

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СЕ-  
ЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА  
КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК**

САМАРА 2017

УДК 519.233.5(075)+621.9(075)

Составители: *А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор И.Н. Хаймович

**Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок:** метод. указ. / сост. *А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.: - 10 ил.

В данных методических указаниях рассмотрен метод определения остаточных напряжений в гладких цилиндрических кольцах, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления.

Методические указания предназначены для студентов механических факультетов, обучающихся по подготовке магистров по направлению 24.04.05 – «Двигатели летательных аппаратов».

Выполнено на кафедре Технологий производства двигателей.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Цель и задачи работы .....	6
2 Последовательность выполнения работы .....	6
3 Технология селективного лазерного сплавления .....	6
3.1 Механизм формирования остаточных напряжений в процессе слс .....	8
3.2 Технологические параметры процесса слс влияющие на уровень остаточных напряжений.....	11
4. Методика определения остаточных напряжений .....	15
4.1 Определение остаточных напряжений в гладких цилиндрических кольцах .....	17
4.2 Снятие остаточных напряжений путем термической обработки гладких цилиндрических колец .....	18
4.3 Измерение параметров гладких цилиндрических колец .....	19
4.4 Построение гистограммы влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений .....	21
5. Содержание отчета .....	22
Контрольные вопросы.....	23
Библиографический список .....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	26

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря технологии селективного лазерного сплавления, разработанной для производства деталей из металлов и сплавов, появилась возможность получения новых конструкционных материалов, создание деталей сложной геометрической формы, а также создание деталей с заданными микроструктурой и механическими свойствами.

Тонкостенные детали получили широкое применение в ряде отраслей машиностроения, особую роль они играют в авиакосмической отрасли. При этом если в других отраслях использование тонкостенных конструкций при проектировании изделий мотивировано снижением металлоемкости, то при проектировании авиационных двигателей эта тенденция вызвана, в первую очередь, снижением общей массы для улучшения эксплуатационных характеристик двигателя. Изготовление деталей авиационных двигателей имеет ряд особенностей, отличающих его от других сфер машиностроительной отрасли. Одна из таких особенностей — высокие требования к точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Зачастую достижение заданных требований точности оказывается сложной производственной и технологической задачей. В таких условиях главной задачей технологической подготовки производства становится максимально точная оценка и прогнозирование погрешностей, которые могут возникнуть в процессе технологической наладки и в процессе обработки заготовки. Если же говорить о непосредственной корректировке параметров по ходу технологического процесса, то такой способ обеспечения качества деталей влечет за собой дополнительные затраты времени и материальных средств, и, как следствие, увеличение общей трудоемкости и стоимости обработки [1].

В процессе СЛС в изготавливаемых деталях возникают внутренние напряжения и деформации. В условиях эксплуатации остаточные напряжения и пластические деформации металла могут способствовать хрупкому и усталостному разрушению, уменьшению коррозионной стойкости, изменению жесткости или точности [2]. Выбор оптимальных параметров процесса СЛС (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, тип штриховки, шаг сканирования и т.д.), а также подбор процесса термической обработки деталей позволяет уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций.

## **1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

Цель работы – изучение методов определения остаточных напряжений в деталях, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления.

Задачи:

- ознакомиться с технологией изготовления деталей с использованием технологии селективного лазерного сплавления;
- ознакомиться с механизмом формирования остаточных напряжений;
- ознакомиться с технологическими параметрами процесса СЛС влияющими на уровень остаточных напряжений;
- приобрести практические навыки по определению остаточных напряжений в гладких цилиндрических кольцах.

## **2 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторной работы.
2. Изучить методические указания по выполнению данной лабораторной работы.
3. Ознакомиться с технологией изготовления деталей технологией селективного лазерного сплавления, с механизмом формирования остаточных напряжений и с технологическими параметрами процесса СЛС влияющими на уровень остаточных напряжений.
5. Определить остаточные напряжения в гладких цилиндрических кольцах.
6. Составить гистограмму влияния стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений в гладких цилиндрических кольцах.
7. Оформить отчет по работе.

## **3 ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

Селективное лазерное сплавление (Selective laser melting, SLM, СЛС) – один из новых методов аддитивного производства, исполь-

зующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет сплавления металлических порошков [3-5]. Суть технологии селективного лазерного сплавления заключается в послойном изготовлении детали, где тепловым источником служит лазерное излучение.

Процесс селективного лазерного сплавления начинается с разбиения цифровой трехмерной CAD модели на слои толщиной от 20 до 100 мкм [3, 6]. Затем при помощи специального модуля, входящего в программное обеспечение MagicsRP, назначаются параметры построения детали (мощность лазерного излучения, скорость сканирования и т.д.). После этого все данные передаются на установку для начала процесса построения. Из бака, в котором содержится металлический порошок при помощи шнека исходный материал порционно подается в дозатор (рекоутер). Дозатор перемещаясь в горизонтальном направлении доставляет металлический порошок на платформу построения и при помощи силиконового ножа разравнивает его. Излишки металлического порошка попадают в передний и задний баки. После того как слой порошка выравнен в работу вступает лазер и при помощи системы зеркал выборочно сплавляет металлический порошок. При воздействии лазерного излучения порошок нагревается, а при приложении необходимой энергии, плавится образуя жидкую ванну. Затем жидкая ванна быстро затвердевает тем самым образуя фрагмент детали. После того как селективное лазерное сканирование текущего слоя закончено, платформа построения при помощи поршня опускается по оси Z на величину слоя, и насыпается новый слой порошка. Процесс является циклическим и повторяется до тех пор, пока изделие не будет полностью закончено (рис. 1).

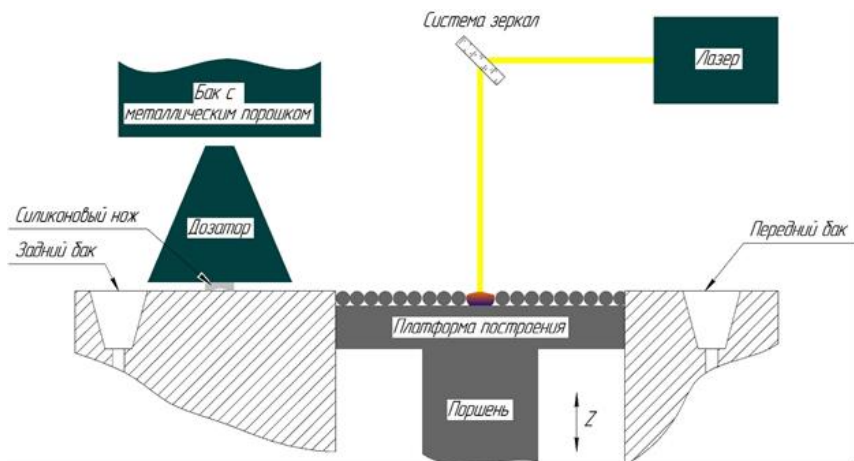


Рис. 8. Принципиальная схема технологии селективного лазерного сплавления

Благодаря технологии СЛС, разработанной для производства деталей из металлов, стала возможна разработка новых конструкционных материалов, создание деталей сложной геометрической формы, а также создание деталей с заданными микроструктурой и механическими свойствами.

### 3.1 МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СЛС

Процесс изготовления деталей технологией СЛС включает в себя локальный нагрев, плавление и затвердевание материала движущимся источником тепла, таким как лазер, слой за слоем. В результате этого различные участки детали испытывают различное количество циклов повторного нагревания и охлаждения. Пространственные термические циклы приводят к формированию остаточных напряжений и как следствие к короблению деталей.

На рис. 2 представлены данные распределения температуры по слоям при СЛС металлического порошка сплава Inconel 718. Видно, что платформа построения действует как теплоотвод. При СЛС



верхних слоев теплообмен через платформу построения уменьшается, что приводит к увеличению максимальной температуры в верхних слоях. Скорость сканирования лазерным излучением металлического порошка в технологии СЛС достаточно высока, что приводит к формированию вытянутого контура температуры за источником тепла и сжатым перед ним. Непостоянное и неравномерное в пространстве распределение температуры приводит к образованию остаточных напряжений [7].

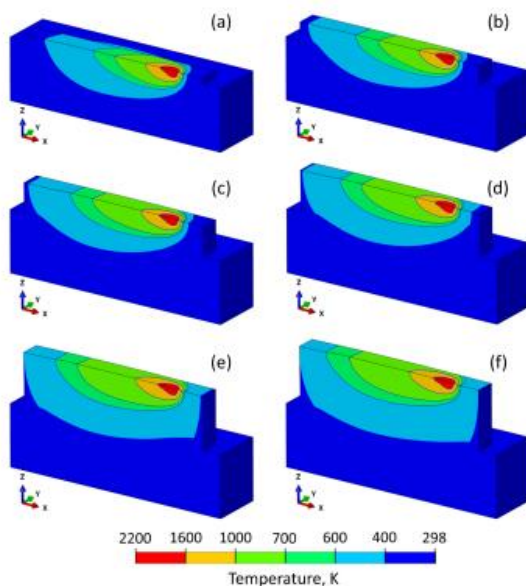


Рис. 2. Распределение температуры при СЛС металлического порошка сплава Inconel 718 на платформе построения [7]:

a - СЛС первого слоя; b - СЛС третьего слоя; c - СЛС пятого слоя; d - СЛС седьмого слоя; e - СЛС девятого слоя; f - СЛС десятого слоя

На рис. 3 показано изменение продольного поля деформаций при СЛС металлического порошка Inconel 718. С добавлением новых слоев в заготовке накапливается большое количество тепла. Помимо

этого, возрастает максимальная температура в зоне сплавления, а также увеличивается бассейн расплава. Жесткость верхних слоев снижается по мере увеличения температуры. Поэтому величина деформаций возрастает в верхних слоях заготовки. Исследования показывают, что тонкостенные вытянутые структуры более подвержены деформациям, чем более короткие [7].

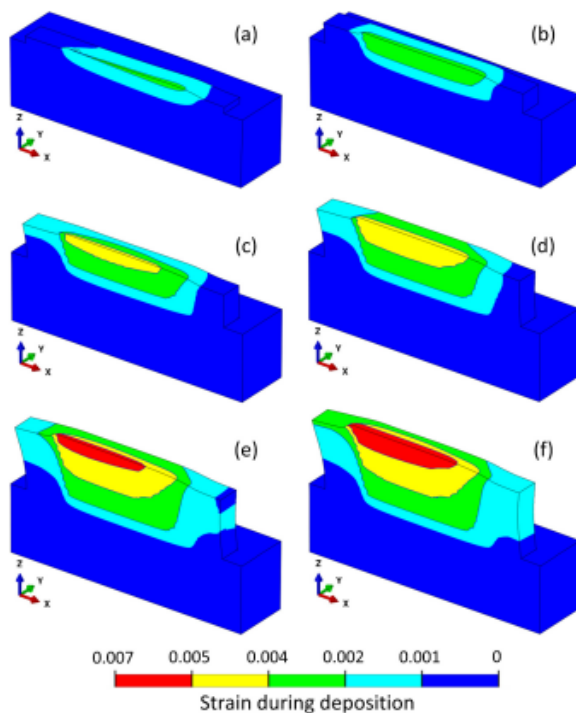


Рис. 3. Распределение деформаций при СЛС металлического порошка сплава Inconel 718 на платформе построения [7]:  
а - СЛС первого слоя; б - СЛС третьего слоя; в - СЛС пятого слоя; д - СЛС седьмого слоя; е - СЛС девятого слоя; ф - СЛС десятого слоя

### **3.2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СЛС ВЛИ- ЮЩИЕ НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Технология СЛС обладает большими преимуществами и возможностями по сравнению с традиционными технологиями производства [8]. Однако остаточные напряжения, возникающие при изготовлении деталей, накладывают серьезные ограничения на практическое применение этой технологии, поскольку они приводят к деформации изготавливаемых деталей и/или к образованию микротрещин. Помимо этого, большие значения остаточных напряжений могут существенно уменьшать механические свойства изготавливаемых деталей.

Деформации, возникающие в процессе СЛС относятся к типу «сварочных деформаций». Под термином «сварочные деформации» понимаются перемещения различных точек изготавливаемого изделия, такие как укорочение, изгиб, поворот сечений, потеря устойчивости листовых элементов. Следовательно, во время изготовления деталей технологией СЛС происходит искажение форм и размеров деталей. Тонкостенные участки (толщиной менее 0,5 мм), нависающие части деталей и любой другой тип геометрии, который обладает низкой геометрической жесткостью, больше всего страдают от этих деформаций.

Выбор оптимальных параметров процесса СЛС (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, стратегия сканирования, шаг сканирования и т.д.), а также подбор процесса термической обработки деталей позволяет уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций.

В настоящей работе будет рассмотрено влияние выбора стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений в деталях.

#### ***Стратегия сканирования***

Стратегия сканирования определяется как способ, которым текущий слой заполняется сканирующими векторами. Выбор стратегии сканирования влияет на распределение температуры в процессе СЛС. Распределение температуры влияет на такие свойства синтезируемого материала как плотность, тепловые и остаточные напряжения, микроструктуру и т.д.

Самая общая стратегия сканирования, заключается в том, что лазер перемещается зигзагообразно по траектории заданной векторами как показано на рис. 4 б. В тот момент, когда лазер приближается к границе сплавляемой зоны он может либо замедлиться, повернуться и снова разогнаться при неизменной мощности лазерного излучения, либо, как только он достиг границы сплавляемой зоны выключить лазерное излучение, произвести поворот и ускорение до нужной скорости сканирования в не зоны сплавления, а затем включить лазерное излучение при пересечении границы зоны сплавления.

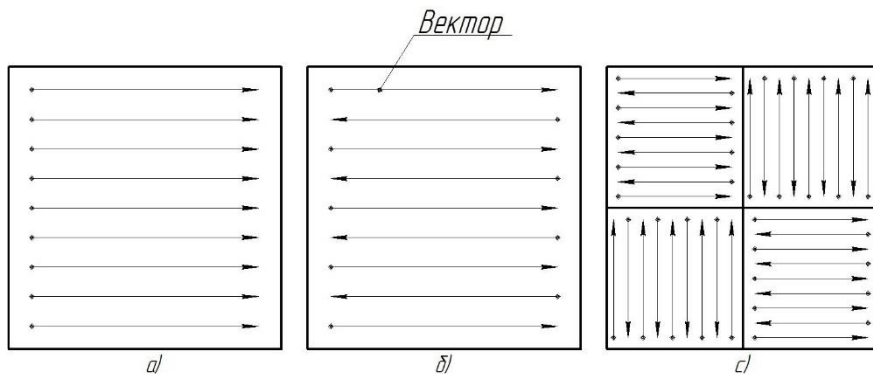


Рис. 4. Виды стратегий сканирования:  
 а - однонаправленная; б - зигзагообразная; с - шахматная

Однонаправленная стратегия сканирования, показанная на рис. 4 а, ведет к снижению плотности синтезируемого материала и в настоящее время практически не применяется [9]. Стратегия сканирова-

ния, показанная на рис. 4 с, заключается в том, что область сканирования делится на более мелкие участки, которые сканируются с определенной последовательностью. Такое разделение большой зоны сплавления на более мелкие участки позволяет сократить длину векторов сканирования, что приводит к уменьшению остаточных напряжений [10]. Стратегия и параметры сканирования внутри более мелкого участка могут задаваться отдельно. Также можно задавать габариты этих участков, порядок их заполнения, поворот стратегии сканирования на соседних участках, наложение двух соседних участков друг на друга и другие параметры.

### ***Термическая обработка***

Снижению остаточных напряжений способствует термическая обработка в виде отжига [2].

Отжиг после СЛС является наиболее эффективным способом уменьшения остаточных напряжений и одновременно позволяет улучшить пластические свойства и выровнять структуру металла в различных зонах детали. Отжиг может быть общим, при котором нагревается все изделие, и местным, когда нагреву подвергают лишь часть детали. Наиболее часто применяют отжиг при температуре нагрева 550–680 °С без зажимных приспособлений. Обычно операция отжига выполняется в три стадии нагрев – выдержка при температуре отжига – охлаждение. После выдержки производится естественное охлаждение на воздухе.

Отжиг целесообразен, когда изготовление детали технологией СЛС связано с последующей обработкой резанием, повышенными требованиями к точности, стабильности формы и геометрических размеров при эксплуатационных нагружениях, а также в тех случаях, когда необходимо повысить сопротивляемость хрупким разрушениям при низких температурах [2, 10].

Остаточные напряжения при отжиге уменьшаются двумя путями [2]:

1) *В следствии пластической деформации в условиях, когда эти напряжения превысят предел текучести.* Так как остаточные напряжения являются упругими, по закону Гука они пропорциональны модулю упругости и величине упругой деформации. С ростом температуры модуль упругости слабо снижается и соответственно слабо уменьшаются остаточные напряжения. Выше некоторой температуры предел текучести становится ниже остаточных напряжений и происходит пластическая деформация, в результате которой остаточные напряжения уменьшаются до значения предела текучести. При напряжениях выше предела текучести генерируется множество дислокаций, скольжение которых приводит к очень быстрой пластической деформации. Считается что степень разрядки остаточных напряжений по такому механизму определяется температурой отжига, а не его продолжительностью.

2) *В результате ползучести при напряжениях меньше предела текучести.* В деталях, в которых остаточные напряжения меньше предела текучести, упругая деформация может с течением времени переходить в пластическую. В области температур, где остаточные напряжения меньше предела текучести, ползучесть является единственно возможным механизмом из уменьшения. При напряжениях меньше предела текучести не происходит массового скольжения дислокаций. Медленное пластическое течение осуществляется перемещением ограниченного числа легкоподвижных дислокаций. Встречаясь с препятствиями скользящие дислокации тормозятся. Истощение легкоподвижных дислокаций приводит к затуханию ползучести, а уменьшение остаточных напряжений еще более усиливает это затухание.

#### **4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Большинство существующих методов определения остаточных напряжений в цилиндрических деталях относится к механическим методам (применение которых почти всегда сопровождается разрушением изделия), из которых наибольшее практическое применение получили методы Г. Закса и Н.Н. Давиденкова. Метод Г. Закса заключается в послойном растачивании или обтачивании цилиндра с измерением окружной и осевой деформации на внешнем или внутреннем радиусе соответственно, и позволяет определить одновременно окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения. При этом отмечается, что данный метод является весьма трудоемким, длительным, а кроме того, предъявляет высокие требования к измерительной технике из-за малой величины подлежащих учету деформаций. В случаях, когда необходимо определить только окружные остаточные напряжения, для снижения трудоемкости и экономии времени выгодно использовать метод Н.Н. Давиденкова, ограничиваясь при этом разрезкой цилиндра вдоль образующей и измерением возникающего изменения его среднего диаметра, без последующего послойного удаления металла с внутренней поверхности цилиндра [11].

Однако применение этих методов для определения остаточных напряжений в деталях, изготовленных технологией СЛС не всегда возможно.

Для анализа остаточных напряжений в деталях, изготовленных технологией СЛС в настоящее время применяется новый качественный метод. Метод основан на измерении кри-

визны образца изготовленного в виде моста (Bridge Curvature Method). После отделения изготовленного образца от платформы построения, внутренние остаточные напряжения частично релаксируют и образец сворачивается под определенным углом, что дает информацию об остаточных напряжениях в синтезируемом материале (рис. 5). Угол скручивания  $\alpha$  является полуколичественным индикатором величины остаточного напряжения внутри детали. Используя конечно элементную модель образца и зная угол скручивания  $\alpha$  можно вычислить количественные значения напряжений [12].

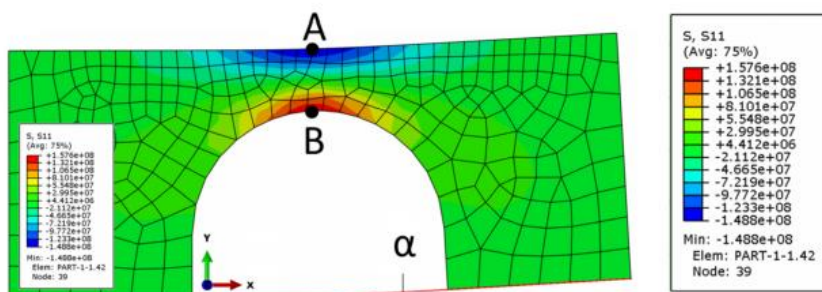


Рис. 5. Виды стратегий сканирования: [12]

Однако и этот метод не дают полной информации о распределении полей остаточных напряжений по объему детали, поскольку позволяют экспериментально определить лишь одну или две компоненты остаточных напряжений, причем только в области, прилегающей к поверхности платформы построения. Данный метод позволяет определять только результирующее значение остаточных напряжений. А для оценки влияния технологических параметров на уровень остаточных напряжений необходимо иметь представление об уровне остаточных напряжений в каждом слое. Для этих целей был разработан собственный метод определения остаточных напря-



жений в деталях, изготовленных технологией СЛС, который включает в себя преимущества метода Bridge Curvature Method. Совмещение метода Bridge Curvature Method с методом академика Н.Н. Давиденкова позволяет определять уровень остаточных напряжений в каждом слое с большой точностью.

#### 4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЛАДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЬЦАХ

Исследование уровня остаточных напряжений производится на гладких цилиндрических кольцах (рис. 6). Цилиндрические кольца изготавливаются технологией СЛС на оптимальных технологических режимах, полученных с использованием методов математического моделирования. С целью исследования влияния стратегии сканирования на уровень остаточных напряжений кольца изготавливались с использованием двух типов стратегий: шахматная «chess» и зигзагообразная «strips».

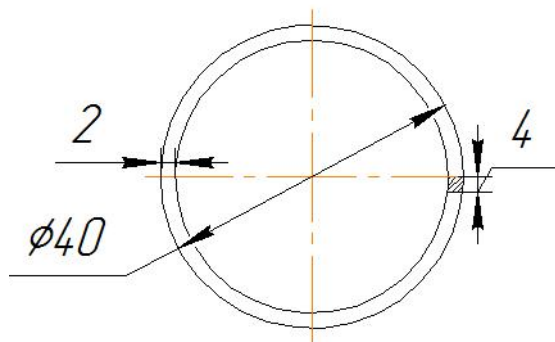


Рис. 6. Гладкое цилиндрическое кольцо

Для исключения внесения дополнительных напряжений, разрезка колец осуществляется с использованием электроэрозионной обработки. Перед химическим травлением измеряется масса образцов, а также их размер в соответствии со схемой, представленной на рис. 7.

На основании величин  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$  можно судить о величине остаточных напряжений.

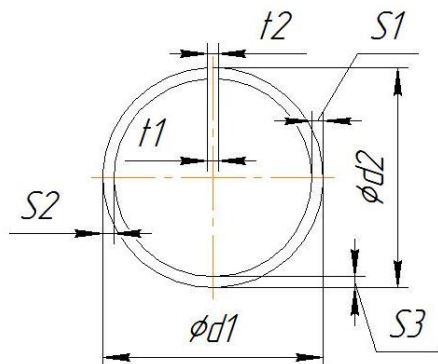


Рис. 7. Контролируемые величины

#### 4.2 СНЯТИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГЛАДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕЦ

Для снижения остаточных напряжений в образцах, изготовленных технологией СЛС из отечественного металлического титанового сплава ВТ6 применяется два типа термической обработки. Один образец подвергается термической обработке в виде низкого отжига (рис. 8).

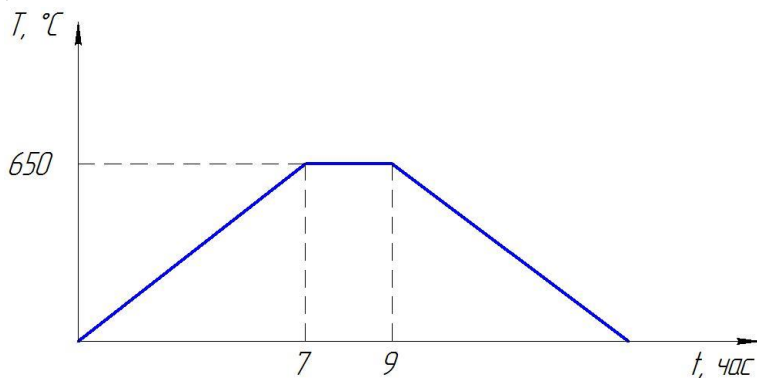


Рис. 8. Схема проведения низкого отжига

Второй образец подвергается термической обработке в виде высокого отжига (рис. 9).

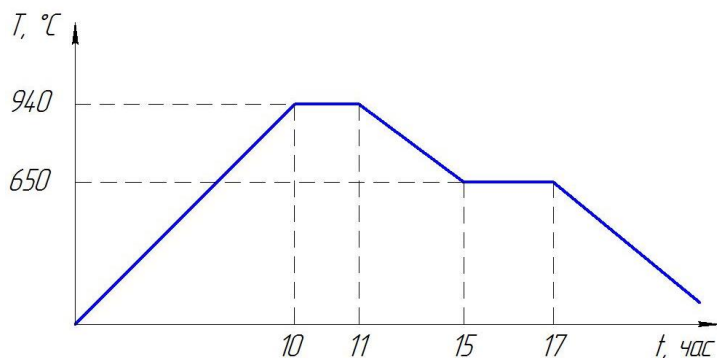


Рис. 8. Схема проведения высокого отжига

Также образцы подвергались термической обработке, включающей в себя низкий отпуск, а затем высокий отпуск.

### 4.3 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЛАДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕЦ

Для измерения значений параметров  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$  гладких цилиндрических колец используется большой инструментальный микроскоп. Большой инструментальный микроскоп позволяет производить измерение величин необходимых параметров без погрешностей, вызванных приложением усилий зажима.

Большой инструментальный микроскоп (рис. 9) имеет массивное основание 1, на котором расположен стол 2. В центре верхней площадки стола установлено стекло 17, что, благодаря наличию осветительного устройства 3, позволяет получать чёткие контурные изоб-

ражения измеряемых деталей. Измеряемая деталь либо непосредственно, либо с помощью различных приспособлений, устанавливается на столе и может перемещаться вместе с ним в продольном и поперечном направлениях с помощью микрометров продольного хода 14 и поперечного хода 16. Таким образом, перемещая стол с измеряемой деталью в продольном или в поперечном направлениях и производя отсчёт по шкалам соответствующих микрометров, можно измерять линейные размеры деталей. При этом цена одного деления шкалы, нанесённой на стебле каждого микрометра, составляет 1мм, а шкалы нанесенной на барабане, – 0,005 мм [13].

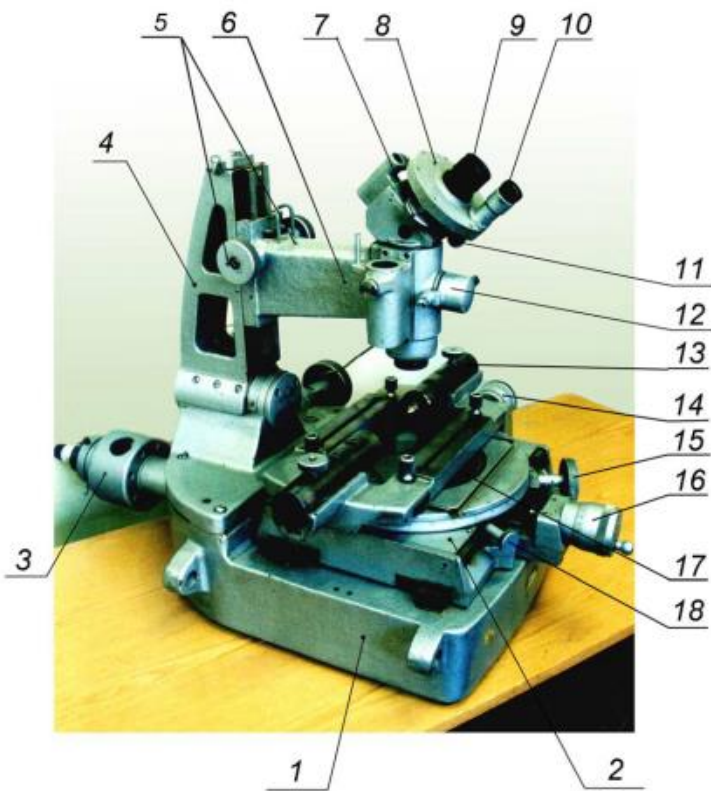


Рис. 9. Большой инструментальный микроскоп

#### 4.4 ПОСТРОЕНИЕ ГИСТОГРАММЫ ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ СКАНИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Производятся измерения геометрических параметров гладких цилиндрических колец в соответствии со схемой, представленной на рис. 7. Результаты измерений заносятся в табл. 1.

Таблица 1 – Значения геометрических параметров гладких цилиндрических колец

Стратегия сканирования	Вид термической обработки	d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	t <sub>1</sub> , мм	t <sub>2</sub> , мм
strips	без термической обработки	40,25	40,22	1,31	1,28
	низкий отжиг	40,28	40,21	1,33	1,46
	низкий отжиг 10 часов	40,25	40,35	1,34	1,63
	низкий + высокий отжиг	39,8	40	0,4	0,31
	высокий отжиг	39,83	39,92	0,47	0,38
chess	без термической обработки	40,13	40,23	1,56	1,57
	низкий отжиг	40,25	40,37	1,1	1,28
	низкий отжиг 10 часов	40,1	40,2	1,28	1,36
	низкий + высокий отжиг	39,9	39,9	0,32	0,36
	высокий отжиг	39,83	39,75	0,38	0,33

На основании замеренных данных строится гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений (рис. 10).

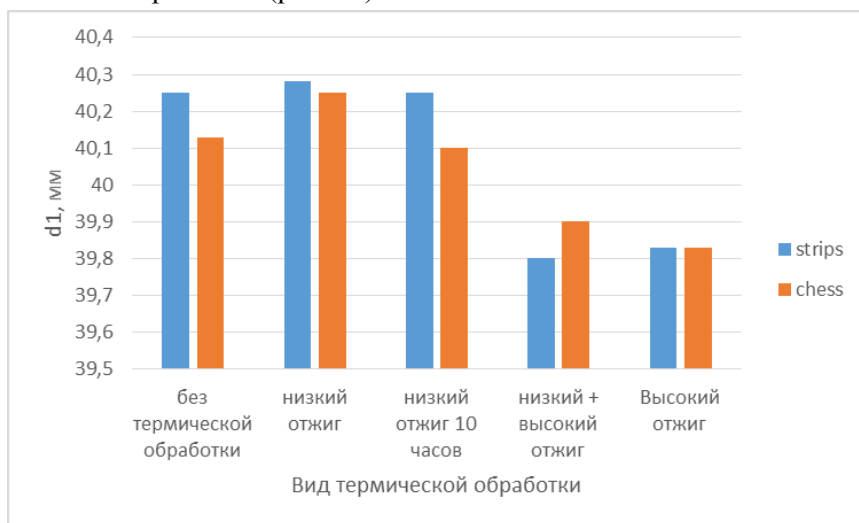


Рис. 10. Гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметру  $d_1$

На основании полученных данных делают вывод о влиянии выбора стратегии сканирования и вида термической обработки на уровень остаточных напряжений в гладких цилиндрических кольцах.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В процессе выполнения работы оформляется отчет, бланк которого приведен в приложении 1. В отчете приводятся: схема изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления; схема контролируемых величин; результаты измерений параметров гладких цилиндрических колец; гистограммы влияния стратегии скани-

рования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметрам  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $t_1$  и  $t_2$ .

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Селективное лазерное сплавление это?
2. Назовите основные параметры СЛС?
3. Какой вид термической обработки применяется для снятия остаточных напряжений?
4. Какие виды стратегий сканирования применяются в технологии СЛС?
5. Опишите процесс формирования остаточных напряжений в процессе СЛС?
6. Основные способы определения остаточных напряжений?
7. Суть метода академика Н.Н. Давиденкова?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Моргунов А.П., Чхетиани Е. Ю.* Технологическое обеспечение точности механической обработки тонкостенных деталей авиационных двигателей // Омский научный Вестник. 2012. № 1(107). С. 130-132.
2. Сварочные напряжения и деформации: методические указания к лабораторным работам. Часть I и II / Сост. Т.Ю. Малеткина. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – 26 с.
3. *Граф Б., Гок С.Э., Гуменюк А.В., Петмайер М.* Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы // Известия высших учебных заведений. 2016. № 3(20). С. 34-42.
4. *Keicher D.M., Miller W.D.* Metal powder report // 1998. 53:26.
5. *Lewis G.K., Nemes R.B., Milewski J.O., Thoma D.J., Cremers D., Barbe M.R.* Directed light fabrication. In: Proceedings of the ICALEO'94 // Laser Institute of America, Orlando. 1994. С. 17.
6. *House M.A., Whitney E.J., Krantz D.G., Arcella F.G.* Rapid laser forming of titanium near shape articles: LaserCast // In: Proceedings of the solid freeform fabrication symposium, Austin, TX. 1996. С. 239.
7. *Mukherjee T., Zhang W., DebRoy T.* An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing // Computational Materials Science. 2017. № 126. С. 360–372.
8. *Kruth, J., Mercelis, P., Froyen, L., Rombouts, M.* Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting // Rapid Prototyping Journal. 2006. № 11(1) С. 26–36.
9. *Nickel, A.H., Barnett, D.M., Prinz, F.B.* Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing // Materials Science and Engineering: A. 2001. № 317(1-2) С. 59–64.
10. Теория термической обработки: учебник для вузов .4-е изд., перераб. И доп. / Новиков И.И.: Металлургия, 1986. - 480 с.

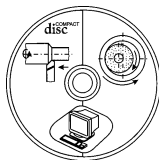


11. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Бознак А.О., Оголь И.И. Применение метода Н.Н. Давиденкова для оценки окружных остаточных напряжений в обработанных дорнованием полых цилиндрах // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32) С. 65–70.

12. Vrancken B., Wauthle R., Kruth J.-P., Humbeeck J. Van Study of the influence of material properties on residual stress in selective laser melting // Solid Freeform Fabrication Symposium location: Austin, Texas, USA date:12-14 August 2013. С. 393 – 407.

13. Бурмистров Е. В. Измерение параметров резьбы: методические указания к лабораторной работе / Е. В. Бурмистров – Самара.: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, 2014. – 27 с.

*Кафедра  
технологий производства  
двигателей*



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

### ОТЧЕТ

по лабораторной работе **«ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕ-  
ЖИМОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА  
КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК»**

*Цель работы:*

1. Схема изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления

## 2. Определение геометрических параметров гладких цилиндрических колец

Стратегия сканирования	Вид термической обработки	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$t_1$ , мм	$t_2$ , мм
strips					
chess					

3. Построение гистограмм влияния стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений

*Гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметру  $d_1$*

без термической обработки    низкий отжиг    низкий отжиг 10 часов    низкий + высокий отжиг    Высокий отжиг  
 Вид термической обработки

*Гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметру  $d_2$*

—  
:  
—

без термической обработки	низкий отжиг	низкий отжиг 10 часов	низкий + высокий отжиг	Высокий отжиг
---------------------------------	-----------------	-----------------------------	------------------------------	------------------

Вид термической обработки

*Гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметру  $t_1$*

—  
:  
—

без термической обработки	низкий отжиг	низкий отжиг 10 часов	низкий + высокий отжиг	Высокий отжиг
---------------------------------	-----------------	-----------------------------	------------------------------	------------------

Вид термической обработки

*Гистограмма влияние стратегии сканирования и термической обработки на уровень остаточных напряжений по параметру  $t_2$*

без термической обработки	низкий отжиг	низкий отжиг 10 часов	низкий + высокий отжиг	Высокий отжиг
Вид термической обработки				

## 5. Индивидуальное задание

## 6. Выводы по работе

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СЕЛЕКТИВНОГО  
ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК**

Методические указания

Составитель *Агаповичев Антон Васильевич*  
*Сотов Антон Владимирович*  
*Смелов Виталий Геннадиевич*

Редактор

Компьютерная правка

Подписано в печать . Формат 60x84 1/17.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. .

Тираж экз. Заказ \_ \_\_\_\_ . Арт. - /2017.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.