

А. Т. Бикмеев, С. В. Иванов, С. И. Перепелица

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСТЫВАНИЯ ПОЛОЙ ЛОПАТКИ ГТД ПОСЛЕ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ

В работе приведены результаты компьютерного моделирования процесса остывания полой лопатки компрессора ГТД в инженерных пакетах Deform 3D и Star-CCM+. Рассмотрено четыре различных режима остывания, выполнена оценка влияния режима остывания на величину остаточных напряжений. *Полая лопатка; компьютерное моделирование; охлаждение; остаточные напряжения*

Одними из наиболее многочисленных элементов роторов современных газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки компрессоров, изготавливаемые из дорогостоящих титановых сплавов. Их количество в современных двигателях может достигать 3000. Таким образом, они могут составлять существенную часть веса и стоимости двигателя. Для облегчения и удешевления конструкции рекомендуется использовать полые (пустотелые) лопатки [1], перо которой представляет собой два соединенных листа титанового сплава, с ячеистым силовым набором во внутренней полости (рис. 1).

Одним из методов получения полых ячеистых конструкций со сложной геометрией, к которым относятся и полые лопатки компрессора ГТД, является сверхпластическая формовка (СПФ) [2–4]. Процесс протекает при достаточно высокой температуре, например для сплава ВТ6 рабочая температура СПФ выбирается вблизи 925 °С (температура сверхпластического состояния титана [5, 6]).

Примером такой лопатки является полая широкохордная лопатка вентилятора двигателя ПД-14, изготавливаемая на УМПО. Заготовка лопатки из нескольких сваренных в отдельных точках листов укладывается в пресс-форму, а затем помещается в печь, где при постоянной

температуре происходит ее раздутие до полного заполнения пресс-формы с одновременным формированием внутренней полости и силового набора.

После изготовления лопатка размещается на пластинчатой подставке, в которой обеспечивается минимальный контакт и равномерное распределение веса лопатки по пластинам с максимальным доступом воздуха ко всей поверхности изделия.

Как известно, процесс охлаждения сопровождается возникновением в конструкции внутренних напряжений и деформаций, вызываемых неравномерностью охлаждения различных ее частей, термическим сжатием и т. д. Остывание в печи, будучи оптимальным с точки зрения снижения градиентов температур, неэффективно с производственной точки зрения – как из-за чрезвычайной длительности процесса, так и вследствие износа оборудования.

Стоимость каждой изготавливаемой лопатки составляет несколько миллионов рублей, поэтому проведение большого числа натурных экспериментов с целью определения оптимальных параметров всего технологического процесса и, в частности, процесса остывания может оказаться экономически невыгодным.

Таким образом, возникает задача построения компьютерной модели процесса охлаждения полой лопатки с целью определения режима охлаждения, при котором величины деформаций и остаточных напряжений будут приемлемыми с точки зрения достижения заданных свойств и размеров конструкции, а длительность процесса – минимальной.

В настоящей работе моделируется охлаждение на открытом воздухе, а также последовательное охлаждение с использованием одного и двух термостатов. Показано, что многоэтапная схема позволяет значительно снизить остаточ-

Контактная информация: 8(347)292-19-31

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

ные напряжения, не увеличивая при этом длительность процесса, а конвективный теплообмен приводит к неравномерному распределению температуры по поверхности лопатки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим полую лопатку (рис. 1) из авиационного титанового сплава ВТ6. Модель материала строится на основе ГОСТ для сплава ВТ6 [7, 8].

Рассмотрим четыре различных режима остывания полую лопатки от температуры 925 °С до 20 °С:

- на воздухе, температура воздуха 20 °С,
- в печи, где температура плавно опускается до 20 °С, со скоростью 2 °С в минуту,
- в одном термостате с температурой 500 °С, а затем на воздухе,
- последовательное охлаждение в двух термостатах с температурами 600 °С и 300 °С.



Рис. 1. Общий вид полую лопатки с сечением по диагонали от кромки до башмака

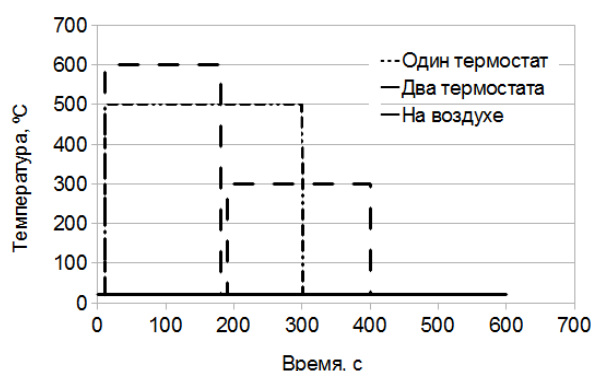


Рис. 2. Изменение температуры окружающей среды для различных режимов охлаждения

В модели охлаждения учитывается кратковременное пребывание лопатки на открытом воздухе, которое имитирует ее перенос из печи

в термостат и между термостатами. Закон изменения температуры со временем для различных режимов показан на рис. 2. На поверхности лопатки заданы граничные условия конвективного теплообмена. Для простоты используется приближение постоянного коэффициента конвективного теплообмена со значением, равным 20 Вт/°С·м².

Был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния лопатки в программном комплексе DEFORM 3D с целью получения величины деформаций и остаточных напряжений по завершении процесса охлаждения. А также рассмотрено влияние свободной конвекции воздуха на распределение температуры по поверхности лопатки в программном комплексе Star-CCM+.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В DEFORM 3D

Результаты расчетов показывают, что при охлаждении на воздухе, в отдельных точках полую лопатки деформации достигают 2 %, что существенно искажает ее геометрию (в частности, угол закрутки может увеличиться более чем на градус). Остаточные напряжения в отдельных точках могут достигать 35–40 МПа.

Плавное охлаждение в печи вызывает очень малые деформации (менее процента) и остаточные напряжения порядка 10 МПа, что в несколько раз меньше, нежели при других режимах. Это показывает, что, как и ожидалось, идеальным режимом, с точки зрения минимизации величины остаточных напряжений, является медленное охлаждение в печи.

Для анализа величины остаточных напряжений на поверхности лопатки были выбраны две точки (рис. 3) с минимальными и максимальными величинами напряжений. Точка P1 расположена на краю пера лопатки и максимально удалена от башмака. Точка P2, в которой в ходе расчета достигается максимальное значение внутренних напряжений, расположена в месте соединения внутренней хорды с внешними листами лопатки.

Из анализа приведенных на рис. 4 графиков изменения внутренних напряжений в процессе охлаждения в выбранных точках следует, что использование термостатов позволяет значительно снизить величину остаточных напряжений, возникающих в полую лопатку после ее охлаждения.

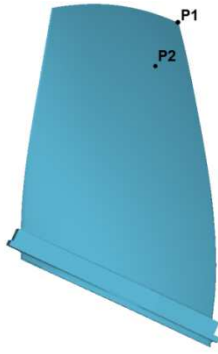


Рис. 3. Схема расположения точек, для которых проводилось наблюдение за температурой и напряжениями

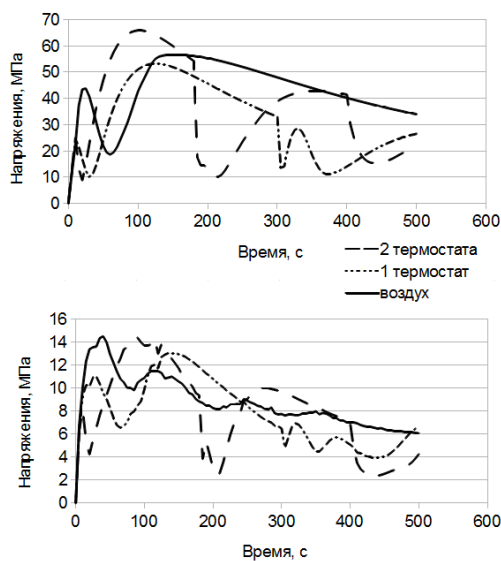


Рис. 4. Напряжения в зависимости от режима охлаждения в точках P2 (верхний) и P1 (нижний)

Резкие скачки напряжений, присутствующие на линиях для каждого из режимов, совпадают с моментами, когда лопатка оказывается на открытом воздухе. Возможно это связано с тем, что после выноса из печи или термостата поверхность лопатки быстро остывает, порождая большие градиенты температуры по толщине листа, а затем, благодаря механизму теплопроводности, градиенты выравниваются. Однако для проверки этого предположения необходимо провести дополнительное исследование.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Реальный процесс остывания лопатки имеет существенно неравномерный характер, так как конвективный теплообмен зависит от геометрии самой лопатки и подставки, на которой она ох-

лаждается. Размер вентиляторной лопатки (~0,8 м) слишком большой для того, чтобы внутренняя теплопроводность металла могла компенсировать неравномерности в остывании детали, поэтому для оценки степени неравномерности процесса охлаждения была проведена серия расчетов в пакете Star-CCM+, с целью определения зон, с более быстрым или более медленным охлаждением, чем в среднем по всей лопатке. Для оценки влияния на процесс охлаждения подставки был проведен расчет остывания сегмента имитатора лопатки.

Результаты расчета показывают, что наличие подставки приводит к снижению теплоотдачи на нижней части лопатки на 15–30 % по сравнению с верхней частью (рис. 5), вследствие ограничения свободного тока воздуха пластинами подставки. Такая разница в теплоотдаче может привести к тому, что разница температур между верхним и нижним листом лопатки достигнет 100 градусов, так как эти листы связаны между собой лишь тонкими перемычками, величина теплового потока через которые мала.

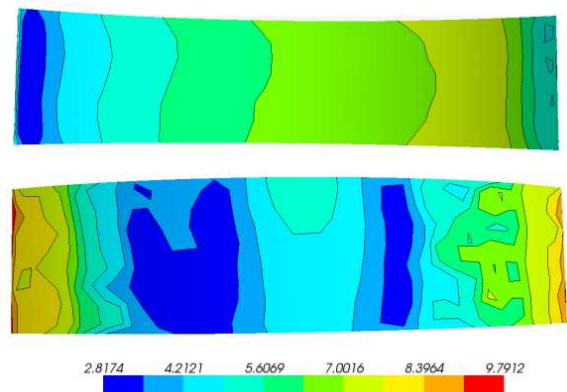


Рис. 5. Коэффициент теплоотдачи с поверхности имитатора лопатки, Вт/м²К

Далее была построена компьютерная модель остывания реальной вентиляторной лопатки без учета влияния подставки на процесс охлаждения. Как и ожидалось, наличие сложной геометрии меняет характер теплоотдачи и он носит неравномерный характер, при этом наибольшее охлаждение имеет место на кромках лопатки (рис. 6).

Теплоотвод с поверхности вблизи кромок лопатки в среднем в полтора-два раза превышает среднюю теплоотдачу по поверхности, что приводит к неравномерным профилям распределения температур (рис. 7). Толстая замковая часть охлаждается медленнее остальных частей лопатки.

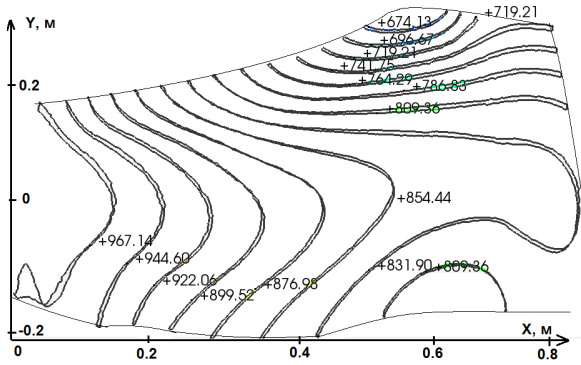


Рис. 6. Распределение температуры для 500 секунды процесса охлаждения, К

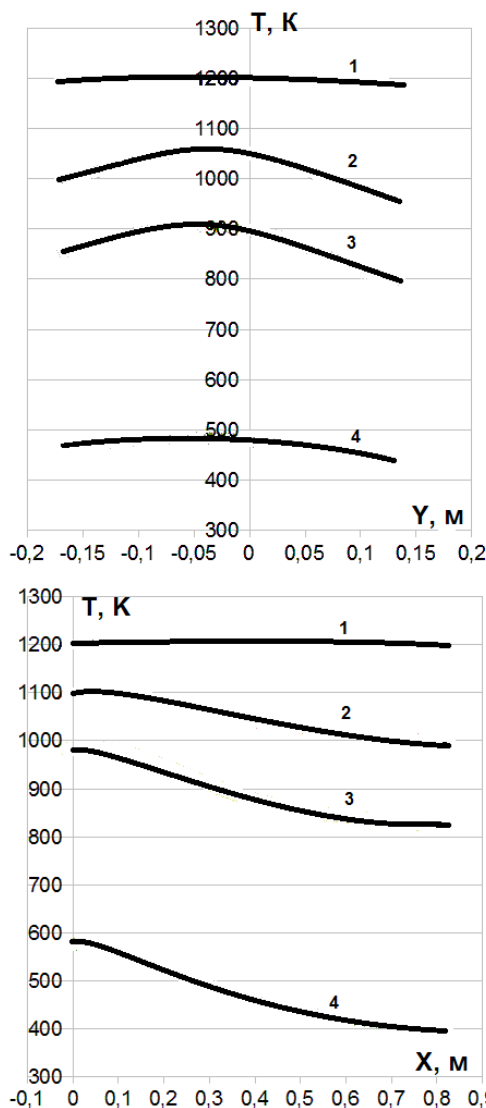


Рис. 7. Распределение температур для продольного (верхний график) и для поперечного (нижний график) сечений лопатки в разные моменты времени

Выступающая часть кромки лопатки имеет существенно меньшую температуру (рис. 6), нежели остальные части кромки лопатки. Экспериментальные данные показывают, что именно в этой части лопатки обнаруживаются наибольшие отклонения от требуемой геометрии изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показывают, что из выбранных температурных режимов охлаждения полый лопатки оптимальным, с точки зрения качества конечного результата, является использование двух термостатов, однако для сокращения количества этапов производства выгоднее использовать режим с одним термостатом.

Отработана методика компьютерного моделирования процесса охлаждения полый лопатки. Дальнейшим шагом может быть моделирование с целью определения оптимальных температур термостатов.

Наличие подставки может значительно повлиять на распределение температуры и привести к возникновению дополнительных напряжений между внешним и внутренним листами лопатки. Вероятно, использования обдува лопатки в процессе охлаждения позволит уменьшить этот эффект.

В дальнейшем планируется выполнить совместный газодинамический, тепловой и упруго-деформационный расчет охлаждения лопатки на подставке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибин В. А., Солонин В. И., Палкин В. А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.
2. Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Ч. I. Международный опыт // Письма о материалах, 2012. Т. 2, вып. 1. С. 32–35.
3. Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Ч. II. Опыт ИПСМ РАН // Письма о материалах, 2012. Т. 2, вып. 1. С. 36–39.
4. Xun Y. X., Tan M. J. Application of superplastic forming and diffusion bonding to hollow engine blades // J. Mater. Process. Technol, 2000. Vol. 99. P. 80–85.

5. **Кайбышев О. А.** Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.

6. Сверхпластичность некоторых титановых сплавов / Р. А. Аубакирова [и др.]. Алма-Ата: Наука КазССР, 1987. 210 с.

7. ГОСТ 19807-91: Титановый сплав ВТ6.

8. Характеристика материала ВТ6 // Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс] (http://www.splav.kharkov.com/mat_start.php?name_id=1298).

ОБ АВТОРАХ

Бикмеев Александр Тимерзянович, доц. каф. высокопроизводительн. выч. технологий и систем. Дипл. физик (БашГУ, 1995). Канд. физ.-мат наук по физике конденсированного состояния (ИФМК УНЦ РАН, 2001). Иссл. в обл. компьютерного моделирования физических процессов.

Иванов Сергей Владимирович, студент спец. «Прикладная математика». Иссл. в обл. компьютерного моделирования пластического течения материалов.

Перепелица Сергей Илларионович, гл. инженер по перспективным программам ОАО «УМПО». Дипл. инженер-механик по оборудованию и технологиям сварочн. производства (УАИ, 1976). Иссл. в обл. сварки трением, диффузионной сварки и сверхпластического формования.