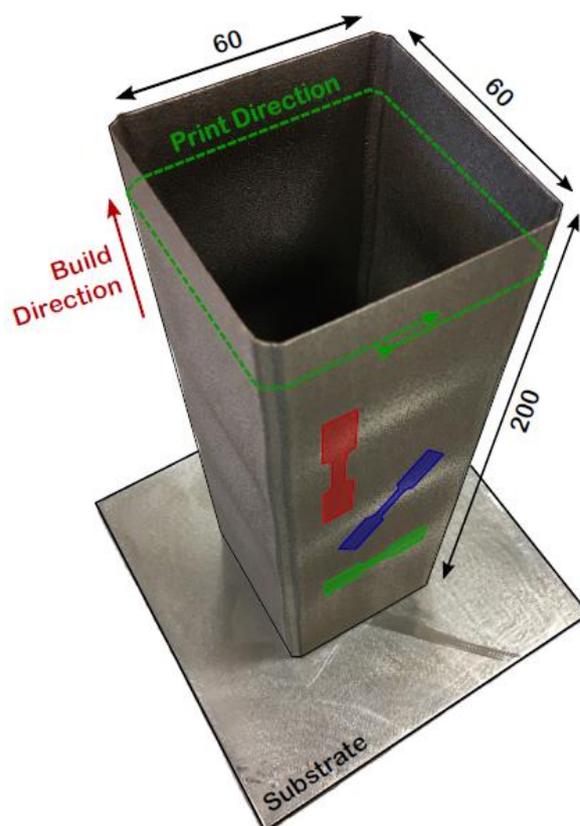


Рисунок 1.3 – Образец для механических испытаний из 316L

Большая часть исследований, направленных на изучения механических характеристик выращиваемых изделий проводится на различных технологических параметрах, это связано с одной стороны с технологическими возможностями используемых установок, с другой стороны, как правило большинство исследований не привязано к выращиванию изделий. В основном, производится изготовление образцов для металлографических исследований и для механических испытаний с целью изучения получаемых свойств. Процесс переноса технологических параметров от маленького образца, к крупногабаритному изделию, является очень важным этапом в подготовке к выращиванию изделий. Поскольку

образцы имеют небольшие габариты, их термическая история будет сильно отличаться от термической истории на крупногабаритных изделиях, у которых время между отдельными валиками может исчисляться минутами.

1.2 Измерение термических циклов во время процесса выращивания

В процессе изготовления изделий, важным значением является средняя температура в области непосредственного выращивания. Данный параметр влияет не только на формирование микроструктуры, но и на возможность образования внутренних макродефектов, таких как несплавления между валиками. В настоящее время проводятся множество исследований термических циклов в процессе выращивания. Производятся сравнение между измеренными термическими циклами на образцах и разработанных тепловых моделях. Так, в [14] была разработана тепловая модель, численные результаты которой, соотнесены с экспериментальными данными, с выращенным образцом, у которого были измерены термические циклы (рисунок 1.4):

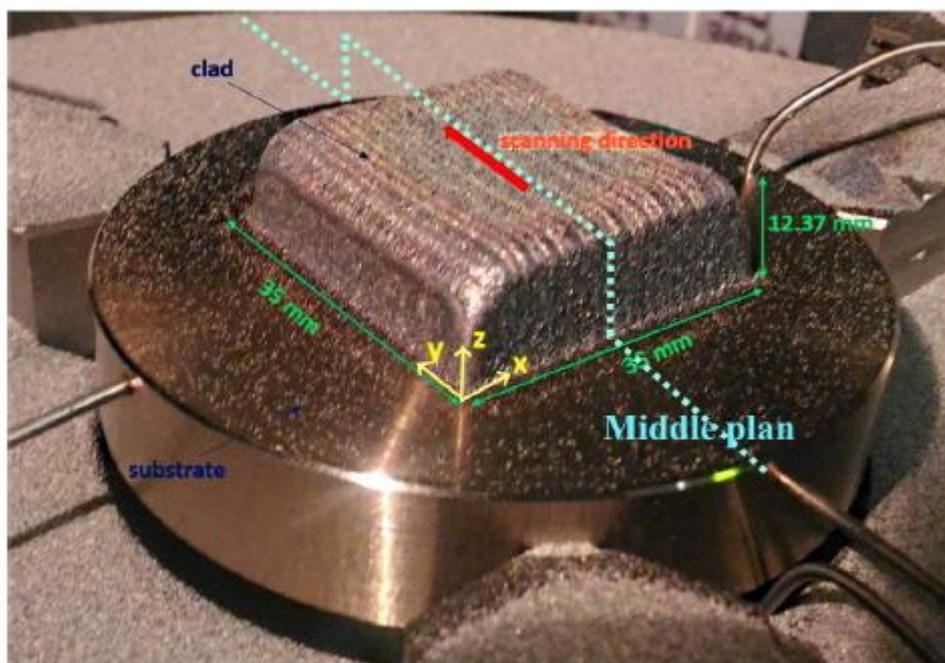


Рисунок 1.4 – Образец из нержавеющей стали 316L

Авторы утверждают, что несмотря на то, что тепловая модель имеет ограничения и недостаточную верификацию с экспериментальными данными,

планируется на ее основе подбирать технологические параметры и прогнозировать образующуюся структуру в выращиваемых образцах.

Для обеспечения однородности механических свойств и качества деталей, изготовленных методом прямого лазерного выращивания, в [15] проводились исследования по контролю теплового состояния за счет процесса принудительного охлаждения, рисунок 1.5:

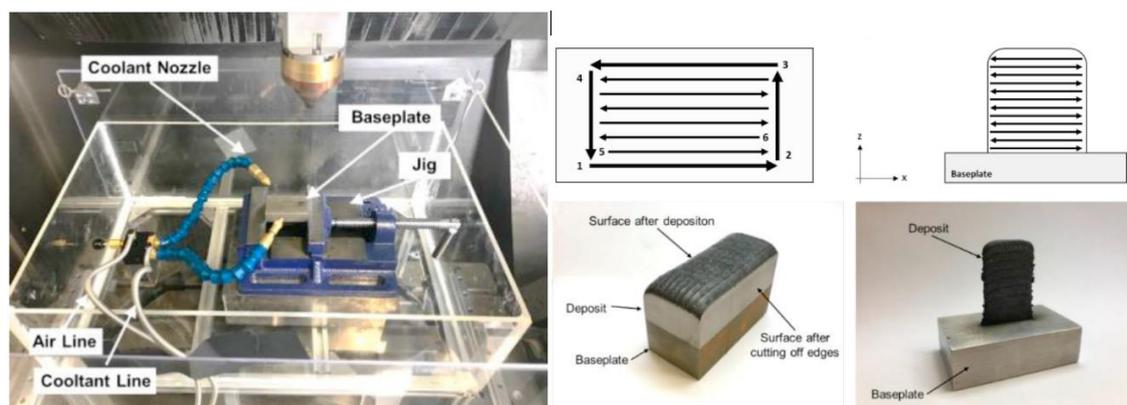


Рисунок 1.5 – Изготовление образцов с принудительным охлаждением

В данном исследовании, проводились измерения термических циклов, выращиваемых образцов с помощью термопар (образцы выращивались в условиях принудительного охлаждения, с разными периодами времени охлаждения, от 4 до 10 слоев). Параллельно были проведены расчеты термических циклов аналитическими методами с использованием уравнения теплопроводности. основываясь на результаты расчета, авторы помимо принудительного охлаждения, перед выращиванием образцов произвели нагрев подложки лазерным излучением до 600°C для достижения однородности выращиваемого образца. В результате данного исследования, было выявлено, что для получения однородности структуры, необходимо использовать комбинацию принудительных подогревов и охлаждений, и, применять ее к каждому слою.

Часть исследований термических циклов направлена на влияние технологической паузы на процесс выращивания и получаемых результатов. Так, в [16] исследовалось влияние технологической паузы между проходами на напряжения, которые возникают в процессе выращивания.

Рассматривались два часто используемых данной технологией сплава, это жаропрочный сплав на основе никеля Inconel 625, и титановый сплав Вt6. На рисунке 1.6 представлена схема экспериментов:

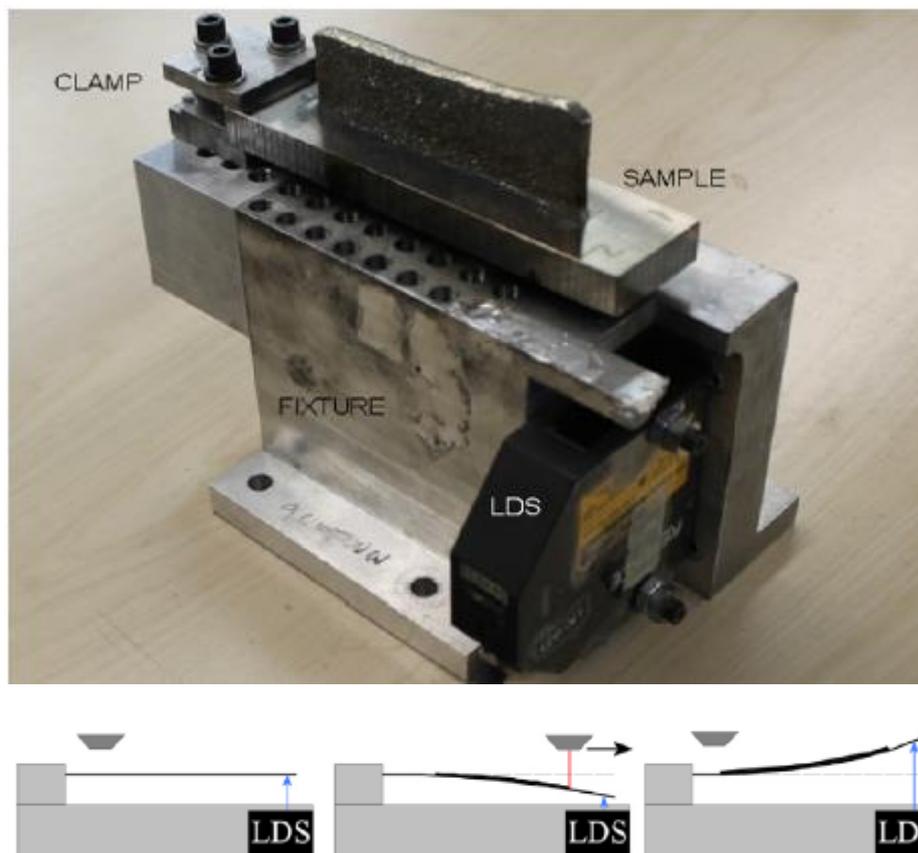


Рисунок 1.6 – Измерение изменения расстояния незакрепленного края подложки во время процесса выращивания

В результате, оказалось, что при выращивании из титанового сплава Вt6 увеличение времени выдержки между слоями приводит к увеличению деформации на 54 % по сравнению с образцом, у которого время выдержки отсутствовало. В жаропрочном сплаве на основе никеля, наоборот, увеличение времени выдержки приводит к снижению деформации на 4,4 %.

Одним из основных направлений исследований термических циклов в процессе прямого лазерного выращивания, является прогнозирование получаемой структуры и фазового состава выращиваемых объектов. Особенно это касается титановых сплавов, в частности, Вt-6, поскольку данный сплав обладает исключительным спросом в авиа-ракетостроении, как материал, обладающей достаточно высокой прочностью и легкостью одновременно.

Эксплуатационные характеристики данного материала, а именно, механические свойства сильно зависят от фазового состава, получаемого в процессе изготовления. Так, например, в работах [17,18,19] представлены результаты исследования термических циклов и получаемых во время выращивания фаз и механических свойств. При высоких скоростях охлаждения и относительно низкой общей температуры выращиваемых заготовок, получается мартенситная структура, с преобладанием α -фазы, которая в свою очередь обладает низкими показателями относительного удлинения (4-6%). Если средняя температура образца во время выращивания составляет близкую к 500°C , то при таких температурах мартенсит разваливается и получается равновесная ($\alpha+\beta$) структура, которая, в свою очередь, обладает высокими эксплуатационными характеристиками (относительное удлинение $\approx 10\%$).

Одним из важнейших практических направлений, которые на данный момент мало изучены, является перенос технологических параметров прямого лазерного выращивания с маленьких образцов на крупногабаритное изделие. Существует несколько причин, по которым не проводятся исследования в данном направлении:

- Отсутствие задач по выращиванию изделий;
- Отсутствие технологической возможности выращивания крупногабаритных изделий;
- Первичные цели исследований сводятся к теоретическим.

В данной работе рассматривается вопрос переноса технологических параметров прямого лазерного выращивания с маленьких образцов на крупногабаритные изделия.

2. Исследование влияния технологической паузы на термическую историю тонкостенного изделия из жаропрочного сплава Inconel 625

Некоторые крупногабаритные изделия имеют время непрерывного роста >100 ч., следовательно, очень важным этапом является подготовка. Необходимо чтобы процесс был стабильным, а результат соответствовал всем эксплуатационным характеристикам. Основой процесса является технологический режим и очень важно правильно определить параметры перед изготовлением реального изделия. Как правило, режим отрабатывается на модельных образцах, которые имеют меньшие габариты и другую термическую историю. В данной работе будут проводиться исследования по сравнению термических циклов изделия и модельных образцов, или, технологических проб.

Все образцы были изготовлены на установке прямого лазерного выращивания. В состав установки входят: шестиосевой робот манипулятор, двухосевой наклонно-поворотный позиционер, лазер с максимальной мощностью 3 кВт. В качестве рабочего инструмента выступает лазерная сварочная головка и четырехструйное сопло для подачи порошка. На рисунке 2.1 представлена фотография установки:



Рисунок 2.1 – Установка прямого лазерного выращивания

Для данного исследования был использован коммерчески доступный порошок из жаропрочного сплава на основе никеля Inconel 625, полученный методом газовой атомизацией. Порошок имел состав 64.61% Ni, 21.25% Cr, 8.45% Mo, 4.65% Nb и 1.06% Fe (в масс. %). Фракционный состав используемого порошка 45-135 мкм. На рисунке 2.2 представлена фотография порошка, полученная на электронном сканирующем микроскопе:

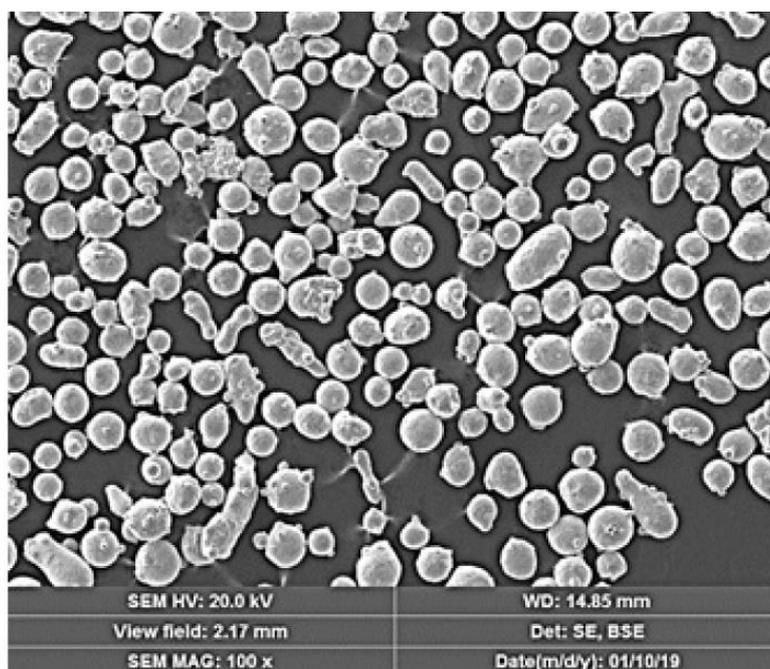


Рисунок 2.2 – Порошок Inconel 625

В результате, был спланирован следующий эксперимент. Сперва изготавливаются технологические пробы с разными паузами между слоями (56, 46, 36, 26 с). Во время выращивания на образцах измеряются термические циклы, путем установления термопары. На рисунке 2.3 представлены габаритные размеры технологической пробы:

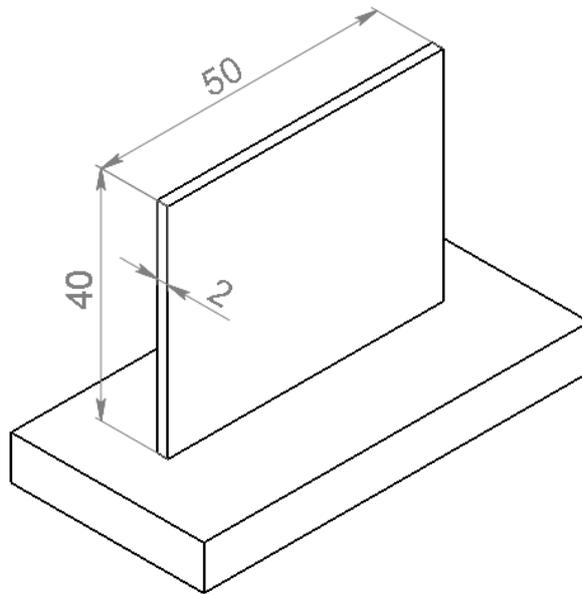


Рисунок 2.3 – Размеры технологической пробы

На рисунке 2.4 представлена фотография процесса выращивания:

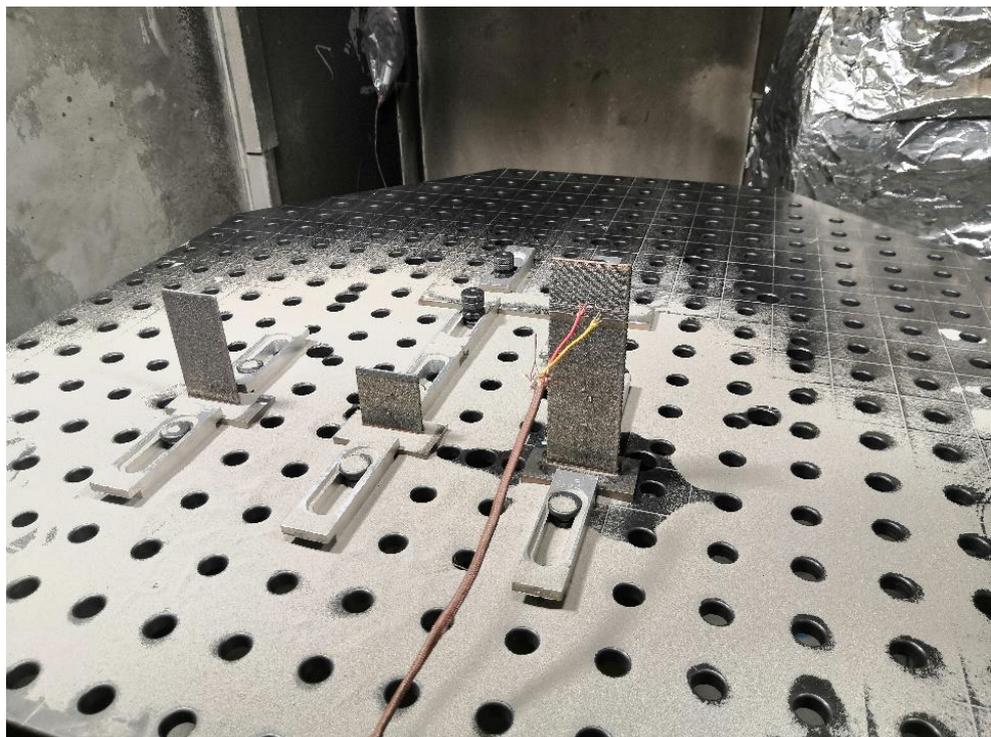


Рисунок 2.4 – Выращенные тонкостенные образцы

Технологический режим выращенных образцов представлен в таблице

2.1:

Таблица 2.1 – Технологический режим тонкостенных образцов

| № п/п | Ширина валика, мм | Мощность, Вт | Скорость процесса, мм/с | Δz , мм | Пауза между слоями, с | Итоговая ширина стенки, мм |
|-------|-------------------|--------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 1300 | 25 | 0,6 | 56 | 1,81 |
| 2 | | | | | 46 | 1,93 |
| 3 | | | | | 36 | 2 |
| 4 | | | | | 26 | 2,08 |

В результате, необходимую ширину стенки в 2 мм имел образец №3 с паузой между слоями 36 с. Изделие, которое далее было выращено в рамках данного эксперимента имеет естественное ожидание между слоями равное 56 с.

Далее изготавливается изделие, которое имитирует тонкостенное, но при этом крупногабаритное, с размерами 502x502x202 мм, рисунок 2.5:

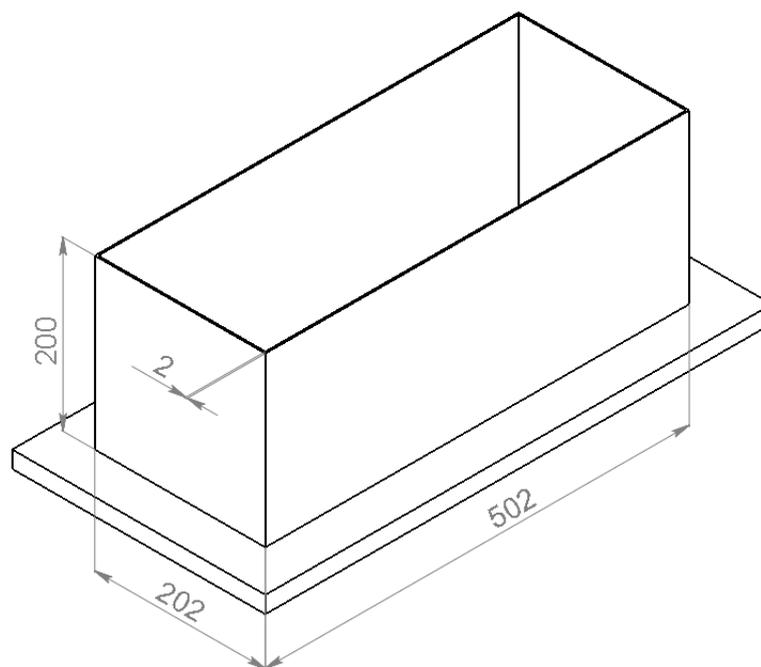


Рисунок 2.5 – Крупногабаритное тонкостенное изделие

Во время процесса выращивания под валик подкладывалась термопара, которая считывала данные температуры. В данном случае термопара

устанавливалась в центральную часть длинной стороны изделия. На рисунке 2.6 представлена фотография процесса выращивания изделия:

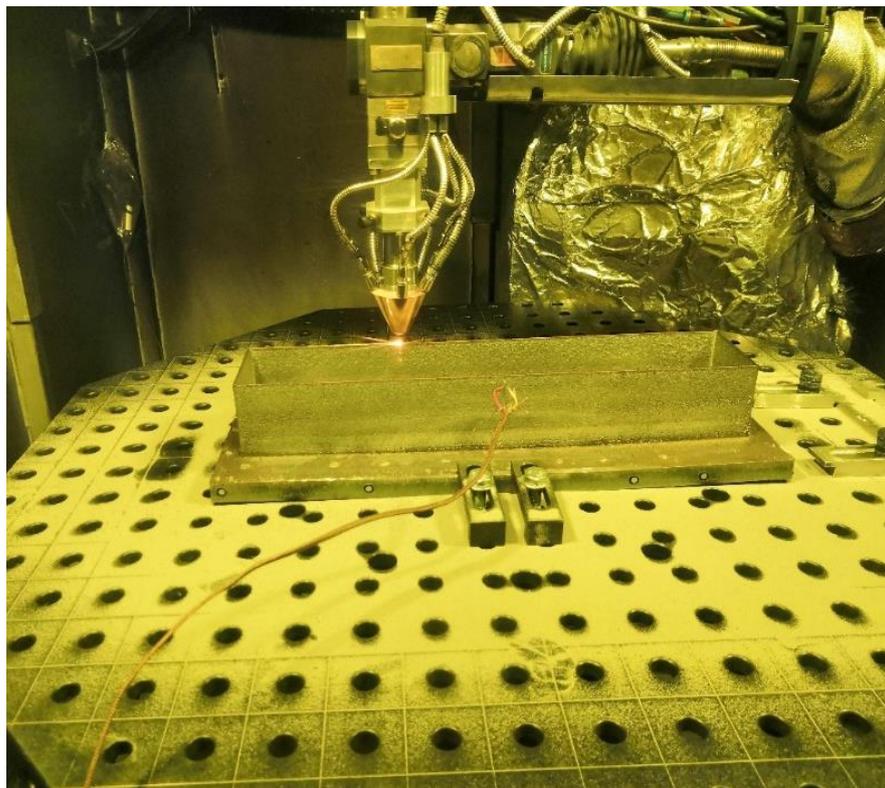


Рисунок 2.6 – Выращивание тонкостенного крупногабаритного изделия

Изделие изготавливалось на параметрах, представленных в таблице 2.1. Стратегией выращивания была выбрана прямоугольная спираль, чтобы не тратить время на переходы между точками старт-стоп при послойном выращивании.

Для измерения температуры использовалась термопара хромель-алюмель типа К с диаметром проволоки 1,2 мм. Температурный диапазон термопары от -200 до 1400 °С.

Полученные с термопар данные были обработаны и разделены на кривые охлаждения валика и на среднюю температуру образца в области выращивания во время процесса. На рисунке 2.7 представлены кривые охлаждения технологических проб и изделия:

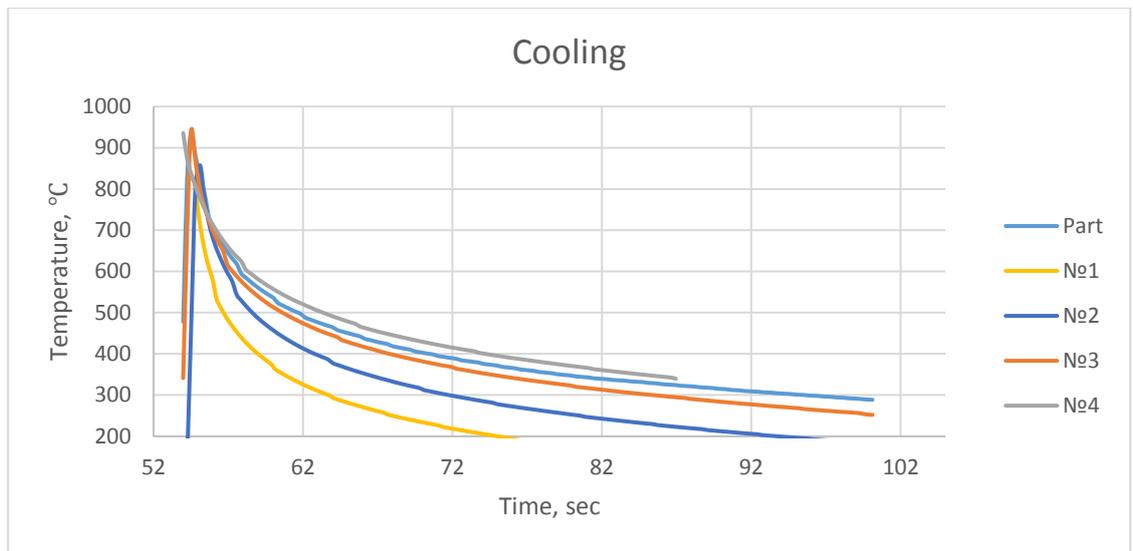


Рисунок 2.7 – Кривые охлаждения тонкостенных образцов и изделия

На рисунке 2.8 представлен график температур, до которых остывают выращиваемые образцы и изделие:

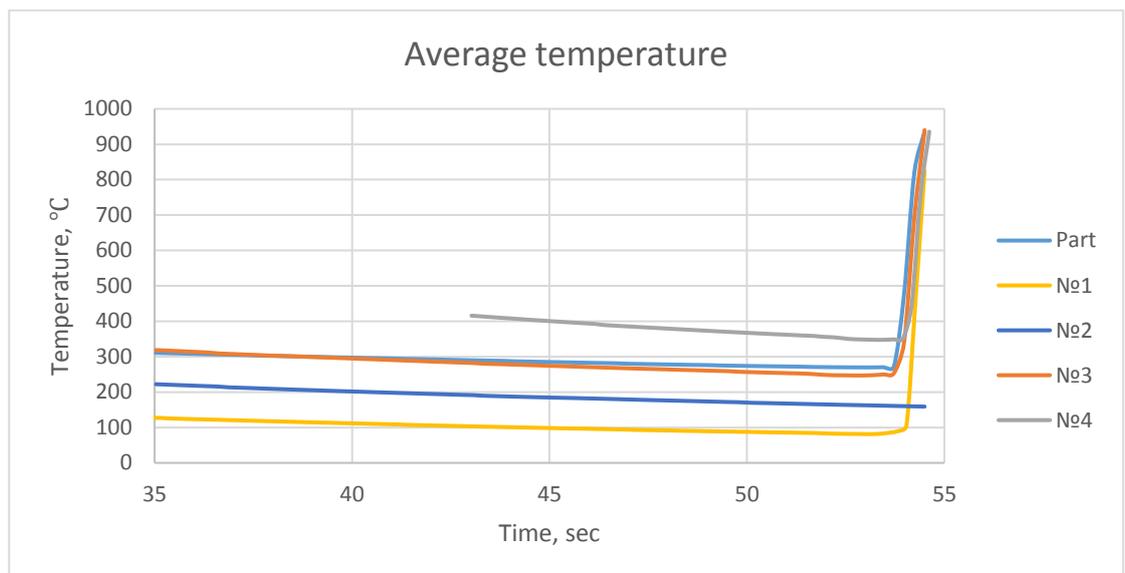


Рисунок 2.8 – График средней температуры тонкостенных образцов и изделия

Исходя из данных, полученных с помощью термопары, можно сделать вывод, что образец № 1, который имеет такое же ожидание между слоями, как и изделие, из-за малых габаритов остывает интенсивнее и имеет ширину стенки на 0,2 мм меньше, чем необходимо. Модельный образец № 4, с ожиданием между слоями 26 секунд имел большую ширину стенки и среднюю температуру.

В результате, только у модельного образца № 3 ширина стенки и термический цикл максимально приближены к изделию. Ширина стенки определяется шириной ванны расплава, которая является одним из основных параметров процесса. Помимо получения необходимой геометрии от ширины стенки зависит устойчивость процесса. При чрезмерном увеличении ванны расплава заданного значения расхода порошка может не хватить, в результате чего, расстояние между рабочим соплом и изготавливаемым изделием может увеличиться и процесс выйдет из зоны устойчивости. Ширина ванны в свою очередь определяется температурой предыдущего слоя, средней температурой изделия, термической историей.

При отработке режима необходимо понимать, что от термической истории зависит правильность выбора технологических параметров и возможность их переноса на реальное изделие. В данном эксперименте показано, что термическая история модельного образца №1 и реального изделия отличаются между собой несмотря на то, что пауза между слоями у них одинаковая. Данный эксперимент был первым шагом к пониманию и отработке технической стороны процесса измерения термических циклов, а также основой для определения величины паузы между соседними валиками в толстостенных образцах при изготовлении технологической пробы.

3. Определение минимального уровня мощности, при котором образуются несплавления в технологических пробах в зависимости от мощности лазерного излучения

Технология прямого лазерного выращивания является термическим процессом с образованием жидкой ванны расплава металлических материалов, следовательно, в данном процессе могут образовываться дефекты, основными из которых являются:

- поры;
- несплавления;

Метод прямого лазерного выращивания применяется в разных отраслях промышленности: авиадвигателестроении, кораблестроении, энергетической промышленности и др. Следовательно, изготавливаемые изделия должны соответствовать высоким эксплуатационным требованиям.

Для увеличения эксплуатационных свойств изделий, полученных методом прямого лазерного выращивания, необходимо стремиться к минимальной пористости и к отсутствию несплавлений и трещин. Причины возникновения дефектов могут быть внешние и технологические. К внешним относится низкое качество порошка (наличие неметаллических включений, химический состав несоответствующий сертифицированному) [20,21,22]. Под технологическими понимается режим, на котором производится процесс, термическая история наплавленных валиков и наличие защитной атмосферы (при необходимости).

Поры – внутренние дефекты в наплавленном металле в виде полости округлой формы, заполненной газом. Из-за высоких скоростей охлаждения газ, попавший в зону ванны расплава, не успевает выйти, в результате, после кристаллизации внутри металла остается сферическая полость. В образцах, полученных методом прямого лазерного выращивания, выделяются поры двух типов: газовые и поры в виде несплавлений [5].

Газовые поры представляют собой сферические полости, как правило диаметром 1-100 мкм хаотично распределенные в выращиваемом образце или

изделии. На рисунке 3.1 представлены фотографии шлифов с газовой пористостью:

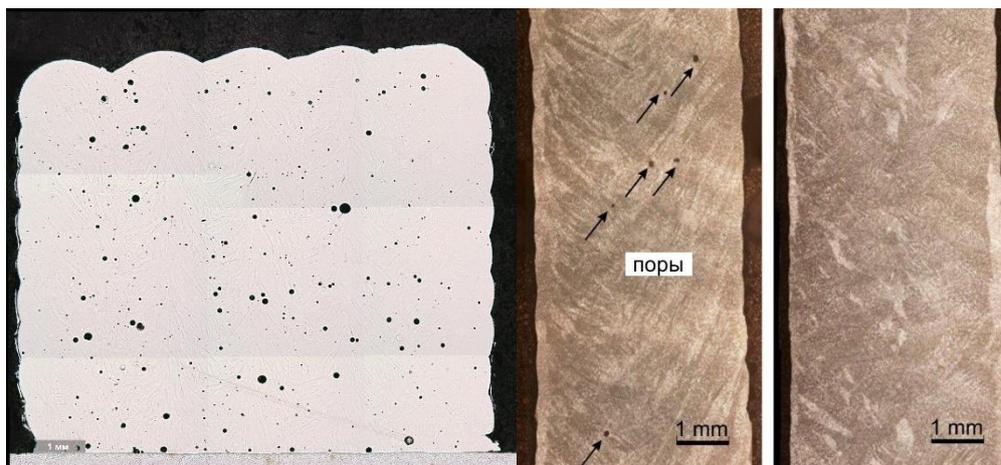


Рисунок 3.1 – Газовая пористость на шлифах

В отличие от пор, несплавления в металле имеют неправильную форму и размеры ≥ 300 мкм. В данной работе особое внимание будет уделено несплавлениям между валиками.

Основной причиной несплавлений в толстостенных образцах с боковыми смещениями валиков является недостаточная энергия лазерного излучения с одновременной подачей в ванну расплава чрезмерного количества порошкового материала [24, 25,26]. В таком случае, основная часть энергии лазерного излучения тратится на переплавление подаваемого порошка, а не на сплавление с соседними слоями, в результате чего образуются дефекты в виде несплавлений между слоями. На рисунке 3.1 представлены шлифы образцов, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V.

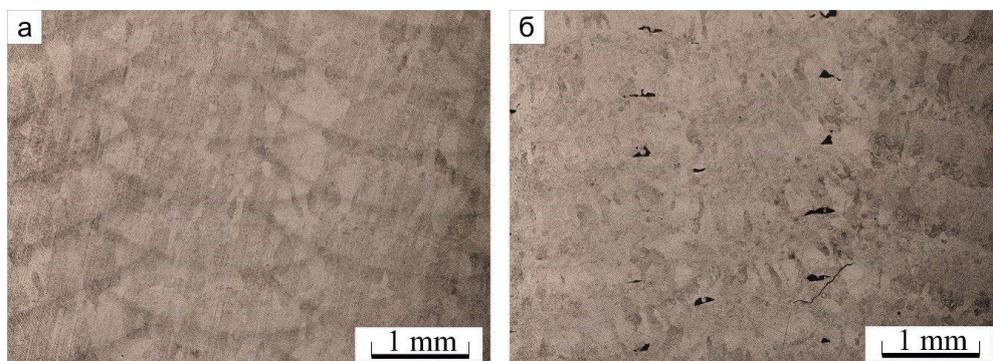


Рисунок 3.1 – Шлифы образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V где, а) образец без несплавлений; б) образец с несплавлениями между валиками

3.1 Эксперименты с нержавеющей сталью 316L

Предварительная подготовка к выращиванию крупногабаритного изделия включает в себя изготовление технологической пробы. Данная операция позволяет провести входной контроль порошка на непосредственном выращивании, и, с другой стороны, предварительно проверить режим на наличие образующихся макродефектов, в виде несплавлений. В процессе данной работы, была разработана рекомендация «стандартной» технологической пробы, которую необходимо изготовить при прибытии нового порошкового материала, и из которого, далее, будет выращиваться изделие. На рисунке 3.2 представлены габаритные размеры технологической пробы:

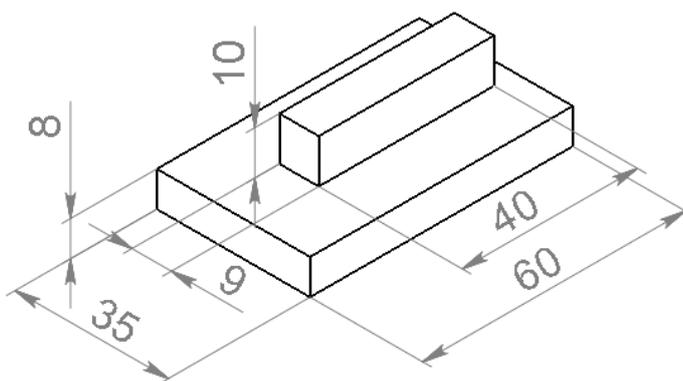


Рисунок 3.2 – Габаритные размеры технологической пробы

Рекомендуется изготавливать технологическую пробу шириной, не менее 4 валиков для выявления возможных несплавлений и высотой не менее 10 слоев, такого количества слоев с одной стороны достаточно для получения полноценного образца на устоявшемся режиме, с другой стороны не так много для ускорения процесса создания технологических проб. Также рекомендуется параллельное выращивание не менее 3-х технологических проб за одну загрузку. Это позволит варьировать мощность лазерного излучения при сохранении остальных параметров неизменными.

В процессе данной работы был разработан следующий план исследований: изготавливаются 4 партии (с разной паузой между соседними валиками, от 5 мин до 0 с) по 8 образцов, которые отличаются между собой

мощностью лазерного излучения. Во время процесса выращивания, в предполагаемый используемый (на изделии) режим устанавливается термopара для измерения и последующего анализа термических циклов и их сравнение с реальным изделием. Таким образом можно выявить минимальную мощность при котором образуются несплавления при разных паузах. Также данный эксперимент позволит определить оптимальное значение паузы, при котором, технологическая проба будет иметь температуру, близкую к температуре изделия в области выращивания. В первую очередь было принято решение исследовать несплавления на нержавеющей стали 316L, как на материале, часто используемом в процессах прямого лазерного выращивания для изготовления изделий.

В таблице 3.1 представлен химический состав стали 316L:

Таблице 3.1 – Химический состав 316L

| Марка материала | O | H | N | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | S | P | Fe | Ti |
|-----------------------------------|----------|----------|-------|-------|------|------|-----------|-----------|----------|-------|--------|-----------|------|
| | Не более | | | | | | | | Не более | | | | |
| 316L ASTM A240 | <0,02 | <0,00021 | <0,02 | ≤0,03 | ≤1,0 | ≤2,0 | 16,0-18,0 | 10,0-14,0 | 2,0-3,0 | ≤0,03 | ≤0,045 | остальное | <0,5 |
| Химия от производителя | | | | 0,021 | 0,32 | 1,32 | 16,52 | 10,05 | 2,08 | 0,022 | 0,041 | | - |

В таблице 3.2 представлены технологические параметры, использованные при выращивании образцов из 316L:

Таблица 3.2 – Технологические параметры 316L

| №1 | Пауза между валиками 5 мин , скорость 25 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
|----|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Номер образца | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
| | Мощность, Вт | 2600 | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 |
| №2 | Пауза между валиками 2,5 мин , скорость 25 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 |

| | | | | | | | | | |
|----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Мощность, Вт | 2600 | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 |
| №3 | Пауза между валиками 40 с , скорость 25 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
| | Мощность, Вт | 2600 | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 |
| №4 | Пауза между валиками 0 с , скорость 25 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 |
| | Мощность, Вт | 2600 | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 |

На рисунке 3.3 представлены фотографии процессов выращивания образцов:

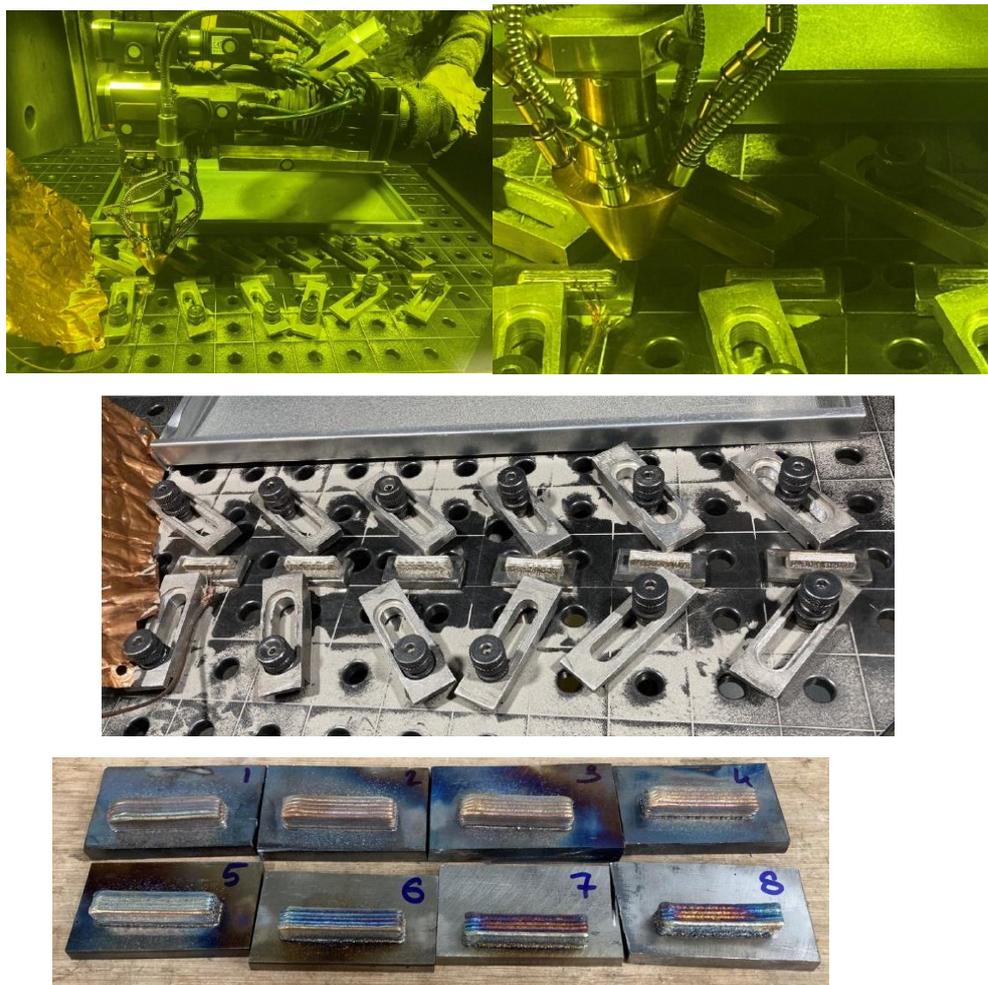


Рисунок 3.3 – Выращенные образцы

После изготовления, образцы были подвергнуты металлографическим исследованиям на наличие внутренних макродефектов. Объектами исследований служили макрошлифы, которые были вырезаны с использованием автоматического высокоскоростного прецизионного отрезного станка Micracut 202 AX Metcon. Шлифы изготавливали на участке пробоподготовки с использованием системы ATM Saphir 250 Laborol-5. Макродефекты исследовались на оптическом микроскопе Leica DMi8A с программным обеспечением Axalit. На рисунке 3.4 представлены фотографии шлифов образцов из первой партии:

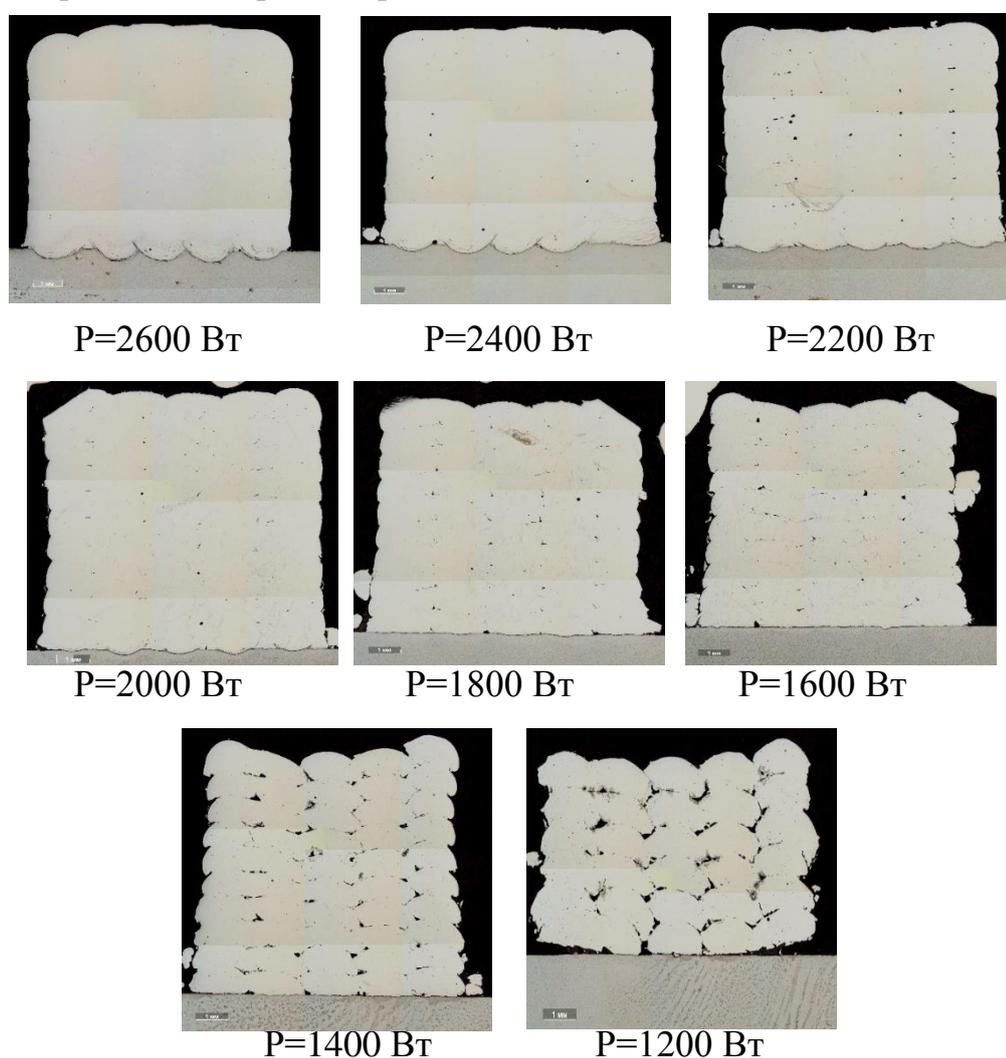


Рисунок 3.4 – Макрошлифы образцов из партии №1 (пауза между валиками 5 мин)

Как видно из рисунка 3.4, ряд несплавлений между первым внешним и вторым внутренним начинается уже при мощности 2400 Вт.

На рисунке 3.5 представлены фотографии шлифов образцов из второй партии:

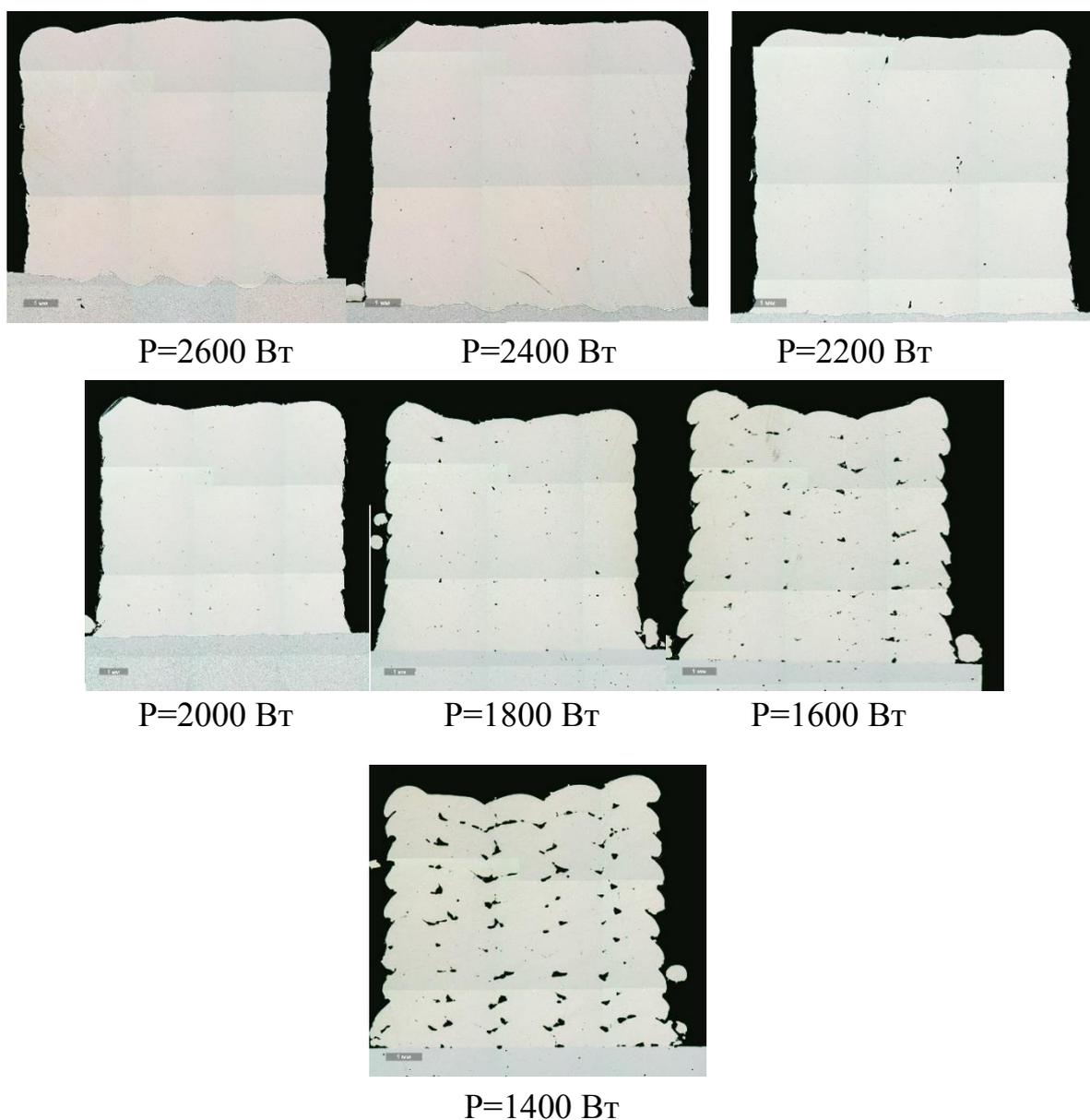


Рисунок 3.5 – Макрошлифы образцов из партии №2 (пауза между валиками 2.5 мин)

Вторая партия очень на первую, и первые ряды несплавлений прослеживаются на мощностях 2400 и 2200 Вт.

На рисунке 3.6 представлены фотографии шлифов образцов из третьей партии:

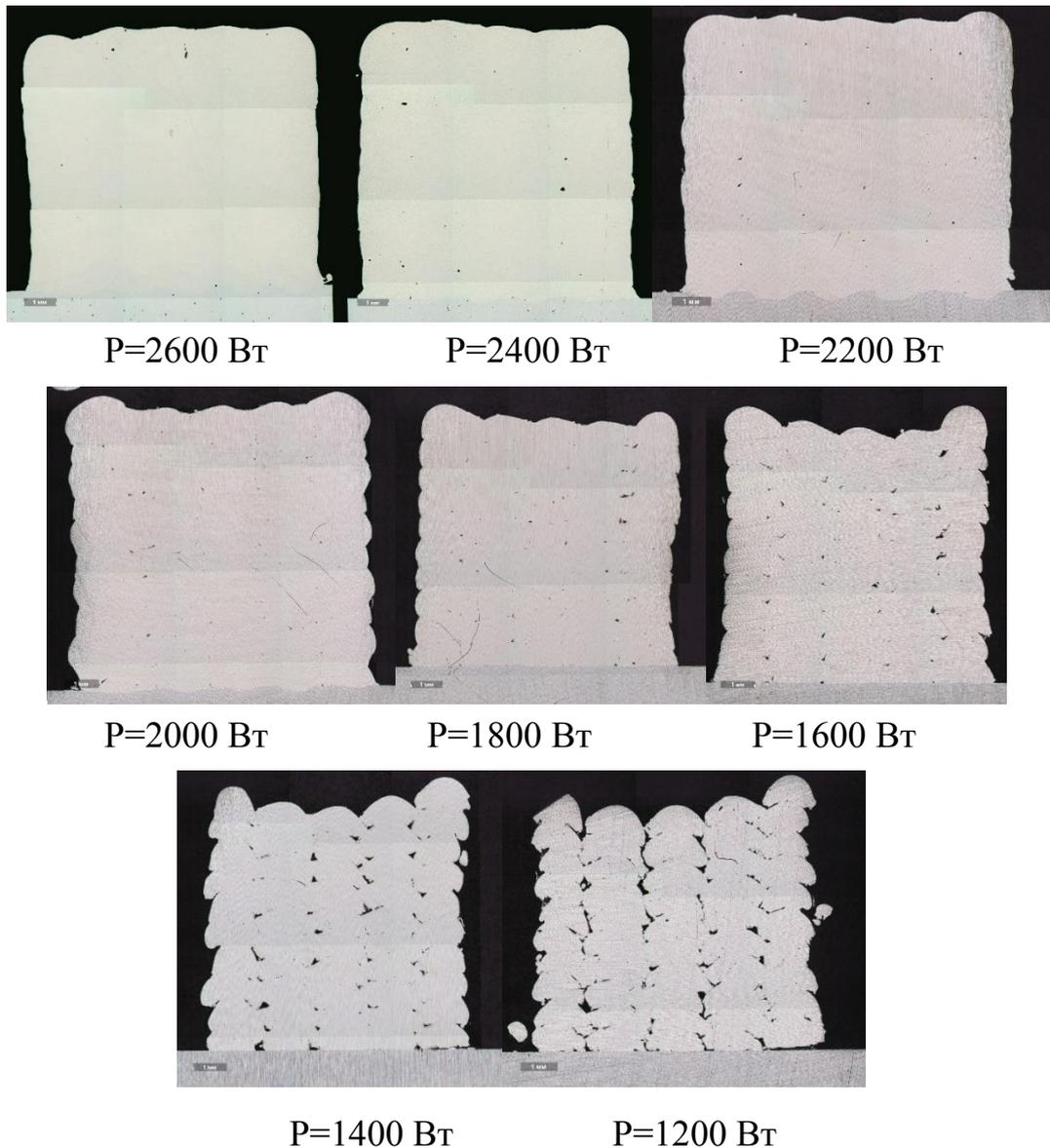


Рисунок 3.6 – Макрошлифы образцов из партии №2 (пауза между валиками 40 с)

Вторая партия близка по второй, и первые ряды несплавлений прослеживаются на мощностях 2200 Вт. По сравнению с первой партией, в третьей несплавления образуются при мощности, на 200 Вт меньшей.

На рисунке 3.7 представлены фотографии шлифов образцов из четвертой партии:

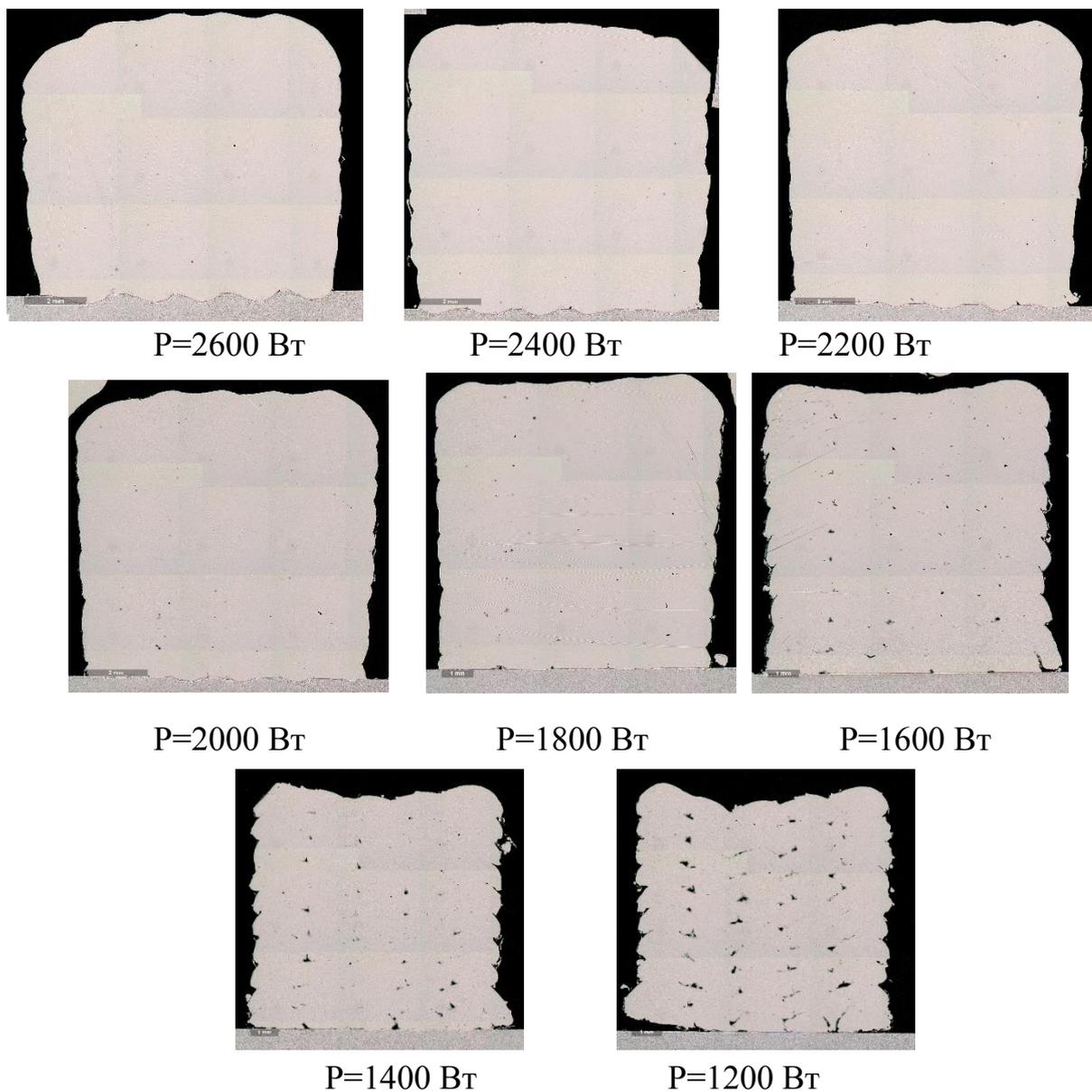


Рисунок 3.7 – Макрошлифы образцов из партии №2 (пауза между валиками 0 с)

В результате анализа полученных данных видно, что уровень мощности при котором образуются несплавления уменьшается по мере уменьшения паузы между соседними валиками, а именно:

- При паузе 5 мин, ряды несплавлений образуются при мощности 2400 Вт;
- При паузе 2.5 мин, ряды несплавлений образуются при мощности 2400-2200 Вт;
- При паузе 40 с, ряды несплавлений образуются при мощности 2200 Вт;

- При паузе 0 с, ряды несплавлений образуются при мощности 1800 Вт;

Исходя из полученных данных, для изготовления крупногабаритного изделия из нержавеющей стали 316L был выбран режим, представленный в таблице 3.3:

Таблица 3.3 – Режим выращивания крупногабаритного изделия

| Ширина валика, мм | Мощность, Вт | Скорость процесса, мм/с | Δx , мм | Δz , мм |
|-------------------|--------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| 2,5 | 2600 | 25 | 1,67 | 0,8 |

На рисунке 3.8 представлен процесс прямого лазерного выращивания крупногабаритного изделия из нержавеющей стали 316L:

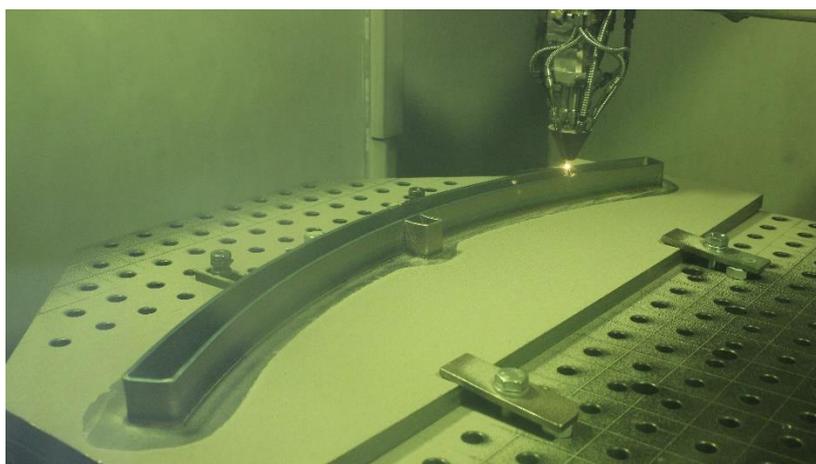


Рисунок 3.8 – Выращивание крупногабаритного изделия

Для того, чтобы сравнить термические циклы выращенных образцов и сравнить их с термическим циклом реального изделия, во время его выращивания была установлена термопара. В результате данной работы были сняты термические циклы с технологических проб из четырех партий и с реального крупногабаритного изделия. Полученные термические циклы были обработаны и сравнены между собой в программной среде Matlab. На рисунке 3.9 представлены результаты сравнения термических циклов:

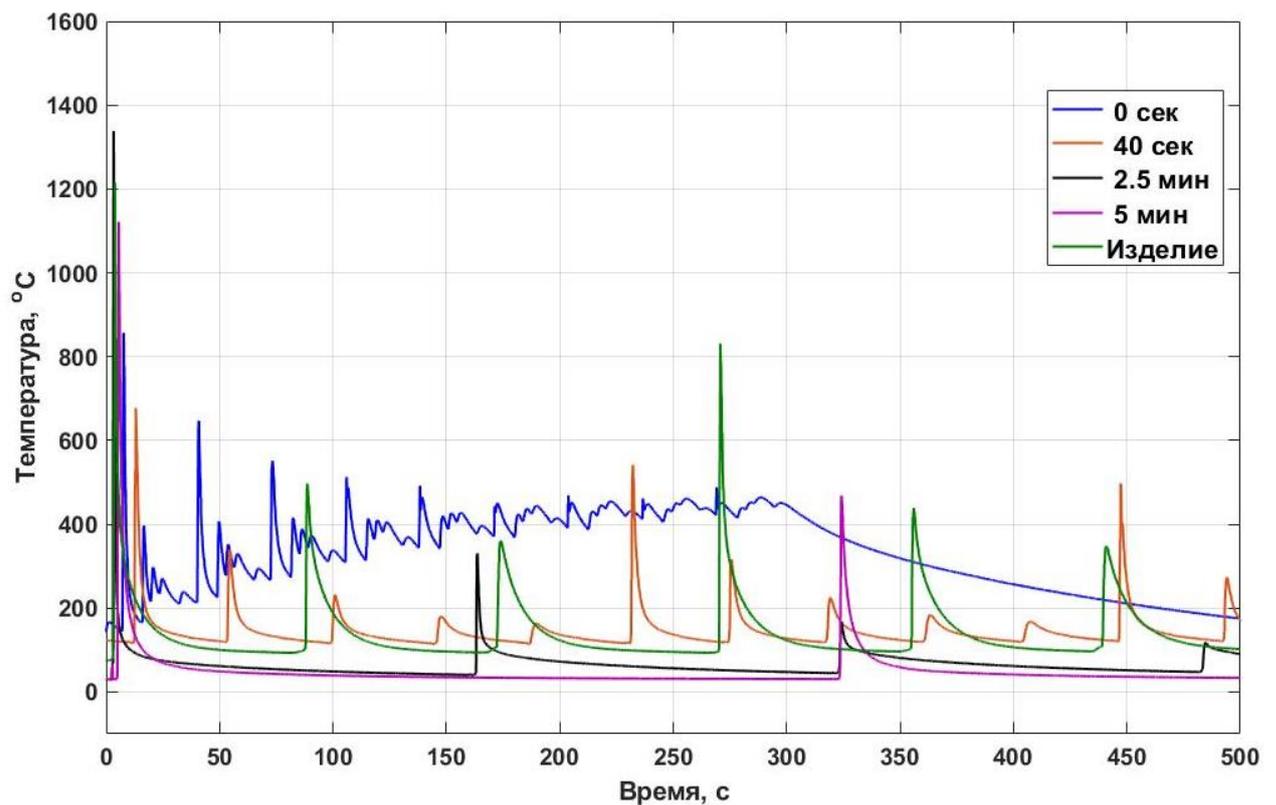


Рисунок 3.9 – Сравнение термических циклов технологических проб и крупногабаритного изделия

В результате выполнения данной работы было выявлено, что при подготовке к изготовлению крупногабаритных изделий, выращивание технологических проб без пауз между проходами может привести к возникновению дефектов в самой детали, а именно, к несплавлениям. Из-за высокой средней температуры в области выращивания, у образцов с нулевой паузой увеличивается глубина проплавления, в результате чего несплавления образуются при гораздо меньшей мощности, которой, в свою очередь, будет недостаточно для реального изделия. Большие паузы между проходами (5 мин, 2.5 мин) в данном случае не имитируют крупногабаритное изделие, поскольку время воздействия излучения достаточно мало и габариты образца слишком маленькие, что приводит к интенсивному остыванию до температуры примерно 40-45° С. В результате было выявлено, что температура, до которой остывает металл в области выращивания у технологических проб со временем ожидания между валиками 40 с, максимально приближена к кривой, снятой с изделия и равняется примерно 170° С. Пауза между соседними валиками 40 с

является оптимальной для данного материала и данных габаритов технологической пробы, поскольку с одной стороны имеет небольшое значение, что позволяет оперативно изготавливать образцы, с другой стороны средняя температура в области выращивания практически равна температуре крупногабаритного изделия в устоявшемся режиме выращивания (несмотря на то, что на изделии, пауза между проходами составляла 1.5 мин).

Параллельно, в процессе работы был изготовлен образец для механических испытаний, результаты которых представлены в таблице 3.5:

Таблица 3.5 – Результаты механических испытаний 316L

| Образец | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|--------------------|----------------------|------------------|--------------|
| 1 | 447,9 | 609,2 | 45,9 |
| 2 | 430,8 | 629,1 | 46,0 |
| 3 | 418,1 | 617,4 | 47,4 |
| среднее | 432,3 | 618,6 | 46,4 |
| Стандартное (316L) | 205-310 | 515-580 | 40-55 |

На рисунке 3.10 представлены кривые растяжения образцов из 316L

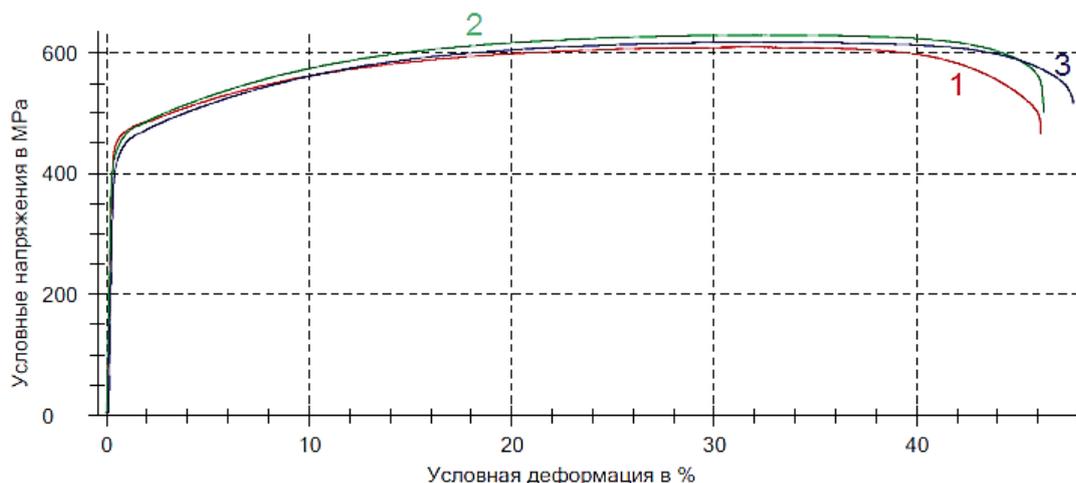


Рисунок 3.10 – Кривые растяжения образцов из 316L

Результаты механических свойств, выращенных образцов, показали высокие значения пердела прочности, текучести и относительного удлинения.

В процессе работы, параллельно с проведением экспериментов и получение шлифов производился расчет формы наплавленных валиков. Проанализировав современные методы и подходы к расчету формы

наплавленных валиков можно сказать, что значительная часть расчетов построена на использовании сеточных методов. Еще одна часть моделей основана на простых аналитических расчетах, в которых поперечная форма валика аппроксимируется разнообразными кривыми. Исключения составляют особые случаи, когда для расчета могут использоваться нейронные сети, регрессионный анализ и прочие. Однако, стоит отметить, что исследования, использующие одинаковую методику, могут применять различные схемы расчета.

Так как формирование массивного элемента или толстой стенки состоит из повторяющегося процесса наплавки одного слоя, а механизм формирования единичного слоя в свою очередь состоит из повторяющегося процесса наплавки одного валика, то следует начать построение модели с формирования единичного валика. На рисунке 3.11 представлена схема расчета формы поперечного сечения при наплавке единичного валика:

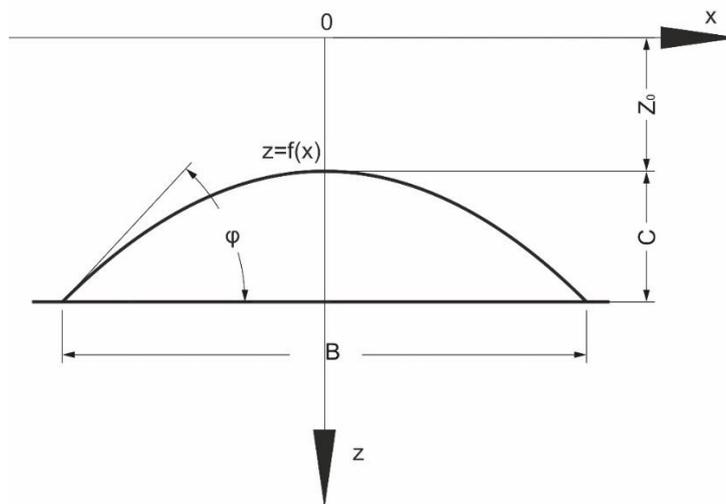


Рисунок 3.11 Схема расчета формы поперечного сечения при наплавке единичного валика

Форма наплавленного единичного валика определяется решением уравнения равновесия жидкой фазы в поле силы тяжести и имеет вид [27]:

$$z^2 = z_0^2 + 2(1 - \cos \varphi)$$

$$x = \int_0^{\varphi} \frac{\cos \varphi d\varphi}{\sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos \varphi)}} \quad (1)$$

где, z_0 - расстояние от вершины усиления до начала координат, а параметр φ - угол между осью z и нормалью к кривой (рисунок 3.11).

В случае наплавки единичного слоя будем считать, что процесс наплавки слоя ведется последовательно – валики накладываются один за другим. Общая схема наложения валиков в первом слое показана на рисунке 3.12:

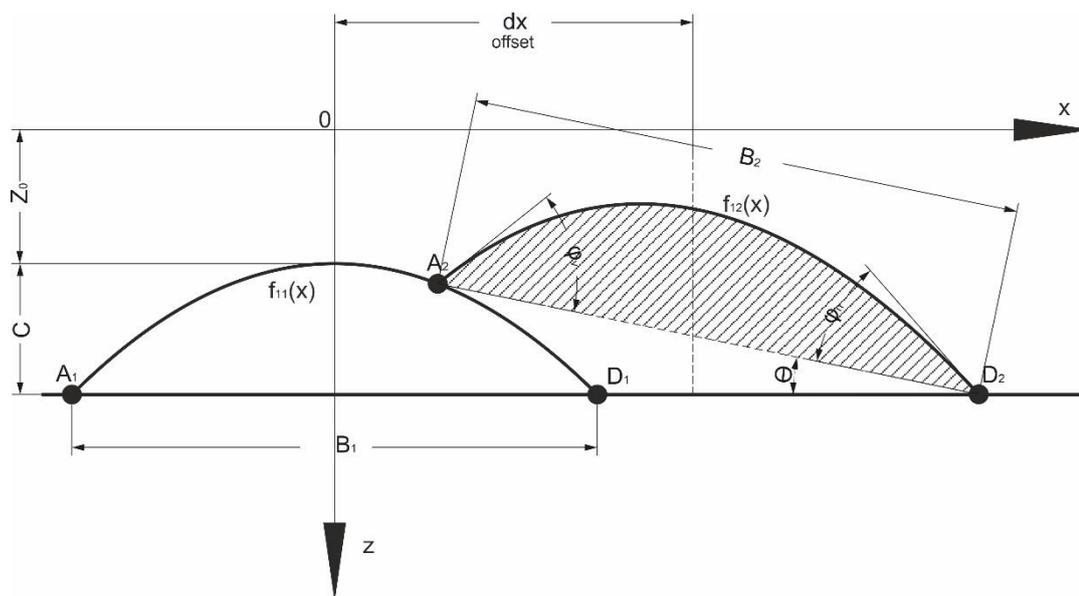


Рисунок 3.12 Схема расчета формы поперечного сечения при наплавке последующих валиков в первом слое

Для построения последующих валиков воспользуемся результатами работы [28]. Установим, что площадь криволинейного треугольника AD_1D_2 заполняется расплавленным металлом и не участвует в расчете, а форма наплавленного валика получается из решения задачи о наплавке на наклонную плоскость.

Согласно работе [28] форма наплавленного валика на наклонной плоскости может быть определена по формулам (1).

Рассмотрим формирование последующих слоев. Процесс формирования последующих слоев так же цикличен и может быть разбит на три повторяющиеся части – наплавка первого валика, промежуточных и последнего валиков. Начнем рассмотрение с первого валика (рисунок 3.13).

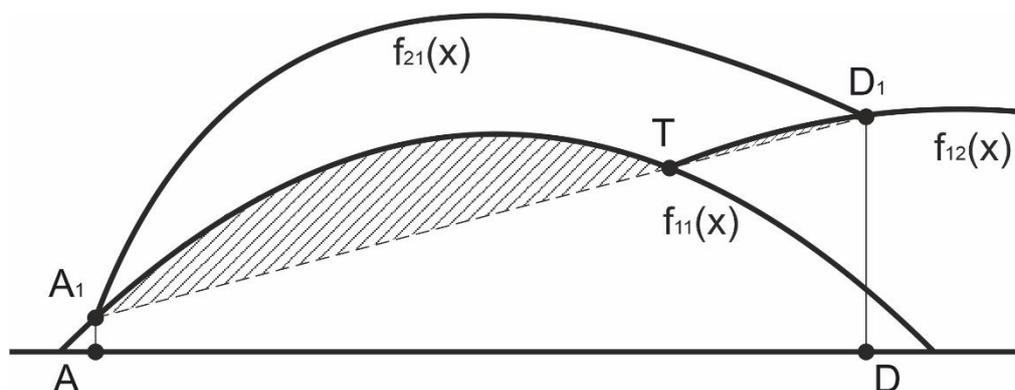


Рисунок 3.13 Схема наложения первых валиков в последующих слоях

При расчете формы первого валика при наплавке последующих слоев используется схема наплавки на наклонную поверхность, описанная выше. Однако, этот случай отличается от случая наплавки в первом слое тем, что в нем учитывается дополнительная площадь, отмеченная на рисунке 3.13 штриховкой. Для ее нахождения интегрируются функции f_{11} и f_{12} в пределах от A до T и от T до D, соответственно. Итоговое значение вычисляется как разность между суммой найденных площадей и площади трапеции AA₁D₁D.

Расчет профиля промежуточных валиков при наплавке второго и последующих слоёв происходят по схеме, представленной на рисунке 3.14.

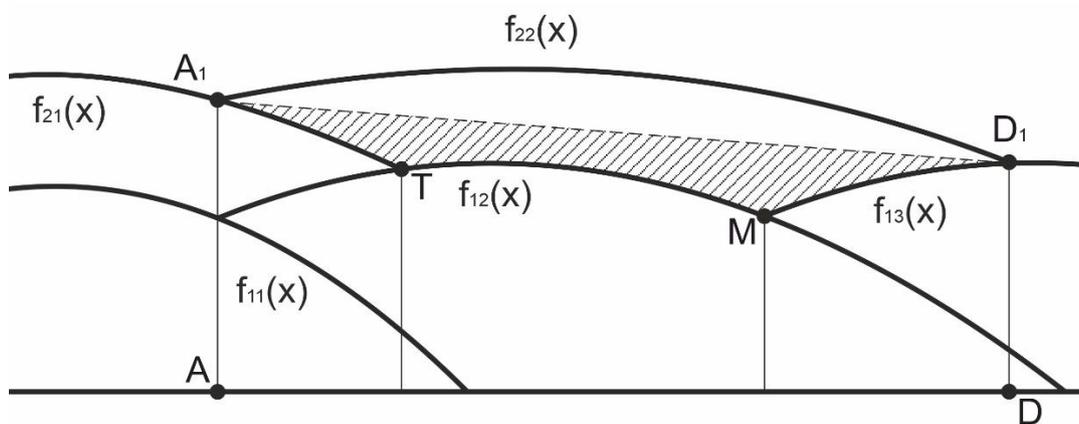


Рисунок 3.14 Схема наложения промежуточных валиков в последующих слоях

При наплавке промежуточных валиков во втором и последующих слоях, расчет снова производится с помощью алгоритма наплавки на наклонную поверхность. Также в процессе расчета корректируется значение площади поперечного сечения наплавленного валика – она уменьшается на величину заштрихованной области.

Общий вид схемы для расчета формы последнего валика при наплавке во втором и последующих слоях показан на рисунке 3.15.

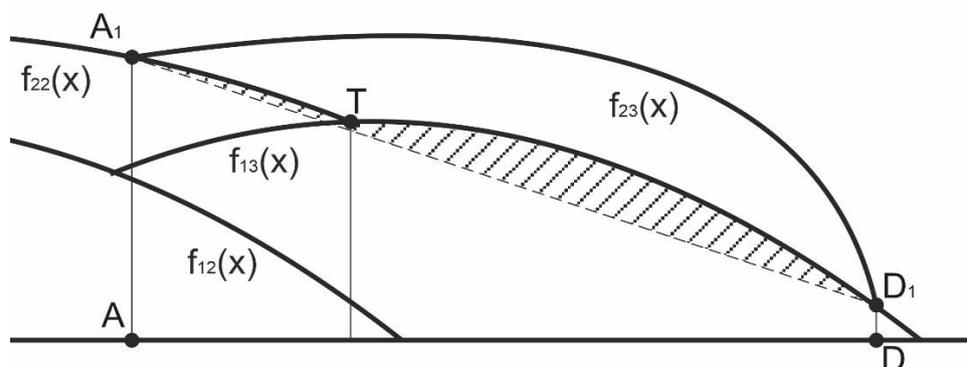


Рисунок 3.15. Схема наложения последних валиков в последующих слоях

При наплавке последнего слоя к уже рассчитанной площади поперечного сечения валика следует добавить заштрихованную площадь. Расчет следует производить методом для формы валика на наклонной поверхности.

Интенсивность излучения в поперечном сечении будет описываться формулой:

$$I(\vec{\rho}, z) = I_0 \frac{w_0^2}{w(z)^2} \exp\left[-\frac{2\vec{\rho}^2}{w(z)^2}\right] \quad (2)$$

где $w(z)$ – изменение радиуса пучка при удалении от горловины; $\vec{\rho}$ – радиус-вектор, лежащий в плоскости, перпендикулярной оси распространения излучения; z – координата на оси распространения излучения с началом координат в горловине пучка.

Также стоит учитывать, что энергия лазера разделяется на две части – нагрев подложки и нагрева порошка:

$$E = E_{pow} + E_{sub}$$

Часть энергии, приходящуюся на нагрев порошка, можно вычислить следующим способом. Будем считать, что наплавленный металл нагревается до температуры плавления и полностью расплавляется. Тогда, для нагрева

массы порошка, перенесенного на подложку за единицу времени, потребуется потратить энергию:

$$E_{pow} = \Delta H_L \cdot V$$

где, ΔH_L - удельная энтальпия плавления присадочного материала, V - объем материала наплавленного за единицу времени. Этот объем можно вычислить из известного расхода порошка и скорости наплавки.

На рисунке 3.15 представлено сравнение формы поперечного сечения, полученной в результате расчета со шлифом:

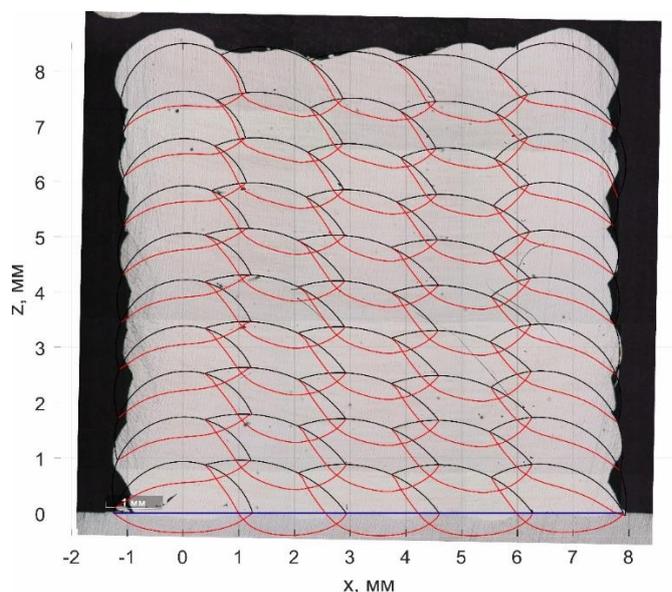


Рисунок 3.15 – Сравнение шлифа технологической пробы и расчета

Получено хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными. Методика учитывает физические особенности процесса ПЛВ, может прогнозировать геометрию многопроходных стенок с высокой точностью (ошибка не более 10%), и может служить инструментом при выборе технологических параметров выращивания. Следующим этапом развития данной модели будет прогнозирование появления несплавлений в местах, где нет пересечения кривых изотерм проплавления.

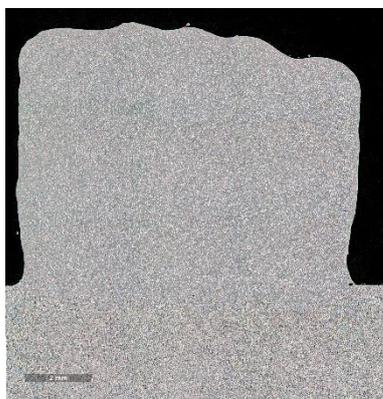
3.2 Эксперименты с титановым сплавом Вt6

Эксперименты по определению уровня мощности при котором образуются неспалвления были также проведены для титанового сплава Вt6. В таблице 3.6 представлены используемые технологические режимы:

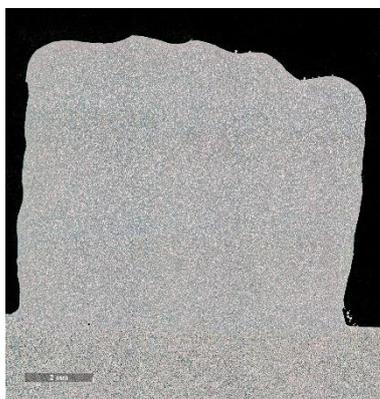
Таблица 3.6 – Технологические режимы для Вt6

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| №1 | Пауза между валиками 5 мин , скорость 20 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
| | Мощность, Вт | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 | 1000 |
| №2 | Пауза между валиками 2,5 мин , скорость 20 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 |
| | Мощность, Вт | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 | 1000 |
| №3 | Пауза между валиками 40 с , скорость 20 мм/с, ширина валика 2,5 мм | | | | | | | | |
| | Номер образца | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
| | Мощность, Вт | 2400 | 2200 | 2000 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 | 1000 |

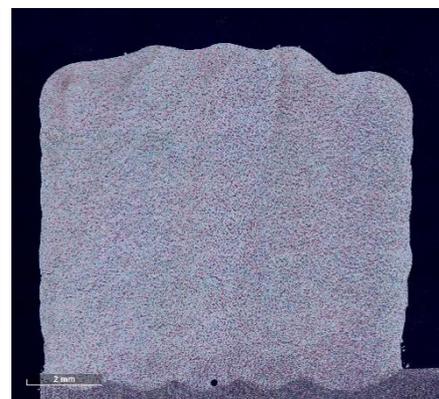
На рисунке 3.16 представлены шлифы первой партии экспериментов:



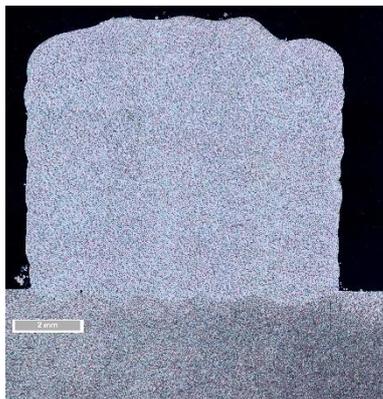
P=2400



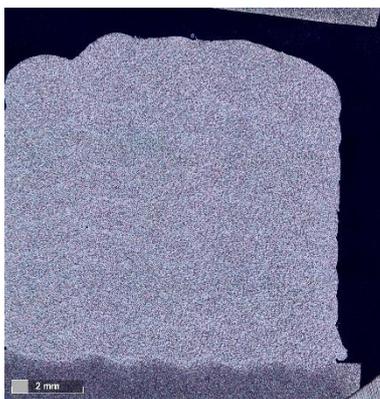
P=2200



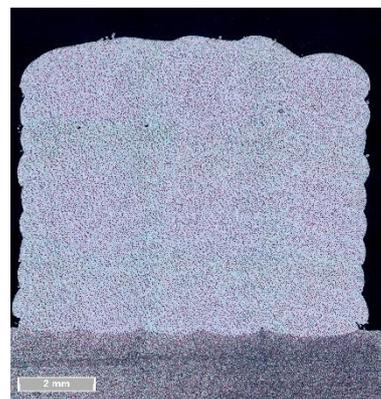
P=2000



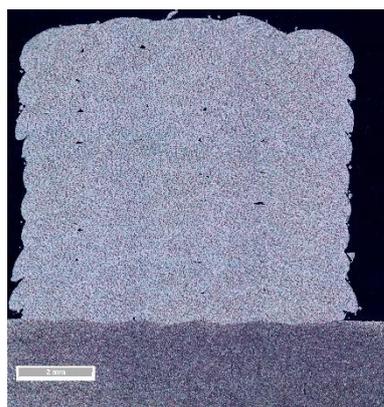
P=1800



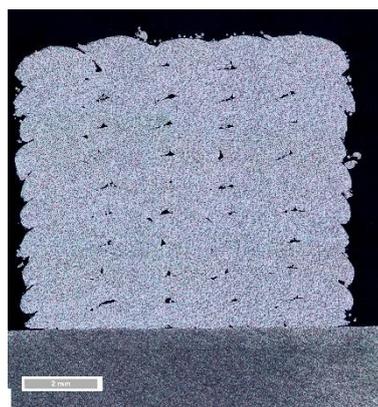
P=1600



P=1400



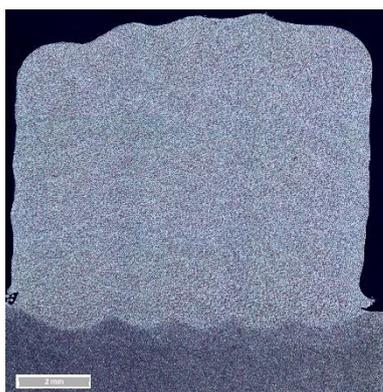
P=1200



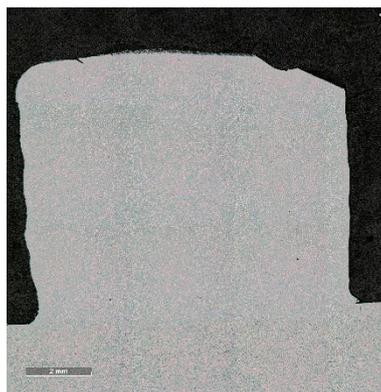
P=1000

Рисунок 3.16 – Макрошлифы образцов из партии №1 Вт6 (пауза между валиками 5 мин)

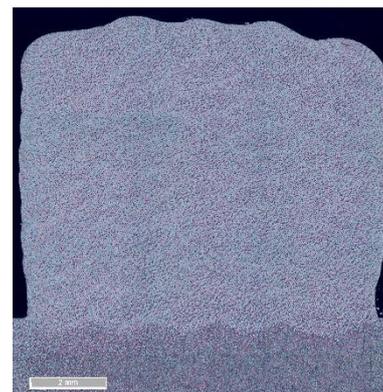
На рисунке 3.17 представлены шлифы второй партии экспериментов:



P=2400



P=2200



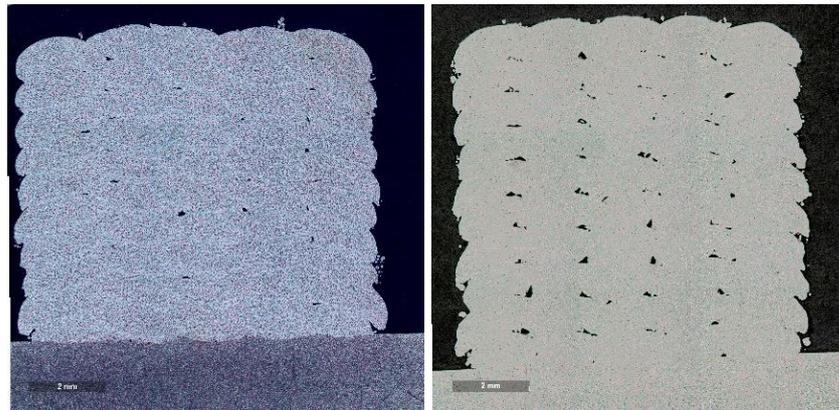
P=2000



P=1800

P=1600

P=1400



P=1200

P=1000

Рисунок 3.17 – Макрошлифы образцов из партии №2 Вт6 (пауза между валиками 2.5 мин)

На рисунке 3.18 представлены шлифы второй партии экспериментов:



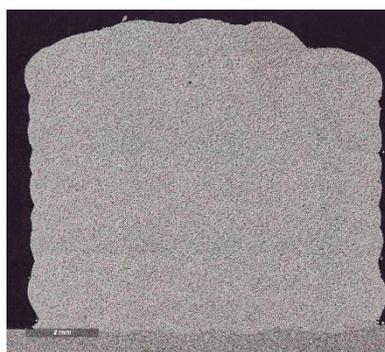
P=2400

P=2200

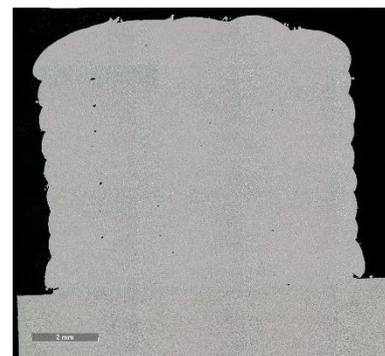
P=2000



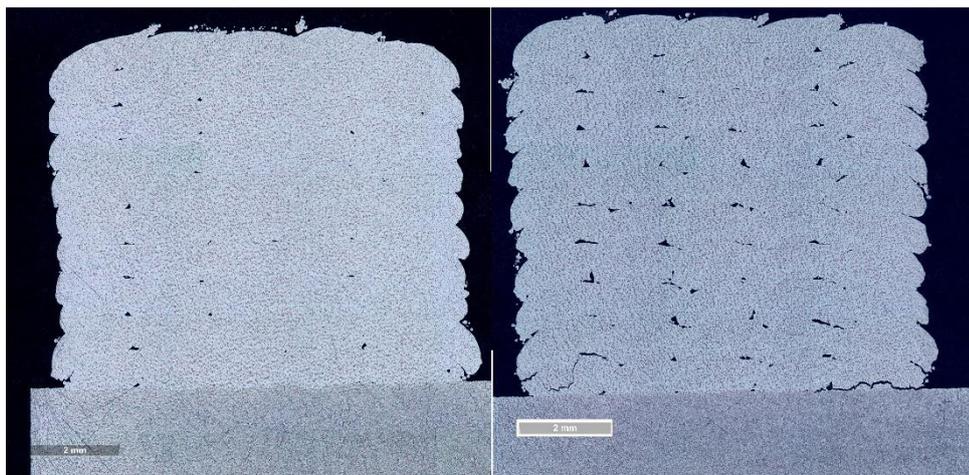
P=1800



P=1600



P=1400



P=1200

P=1000

Рисунок 3.18 – Макрошлифы образцов из партии №3 Вт6 (пауза между валиками 40 с)

В результате анализа полученных шлифов, стало понятно, что на используемых режимах, образование несплавлений находится на достаточно низком уровне по сравнению с образцами из 316L. Во время процесса выращивания были измерены термические циклы, на рисунке 3.19 представлены графики сравнения термических циклов:

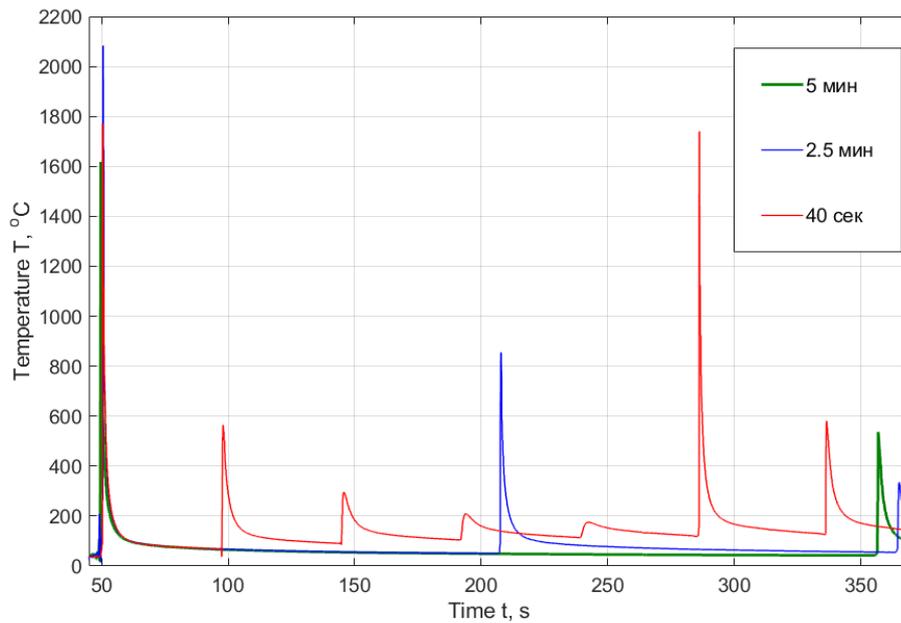


Рисунок 3.19 – Сравнение термических циклов на образцах из титанового сплава Вt6

При выращивании изделий из титановых сплавов, помимо несплавлений на механические свойства влияет получающаяся структура металла. Как уже было сказано ранее, в зависимости от скорости охлаждения может образовываться разная структура, которая сильно влияет на механические свойства. Для прогнозирования микроструктуры в титановых сплавах в [19] было предложено расчетное определение температурного поля при прямом лазерном выращивании. Поскольку титановый сплав Вt6 является одним из самых востребованных материалов в аддитивных технологиях, возможность прогнозировать получающуюся структуру окажется полезной при предварительной подготовке и декомпозиции выращиваемых изделий.

ВЫВОД

- Проанализированы существующие методы изготовления образцов для металлографических исследований и механических испытаний;
- Проанализированы методики измерения термических циклов при выращивании и применение полученных результатов;
- Определены уровни мощностей в зависимости от времени паузы между соседними валиками, при которых образуются несплавления (на нержавеющей стали 316L и титановом сплаве Вt6);
- Разработаны рекомендации по изготовлению технологических проб на стадии подготовки к выращиванию крупногабаритного изделия;
- Разработаны рекомендации по технологическим параметрам прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий из нержавеющей стали 316L;
- Проведены работы по моделированию профиля поперечного сечения толстостенных элементов;

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш Аддитивные технологии в машиностроении
2. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. Ded, W. Zhang// Progress in Materials Science 92 (2018) 112–224
3. T.A. Campbell, O.S. Ivanova, Additive manufacturing as a disruptive technology: implications of three-dimensional printing, Technol. Innov. 15 (1) (2013) 67–79, <https://doi.org/10.3727/194982413x13608676060655>
4. R. Russell, et al., Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications, in: Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier, 2019, pp. 33–66. doi: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00003-0
5. I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, Springer New York, New York, NY, 2015, doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
6. L.E. Murr, Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance, Springer International Publishing, Cham, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-01815-7
7. H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 83 (1–4) (2016) 389–405, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
8. Turichin G.A., Somonov V.V., Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Klimova O.G. High-speed direct laser deposition: technology, equipment and materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Current Problems and Solutions, 2016, Vol. 125 № 012009.
9. A. M. Vildanov, K. D. Babkin, E. V. Alekseeva. Macro Defects in direct laser deposition process // Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.041>

10. Abdollah Saboori, Gabriele Piscopo, Manuel Lai, Alessandro Salmi, Sara Biamino, An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 780, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179>
11. D.R. Feenstra, V. Cruz, X. Gao, A. Molotnikov, N. Birbilis, Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, Volume 34, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101205>
12. Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, S.B. Tor, Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review, *Materials & Design*, Volume 139, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>
13. Pierre Margerit, Daniel Weisz-Patrault, Krishnaswamy Ravi-Chandar, Andrei Constantinescu, Tensile and ductile fracture properties of as-printed 316L stainless steel thin walls obtained by directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, Volume 37, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101664>
14. Seifallah Fetni, Tommaso Maurizi Enrici, Tobia Niccolini, Hoang Son Tran, Olivier Dedry, Laurent Duchêne, Anne Mertens, Anne Marie Habraken, Thermal model for the directed energy deposition of composite coatings of 316L stainless steel enriched with tungsten carbides, *Materials & Design*, Volume 204, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109661>
15. Ryo Koike, Luca Pagano, Yasuhiro Kakinuma, Yohei Oda, Masaki Kondo, Stabilization of metal structure formation in directed energy deposition by applying a coolant system, *Procedia Manufacturing*, Volume 40, 2019, Pages 38-44, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.008>
16. Erik R. Denlinger, Jarred C. Heigel, Pan Michaleris, T.A. Palmer, Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys, *Journal of Materials Processing*

Technology, Volume 215, 2015, Pages 123-131,
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.030>

17. Frank Silze, Michael Schnick, Irina Sizova, Markus Bambach, Laser Metal Deposition of Ti-6Al-4V with a Direct Diode Laser Set-up and Coaxial Material Feed, *Procedia Manufacturing*, Volume 47, 2020, Pages 1154-1158,
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.156>

18. Frederick Lia, Joshua Z. Park, Jayme S. Keist, Sanjay Joshi, Richard P. Martukanitz, Thermal and microstructural analysis of laser-based directed energy deposition for Ti-6Al-4V and Inconel 625 deposits, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 717, 2018, Pages 1-10,
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.060>

19. M O Gushchina¹, S Yu Ivanov and A M Vildanov. Effect of Temperature Field on Mechanical Properties of Direct Laser Deposited Ti-6Al-4V Alloy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 969 (2020).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012103>

20. Seifi, M., Salem, A., Beuth, J. et al. Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. *JOM* 68, 747–764 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s11837-015-1810-0>

21. Pan Wang, Mui Ling Sharon Nai, Xipeng Tan, Guglielmo Vastola, Srinivasan Raghavan, Wai Jack Sin, Shu Beng Tor, Qing Xiang Pei, Jun Wei. Recent Progress of Additive Manufactured Ti-6Al-4V by Electron Beam Melting. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*

22. Cunningham, R., Narra, S.P., Ozturk, T. et al. Evaluating the Effect of Processing Parameters on Porosity in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V via Synchrotron X-ray Microtomography. *JOM* 68, 765–771 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s11837-015-1802-0>

23. Peng-Hui Lia Wei-Guo Guoa Wei-Dong Huang YuSuc XinLin Kang-Bo Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti–6Al–4V alloy over a wide

range of strain rates and temperatures // Materials Science and Engineering: A
Volume 647, 28 October 2015, Pages 34-42

24. T. Vilaro, C. Colin, J. D. Bartout Metallurgical and Materials
Transactions A, 2011, Volume 42, Issue 10, pp 3190–3199

25. As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V
Alloy Processed by Selective Laser Melting, Charlotte de Formanoir Sébastien
Michotte, Olivier Rigo, Lionel Germain, Stéphane Godet Electron beam melted Ti–
6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-
treated material// Materials Science & Engineering A 652 (2016) 105–119

26. A M Vildanov, K D Babkin, E V Zemlyakov and M O Gushchina. The
effects of beam oscillation on the quality of laser deposited metal parts. IOP Conf.
Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109 (2018)

27. Akira Matsunawa and Takayoshi Ohji, Role of Surface Tension in
Fusion Welding (Part 1), Transactions of JWRI. 11(2) P.145-P.154, 1982-12

28. Березовский Б.М. Математическое моделирование формирования
горизонтальных швов на наклонной плоскости [текст] / Стихин В.А. //
Автоматическая сварка №1, 1988г., 26-31с