

*Савиных А.А.*

*студент*

*6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»*

*Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»*

*им. Д.Ф. Устинова*

*Россия, г. Санкт-Петербург*

*Двойникова Е.В.*

*студент*

*6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»*

*Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»*

*им. Д.Ф. Устинова*

*Россия, г. Санкт-Петербург*

*Астахов А.М.*

*студент*

*6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»*

*Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»*

*им. Д.Ф. Устинова*

*Россия, г. Санкт-Петербург*

*Кутилин А.А.*

*студент*

*6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»*

*Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»*

*им. Д.Ф. Устинова*

*Россия, г. Санкт-Петербург*

*Чернов К.М.*

*студент*

*6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»*

*Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»*

*им. Д.Ф. Устинова*  
*Россия, г. Санкт-Петербург*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГОФРИРОВАННЫХ ПРОСТАВОК ДЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖРД ТРАДИЦИОННЫМИ И ЛАЗЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

**Аннотация.** В статье рассматривается изготовление гофрированных проставок для камер сгорания ЖРД традиционными и лазерными технологиями. Целью работы является сравнительный анализ существующих методик. В процессе работы выявлялись особенности каждого из методов, их достоинства и недостатки. В результате сделаны выводы о целесообразности применения каждого из методов в конкретных случаях производства.

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, гофрированная проставка, гофра, камера сгорания, стенка.

**Annotation.** The article discusses the production of corrugated spacers for liquid propellant rocket engine combustion chambers using traditional and laser technologies. The aim of the work is a comparative analysis of existing methods. In the course of the work, the features of each method, their advantages and disadvantages were identified. As a result, conclusions were made about the feasibility of using each method in specific production cases.

**Keywords:** liquid propellant rocket engine, corrugated spacer, corrugation, combustion chamber, wall.

### **Введение**

В данной статье рассматриваются технологии производства гофрированных проставок для камеры сгорания ЖРД. Гофрированные проставки служат для соединения оболочек между собой и формирования межрубашечного пространства – тракта для протекания охлаждающего

компонента топлива. Для изготовления гофров используют традиционные методы, которые включают в себя штамповку и прокатку.

Однако современное производство камер сгорания ЖРД всё чаще использует лазерные технологии для изготовления гофрированных проставок. Лазерная резка и сварка позволяют создавать сложные геометрические формы с высокой точностью, а также обеспечивают возможность изготовления проставок из широкого спектра материалов, включая специальные сплавы.

### **1 Особенности конструкции и требования**

Камеры сгорания с оболочками, связанными при помощи гофрированных проставок широко применяются как в двигателях большой мощности, так и в маломощных (рулевых). При помощи гофрированных проставок обеспечивается необходимый зазор между оболочками для протекания охлаждающего компонента.

Проставки позволяют регулировать скорость протекания жидкости в межрубашечном пространстве и тепловой режим стенки КС. Профиль сечения проставок зависит от места их расположения в стенке КС, например на входе в область критического сечения проставки, как правил, изготавливаются с винтовыми гофрами. Оболочки с проставками соединяются пайкой. Конструкция получается прочной и достаточно лёгкой.

Двигатели с КС, выполненными с использованием гофрированных проставок, достаточно надёжны и обладают хорошими конструктивными показателями. Однако изготовление таких КС трудоёмко и требует на всех участках сборки весьма тщательного контроля.

Соединяются части паяных КС между собой, обычно, сваркой.

В КС с гофрированными проставками не допускается:

- полное заплавление каналов;
- частичное заплавление каналов со стороны огневого днища;
- оребрение со стороны огневой стенки;
- окисление узла.

На рисунке 1 представлен общий вид КС с гофрированными проставками.

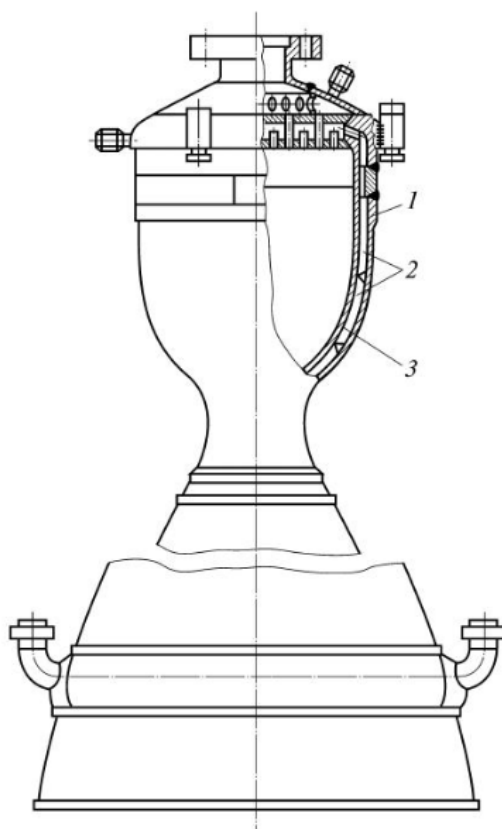


Рисунок 1 – Общий вид КС с гофрированной проставкой: 1 – рубашка, 2 – гофрированные проставки; 3 – стенка

## **2 Материалы, используемые при изготовлении гофрированных проставок, стенки и рубашек**

Гофрированные проставки в процессе работы двигателя подвергаются действию протекающего компонента. Сложная их конфигурация обуславливает высокие технологические свойства материалов проставок, особенно по холодной штампуемости и способности к пайке. Материалом для них служат малоуглеродистые стали 08КП и 10КП, иногда нержавеющей сталь Х18Н9Т. Также используют сплавы на основе меди.

Стенка двигателя подвергается непосредственному воздействию давления горячих газов и коррозионному действию компонентов, протекающих в межрубашечном пространстве. Для лучшего отвода тепла материал стенки должен обладать хорошей теплопроводностью и

конструктивно часто имеет небольшую толщину. Стенка обычно изготавливается из листовой нержавеющей стали X18H9T, жаропрочных (ЭИ659) или титановых сплавов.

Рубашка в большинстве КС подобного типа является основным несущим элементом конструкции, воспринимающим силовые воздействия от работающего двигателя. Кроме силовых нагрузок рубашка подвергается коррозионному действию протекающих в межрубашечном пространстве компонентов. Рубашка обычно изготавливается толще, чем стенка, и иногда толщина меняется по длине КС. В качестве конструкционных материалов для рубашки применяются легированные стали ЭИ654, ЭИ763 (23Х2Н13ФА), ЭИ811 (Х21Н5Т), ЭП-56, 10Х16Н45А, 12Х2НВФА, 21Х2НВФА, иногда титановые сплавы.

Рассмотрим на примере РД-107.

Гофрированные проставки выполнены из сплава №5 на медной основе. В зависимости от вида легирующих компонентов медные сплавы могут иметь высокие электро- и теплопроводность, пластичность и прочность при высоких температурах, могут быть устойчивыми к износу и агрессивным средам, а также высокоупругими. Медь хорошо сопротивляется коррозии, легко обрабатывается давлением, но плохо резанием и имеет невысокие литейные свойства из-за большой усадки. Так же используют малоуглеродистые и нержавеющей стали.

В данном случае для рубашки сопла используют Сталь 12Х2НВФА, т.е. содержит 0,12% углерода, 2% хрома, до 1 % никеля, вольфрама и ванадия. Сталь высококачественная с содержанием фосфора и меры менее 0,025%.

Конструкционная легированная высококачественная с низким содержанием углерода сталь. Хорошо сваривается ручной дуговой контактной и агроно-дуговой (ручной и автоматической) сваркой; удовлетворительно – атомноводородной и газовой сваркой.

Сталь жаропрочная, имеет повышенные прочностные свойства, не склонны к хрупкости. Упрочняется путём термической обработки (закалки в масле с последующим отпуском или нормализации с отпуском).

### **3 Технологические процессы производства камеры сгорания с гофрированной проставкой**

Производство камеры сгорания ракетного двигателя с гофрированной проставкой включает в себя несколько ключевых технологических процессов:

1) Изготовление основной структуры камеры сгорания. Обычно это делается путём литья или использованием специальных процессов обработки металла, таких как фрезерование, сверление и токарная обработка. Материал для изготовления должен быть прочным и способным выдержать высокие температуры и давления.

2) Гофрирование проставки. Для создания гофрированной проставки может использоваться процесс тиснения, штамповки или лазерной обработки.

3) Соединение проставок с основной структурой. Этот процесс может включать в себя швы сварки или другие методы соединения для обеспечения надёжной и герметичной конструкции.

4) Окончательная обработка. После того как проставка присоединена к основной структуре, камера сгорания может потребовать окончательной обработки, такой как термообработка, термическая обработка поверхности, обработка электроискровым разрядом или же другие технологические процессы для обеспечения нужных характеристик и качества.

### **4 Изготовление гофрированных проставок**

Гофрированные проставки изготавливают из ленты толщиной 0,3...0,8мм, высота гофров составляет 2,5...8,0мм. Сечение проставок имеет трапецеидальный или синусоидальный профиль.

Требования предъявляемые к гофрированным проставкам:

- правильность геометрической формы и точность размеров проставок по профилю и длине;

- несимметричность профиля (завал гофров) и уточнение не должны превышать 0,05 мм;
- концы гофрированных проставок должны соединяться сваркой или пайкой с подправкой профиля;
- на торцах проставок не должно быть заусенцев.

Пояса гофрированных проставок располагаются на средней и нижней части КС. Гофры могут быть цилиндрическими, фасонными и коническими. По длине гофрированные проставки имеют переменное сечение и поэтому изготавливаются поясами.

## 5 Изготовление гофрированных проставок традиционным методом

### 5.1 Традиционные методы

Гофрированные проставки выполняются на прессах в специальных штампах или прокаткой на профилированных валках. При изготовлении гофрированных проставок на прессах предварительно вырезают заготовки в виде лент, которые затем формируются в штампах. Штамп для получения проставок, изображённый на рисунке 2, имеет прижимной пуансон, фиксирующий гофр, гибочный пуансон, изгибающий гофр и заставляющий продвигаться свободный конец ленты.

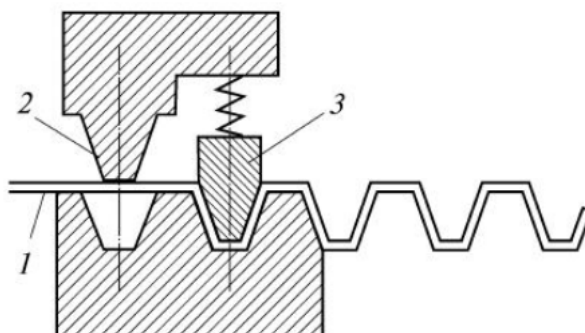


Рисунок 2 – Штамп для получения гофрированных проставок: 1 – заготовка (лента); 2 – гибочный пуансон; 3- прижимной пуансон

Этот способ наиболее распространён и универсален, но малопроизводителен. В настоящее время созданы автоматизированные

штампы, сложные в изготовлении, но имеющие более высокую производительность. Таким способом получают проставки с прямыми и косыми (винтовыми) гофрами.

Другой способ выполнения гофров – прокатка гладкой ленты между специально спрофилированными валками представлен на рисунке 3. Валки имеют специальный скорректированный эвольвентный профиль, поэтому гофры получаются трапецеидальной формы.

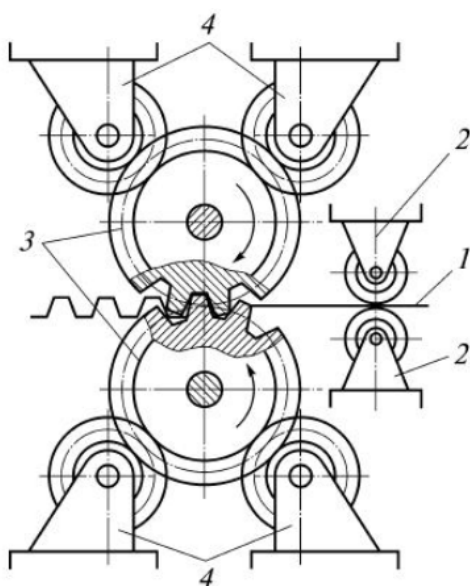


Рисунок 3 – Схема прокатки гофрированных проставок на профилированных валках: 1 – заготовка; 2 – подающие ролики; 3 – профилированные формирующие валки; 4 – поддерживающие валки

Достоинства этого метода – сравнительная простота применения оснастки и высокая производительность.

После формовки проставки из неё вырезается заготовка, концы которой соединяются аргонодуговой сваркой или пайкой. Сварка ведётся газовой горелкой с использованием флюса. После сварки или пайки проставок проводят механическую обработку гофрированных поясов. Схема показана на рисунке 4.

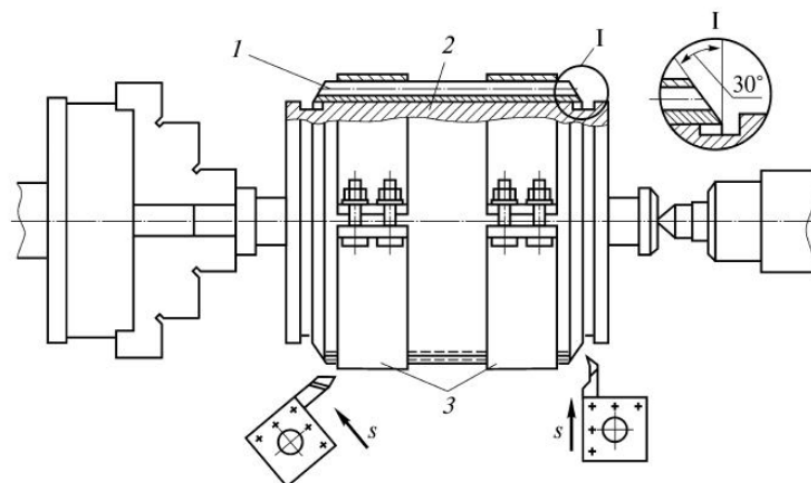


Рисунок 4 – Схема механической обработки поясов гофрированных проставок: 1 – пояс гофрированных проставок; 2 – оправка; 3 – гибкие бандажи

Заготовку устанавливают на оправке, закрепляют бандажными кольцами и обрабатывают на токарном станке. При этом сначала осуществляют подрезку торцов в размер, а затем – образование резцом угла (обычно  $30^\circ$ ). Обработку ведут резцами с малыми глубинами резания и подачи. В процессе токарной обработки торцов образуются заусенцы, удаляемые либо шабером, либо надфилем. В последнее время на этой операции применяют более прогрессивные методы обработки, не образующие заусенцы: анодно-механическую обработку дисками и электро-эрозионную обработку.

Обработку торцов гофрированных поясов под угол выполняют во избежание уменьшения проточных сечений в местах стыковки гофрированных поясов.

После изготовления поясов гофрированных проставок контролируют их размеры и завал гофров по профилю, а также проводят травление и осветление, в некоторых случаях наносят никелевое покрытие. [1]

## **5.2 Достоинства и недостатки изготовления традиционными методами**

К достоинствам относятся:

- Опыт и доступность. Традиционные методы изготовления широко распространены и у многих производителей есть опыт и доступность оборудования для их реализации;
- Прочность. Изделия, изготовленные традиционными методами, обычно обладают хорошей прочностью, что особенно важно для ракетных двигателей.

К недостаткам же относится:

- Сложность изготовления сложных форм. Традиционные методы могут затруднять создание сложных геометрических форм, что может быть необходимо для оптимизации производительности и эффективности камер сгорания ракетных двигателей;
- Материальные потери. Некоторые традиционные методы обработки могут привести к большим потерям материалов из-за отходов и стружки;
- Длительное время изготовления. Некоторые традиционные методы требуют больше времени на изготовление, что может увеличить производственные затраты и сроки выполнения заказов.

## **6 Изготовление гофрированных проставок лазерными технологиями**

Изготовление гофрированной проставки с использованием лазерных технологий может быть достигнуто с помощью лазерной резки, лазерной сварки.

Рассмотрим каждую технологию:

### **6.1 Лазерная резка**

Лазер может быть использован для вырезания сложных форм и узоров на плоском листе материала, из которого будет изготовлена гофрированная проставка. Это позволяет повысить прочность и эффективность проставки.

1.1. Лазерная резка нержавеющей стали происходит через плавление. Действие сфокусированного лазера на поверхность металла содействует его быстрому нагреву, то есть в этой зоне нержавеющей стали начинается плавление. Равномерное движение лазерного луча позволяет создавать любую форму детали. При избыточном нагреве молекулы металла переходят в фазу закипания, где частицы материала начинают испаряться. [3]

Нержавеющая сталь наиболее часто режется с применением азота под высоким давлением в качестве вспомогательного газа. Это позволяет избежать образования на кромке реза оксидов, которые вызывают коррозию. Типичные параметры резки нержавеющей стали лазером задают расположение фокуса в точке между средней точкой и нижней границей листа. Давления вспомогательного газа обычно достаточно высоки: от 10 бар для тонкого материала до 18 бар для толстого материала. Наиболее распространенные дефекты при резке нержавеющей стали: образование плазмы, которое ведет к сбоям резки и образованию окалины на детали или каркасе. Поскольку луч волоконного лазера может обеспечить меньший фокус по сравнению с промышленными лазерами CO<sub>2</sub>, то разрез должен быть достаточно широким для обеспечения приемлемого потока вспомогательного газа для сдувания расплавленного материала. Технологические карты резки в ЧПУ могут быть хорошим отправным пунктом для оптимизации процесса резки. Прожиг нержавеющей стали достаточно прост при использовании метода, подобного методу одиночной струи для низкоуглеродистой стали. Однако поскольку используется инертный газ, прилегающий материал не обгорает и его температура не влияет на процесс резки. Давление вспомогательного газа для прожига обычно ниже по сравнению с давлением режущего газа, что предотвращает образование плазмы при прожиге. По окончании прожига

необходим процесс деформации металла для установки геометрии разреза. В противном случае разрез будет нестабильным. [4]

При работе с нержавеющей сталью при мощности излучателя 500 Вт скорость резки 1мм составит 5-8 м/мин; 0,3мм - 8 – 12м/мин. Сила тока не превышает 220А. Напряжение дуги 13В. Расход газа – 0,29 (в горелку)/ 0,32 (в насадку)/ 0,1 (для защиты обратной стороны шва) л/с.

1.2. Лазерная резка низкоуглеродистой стали – воздух и азот в качестве вспомогательного газа.

Резка низкоуглеродистой стали с использованием азота в качестве вспомогательного газа подобна резке нержавеющей стали с использованием азота. Воздушную резку низкоуглеродистой стали можно использовать на тонком материале (< 1мм). Давления воздуха обычно лежат в диапазоне между давлением, которое используется для резки с кислородом и азотом. Результирующая кромка резки более шершавая по сравнению с аналогичной кромкой при резке с использованием кислорода или азота. [4]

Так же газовая резка является стандартной техникой, используемой для резки низкоуглеродистой стали (рисунок 5). В качестве режущего газа используется кислород. Перед вдуванием в разрез давления кислорода повышается до 6 бар. Там нагретый материал вступает в реакцию с кислородом: он начинает гореть и окисляться. В результате химической реакции высвобождается большое количество энергии, примерно в пять раз больше энергии лазера. [5]

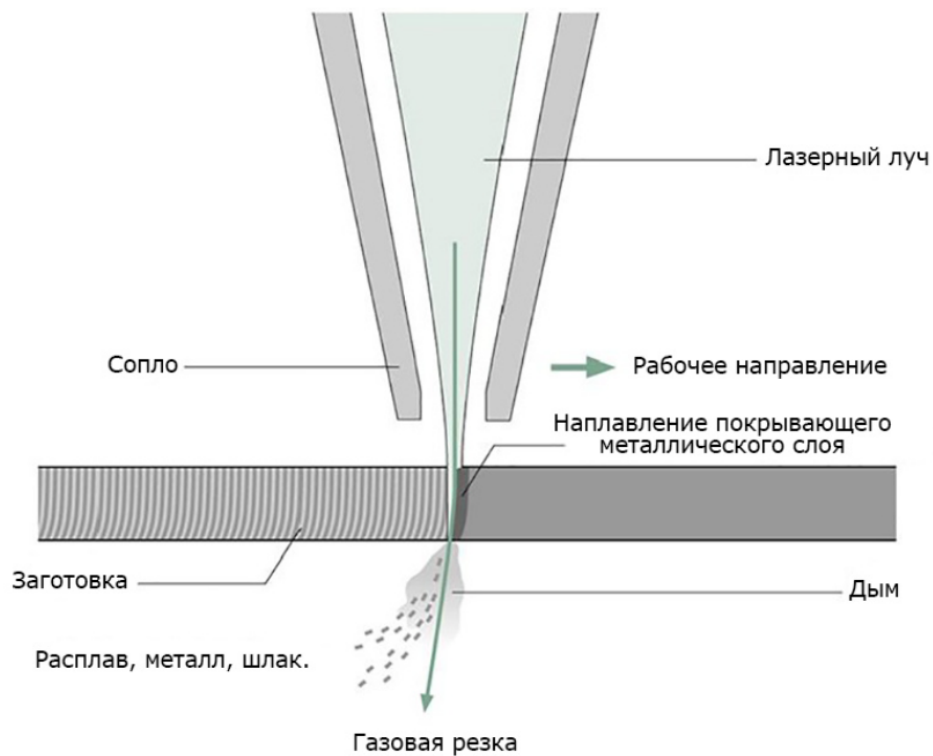


Рисунок 5 – Газовая резка. (лазерный луч плавит заготовку, а ржущий газ сдувает расплавленный материал и шлак в зоне разреза)

Для низкоуглеродистых сталей при толщине металла до 1 мм и мощностью лазера 100 Вт резка должна быть примерно 1,6 м/мин. [6]

### 1.3. Лазерная резка сплавов на основе меди.

Исходя из химического состава, теплофизических характеристик, мягкости металла и лёгкости его деформации, обработка меди и сплавов на её основе имеет ряд технических особенностей. Ввиду высокой отражательной способности меди световое излучение лазера расфокусируется и отражается от поверхности материала, приводя к невозможности лазерного раскроя. Поэтому используется тонкоструйная плазменная резка, обеспечивающая быструю и точную обработку листовых заготовок. Конструктивная схема формирования тонкоструйной плазмы представлена на рисунке 6.

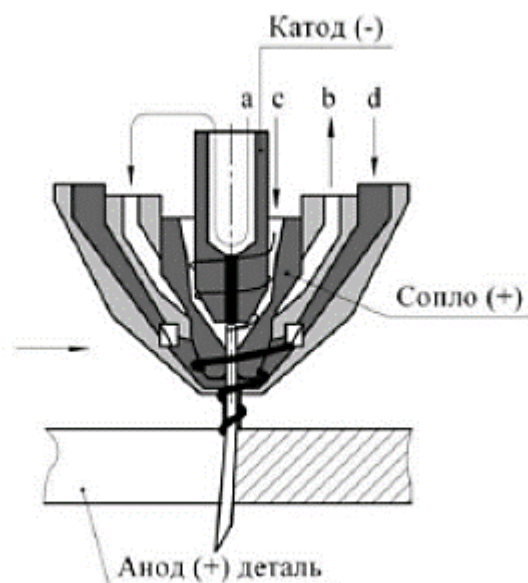


Рисунок 6 – Конструктивная схема формирования тонкоструйной плазмы: а, б – каналы охлаждения катода и сопла; с – канал плазмообразующего газа; д – канал завихряющего газа

Основным отличием тонкоструйной плазменной резки от классического варианта является конструкция плазмотрона, имеющая завихрителя, имеющая завихряющий канал для подачи защитного газа. [7]

Если параметры выбраны правильно, то в разрезе плазменной резки с применением плазменного наплавления появляются плазменные облака.

Плазменное облако состоит из ионизированного пара металла и ионизированного газа для резки.

Плазменное облако поглощает энергию CO<sub>2</sub>-лазера и переводит ее в заготовку, позволяя соединить больше энергии с заготовкой, что позволяет быстрее плавить металл и ускоряет процесс резки.

Поэтому процесс резки также называют высокоскоростной плазменной резкой.

Плазменное облако фактически прозрачно для твердого лазера, поэтому плазменная резка может использоваться только при лазерной резке CO<sub>2</sub>. [5]

## 6.2 Лазерная сварка

Лазерная сварка используется для соединения нескольких листов материала вместе с созданием требуемого гофрированного рельефа. Этот

метод обеспечивает высокую прочность и точность соединения, что важно для гофрированных структур, подвергающимся высоким механическим нагрузкам.

Лазерный луч производит фиксацию изделий следующим образом:

1. Соединяемые элементы плотно фиксируются у соединительной линии;
2. Лазерный луч направляется на стык;
3. Происходит активизация генератора. Устройство равномерно разогревается и затем плавит металлические частицы на кромках. Лишние элементы при данной технологии испаряются.

У луча лазера сечение с небольшими размерами, поэтому полученный сплав исправляет неровности, заполняет трещинки и другие недочеты, попавшие на территорию обработки лазерным лучом. [9]

Для сварки лазером нержавеющей, низкоуглеродистых сталей, сплавов на основе меди используются твердотельные лазеры, схема которого приведена на рисунке 7. В составе таких лазеров имеется особый рубиновый стержень, который также производится из неодимового стекла. Располагается внутри специальной осветительной камеры.

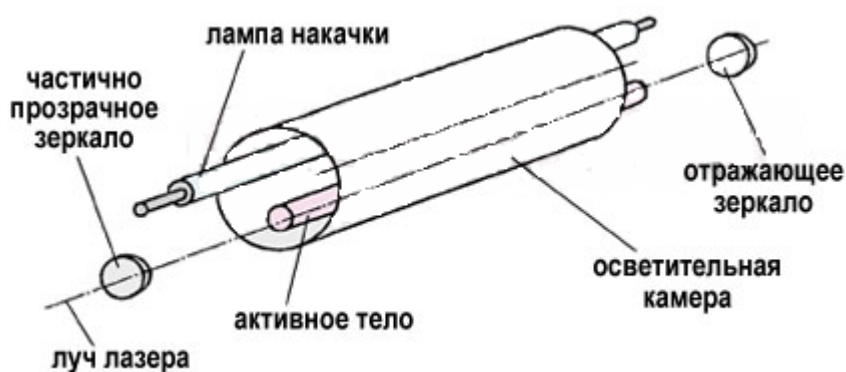


Рисунок 7 – Схема твердотельного лазера

Процесс использования данного вида лазеров выглядит следующим образом:

- а. В осветительную камеру с выбранной частотой направляется луч света с высокими показателями мощности. При этом возникает возбуждение атомных частиц.

б. Появляется световое излучение. Его волны обладают одинаковой длиной.

в. Так как части стержневой детали на торцах состоят из отражающих зеркал, а одно из них является частично прозрачным, именно через него проходит энергия в качестве лазерного излучения. [9]

При толщине до 0,5 мм мощность лазера для низкоуглеродистой и нержавеющей стали составляет 250 Вт. Вид тока постоянный. Сила тока 20-30А. Напряжение 10В. [8]

### **6.3 Аргонодуговая сварка**

Данный вид сварки используется для соединения заготовок.

Для получения полноценного шва применяют присадочную проволоку.

После окончания сварки инертный газ подаётся до тех пор пока металл не остынет до определённой температуры.

Параметры сварки:

- Сила тока не превышает 250 А;
- Число проходов 2;
- Напряжение дуги 13 В;
- Скорость сварки 0,4 см/с;
- Расход аргона – 0.3 (в горелку) / 0.33 (в насадку) /0.1 (для защиты обратной стороны шва) л/с.

### **6.4 Достоинства и недостатки изготовления гофрированных проставок лазерными методами**

К достоинствам относятся:

- Повышенная точность. Лазерные технологии обеспечивают высокую точность обработки, что позволяет создавать сложные геометрические формы с высокой степенью точности;
- Минимализация отходов. Лазерная обработка позволяет сократить количество отходов материала благодаря более эффективному использованию сырья;

- Широкий спектр материалов. Данные технологии позволяют работать с различными материалами, включая металлы, сплав, пластик и композитные материалы;

- Быстрая обработка. Лазерная обработка в большинстве случаев обеспечивает более быструю обработку материалов по сравнению с традиционными методами.

Недостатки изготовления гофрированных проставок лазерными методами:

- Высокие затраты на оборудование. Внедрение лазерных технологий требует значительных инвестиций в специализированное оборудование;

- Высокие требования к обслуживанию. Лазерное оборудование требует специализированного обслуживания и квалифицированного персонала для эксплуатации;

- Ограничения по толщине материала. Для некоторых лазерных технологий может быть ограничена толщина обрабатываемого материала;

- Возможные изменения свойств материала. Лазерная обработка может повлечь за собой изменения металлической структуры и свойств материала.

### **Вывод**

Таким образом, изготовление гофрированных проставок для камеры сгорания ЖРД с использованием традиционным и лазерных технологий обладает своими особенностями и преимуществами. Традиционные методы давно используются и имеют свои преимущества в производстве.

Однако лазерные технологии предлагают более высокую точность, возможность работы с более широким спектром материалов и создания сложных геометрических форм. Это позволяет сократить количество отходов материала и улучшить качество конечного изделия.

Таким образом, использование традиционных и лазерных технологий в процессе изготовления гофрированных проставок для камеры сгорания ЖРД имеет свои преимущества и предоставляет производителям возможность

выбора оптимального подхода в зависимости от требуемых характеристик, материалов и условий производства.

### **Использованные источники:**

1. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: учебник для вузов / Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А., Филимогов А.С.; под ред. Моисеев В.А. и Тарасова В.А. – Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 379, [5] с.

2. Устройство двигателя РД-107: учебное пособие / Кравченко Д.Г., Анискевич Ю.В., Лабанова А.М.; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – 27 с.

3. Процесс и режимы лазерной резки. [Электронный ресурс]/URL: <https://prelektro.ru/pages/process-i-rezhimi-lazernoj-rezki-nerzhaveiki>

4. Hypertherm Fiber Laser Инструкция по эксплуатации — 80709J, 3-я редакция, 81 с. [Электронный ресурс]/URL: [http://kbriko.ru/files/TEORIA/Prog/CypCut/Settings\\_Laser.pdf](http://kbriko.ru/files/TEORIA/Prog/CypCut/Settings_Laser.pdf)

5. Основы лазерной резки – знания, которые вам понадобятся. [Электронный ресурс]/URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/428>

6. Скорость лазерной резки: выбор оптимального оборудования. [Электронный ресурс]/URL: <https://vt-metall.ru/articles/593-skorost-lazernoj-rezki/#:~:text=%D0%94%D0%BB%D1%8F%20%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%8B%D1%85%20%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BA%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%B9%20%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8B,4%2C6%20%D0%BC%2F%D0%BC%D0%B8%D0%BD>

7. Редькин В.Д. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов. / НГТУ. Новосибирск. / Труды №12-1. 2022

8. Настройка мощности лазера в зависимости от свойств материала. [Электронный ресурс]/URL: <https://mnitek.ru/nastrojki-moshhnosti-lazera-v-zavisimosti-ot-svoystv-materiala/>

9. Всё о лазерной сварке: преимущества и недостатки, характеристика, виды, дефекты. [Электронный ресурс]/URL: <https://laserstore.ru/blog/vse-o-lazernoj-svarke/>