

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

На правах рукописи

Ковчик Антон Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ
ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 316L**

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:

Ковчик Антон Юрьевич

Научный руководитель:

Туричин Глеб Андреевич,

профессор, доктор технических наук

Санкт-Петербург – 2022

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

Директор ВШ: Семенча Александр Вячеславович,
кандидат химических наук

Научный руководитель: Туричин Глеб Андреевич,
профессор, доктор технических наук

Рецензент: Земляков Евгений Вячеславович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Цифровые лазерные технологии», СПбГМТУ

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Технология прямого лазерного выращивания находит широкое применения в различных сферах промышленности. Благодаря послойному формированию изделий, прямое лазерное выращивание позволяет производить изделия сложной формы за один установ, что позволяет ускорить производственный цикл, по сравнению с традиционными методами механической обработки, и сварки.

Однако, технология прямого лазерного выращивания имеет определенные недостатки. Первый – высокие требования к качеству присадочного материала, в качестве которого используется металлический порошок. В виду высоких требований и трудоемкости изготовления стоимость порошка существенно выше металлического проката. Второй-принципиальный. Принцип технологии заключается в послойном формировании изделия на металлической подложке из металлического порошка под воздействием лазерного излучения. При кристаллизации и охлаждении внутри наплавленного металла образуются остаточные напряжения, которые в свою очередь вызывают деформации изделия непосредственно в ходе выращивания. В результате деформаций изготовление изделия методом прямого лазерного выращивания представляет собой итерационный процесс. Чтобы снизить число итераций и тем самым уменьшить материальные и временные издержки при изготовлении изделия необходимо производить прогноз и компенсацию влияния деформаций.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка методики прямого лазерного выращивания изделия в пределах заданной точности с минимальными временными и материальными затратами.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы прогнозирования и компенсации деформаций, определить преимущества и недостатки.
2. Определить зависимости характера деформаций от геометрии изделия. Произвести классификацию типов деформаций
3. Разработать математическую модель расчета деформаций, и определение на ее основе степень и характер деформации изделия.
4. Экспериментальное подтверждение работоспособности методов компенсации конкретных видов деформаций согласно классификации, на основании результатов расчета математической модели.
5. Создание полной методики и её подтверждение работоспособности прогнозирования и компенсации деформаций на примере конкретного изделия.

Научная новизна

Проанализированы существующие работы по исследованию напряженно деформированного состояния изделий, произведенных методом прямого лазерного выращивания. В результате анализа не обнаружено методов компенсации деформаций для изделий из нержавеющей стали марки 316L. Решения проблемы деформаций изделия, описанные в данной методике полностью технологичны и рекомендованы к применению в технологии прямого выращивания.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанная методика компенсации деформаций позволяет производить прямое лазерное выращивание массивных и осесимметричных изделий за одну дополнительную итерацию. Также методика позволяет повысить точность изготовления изделий сложной формы: неправильной геометрической формы, тонкостенных крупногабаритных изделий, например, кожух газ-воздушного тракта камеры сгорания.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на 9-ой и 10-ой международной научной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2018, 2021).

Публикации

Результаты диссертационного исследования представлены в 3-х научных публикациях. Все статьи входят в международную базу данных SCOPUS

Представление научного доклада: основные положения

1. Проблематика напряжённно-деформированного состояния изделия и влияние его на технологический процесс прямого лазерного выращивания.
2. Связь геометрии изделия и характера деформаций, образующихся в процессе прямого лазерного выращивания.
3. Моделирование процесса выращивания методом конечных элементов. Калибровка модели и экспериментальное подтверждение.
4. Методика определения коэффициента усадки изделия для технологии прямого лазерного выращивания.
5. Описание деформаций и методы их компенсации в зависимости от геометрии.
6. Методика компенсации деформаций изделий. Применение ее на практике.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, а также научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Основной материал диссертации распределен по четырем главам.

В первой главе представлено описание технологического процесса прямого лазерного выращивания, требования к техническому обеспечению,

показаны условия устойчивого процесса. Приведена и проанализирована проблематика образования внутренних напряжений и деформаций в изделиях, изготовленных аддитивными методами в целом и технологией прямого лазерного выращивания в частности.

Описаны основные виды дефектов характерных для различных типов геометрии и построена классификация, на основании связи геометрии изделия с определенными дефектами. Описаны случаи образования комплексных деформаций изделий сложной формы

Проанализированы существующие решения проблемы деформации изделий и возможность их применения в технологии прямого лазерного выращивания. Определены факторы, влияющие на образование деформаций определенного характера и предложены методы компенсации.

В Выводах главы сформированы задачи дальнейшего научного исследования. Выполнение данных

Во второй главе Выполнено технологическое описание процесса прямого лазерного выращивания изделия из нержавеющей стали марки 316L. Показан процесс выбора оптимальных технологических параметров выращивания, с помощью процесса создания и анализа технологических проб.

Описан принцип прогнозирования деформаций изделия в процессе выращивания при помощи математического моделирования в расчетном пакете abacus. Первым шагом моделирования стала калибровка модели расчета температурного поля на примере осесимметричного изделия. Размеры из Осевая симметрия изделия позволила перевести решение из трехмерной задачи в двумерную упростить модель расчета температурного поля и деформации. Методика расчета повторяет послойный принцип формирования изделия. Проведена верификация результатов расчетной модели с помощью экспериментального выращивания моделируемого изделия. Данные эксперимента получены при использовании ручного лазерного сканера. Результаты сравнения результатов модели и экспериментального выращивания изделия представлены на рисунке 1. Представлен профиль смещения внутренней стенки изделия (слева, и внешней стенки изделия

(справа.) Эксперимент показал, что величина деформации осесимметричного изделия из нержавеющей стали марки 316L, диаметром 200мм, высотой 200 мм и толщиной стенки 4 мм составляет около 1.5 мм по радиусу, в зоне устойчивой деформации, что примерно равно 1% от целевого диаметра изделия.

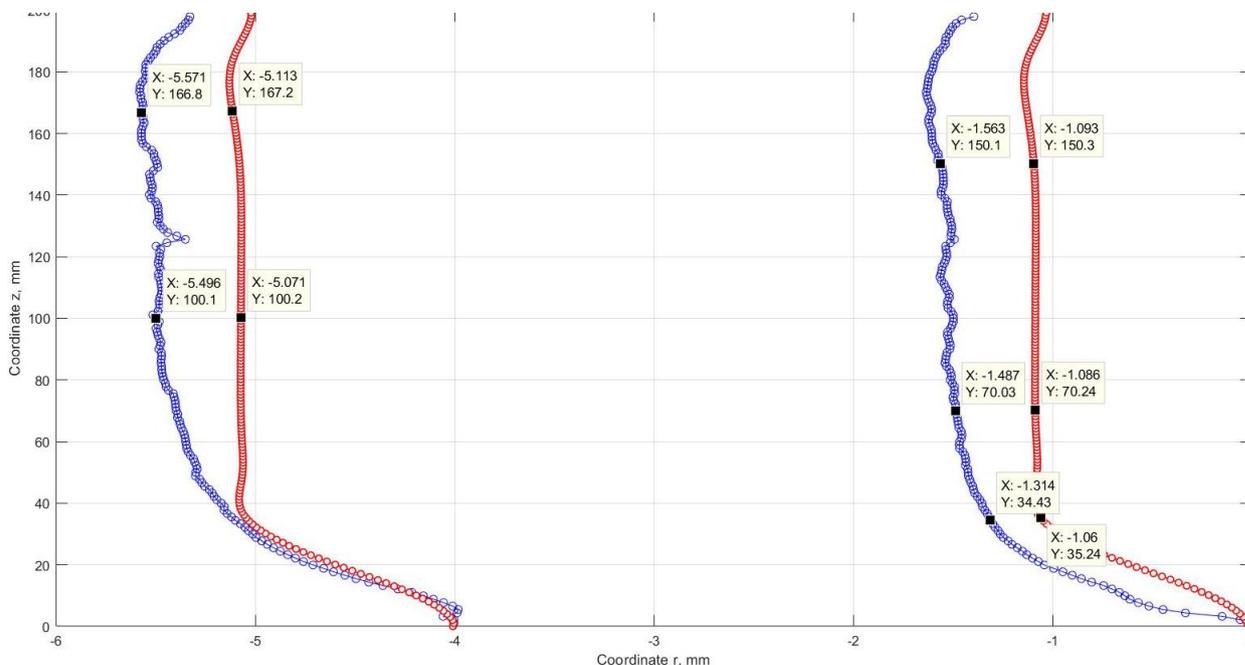


Рисунок 1. – Сравнение профиля деформации модели (красный) и выращенного изделия (синий)

Результаты демонстрируют схожий характер деформации изделия при моделировании и реальным процессом выращивания, однако численно результаты отличны. Разница между расчетом и экспериментом составляет около 50%. Данное несоответствие результатов связано с тем, что в модели не учитывает аккумулярование тепла изделием в процессе выращивания. Каждый последующий слой создавал деформации, однако после добавления последующего, предыдущий слой рассматривался, как охлажденный до комнатной температуры. Модель откалибрована с учетом сохранения количества тепла, вложенного в изделие в процессе выращивания. Средняя температура данного изделия в момент выращивания составила около 100°C.

рисунок 2. Результаты моделирования с учетом калибровки показывают

усадку в размере 1.6-1.7 мм. Сравнение калиброванных расчетных данных с результатами эксперимента представлено на рисунке 2.

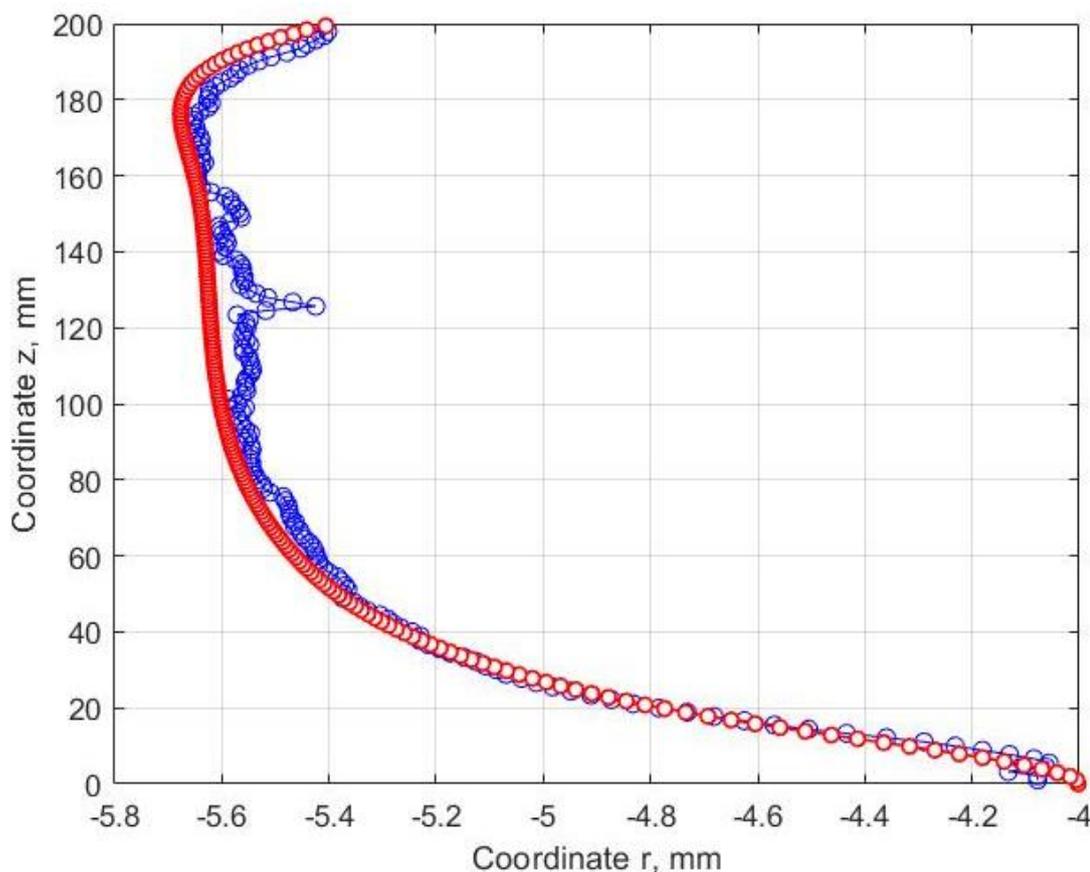


Рисунок 2. – Сравнение профиля деформации модели с учетом калибровки (красный) и выращенного изделия (синий)

Результаты, демонстрируют отклонение только внутренней поверхности стенки изделия. Совпадение результатов экспериментального выращивания и компьютерного моделирования позволят признать модель как достоверную. Особенности выращивания осесимметричного изделия продемонстрированы характером деформации цилиндра после завершения процесса. От основания подложки до значения 70 мм по высоте изделие испытывает равномерную усадку. Далее на значениях высоты цилиндра от 180 до 200мм влияние деформации незначительно ослабевает. Целесообразно закладывать выращивание целевого изделия в промежутки стабильного роста изделия, зоны усадки и ослабевающих деформация являются отсекаемыми частями изделия.

Следует отметить, что данные отражают взаимосвязь формы изделия и его деформации, но не демонстрируют закономерности между характером деформации и размером изделия, следовательно, необходимо было определить связь между размером изделия и характером деформации.

Далее была определена зависимость величины и характера деформации изделия в зависимости от радиуса цилиндра при постоянной высоте изделия, а также была определена зависимость распределения температурного поля (Рисунок 3).

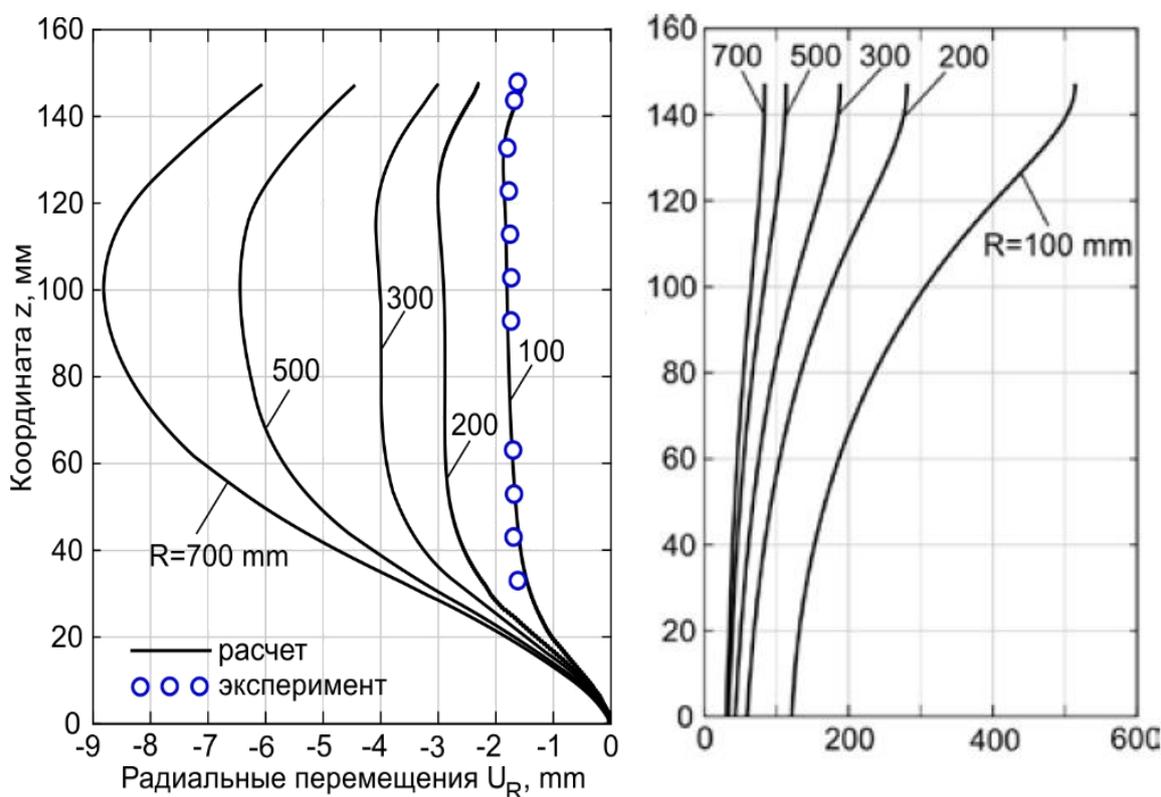


Рисунок 3. – Зависимость деформации от радиуса изделия (слева) и распределение температурного поля по высоте изделия после наплавки последнего слоя в зависимости от радиуса изделия (справа).

Данные показали, что в результате увеличения радиуса изделия с сохранением высоты и толщины стенки происходит увеличение его радиального смещения к центру оси вращения, а также меняется кривизна боковой стенки. Это объясняется увеличенным объемом наплавленного материала в слое из-за большей длины окружности наплавки, а также уменьшением температурного градиента вдоль направления роста изделия.

Более холодный металл препятствует температурному расширению отвержденного наплавленного слоя и способствует образованию больших напряжений и как следствие приводит к увеличению деформаций. Чем меньше радиус изделия, тем больше градиент температуры, соответственно уровень остаточных напряжений меньше, что приводит к более равномерной усадке изделия. Также анализируя данные рисунка 3 можно предположить, что при превышении определенного отношения толщины стенки к радиусу кривизны происходит потеря зоны устойчивого роста, что связано с недостаточной жесткостью стенки изделия по отношению к уровню остаточных напряжений. В данном случае масштабирование изделия не позволяет компенсировать деформацию что приводит к необходимости повысить жесткость стенки изделия (данная тема будет более подробно рассмотрена в 3 главе).

Компенсация деформаций равномерно деформируемого изделия возможна при помощи масштабирования изделия коэффициент усадки. Далее была определена зависимость коэффициента усадки $\left(\frac{U_R(H)}{R}\right)$ относительно радиуса изделия. А также пропорция смещения верхнего края изделия относительно радиуса изделия $\left(\frac{U_R^{min}}{R}\right)$. На рисунке 4 представлены результаты зависимости коэффициента усадки изделия и максимального смещения верхнего края.

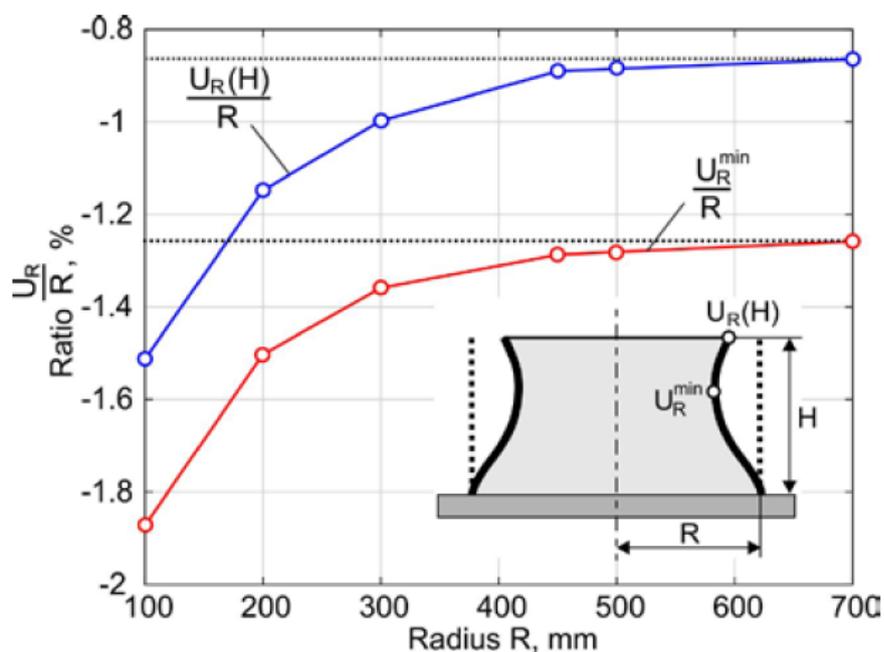


Рисунок 4 – зависимость коэффициента усадки от радиуса изделия (красный),
зависимость смещения верхнего края изделия от радиуса (синий)

Обе зависимости имеют одинаковый характер, что говорит о об изменении коэффициента усадки изделия по определенному закону. Начиная с радиуса изделия в 450мм значение коэффициента усадки принимает постоянное значение около 1,3%, равно как и для смещения верхнего края. Тем самым можно утверждать, что коэффициент усадки был точно определен.

В результате во второй главе была описана методика определения масштабного коэффициента изделия. Данная методика, применима для определения масштабного коэффициента для любого материала, используемого в технологии прямого лазерного выращивания.

В третьей главе более подробно рассмотрены основные виды деформаций и методы компенсации деформаций крупногабаритных изделий, тонкостенных изделий неправильной формы.

Описаны методы компенсации деформации подложки для крупногабаритных изделий с использованием стапеля жесткости, чтобы избежать образование деформаций изделия в случае, когда невозможно обеспечить необходимую высоту материала под обрезку изделия. Описаны условия необходимые к соблюдению для применения описанного решения.

На рисунках 5.1 и 5.2 представлен пример изделия выращиваемого в стапеле для повышения жесткости изделия.

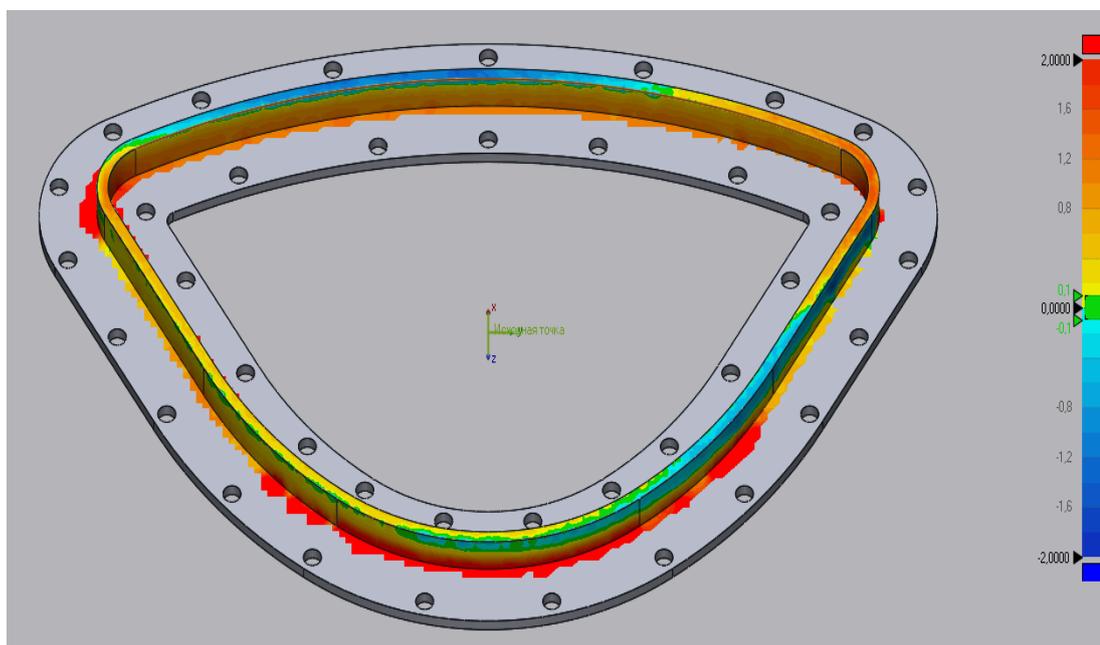


Рисунок 5.1 – Сравнение скана выращенного изделия с моделью (пределы шкалы измерений $\pm 2\text{мм}$)



Рисунок 5.2 – Выращенное изделие

Далее описаны дефекты тонкостенных изделий в том числе неправильной формы и характерный для них тип деформации – потеря устойчивости стенки изделия. Появление коробления в процессе выращивания Рисунок 6.



Рисунок 6– коробление стенки тонкостенного изделия

Данный тип деформации встречается также в осесимметричных изделиях в случае, когда отношение толщины стенки изделия и его радиуса

становится слишком мало. На рисунке 6 представлено изображение двух баллонов, толщина стенки деформированного баллона 1.2мм. толщина стенки недеформированного баллона 1.5 мм, диаметр баллонов 150мм. В случае с осесимметричным изделием незначительное повышение толщины стенки позволяет избежать коробления, однако данное решение не подходит для изделий неправильной формы. Коробление тонкостенных изделий неправильной формы компенсируется при помощи добавления дополнительных ребер жесткости на стенке изделия, однако данное решение приводит к образованию крупномасштабных деформаций.

Далее происходит подробное описание метода компенсации масштабных деформаций изделия, то есть деформации стенки изделия, распределенные по большой области. На рисунке 7 представлено сравнение данных сканирования изделия с его моделью.

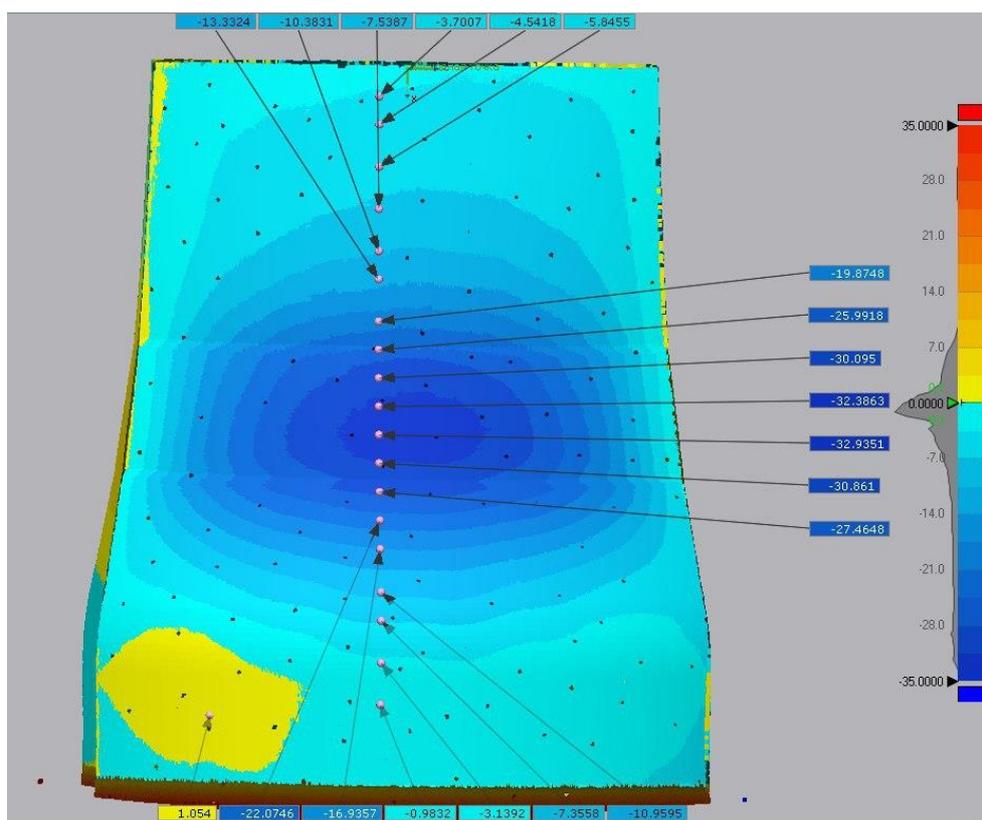


Рисунок 7– масштабная деформация тонкостенного изделия

Максимальная деформация стенки составила 10.9мм на сторону. Однако, не наблюдается эффекта коробления. Компенсация данного явления была произведена путем обратного выгибания стенки.

В четвертой глав полностью описана применение методики компенсации деформаций при выращивании тонкостенного изделия с комплексными деформациями.

Первый шаг - это моделирование деформаций изделия и подтверждение результатов моделирования тестовым выращиванием изделия. На рисунке 8.1 представлен данные полученные после моделирования деформаций. Была предпринята попытка на этапе моделирования компенсировать деформацию изделия обратным выгибанием деформированных стенок изделия, что согласно данным рисунка 8.2 изменило характер деформации и привело к образованию эффекта коробления стенки что показало необходимость добавления дополнительных ребер жесткости.

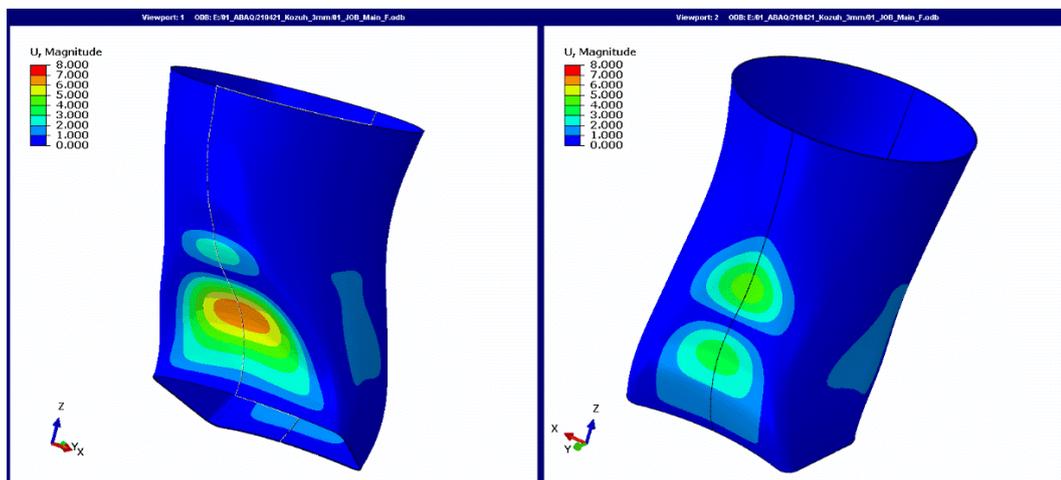


Рисунок 8.1– Результаты моделирования деформаций изделия до попытки компенсации деформаций.

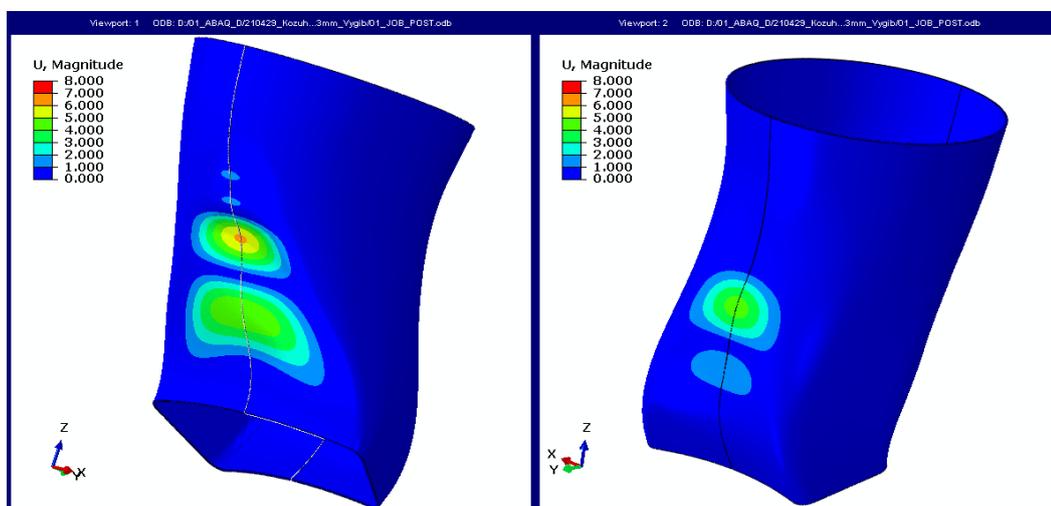


Рисунок 8.2– Результаты моделирования деформаций изделия после попытки компенсации деформаций.

Данные представленные на рисунках 8.1, 8.2 показывают степень деформации по модулю смещения стенки. После моделирования было выполнено выращивание изделия после компенсации модели обратным изгибанием, для проверки достоверности результатов моделирования, результаты выращивания изделия представлены на рисунке 9.

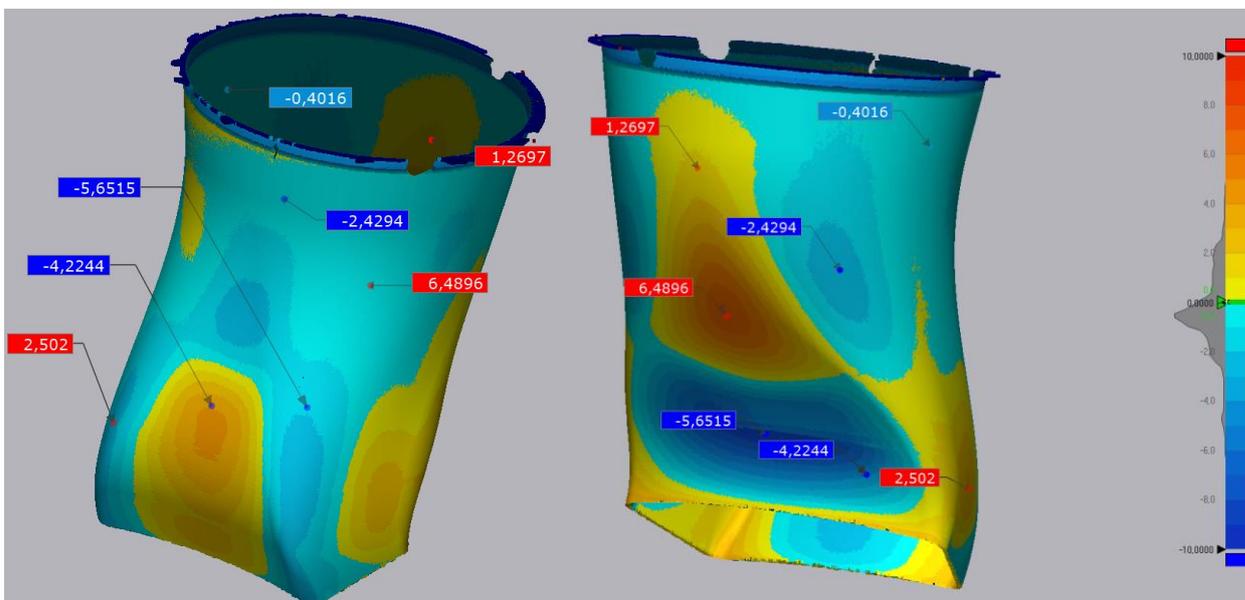


Рисунок 9– Результаты выращивания изделия после попытки компенсации деформаций.

Согласно результатам сравнения выращенного изделия, с целевой 3D - моделью позволяет сделать вывод о достоверности результатов моделирования изделия.

Следующий шаг – изменение геометрии изделия для компенсации влияния деформаций коробления стенки - добавление ребер жесткости. Расположение ребер, их размер и толщина определены на основании компьютерного моделирования изделия. Результаты моделирования представлены на рисунке 10.1. Согласно данным рисунка остаются области с высокой степенью деформации, поэтому необходимо произвести компенсацию данных деформаций, после добавления ребер. Результаты моделирования после компенсации представлены на рисунке 10.2.

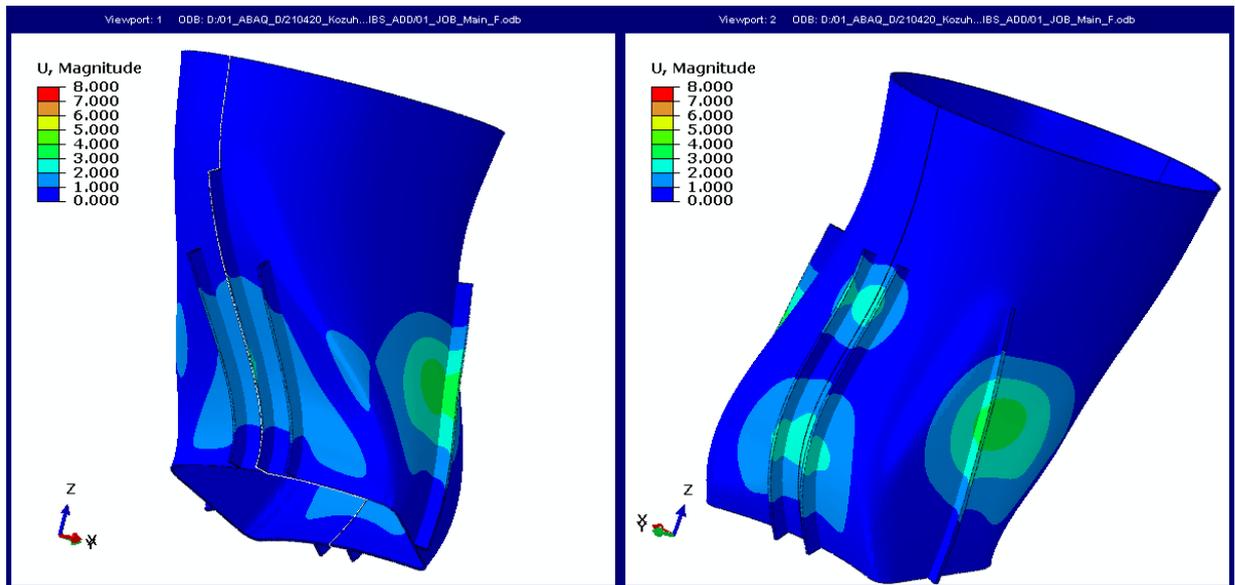


Рисунок 10.1– Результаты моделирования деформаций изделия с добавлением ребер жесткости до попытки компенсации деформаций.

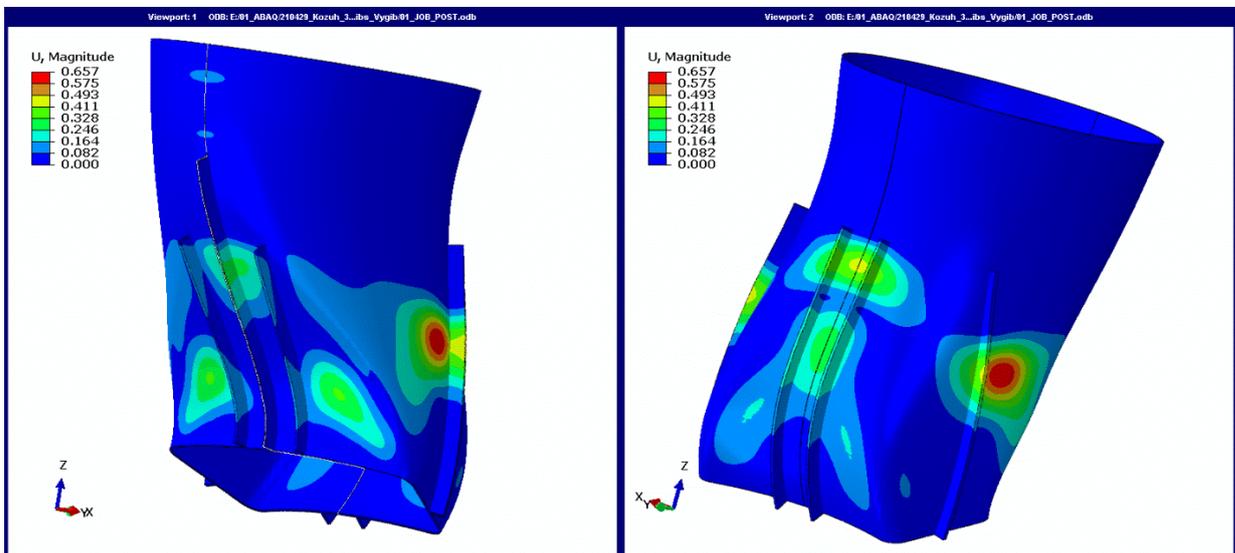


Рисунок 10.2– Результаты моделирования деформаций изделия с добавлением ребер жесткости после попытки компенсации деформаций.

Результаты моделирования после всех применённых мер показали незначительные отклонения в пределах 0.7 мм, что является приемлемым результатом. И после всех манипуляций, применение масштабного коэффициента усадки изделия. Результаты повторного выращивания изделия с учтенными мерами по компенсации деформаций представлены на рисунке 11.

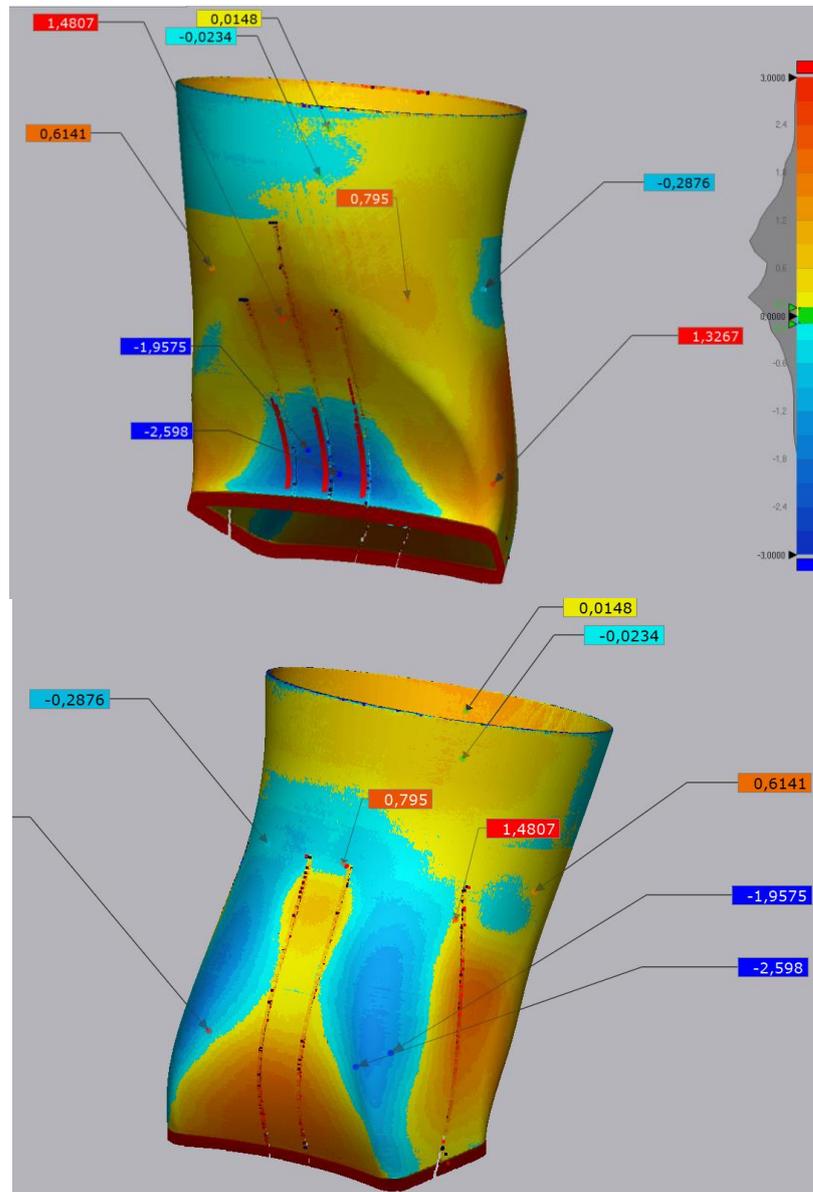


Рисунок 11– Результаты моделирования деформаций изделия с добавлением ребер жесткости после попытки компенсации деформаций.

Результаты моделирования и эксперимента несколько отличаются друг от друга, однако очевидно существенное снижение влияния деформаций на геометрию изделия после примененных мер по компенсации деформаций. Изделие до добавления ребер жесткости испытывало деформации в пределах до 6.5 мм, после применения всех мер деформации изделия в максимальных значениях не превышают 2.5мм. Оба изделия выращенные в ходе выполнения исследования представлены на рисунке 12.



Рисунок 12– Изделия произведенные в ходе проверки методики компенсации деформаций.

Различие компьютерного моделирования с экспериментом связаны с различием в послойном добавлении материала между расчетом и экспериментом. Расчет является решением с применением определенных допущений, для его реализации. Если расчет производит наплавку всего слоя целиком, то вовремя эксперимента наплавка слоя происходит постепенно, сперва наплавляется слой контура изделия, а после слои ребер жесткости.

Несмотря на необходимость более подробного исследования описанных в работе тем, представленные результаты показывают практическую применимость разработанной методики компенсации деформаций на реальных изделиях.

Заключение

Данное исследование имеет колоссальную значимость для технологии прямого лазерного выращивания, его результаты позволят повысить качество выпускаемых изделий и снизить издержки на их изготовление, а также расширить сферу влияния технологии.

Однако, ввиду выбора чрезмерно объемной темы диссертационного исследования, на текущий момент работа выполнена не до конца, большинство решений были использованы на практике, однако не были оформлены в полноценные исследования, за неимением достаточно количества чистых экспериментальных данных.

Цели исследования будут достигнуты после чего результаты будут представлены в ученый совет в виде диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в других изданиях

1. Kovchik A., Vildanov A., Babkin K. Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316l stainless steel product, BTLA 2021" 2021. С. 012010.
2. Kovchik A.Y., Babkin K.D., Rakhmatulina Z.A. Distortion compensation in lmd process. MS-CAMC 2019. Saint Petersburg, 2020. С. 568-571.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.136>
3. Yun N.G., Arkhipov A.V., Kovchik A.Y., Stankevich S.L. Design and optimization of discrete powder nozzle for laser metal deposition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. С. 012012

Аспирант _____ Ковчик А.Ю.