

**УДК 621.45.022**

**ББК 39.55**

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ  
С ПОПЕРЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОН ОБРАТНЫХ  
ТОКОВ**

**Сергей Викторович Скоробогатов**

**Московский государственный технический университет  
гражданской авиации (Иркутский филиал)**

**Иркутск, Россия**

**maestro.ru@mail.ru**

**Александр Иванович Исаев**

**доктор технических наук, профессор**

**Московский государственный технический университет  
гражданской авиации (Иркутский филиал)**

**Иркутск, Россия**

**isaew\_alexandr@mail.ru**

С каждым годом эксплуатационные требования, предъявляемые к авиационным силовым установкам, становятся всё жёстче. Камера сгорания, являясь одним из основных элементов двигателя летательного аппарата, определяет показатели его эффективности, экологичности и надёжности. Улучшение данных показателей возможно за счет учета эксплуатационных требований на этапе проектирования камеры сгорания.

Поскольку концепция камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов предполагает наличие множества тонкостенных элементов, а также поверхностей двойной кривизны, то процесс изготовления камеры такой конструкции представляет собой комплексную инженерную задачу.

В статье описана технология изготовления камеры сгорания предлагаемой конструкции на примере экспериментальной модели для камерного стенда.

**Ключевые слова:** камера сгорания, авиационный газотурбинный двигатель, эксплуатационные характеристики, технология изготовления, процесс горения.

## **TECHNOLOGY OF MANUFACTURING SOME ELEMENTS OF A COMBUSTION CHAMBER WITH A LATERAL SYSTEM OF REVERSE CURRENT AREA FORMATION**

**Sergej Viktorovich Skorobogatov**  
**Moscow State Technical University**  
**Of Civil Aviation (Irkutsk branch)**  
**Irkutsk, Russia**  
**maestro.ru@mail.ru**

**Aleksandr Ivanovich Isaev**  
**Doctor of Technical Sciences, professor**  
**Moscow State Technical University**  
**Of Civil Aviation (Irkutsk branch)**  
**Irkutsk, Russia**  
**isaew\_alexandr@mail.ru**

With each passing year, the operational requirements for the aircraft power plants are getting stricter and stricter. The combustion chamber as one of the main parts of an aircraft engine determines the indicators of its efficiency, reliability and environmental compatibility. The indicators can be improved due to taking into account the operational requirements at the stage of designing a combustion chamber.

As the concept of a combustion chamber with a lateral system of reverse current area formation implies presence of a number of thin-walled elements as well as double-curved surfaces, designing a chamber of such construction is a complex

engineering problem.

The article describes a technology of manufacturing a combustion chamber of the desired design on an example of experimental model for a chamber stand.

**Key words:** combustion chamber, aircraft gas-turbine engine, operational features, technology of manufacturing, combustion process.

Конструктивное совершенство камеры сгорания определяет ряд факторов, которые могут оказаться лимитирующими в условиях постоянного ужесточения эксплуатационных требований. Это касается как повышения параметров цикла, так и улучшения эмиссионных характеристик силовой установки [Самойлов, Бородин, 2011, с. 32]. Также немаловажным фактором является то, какими параметрами будет обладать поток газа при поступлении в турбину – один из самых теплонапряженных элементов силовой установки. Наличие значительной температурной неравномерности на входе в сопловой аппарат влечёт за собой уменьшение ресурса элементов турбины [Григорьев, Рудаков, Соловьева, 2007, с. 72; Петрова, Тарасов, 2015, с. 124; Михеенков, 2006, с. 241], что влечёт за собой и рост затрат на техническую эксплуатацию авиационного двигателя.

Предлагаемая концепция кольцевой камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов предполагает наличие в ее конструкции криволинейных поверхностей, способствующих формированию крупных вихревых структур в поперечном направлении. Как показали исследования [Исаев, Скоробогатов, 2019, с. 32; Исаев, Скоробогатов, 2019, с. 21], реализация такого подхода позволяет существенно снизить температурную неравномерность газового потока на выходе из камеры сгорания, а также предотвратить возникновения застойных зон в области горения. В вышеуказанных статьях также содержится подробное описание конструкции и принципа работы камеры сгорания предлагаемой концепции.

Поскольку рассматриваемая в данной статье модель камеры сгорания предназначалась для проведения огневых испытаний на камерном стенде, то её

конструкция должна удовлетворять следующим требованиям:

- необходимо обеспечить выполнение критерия геометрического подобия относительно исходной 3D модели [Кордон, 2005, с. 130; Седов, 1977, с. 11];

- должны быть предусмотрены элементы соединения проточной части камеры сгорания с воздушной магистралью камерного стенда;

- должны быть предусмотрены технологические отверстия для размещения топливной форсунки и пускового воспламенителя;

- должна быть обеспечена возможность подключения форсунки и пускового воспламенителя к топливной и электрической системам камерного стенда;

- должна быть обеспечена возможность визуального наблюдения процесса горения;

- конструкция камеры сгорания должна выдерживать воздействие высоких температур в течение требуемого промежутка времени.

Учитывая вышеперечисленные требования, была разработана 3D модель камеры сгорания для испытаний на камерном стенде (рисунок 1).

Так как в данной модели предполагается горение топливовоздушной смеси, то в качестве материала для изготовления элементов камеры сгорания была выбрана углеродистая сталь. Данный выбор также обусловлен возможностью соединения элементов из такого материала методом электродуговой сварки. Для возможности визуализации процесса горения в боковой части камеры сгорания предусмотрена возможность установки жаропрочного стекла.

Поскольку воздушные магистрали камерного стенда имеют круглое сечение, конструкция экспериментальной модели камеры сгорания предполагает наличие перехода с прямоугольного сечения в рабочей зоне на круглое сечение в области соединения модели с воздушной магистралью камерного стенда. Этот переход осуществляется благодаря наличию диффузорной части на входе, а также конфузорной части на выходе камеры

сгорания.

Как видно на рисунке 1, самой сложной геометрической конфигурацией обладает коллектор газового потока, который фактически определяет температуру в зоне горения и её распределение на выходе камеры сгорания.

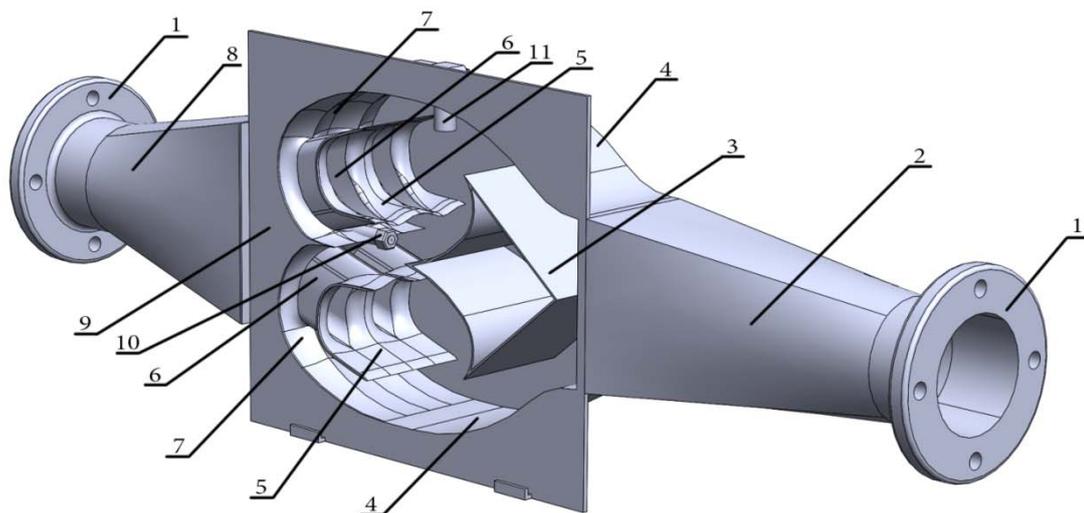


Рисунок 1 – 3D модель камеры сгорания для камерного стенда: 1 – фланцы; 2 – диффузор; 3 – уголкового стабилизатор пламени; 4 – стенки внешнего обвода; 5 – разделительные поверхности; 6 – выходные патрубки; 7 – задняя стенка; 8 – газосборник (конфузор); 9 – плоскость прилегания жаропрочного стекла; 10 – топливная форсунка; 11 – пусковой воспламенитель

Сам коллектор представляет собой совокупность элементов, которую можно условно разделить на две группы. В первую группу входят элементы, которые формируют разделительные поверхности и стенки выходных патрубков (см. рисунок 1, пункты 5, 6). Во вторую группу входят элементы, образующие заднюю стенку камеры сгорания (см. рисунок 1, пункт 7).

Элементы первой группы представляют собой тонкостенные объекты, которые взаимодействуют с потоком газа своими внешней и внутренней сторонами. Этим обусловлен выбор в пользу штамповки данных элементов из листового металла. В качестве материала заготовок использовалась углеродистая сталь марки Ст3. Штамповочный инструмент для данного

технологического процесса изготавливался на фрезерном станке с числовым программным управлением (рисунок 2).

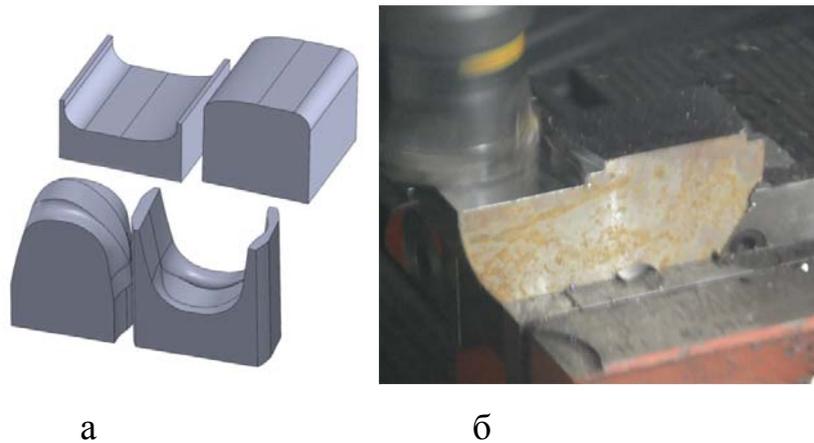


Рисунок 2 – Штамповочный инструмент: а – спроектированные 3D модели; б – процесс изготовления

Для увеличения пластичности металла заготовок его температура повышалась с помощью электрической муфельной печи до 1050°C, что соответствует чисто аустенитной структуре доэфектоидной стали (рисунок 3), при которой она обладает наибольшей пластичностью [Семёнов, 2011, с. 27]. Данный шаг позволяет осуществлять глубокую штамповку фасонных элементов (рисунок 4) без риска образования трещин.

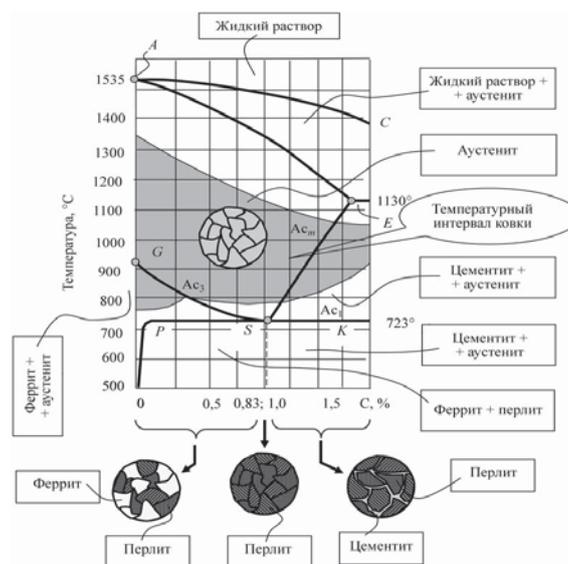


Рисунок 3 – Часть диаграммы состояния железоуглеродистых сталей и температурные интервалыковки и штамповки

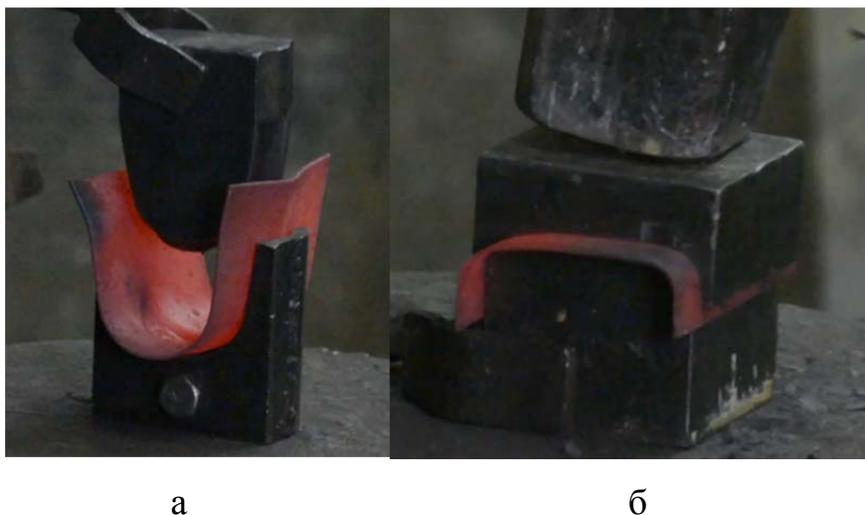


Рисунок 4 – Процесс горячей штамповки: а – фрагмента разделяющей поверхности; б – фрагмента выходного патрубка

Для уменьшения сил трения, затрудняющих процесс извлечения заготовки, в изготовленных штампах были предусмотрены штамповочные уклоны в  $5^\circ$  [Килов, Вольнов, Килов, 2004, с. 32].

В дальнейшем отштампованные элементы остужались на воздухе, после чего из них удалялись излишки металла, и осуществлялась подготовка к сварному соединению.

Элементы второй группы взаимодействуют с потоком только лишь своей внутренней стороной, и поскольку стендовая модель не имеет жестких ограничений по массовым и габаритным характеристикам, было принято решение данные элементы изготовить путём фрезеровки, удаляя металл лишь с одной стороны заготовок и формируя тем самым облик задней стенки камеры сгорания.

По ряду обстоятельств, в процессе подготовки управляющих программ, задняя стенка была разделена на множество фрагментов (рисунок 5). В дальнейшем эти фрагменты, а также тонкостенные элементы из первой группы соединялись между собой методом электродуговой сварки с последующей зачисткой сварных швов абразивным инструментом (рисунок 6). Область, в

которой тонкостенные элементы соединялись с массивной конструкцией задней стенки, предварительно подогревалась с помощью пропановой горелки для предотвращения образования трещин после остывания сварного шва.



а

б

Рисунок 5 – Фрагментированная задняя стенка камеры сгорания: а–вид с внутренней стороны; б – вид с внешней стороны



а

б



в

Рисунок 6 – Соединение изготовленных элементов камеры сгорания: а – предварительный подогрев места соединения; б – процесс сварки металла; в – зачистка швов с помощью абразивного инструмента

В совокупности вышеперечисленные методы позволили изготовить блок коллектора газового потока камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов, обеспечив при этом выполнение критерия геометрического подобия относительно исходной 3D модели (рисунок 7).



Рисунок 7 – Выходная часть камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов, включающая в себя коллектор газового потока

Остальные элементы камеры сгорания изготавливались путем выполнения слесарных работ с использованием преимущественно ручного инструмента.

На этапе изготовления газосборника была сформирована ниша для размещения топливной форсунки, под которую в конфузорной части вырезалась соответствующая выемка (рисунок 8).



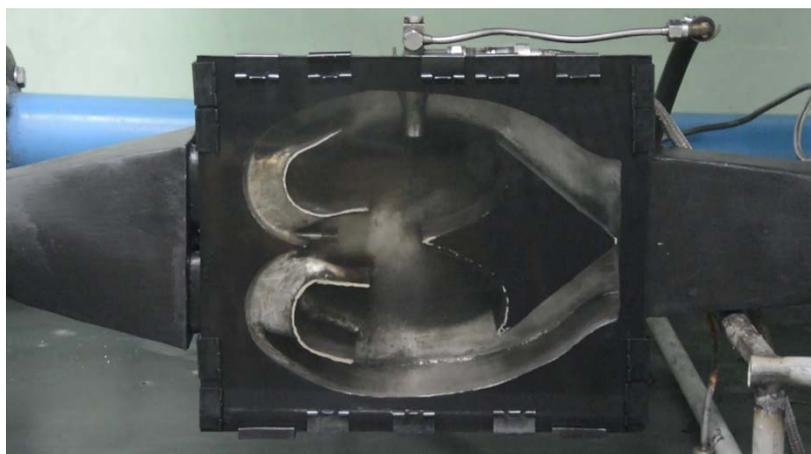
Рисунок 8 – Коллектор газового потока, объединённый с газосборником в единую конструкцию

При формировании остова газосборника, диффузора, уголкового стабилизатора пламени с элементами внутреннего профилирования, стенок внешних обводов камеры сгорания использовалась ручная гибка листового металла. Контроль на предмет соответствия спрофилированных таким образом элементов осуществлялся по шаблонам, изготовленным с помощью станков с числовым программным управлением. Также в области верхней стенки камеры сгорания была выполнена система отверстий для установки пускового воспламенителя.

Благодаря вышеперечисленным мероприятиям, удалось изготовить экспериментальную камеру сгорания в соответствии с геометрическими параметрами ранее спроектированной 3D модели (рисунок 9 а).



а



б

Рисунок 9 – Модель камеры сгорания в собранном виде: а – отшлифованная, отдельно стоящая; б – окрашенная, размещенная на камерном стенде

Перед установкой на камерный стенд, модель камеры сгорания покрывалась жаростойкой эмалью, подготавливалась к подключению к коммуникациям стенда (см. рисунок 9 б). Жаропрочное стекло крепилось к корпусу посредством эластичных зажимов, предохраняющих его от раскола в процессе температурных деформаций корпуса камеры сгорания.

Результаты многочисленных огневых испытаний продемонстрировали работоспособность разработанной конструкции. Модель камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов показала хорошие пусковые характеристики. Процесс горения стабилен и устойчив, а его качественная картина коррелируется с расчетными данными.

Использование в качестве боковой стенки жаропрочного стекла позволило организовать визуальное наблюдение процессов, протекающих в зоне горения изготовленной модели камеры сгорания (рисунок 10).



Рисунок 10 – Процесс горения в камере сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов

Таким образом, в результате проделанных технологических операций удалось изготовить экспериментальную модель камеры сгорания с поперечной системой образования зон обратных токов в соответствии со всеми предъявляемыми к ней требованиями.

## Библиографический список

1. *Григорьев А. В.* Воздействие поля температуры газа и турбулентности набегающего потока на теплоотдачу в сопловую решетку турбины и оптимизация камеры сгорания / А. В. Григорьев, О. А. Рудаков, А. В. Соловьева // Научный вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2007. № 2 (13). С. 72–77.
2. *Исаев А. И.* Обеспечение эксплуатационных требований при проектировании фронтного устройства камеры сгорания с поперечной системой вихреобразования / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 21–32.
3. *Исаев А. И.* Учет эксплуатационных аспектов на этапе формирования облика коллектора газового потока в камере сгорания / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 32–41.
4. *Килов А. С.* Производство заготовок. Объёмная штамповка: серия учебных пособий из шести книг. Книга 1. Проектирование и производство поковок (штампованных заготовок) / А. С. Килов, С. В. Вольнов, К. А. Килов. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. 155 с.
5. *Кордон М. Я.* Гидравлика / М. Я. Кордон, В. И. Семакин, И. Д. Горешник. Пенза: Пензенский государственный университет, 2005. 71 с.
6. *Михеенков Е. Л.* Обеспечение надежности работы сопловых лопаток первой ступени высокотемпературной газовой турбины / Е. Л. Михеенков // Научный вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2006. № 2. С. 241–246.
7. *Петрова М. А.* Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей / М. А. Петрова, А. И. Тарасов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 217. С. 124–127.
8. *Самойлов И. А.* Влияние экологической политики ИКАО на развитие парка самолетов / И. А. Самойлов, М. А. Бородин, В. И. Самойлов, О. А. Кауркина // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. № 1. С. 111–117.
9. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
10. *Семёнов Е. И.* Ковка и горячая штамповка. М.: МГИУ, 2011. 414 с.

## References

1. *Grigor'ev A. V.* (2007) Influence of the field of gas temperature and air ram turbulence on the heat release to the turbine nozzle ring and combustion chamber optimization / A. V. Grigor'ev, O. A. Rudakov, A. V. Solov'eva // Bulletin of Samara State Aerospace University. 2007. № 2 (13). P. 72–77. (in Russian)

2. *Isaev A. I.* (2019) Ensuring operational compliance when designing the head of a combustion chamber with a lateral system of vortex formation / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // Bulletin of State National Research Institute of Civil Aviation. 2019. №25. P. 21–32. (in Russian)
3. *Isaev A. I.* (2019) Taking into account operational issues at the stage of designing the gas flow collector in a combustion chamber / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // Bulletin of State National Research Institute of Civil Aviation. 2019. №25. P. 32–41. (in Russian)
4. *Kilov A. S.* (2004) Production of blank parts. Bulk forming: series of textbooks of six parts. Part 1. Design and production of forgings / A. S. Kilov, S. V. Vol'nov, K. A. Kilov. Orenburg: OSU, 2004. 155 p. (in Russian)
5. *Kordon M. Ja.* (2005) Hydraulics / M. Ja. Kordon, V. I. Semakin, I. D. Goreschnik. Penza: Penza State University, 2005. 71 p. (in Russian)
6. *Miheenkov E. L.* (2006) Ensuring the operational reliability of nozzle vanes of the first stage in a high-temperature gas turbine / E. L. Miheenkov // Bulletin of Samara State Aerospace University. 2006. № 2. P. 241–246. (in Russian)
7. *Petrova M. A.* (2015) Analysis of the operational conditions of turbine blade surface layers in modern engines / M. A. Petrova, A. I. Tarasov // Bulletin of MSTU CA. 2015. № 217. P. 124–127. (in Russian)
8. *Samojlov I. A.* (2011) Influence of ICAO environmental policy on aircraft fleet development / I. A. Samojlov, M. A. Borodin, V. I. Samojlov, O. A. Kaurkina // Bulletin of State National Research Institute of Civil Aviation. 2011. № 1. P. 111–117. (in Russian)
9. *Sedov L. I.* (1977) Methods of similarity and dimensions in mechanics. M.: Nauka, 1977. 440 p. (in Russian)
10. *Semjonov E. I.* (2011) Blacksmithing and hot forming. M.: MSIU, 2011. 414 p. (in Russian)