

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

СОКОЛОВ ПАВЕЛ ЮРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТИТАНОВЫХ КОЛЕЦ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Алещенко Александр Сергеевич

Москва – 2026

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Титановые сплавы широко применяются в машиностроении, и, в частности, в самолётостроении. Из них изготавливают детали авиационных двигателей. Например, крупногабаритные кольца из титанового сплава ВТ6, являются частью корпуса газотурбинного двигателя. Традиционная технология изготовления таких изделий содержит большое число технологических операций и обладает низким коэффициентом использования металла.

Аддитивное производство (3D-печать) – это технология изготовления детали путём добавления материала слой за слоем. Метод прямого лазерного выращивания (ПЛВ) является наиболее перспективным для изготовления крупногабаритных изделий. Данный метод заключается в непосредственной подаче газопорошковой струи через сопло в область воздействия лазерного излучения в процессе построения изделия.

Исключение трудоёмких процессов изготовления и передела заготовки кольца, путём их замены на метод прямого лазерного выращивания, для получения профиля поперечного сечения близкого к геометрии готового изделия, позволит увеличить производительность технологического процесса изготовления крупногабаритных колец, а также увеличить коэффициент использования металла и расширить сортамент мелкосерийного производства. При этом, для достижения высоких эксплуатационных характеристик, необходимо обеспечить выполнение операций постобработки заготовки, полученной методом прямого лазерного выращивания, для исключения возможных дефектов в готовом изделии.

Целью работы является исследование влияния параметров пластической деформации, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств крупногабаритных изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**:

- разработать рациональный режим прямого лазерного выращивания заготовок из титанового сплава ВТ6, обеспечивающий производительность процесса более 1 кг/ч;
- исследовать влияние процессов постобработки на плотность и механические свойства изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом ПЛВ;
- определить характер изменения структуры и свойств изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом ПЛВ, под действием горячей деформационной обработки;
- разработать профиль поперечного сечения заготовки крупногабаритного кольца, изготавливаемого методом прямого лазерного выращивания, с возможностью последующей раскатки для достижения требуемого уровня эксплуатационных свойств и увеличения коэффициента использования металла.

Область исследования. Процессы деформационной обработки изделий, полученных методом прямого лазерного выращивания, обеспечивающие высокий уровень их механических свойств.

Объектом исследования является процесс пластической деформации заготовок из титанового сплава ВТ6, полученных методом ПЛВ. Влияние схемы пластической деформации и деформационных параметров прокатки на структуру и свойства изделий.

Методы исследования. Экспериментальные исследования процесса прямого лазерного выращивания осуществляли на базе института лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) СПбГМТУ. Установка ПЛВ оснащена волоконным лазером ЛС-5 с лазерной головкой D30 Wobble Module, шестиосевым роботом-манипулятором с наклонно-поворотным позиционером и трёхструйным соплом. Горячую прокатку выполняли на лабораторном двухвалковом стане ДУО 210. Электрическую камерную печь типа СНОЛ использовали для нагрева перед прокаткой и термообработки. Исследования микроструктуры полученных образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy. Механические испытания образцов выполняли на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z250. Моделирование процессов прокатки и раскатки осуществляли методом конечных элементов в программном комплексе QForm.

Получены следующие результаты, имеющие **научную новизну** и **выносимые на защиту**:

- разработан новый технологический процесс производства крупногабаритных колец из титановых сплавов, с использованием аддитивных технологий и радиально-осевой раскатки;
- определено, что минимальная степень пластической деформации заготовки из титанового сплава ВТ6, полученной методом ПЛВ, достаточная для получения требуемого комплекса механических свойств, составляет 10%;
- разработана методика выбора профиля поперечного сечения заготовки кольца, с использованием программного комплекса QForm.

Практическая значимость исследования заключается в следующем:

- разработан режим прямого лазерного выращивания заготовки из титанового сплава ВТ6, обеспечивающий производительность не менее 1 кг/ч и минимальное количество внутренних дефектов или их отсутствие;
- разработан процесс постобработки после ПЛВ, обеспечивающий увеличение плотности сплава ВТ6 и улучшение комплекса механических свойств;
- определены технологические параметры процесса радиально-осевой раскатки крупногабаритных колец диаметром 2065 мм из сплава ВТ6;
- выбран профиль поперечного сечения заготовки кольца, подходящий для аддитивного производства и последующей радиально-осевой раскатки на гладких валках кольцепрокатных станков, обеспечивающий повышение коэффициентом использования металла.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Всероссийская школа-конференция с международным участием «Аддитивные технологии в цифровом производстве. Металлы, сплавы, композиты» (2–4 октября 2019 г., г. Москва); XV Международный Конгресс прокатчиков (22–23 апреля 2026 г., г. Москва).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 3-х статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы Scopus.

Достоверность научных результатов. Достоверность полученных научных результатов подтверждается применением вычислительных САПР систем для компьютерного моделирования и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов. Текст диссертации проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, в получении и анализе основных результатов экспериментов и компьютерного моделирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.4 Обработка металлов давлением по п. 1 «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов», п. 3 «Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации», п. 8 «Исследование пластической деформации металлов в процессах обработки давлением, совмещенных с другими технологическими процессами обработки металлов с целью разработки энергоэффективных и материалосберегающих технологий».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основного текста, выводов и трёх приложений. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста и содержит 96 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 76 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении раскрыта актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены существующие технологии получения крупногабаритных колец. Основными недостатками известных процессов являются высокая трудоёмкость и низкий коэффициент использования металла. При этом операция раскатки колец является основой для формирования геометрии готового изделия. Проанализированы способы раскатки кольцевых заготовок и основные параметры процесса.

Для устранения указанных недостатков предложено формировать кольцевую заготовку с использованием аддитивных технологий. Рассмотрен метод прямого лазерного выращивания, как наиболее перспективный для изготовления крупногабаритных изделий и представлен литературный обзор совмещённых процессов аддитивного производства и пластической деформации. Принцип построения изделий методом ПЛВ заключается в формировании отдельных наплавочных валиков и наложении их друг на друга в определённом порядке.

Отмечены основные недостатки существующих технологий и необходимость и основные направления проведения дополнительных экспериментальных исследований для оценки характера влияния параметров пластической деформации при раскатке кольцевых заготовок, полученных методом прямого лазерного выращивания, на уровень механических свойств готового изделия.

Вторая глава посвящена исследованию влияния параметров метода прямого лазерного выращивания на структуру и свойства титанового сплава ВТ6. Схема процесса ПЛВ приведена на рисунке 1.

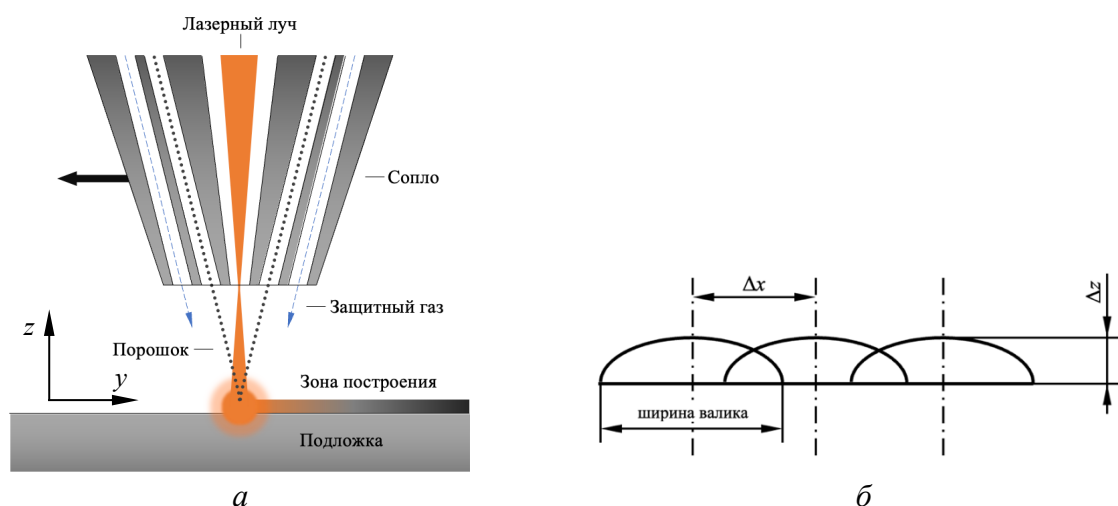


Рисунок 1 – Схема процесса ПЛВ (а) и схема смещения валиков по осям x и z (б)

Для увеличения производительности процесса ПЛВ выбрали диаметр пятна лазера 3,5 мм, что позволило увеличить ширину ванны расплава и формируемого валика. Шаг между слоями Δz – 0,8 мм (рисунок 1 б). Варьируемые параметры процесса: мощность лазерного излучения – 1000–2500 Вт; скорость наплавки – 15–50 мм/с; шаг между валиками – 1,2–2,2 мм.

Используемая величина диаметра пятна позволяет увеличить размер шага по оси x за счет увеличения ширины валика. Установлено, что при увеличении шага между валиками Δx до 2,0 мм происходит уменьшение количества и размеров несплавлений, однако при смещении 2,2 мм наблюдается их рост. Таким образом для дальнейшего анализа влияния параметров режима выращивания выбран шаг между валиками 2,0 мм.

Увеличение мощности лазера при постоянной скорости процесса приводит к уменьшению количества дефектов и увеличению размеров зерна.

При этом увеличение скорости наплавки до 40 мм/с ведёт к появлению несплавлений, а при скорости 50 мм/с размер и количество дефектов значительно увеличивается. Это связано с тем, что при повышении скорости наплавки сокращается ширина ванны расплава, и выбранное смещение по оси x не покрывает величину, на которую ванна уменьшается, как следствие происходит образование полостей в перекрытиях между соседними слоями.

Исходя из вышеизложенного, для дальнейших исследований был выбран следующий режим процесса ПЛВ: мощность лазерного излучения – 2,3 кВт; скорость наплавки – 20 мм/с. Данные параметры позволяют обеспечить производительность процесса более 1 кг/ч и минимальное количество внутренних дефектов или их отсутствие.

В третьей главе рассмотрены экспериментальные исследования влияния постобработки на структуру и свойства образцов из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания. Для снятия остаточных напряжений после процесса ПЛВ проводили отжиг в защитной среде аргона при температуре 825 °С, с выдержкой 2 часа. После чего образцы подвергали операциям вакуумного отжига, горячего изостатического прессования (ГИП) и горячей продольной прокатке на первом этапе обработки. На втором этапе – часть образцов после первого этапа дополнительно обрабатывали повторно вариациями ГИП или прокатки, для анализа комбинации процессов постобработки. Схема операций с обозначением образцов показана на рисунке 2.

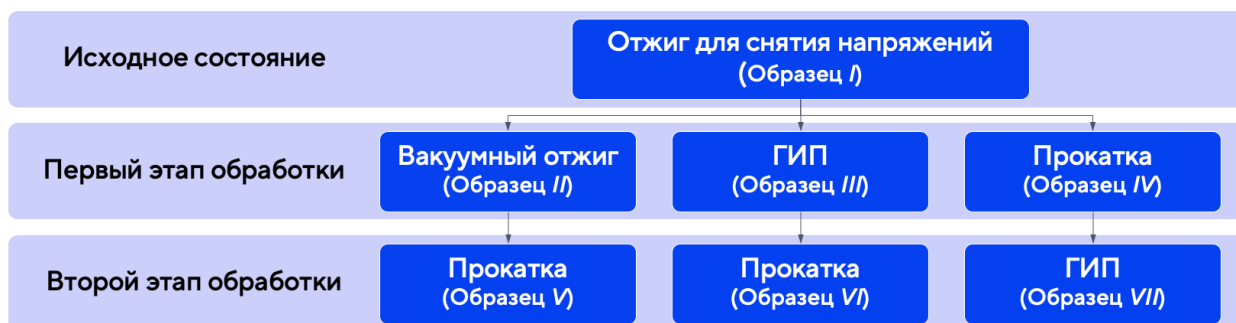


Рисунок 2 – Схема вариаций комбинирования способов постобработки

Вакуумный отжиг выполняли в течение двух часов при температуре 800 °С и давлении в рабочей камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Горячее изостатическое прессование образцов проводили на предприятии АО «Композит». Образцы подвергали процессу ГИП на установке ABRA HIRP (Швейцария) при температуре 910 °С, давлении в камере 150 МПа на протяжении двух часов. Горячую прокатку выполняли на лабораторном двухвалковом стане ДУО 210, при температуре 940 °С. Степень деформации за проход – 20 %.

Изделия, полученные аддитивным производством, могут содержать незначительное количество внутренних дефектов в виде пор, объём которых не превышает 0,3 % от всего объёма. Для исследования влияния процессов постобработки на пористость изделий измеряли плотность образцов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения плотности после операций постобработки

Вид обработки	Обозначение образца	Плотность, г/см ³	Δ , %
Исходное состояние	<i>I</i>	4,4162	–0,31
Вакуумный отжиг	<i>II</i>	4,4169	–0,30
ГИП	<i>III</i>	4,4183	–0,26
Горячая продольная прокатка	<i>IV</i>	4,4181	–0,27
Вакуумный отжиг + Горячая прокатка	<i>V</i>	4,4180	–0,27
ГИП + Горячая прокатка	<i>VI</i>	4,4183	–0,26
Горячая прокатка + ГИП	<i>VII</i>	4,4186	–0,26

Справочное значение плотности титанового сплава ВТ6 в литом состоянии – 4,43 г/см³. Анализ данных таблицы показывает, что операции обработки давлением ГИП и горячая прокатка позволяют увеличить плотность изделий, полученных методом ПЛВ.

Микроструктура образца *I* в исходном состоянии и образцов *II–VII* после операций постобработки показана на рисунке 3.

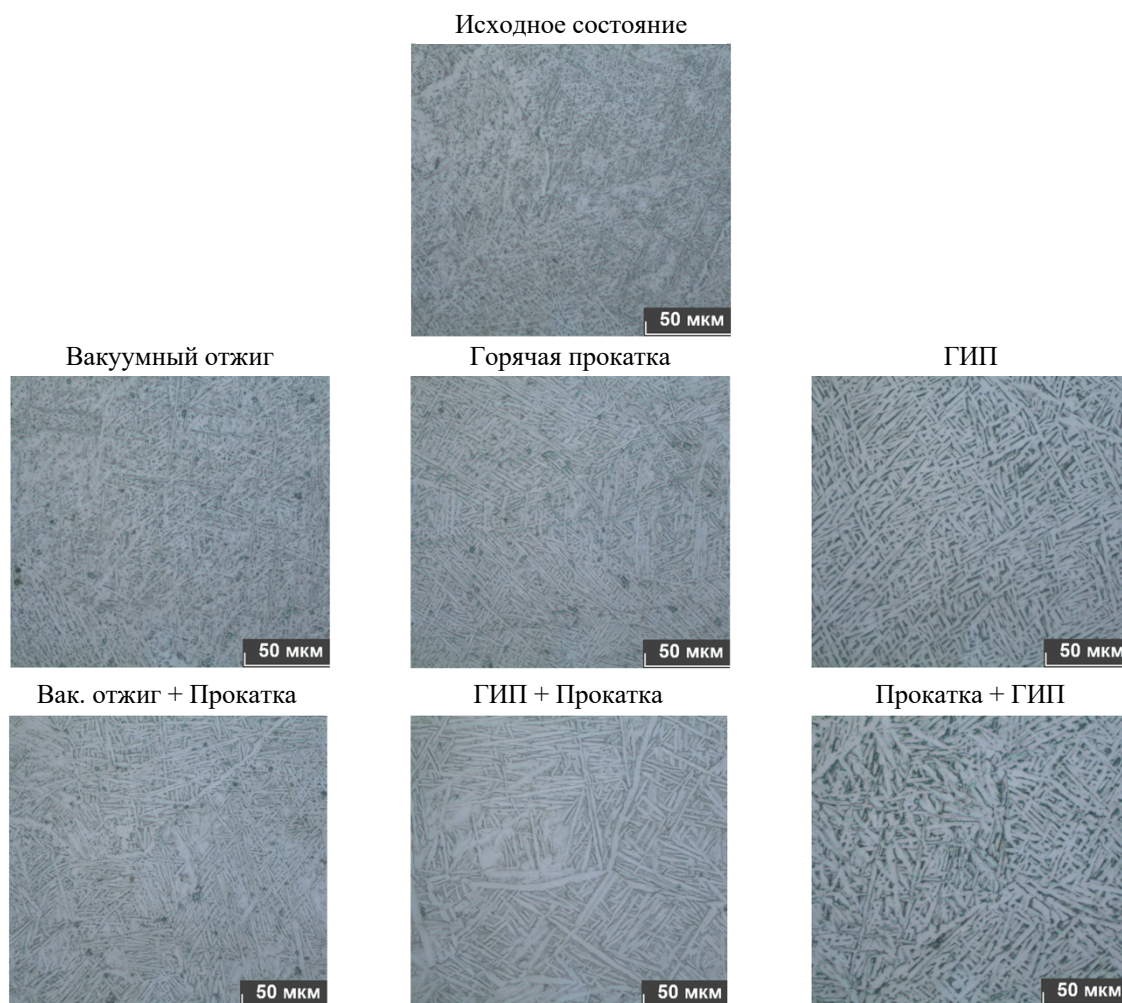


Рисунок 3 – Микроструктура образцов после различных видов постобработки

Исходный образец характеризуется стандартной для данного сплава двухфазной ($\alpha+\beta$)-структурой. Общий вид представляет собой Видманштеттову структуру с α -фазой, расположенной по границам зёрен, и α -пластинами внутри β -зёрен, пересекающимися под различными углами.

Вакуумный отжиг не оказывает значительного влияния на структуру, в которой преобладает первичная α -фаза. После операции ГИП в микроструктуре сплава преобладает вторичная α -структура с плотно расположенными крупными пластинами α -фазы. Микроструктура после горячей прокатки также характеризуется пластинами вторичной α -фазы, но меньшего размера.

Операция постобработки на втором этапе нивелирует эффект предыдущей обработки, что отражается на состоянии микроструктуры и результатах механических испытаний (таблица 2).

Таблица 2 – Механические свойства образцов после операций постобработки

Вид обработки	Образец	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Исходное состояние	<i>I</i>	$960 \pm 1,4$	$1042 \pm 0,6$	$14 \pm 2,2$
Вакуумный отжиг	<i>II</i>	$927 \pm 6,1$	$1021 \pm 0,5$	$16 \pm 0,1$
ГИП	<i>III</i>	$890 \pm 0,1$	$992 \pm 1,8$	$18 \pm 3,5$
Прокатка	<i>IV</i>	$922 \pm 1,3$	$1019 \pm 0,6$	$22 \pm 0,2$
Вакуумный отжиг + Прокатка	<i>V</i>	$923 \pm 0,6$	$1018 \pm 0,6$	$22 \pm 1,9$
ГИП + Прокатка	<i>VI</i>	$904 \pm 8,3$	$1020 \pm 1,5$	$22 \pm 1,4$
Прокатка + ГИП	<i>VII</i>	$844 \pm 2,8$	$977 \pm 0,4$	$27 \pm 2,5$
Требования НТД	–	–	от 835	от 8

Механические свойства образцов *IV*, *V* и *VI*, подвергнутых горячей продольной прокатке в качестве завершающей операции постобработки находятся на одном уровне, что исключает необходимость проведения второго этапа обработки. Горячая прокатка обеспечивает требуемый уровень прочностных характеристик при достаточно высокой пластичности. Таким образом процессы горячей пластической деформации могут быть использованы для улучшения структуры и свойств изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания.

Четвёртая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния параметров пластической деформации в процессе горячей продольной прокатки на структуру и свойства сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания.

Полученные аддитивными технологиями две заготовки разделили на три части, для определения механических свойств в разных по отношению к плоскости выращивания направлениях. Схема резки и последующей горячей прокатки показана на рисунке 4. Прокатку осуществляли на лабораторном стане ДУО 210. Температура прокатки составила 940 °С.

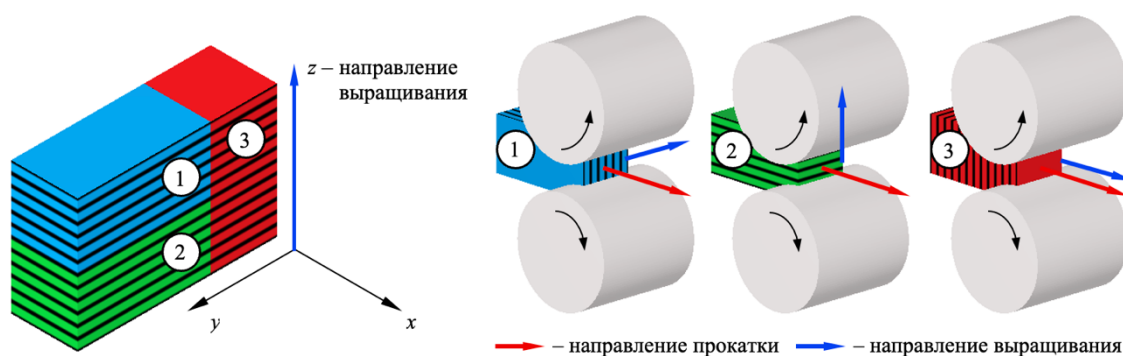


Рисунок 4 – Схема прокатки образцов в разных направлениях относительно плоскости выращивания

Режим деформации представлен в таблице 3. Были прокатаны шесть образцов. Первые цифры в обозначении образца – номер заготовки, вторая цифра – для определения направления прокатки относительно плоскости выращивания (рисунок 4). Прокатку проводили за пять проходов, с единичным обжатием 10 % в каждом. При этом образцы, полученные из заготовки «20», в первом проходе обжимали на степень деформации 20 %. Фактическую степень деформации образцов (таблица 3) определяли измерением их толщины после прокатки.

Таблица 3 – Таблица прокатки на лабораторном стане ДУО 210

Образец	Изменение толщины по проходам, мм	Общая степень деформации после прохода, %				
		1	2	3	4	5
20-1	23,0-17,9-16,3-14,9-13,4-12,1	22,2	29,1	35,2	41,7	47,4
20-2	21,0-17,4-15,5-14,2-12,6-11,3	17,1	26,2	32,4	40,0	46,2
20-3	20,0-15,7-14,0-12,6-11,2-9,6	21,5	30,0	37,0	44,0	52,0
30-1	32,0-28,8-26,1-23,6-21,3-18,8	10,0	18,4	26,3	33,4	41,3
30-2	31,0-26,7-24,0-21,7-19,4-17,1	13,9	22,6	30,0	37,4	44,8
30-3	28,0-25,0-22,5-19,6-17,4-15,1	10,7	19,6	30,0	37,9	46,1

После 1-го, 3-го и 5-го проходов от прокатанных образцов отбирали по три образца для механических испытаний и по одному образцу для структурного анализа после каждого прохода. Характер изменения микроструктуры образцов в результате горячей прокатки, представлен на рисунке 5.

В исходном состоянии имеет место пластинчатая микроструктура, с разориентированным внутризерненным строением, свойственная титановому сплаву ВТ6. По мере увеличения накопленной деформации наблюдается заметная проработка микроструктуры, выраженная в виде глобуляризации α -пластин с их ориентацией в направлении прокатки. При увеличении накопленной степени деформации более 30 % начинает формироваться текстура прокатки. Известно, что формирование преимущественной

ориентировки зерен, начинается происходит со степеней деформации более 50 %, поэтому процесс формирования текстуры при обжатиях менее 50 % сравнительно слабо влияет на анизотропию свойств.

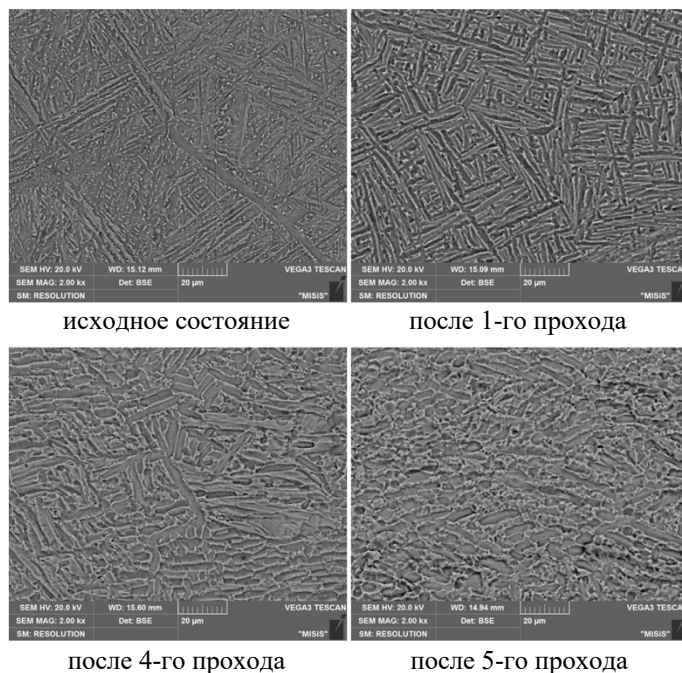


Рисунок 5 – Микроструктура образцов в исходном состоянии и после 1, 4 и 5 проходов

Результаты механических испытаний показали отсутствие существенной анизотропии свойств при прокатке образцов в различных направлениях по отношению к плоскости лазерного выращивания (рисунок 6).

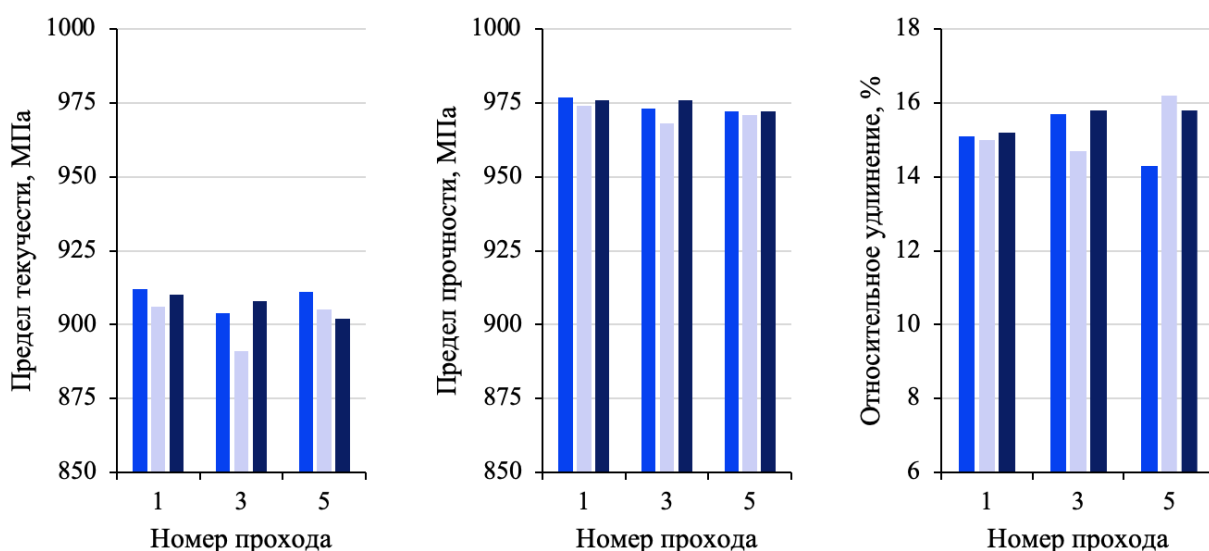


Рисунок 6 – Механические свойства образцов, прокатанных в разных направлениях:
 ■ – образец № 1; ■ – образец № 2; ■ – образец № 3

После горячей деформации во всех направлениях прокатки после первого прохода при степени деформации около 10 % наблюдается повышение как прочностных, так и пластических характеристик. Дальнейшее

увеличение накопленной степени деформации за счёт увеличения числа проходов не оказывает существенного влияния на механические свойства.

Увеличение степени деформации в первом проходе с 10 % до 20 % также не оказывает существенного влияния на уровень механических свойств (рисунок 7).

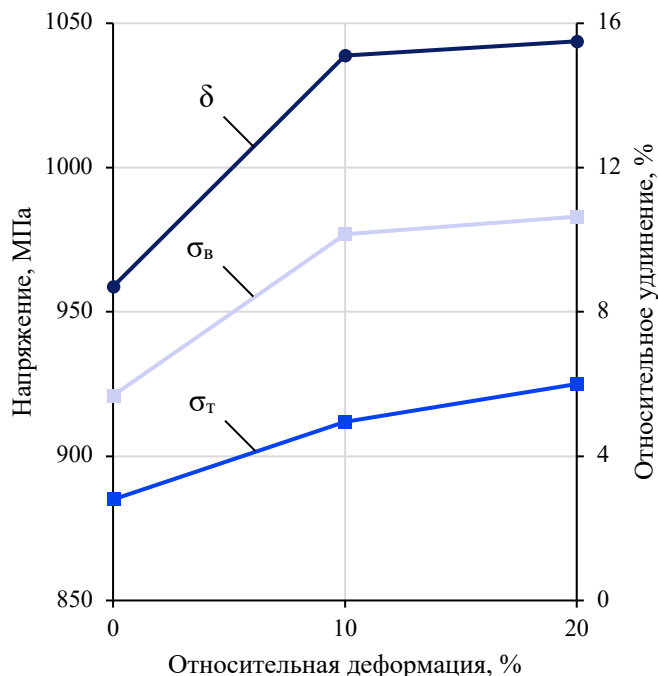


Рисунок 7 – Изменение механических свойства образцов, прокатанных с разной степенью единичной деформации

Из полученных результатов можно сделать вывод, что деформация заготовки из титанового сплава ВТ6, полученной методом прямого лазерного выращивания, путём горячей прокатки с единичным обжатием от 10 %, обеспечивает повышение как прочностных, так и пластических свойств готовой продукции.

В пятой главе рассмотрено моделирование процессов производства крупногабаритного кольца из сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания. Компьютерное моделирование выполнялось в программном комплексе QForm.

Первым этапом разработки методики моделирования является сопоставление полученных результатов физического эксперимента горячей прокатки рассматриваемых образцов с результатами компьютерных расчётов (рисунок 8).

Полученные в результате моделирования картины в целом согласуются с результатами физического моделирования. Так, наиболее полно по сечению образца деформация распределяется при преодолении порога величины обжатия в 15 %.

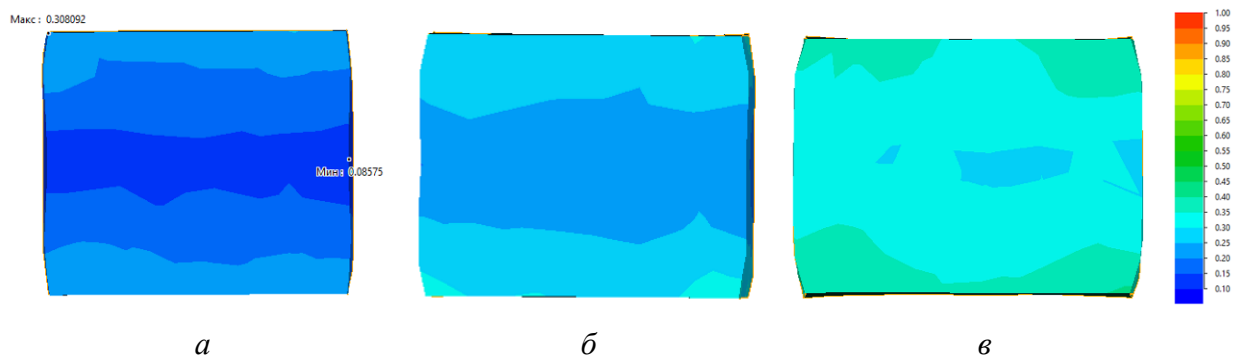


Рисунок 8 – Распределение пластической деформации в поперечном сечении заготовки при моделировании прокатки со степенью деформации: *а* – 10 %; *б* – 15 %; *в* – 20 %

В качестве основы для разработки геометрической формы сечения заготовки, получаемой процессом прямого лазерного выращивания, использовали схему заготовки кольца (рисунок 9), предназначенную для изготовления готовой детали путём радиально-осевой раскатки и последующей механической обработки. Потери металла по данной технологической схеме составляют около 90 %.

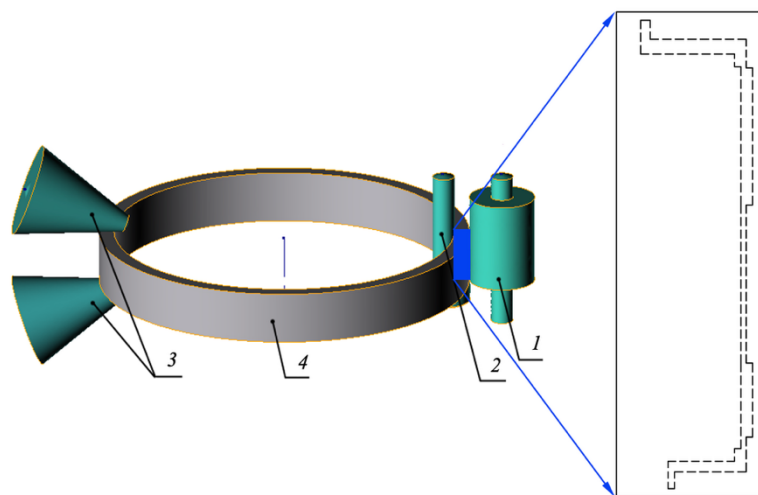


Рисунок 9 – Схема процесса радиально-осевой раскатки с поперечным сечением заготовки (пунктирными линиями показан профиль готового кольца):

1 – главный валок; *2* – оправка; *3* – осевые конические валки; *4* – кольцевая заготовка

Для повышения эффективности технологического процесса предложено использовать форму сечения заготовки, имеющую отверстия (рисунок 10), позволяющую в среднем повысить коэффициент использования металла на 60 %.

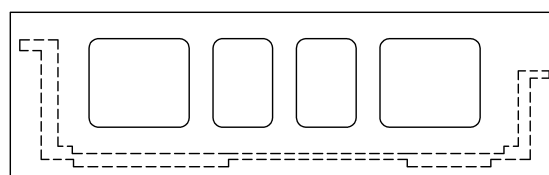


Рисунок 10 – Схема заготовки, получаемой ПЛВ, для моделирования горячей деформации (пунктирными линиями показан профиль готового кольца)

Такая форма сечения заготовки должна обеспечить деформацию всех участков будущего кольца на 10–20 %, а также достаточно технологична для использования на кольцепрокатных станах, обеспечивая необходимую стабильность процесса раскатки.

Для поиска наиболее рационального варианта формы сечения заготовки изменяли её геометрические размеры и конфигурацию отверстий в ней. В результате компьютерного моделирования были получены картины распределения величины пластической деформации по поперечному сечению кольца. На рисунке 11 приведены результаты для шести вариантов поперечного профиля.

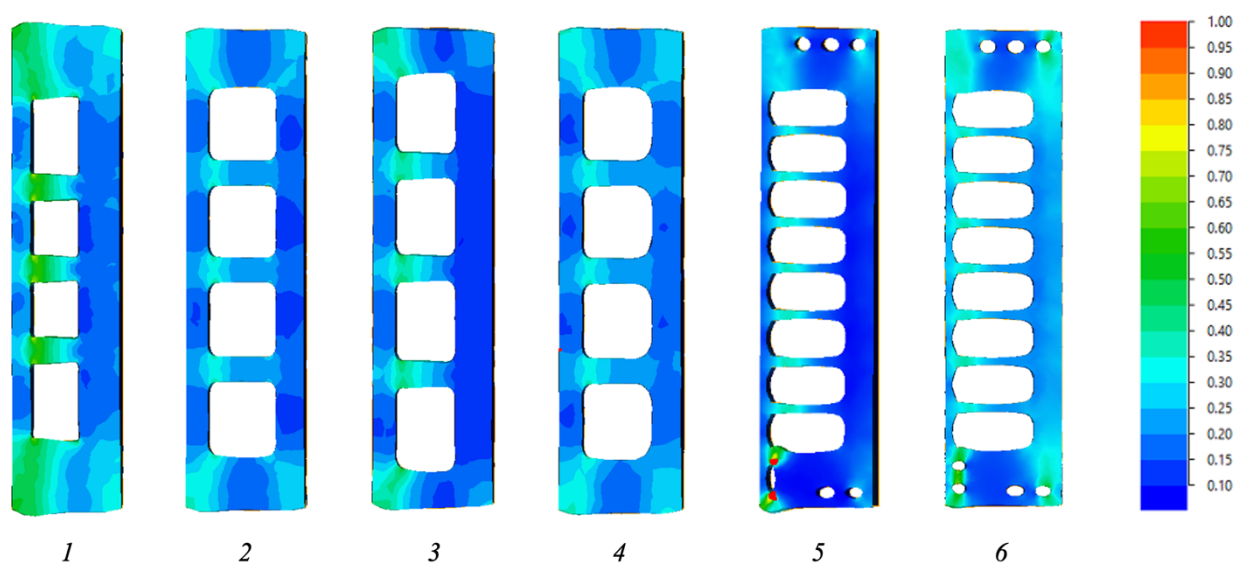


Рисунок 11 – Распределение пластической деформации по сечению кольцевой заготовки, для вариантов 1–6

Исходя из моделирования следует, что наиболее удовлетворительный результат достигается при использовании формы поперечного сечения заготовки по варианту 4. Пластическая деформация в данном случае равномерно распределена по сечению, а среднее значение деформации составляет 0,25. Отношение площади четырёх отверстий к площади прямоугольной заготовки составляет 0,39.

Выбранный вариант профиля поперечного сечения заготовки использовали для моделирования радиально-осевой раскатки. В качестве прототипа для создания модели рабочего инструмента был выбран кольцепрокатный стан RAW 400/400-6000/1200 производства SMS Meer, компании АО «Русполимет». Процесс раскатки реализован за три полных оборота заготовки кольца вокруг собственной оси, в течение 9,4 с при температуре 940 °С. На рисунке 12 представлена расчётная модель раскатанной заготовки кольца с распределением пластической деформации на её поверхности и в поперечном сечении.

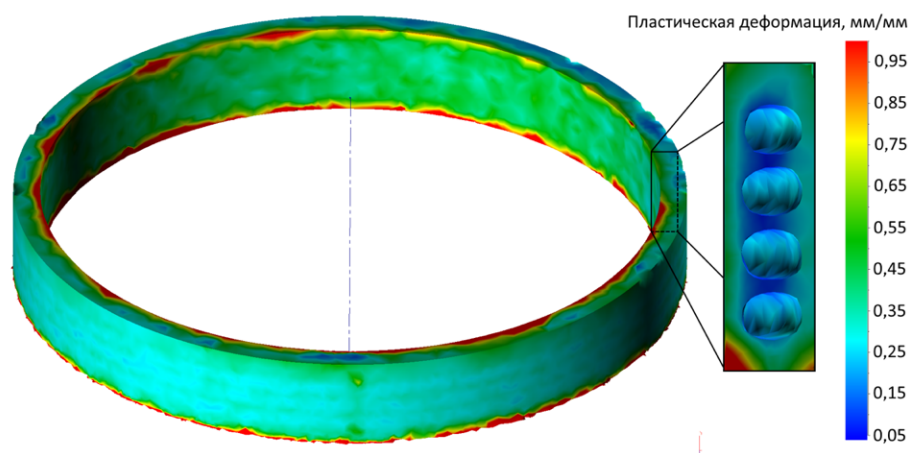


Рисунок 12 – Схема распределения пластической деформации на поверхности и в сечении заготовки кольца после раскатки

Равномерность распределения пластической деформации раскатанного кольца в целом позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств готового изделия. Минимум деформации зафиксирован в зоне ребер, соединяющих внутреннюю и внешнюю стороны заготовки кольца, и достигает в среднем 0,06–0,08 мм/мм, что не критично для разрабатываемой технологии, так как ребра будут удалены при последующей механической обработке. Максимум значений величины пластической деформации отмечен с внутренней стороны на торце заготовки и достигает 1,0–1,2 мм/мм.

Усилие, создаваемое главным валком кольцепрокатного стана, возрастает по мере увеличения накопленной деформации в объеме заготовки и её остывания (рисунок 13). После трех оборотов кольца вокруг оси с постепенным обжатием по его толщине на величину 8,46 мм, что соответствует степени деформации 13,42%, достигнуто усилие на главном валке 227 кН. Таким образом, подтверждается возможность горячей раскатки кольца выбранного профиля поперечного сечения, полученного методом прямого лазерного выращиваия, на стане RAW 400/400-6000/1200 с ограничением по усилию на главном валке 400 кН.

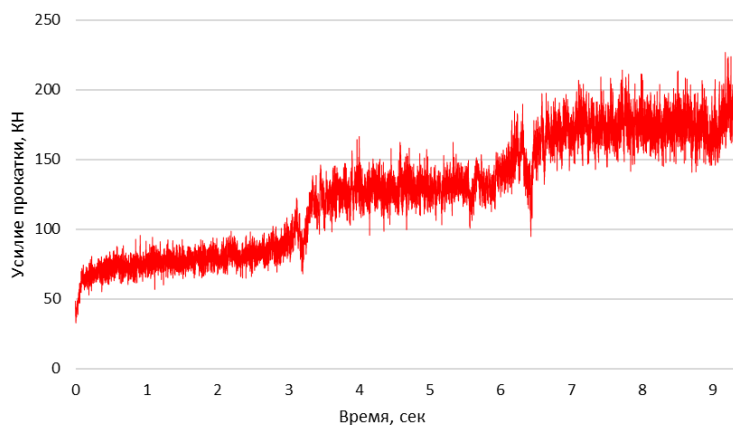


Рисунок 13 – Изменение усилия прокатки на главном валке в процессе раскатки кольца

Для физического моделирования горячей деформации, методом прямого лазерного выращивания была изготовлена заготовка сектора кольца с выбранным профилем поперечного сечения (рисунок 14 а).

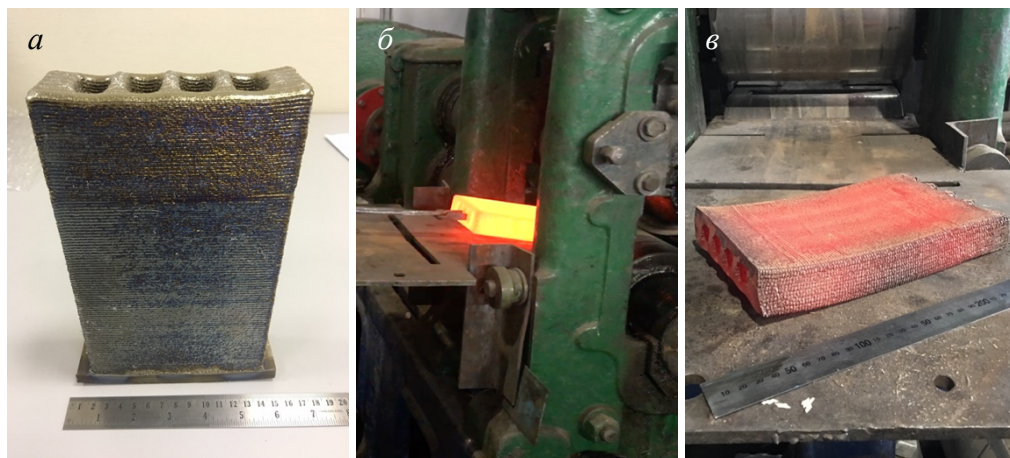


Рисунок 14 – Общий вид сектора кольца после ПЛВ (а), до (б) и после (в) прокатки

Перед отделением заготовки от подложки провели термообработку при 825 °С в течение 1 ч. Обжатию заготовки осуществляли на лабораторном стане продольной прокатки ДУО 210 при температуре 940 °С со степенью деформации 15 % (рисунок 14 б).

Микроструктура после прокатки, представленная на рисунке 15, характеризуется 5–6 типом по 9-типной шкале для ($\alpha+\beta$)-сплавов, что соответствует требованиям ГОСТ 26492–85 для сплава ВТ6.

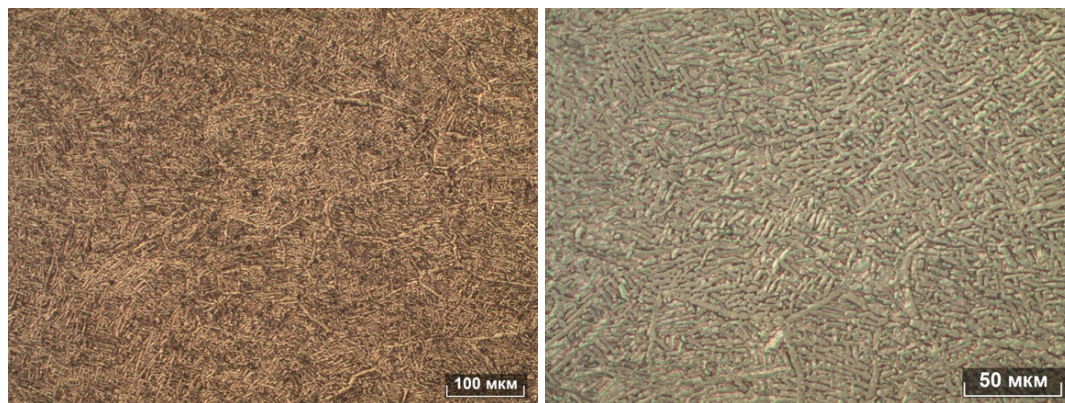
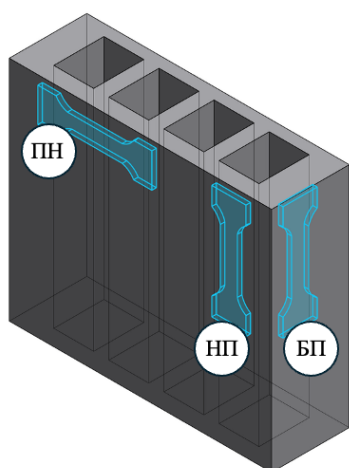
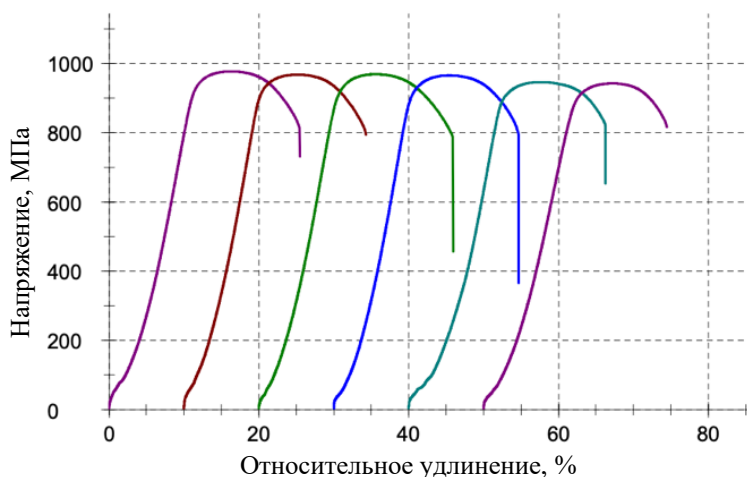


Рисунок 15 – Микроструктура заготовки из титанового сплава ВТ6, полученной методом ПЛВ, после прокатки

У прокатанного сектора кольца, в зонах, которые после механической обработки формируют профиль готового изделия, отобрали образцы для механических испытаний. На рисунке 16 показана схема отбора образцов (по два образца на точку) и результаты испытаний на растяжение.



а



б

Рисунок 16 – Схема отбора образцов (*а*) и результаты механических испытаний (*б*): НП – направление прокатки; ПН – поперечное направление; БП – боковая плоскость

В таблице 4 представлены результаты механических испытаний.

Таблица 4 – Механические свойства образцов из сплава ВТ6, полученных методом ПЛВ, после прокатки

Образец	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %
БП-1	905	977	16,0
БП-2	902	968	15,3
НП-1	892	969	19,4
НП-2	890	966	19,0
ПН-1	882	946	16,1
ПН-2	872	943	13,2

Механические свойства титанового сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания и последующей горячей деформации, соответствуют требованиям ГОСТ 26492–85 для изделий ответственного назначения и требованиям ОСТ 1–92039–75 на цельнокатанные кольца из титановых сплавов, изготовленных методом раскатки на кольцепрокатном стане.

Заключение

1. Анализ научно-технической литературы показал, что известные технологии производства крупногабаритных колец ответственного назначения характеризуются значительным числом технологических операций и низким коэффициентом использования металла, поскольку потери металла на операции механической обработки могут достигать 90 %. Использование метода прямого лазерного выращивания для получения заготовок крупногабаритных колец позволит расширить сортимент

мелкосерийного производства и уменьшить недостатки существующих технологий.

2. В результате экспериментальных исследований определён режим прямого лазерного выращивания сплава ВТ6, с производительностью более 1 кг/ч и минимальным количеством внутренних дефектов или их отсутствием.

3. Проведённое исследование влияния постобработки на структуру и свойства образцов из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания, показало, что процессы горячей пластической деформации позволяют обеспечить требуемый уровень как прочностных, так и пластических характеристик.

4. Анализ результатов механических испытаний образцов из сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания и последующей горячей прокатки, показал отсутствие существенной анизотропии свойств при прокатке в разных направлениях по отношению к плоскости лазерного выращивания. Установлено, что степень единичной деформации 10 % достаточна для улучшения комплекса механических свойств σ_T , σ_B и δ .

5. Разработана методика с использованием программного комплекса QForm, позволяющая выбирать профиль поперечного сечения заготовки, обеспечивающий пластическую деформацию всех участков будущего кольца на 10–20 % и позволяющий сократить потери на операции механической обработки. Компьютерное моделирование подтверждает возможность радиально-осевой раскатки выбранного профиля, а физический эксперимент горячей прокатки сектора кольца показал соответствие структуры и свойств требованиям ГОСТ 26492–85 и отраслевому стандарту на цельнокатаные кольца ОСТ 1-92039-75.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Sokolov P., Aleshchenko A., Koshmin A., Cheverikin V., Petrovskiy P., Travyanov A., Sova A. Effect of hot rolling on structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy parts produced by direct laser deposition // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – V. 107(3–4). – P. 1595–1603.

2. Кошмин А. Н., Алещенко А. С., Патрин П. В., Соколов П. Ю., Зиновьев А. В. Исследование условий горячей деформации аддитивно выращенных заготовок из титанового сплава ВТ6 с применением конечно-элементного моделирования // Металлург. – 2020. – № 11. – С. 100–106.

3. Koshmin A. N., Aleschenko A. S., Patrin P. V., Sokolov P. Y., Zinov'ev A. V. Study of conditions for thermal deformation of additively grown billets from VT6 titanium alloy using finite element simulation // Metallurgist. – 2021. – V. 64(11–12). – P. 1223–1233.

4. Sokolov P., Koshmin A., Aleschenko A., Patrin P. Post-processing influence on additively produced Ti-6Al-4V alloy structure and mechanical properties // Materials Science and Technology. – 2023. – V. 39(7). – P. 828–833.

5. Соколов П. Ю., Кошмин А. Н., Алещенко А. С., Зиновьев А. В. Влияние горячей деформации на формирование структуры и механических

свойств сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания // Труды XV Конгресса прокатчиков (том 1): Сборник статей. – Москва: ООО «Грин Принт», 2026. – С. 87–92.