

Технологическая оптимизация процесса сверхпластической формовки тонкостенного кольца воздухозаборника газотурбинных двигателей

© А.В. Чередниченко^{1,2}, Ю.М. Темис^{1,2},
А.И. Факеев², А.П. Худяков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

Рассмотрено использование технологического процесса сверхпластической формовки (СПФ) для производства облегченных деталей газотурбинных двигателей. На примере детали простой формы — полого кольца воздухозаборника — поставлена и решена задача конструкторско-технологического проектирования. При решении данной задачи учтены как особенности конструкции кольца воздухозаборника, так и особенности процесса СПФ. Поставлена и решена задача технологической оптимизации — выбраны целевая функция, параметры оптимизации и ограничения, накладываемые на параметры оптимизации. Для решения задачи оптимизации выбран и реализован алгоритм последовательного квадратичного программирования. Для снижения трудоемкости расчетов уменьшено количество геометрических параметров оптимизации путем использования кубических сплайнов для описания геометрии заготовки. Также определены оптимальные законы подачи давления формовки, обеспечивающие изготовление качественной детали. Показана возможность применения предложенного подхода и для проектирования других деталей газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, сверхпластическое формование, конструкторско-технологическое проектирование, тонкостенные детали газотурбинного двигателя.

Введение. К современным авиационным газотурбинным двигателям (ГТД) с каждым годом предъявляют все более жесткие требования по экономичности, безопасности, шуму и эмиссии вредных веществ. Учет этих требований при создании новых авиационных двигателей приводит к необходимости существенного снижения массы как отдельных узлов и деталей, так и двигателя в целом. При этом узлы и детали двигателя должны обладать заданными эксплуатационными свойствами и характеристиками.

Одним из способов достижения необходимого результата является использование новых конструктивных решений и (или) материалов в ответственных деталях ГТД, что, в свою очередь, приводит к необходимости использования современных технологических процессов при изготовлении этих деталей. Такие технологические процессы могут

вносить свои ограничения на конструкцию уже изготовленной детали. Соответственно при создании новых деталей ГТД необходимо использовать конструкторско-технологическое проектирование, учитывающее все необходимые взаимосвязи между конструкцией и технологией ее изготовления и обеспечивающее изготовление оптимальной конечной детали.

Достаточно простой по форме деталью ГТД, массу которой можно снизить, используя новые технологические процессы, является кольцо воздухозаборника. Оно представляет собой часть наружного корпуса самолета, соединенную с мотогондолой двигателя (рис. 1). Во время эксплуатации кольцо воздухозаборника испытывает значительные нагрузки, вызванные воздействием воздушного потока, поступающего с высокой скоростью в двигатель. От конструкции этой детали зависят качество работы и надежность всего двигателя.



Рис. 1. Авиационный ГТД консорциума EngineAlliance: мотогондола (1), кольцо воздухозаборника (2)

Технологическая оптимизация кольца воздухозаборника. Рассмотрим конструкцию кольца воздухозаборника без аэродинамического профилирования входной части и дополнительного усиления ребрами жесткости (рис. 2). Такую деталь можно изготовить из титанового сплава ВТ-6 с использованием технологического процесса сверхпластической формовки (СПФ). Сущность СПФ заключается в том, что для формообразования конечной детали используется эффект сверхпластичности материалов, который возникает при достаточно низких скоростях деформации (порядка 0,0001 1/с) и высоких температурах. Для достижения эффекта сверхпластичности требуется обеспечить такое изменение давления формовки, при котором скорость деформации будет оставаться постоянной и равной оптимальной скорости деформации.

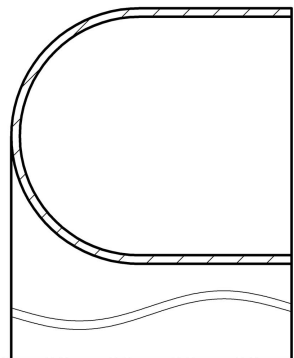


Рис. 2. Схематичное изображение сечения кольца воздухозаборника авиационного ГТД

Для успешного производства облегченного кольца воздухозаборника необходимо создать методику проектирования такой детали, учитывающую как ее конструктивные особенности, так и особенности технологического процесса ее изготовления. В частности, качественная деталь должна обладать заданной внешней аэродинамической формой и удовлетворять заданным требованиям по прочности и ресурсу, обладая при этом минимальной массой. Поскольку данная деталь при использовании СПФ изготавливается из плоской заготовки, в первую очередь необходимо решить задачу проектирования такой заготовки, которая в конечном итоге приведет к получению качественной детали.

Сложность решения этой задачи заключается в том, что она является обратной задачей проектирования. Поэтому для ее решения применены методы оптимального проектирования, для реализации которых:

- 1) разработана математическая модель процесса СПФ кольца воздухозаборника;
- 2) на основе данной математической модели создана вычислительная конечно-элементная модель, реализованная в программном комплексе MSC.Marc;
- 3) разработана методика автоматизированного построения заготовок кольца воздухозаборника;
- 4) поставлена и решена задача оптимизации применительно к процессу СПФ кольца воздухозаборника из плоской заготовки.

В математической модели процесса СПФ используется модель жестко-пластического материала [1, 2], течение которого описывается зависимостью

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m,$$

где σ — напряжение течения материала; K — постоянная материала; ε — деформация; n — параметр деформационного упрочнения; $\dot{\varepsilon}$ —

скорость деформации; m — параметр скоростной чувствительности материала.

Для обеспечения оптимальных условий сверхпластичности в заготовке давление формовки автоматически подбиралось исходя из следующего критерия:

$$\dot{\epsilon}_{\max} = \dot{\epsilon}_{\text{opt}},$$

где $\dot{\epsilon}_{\max}$ — максимальная скорость деформации в заготовке; $\dot{\epsilon}_{\text{opt}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ — оптимальная (требуемая) скорость деформации для реализации в заготовке условий сверхпластичности.

В математической модели также учитывается контактное взаимодействие между жестким штампом и деформируемой заготовкой. Геометрия штампа обеспечивает необходимую аэродинамическую форму готовой детали.

Для учета трения между заготовкой и инструментом используется закон трения Амонтона — Кулона (условие трения Кулона), согласно которому напряжение контактного трения при проскальзывании прямо пропорционально нормальному напряжению:

$$\boldsymbol{\tau}_m = k|\boldsymbol{\sigma}_N|,$$

где $\boldsymbol{\tau}_m$ — вектор касательного напряжения на поверхности контакта; k — коэффициент трения, определяемый экспериментально; $\boldsymbol{\sigma}_N$ — вектор нормального напряжения на поверхности контакта. При расчетах принимали значение коэффициента трения $k = 0,1$.

Заготовка закреплена от перемещений в радиальном направлении на боковых поверхностях, давление приложено к внешней поверхности заготовки. Процесс СПФ считается изотермическим.

Конечно-элементная модель заготовки для кольца воздухозаборника, созданная в программном комплексе MSC.Marc, состоит из четырех элементов по толщине и 100 элементов по длине заготовки (рис. 3). При этом рассматривается осесимметричная постановка.

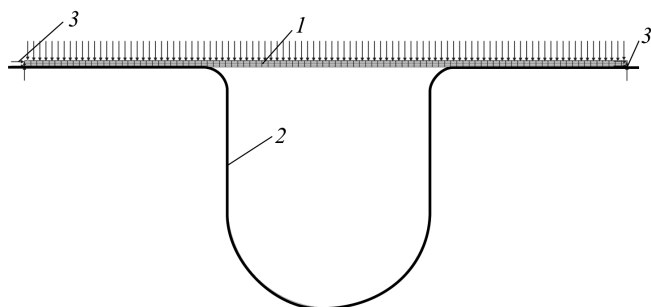


Рис. 3. Конечно-элементная модель СПФ кольца воздухозаборника: конечно-элементная модель заготовки (1), модель поверхности штампа (2), крепление от всех перемещений (3)

Задача оптимизации технологического процесса СПФ кольца воздухозаборника сформулирована следующим образом:

$$J(\bar{x}) \rightarrow \min, \quad \bar{x} \in \Omega \subset \mathbb{R}^n,$$

$$J(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (t_i(\bar{x}) - h_i)^2},$$

$$\Omega = \begin{cases} h^0 \leq t_i \leq 3h^0, \\ t_i \geq h_i, \end{cases}$$

где $J(\bar{x})$ — целевая функция, являющаяся среднеквадратичным отклонением толщины деформированной заготовки от требуемой; x_i — параметры оптимизации — толщины исходной заготовки; n — количество параметров оптимизации; m — количество отслеживаемых толщин отформованной детали, $m = 100$; t_i — толщина полученной детали в i -м сечении; h_i — минимально необходимая требуемая толщина в i -м сечении готовой детали; h^0 — минимальная высота сечения заготовки.

В качестве параметров оптимизации заготовки приняты толщины заготовки в характерных точках. Эти точки располагались на равных расстояниях одна от другой по всей длине заготовки. Чтобы снизить количество параметров оптимизации и получить решение задачи в разумные сроки, геометрию исходной заготовки моделировали с помощью кубических сплайнов, проходящих через эти характерные точки.

Определение толщин деформированной заготовки происходило по следующему алгоритму: для каждого узла из верхнего ряда узлов находили два ближайших узла из нижнего ряда узлов, по полученным трем точкам строили треугольник, в котором методами аналитической геометрии находили искомую высоту.

При формовке воздухозаборника и других тонкостенных деталей из плоской заготовки основными дефектами являются разнотолщинность и чрезмерное (недопустимое) утонение детали, что может привести к разрушению или заготовки на этапе формоизменения, или готовой детали во время эксплуатации. Чтобы избежать большого утонения, в готовой детали необходимо обеспечить минимальную требуемую толщину в любом сечении. При постановке задачи оптимизации это учитывается в виде ограничений типа неравенств, накладываемых на параметры оптимизации.

При решении задачи минимальную высоту сечения заготовки и минимально необходимую требуемую толщину готовой детали в i -м сечении принимали одинаковыми — 6 мм. Начальные значения толщин исходной заготовки также на первой итерации были приняты равными 6 мм. Для решения данной задачи был выбран метод последовательного квадратичного программирования [3], обеспечивающий

достаточно высокую скорость сходимости недалеко от искомой точки минимума.

В первом варианте решения задачи оптимизации принимали количество параметров оптимизации $n = 10$.

На рис. 4 приведена зависимость целевой функции от номера итерации. Распределение накопленной пластической деформации в конечной детали, полученной из оптимальной заготовки, иллюстрирует рис. 5.

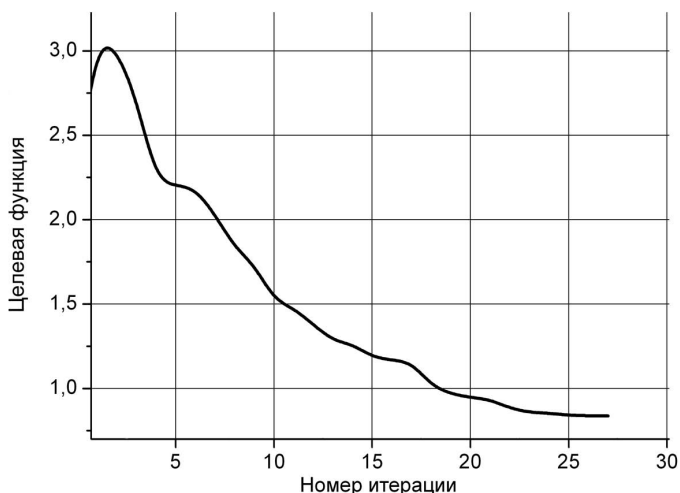


Рис. 4. Зависимость целевой функции от номера итерации при оптимизации по 10 параметрам

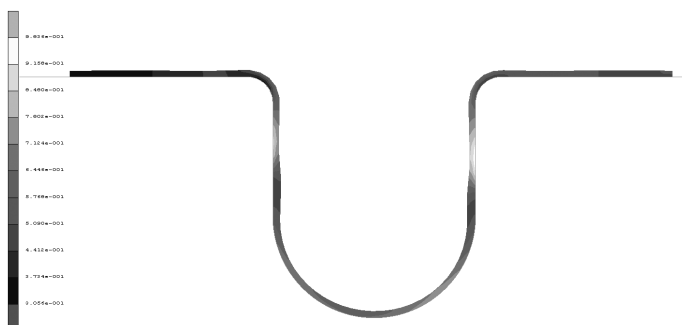


Рис. 5. Распределение суммарных накопленных пластических деформаций в оптимизированной детали

Среднеквадратичное отклонение для начальной заготовки составляло 2,5 мм, а для оптимизированной — 0,85 мм, т. е. распределение толщин стало более равномерным. Кроме того, в оптимизированной детали, полученной после моделирования СПФ, отсутствуют сильные утонения. Значения толщины оптимизированной заготовки в характерных точках приведены при использовании 10 параметров оптимизации далее:

№ контрольной точки ..	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота заготовки, мм	7,84	8,49	9,27	12,09	10,93	11,40	11,36	13,47	10,74	9,93

Для более равномерного распределения толщин была проведена оптимизация по проведенному выше алгоритму по 19 характерным точкам (параметрам оптимизации). В качестве начальных значений взят предыдущий результат оптимизации по 10 характерным точкам.

На рис. 6 приведена зависимость целевой функции от номера итерации, на рис. 7 показано распределение накопленной пластической деформации в отформованной заготовке после оптимизации.

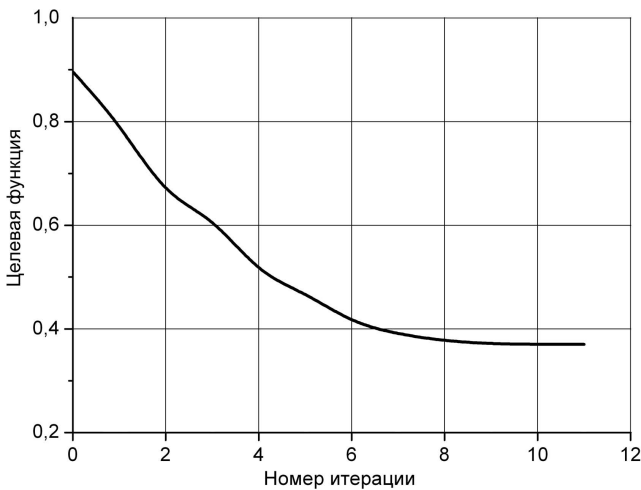


Рис. 6. Зависимость целевой функции от номера итерации при оптимизации по 19 параметрам

Среднеквадратичное отклонение после второго этапа оптимизации составляло 0,38 мм. Значения толщин характерных сечений оптимизированной заготовки при использовании 19 параметров оптимизации приведены ниже:

№ контрольной точки ..	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота заготовки, мм	7,76	8,01	8,21	8,67	8,83	10,47	11,61	10,39	10,82	10,62
№ контрольной точки ..	11	12	13	14	15	16	17	18	19	—
Высота заготовки, мм	10,78	10,78	10,90	11,56	12,94	10,40	10,03	9,61	9,41	—

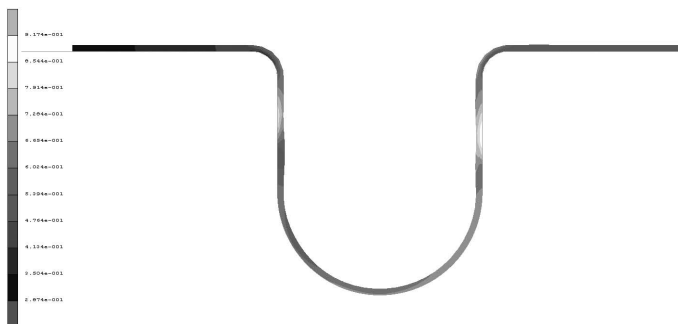


Рис. 7. Распределение суммарных накопленных пластических деформаций в отформованной детали после оптимизации по 19 параметрам

Заключение. В результате проделанной по предложенной методике проектирования работы получены: твердотельная модель оптимизированной заготовки, твердотельная модель детали, максимально приближенная к проектной (рис. 8), а также оптимальный закон подачи давления для соблюдения условия сверхпластичности по скорости деформации.

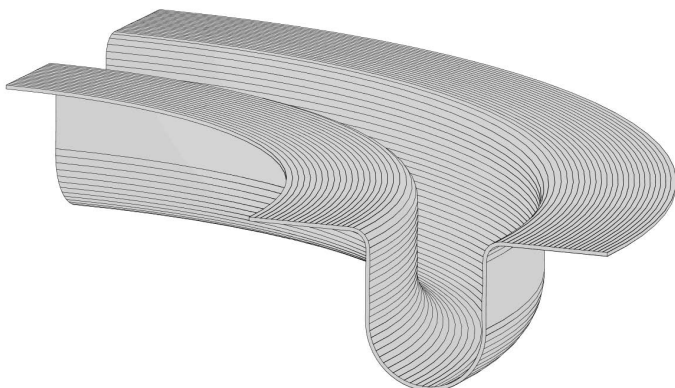


Рис. 8. Твердотельная модель кольца воздухозаборника, полученная в результате оптимального проектирования заготовки

Сравнение законов подачи давления СПФ для изготовления кольца воздухозаборника из исходной и оптимизированной заготовок (рис. 9) показывает увеличение максимального давления формовки, обеспечивающего необходимые условия сверхпластического течения металла. При этом характер закона подачи давления не изменяется. Это связано с тем, что увеличение толщин исходной заготовки соответствующим образом увеличивает сопротивление заготовки деформированию. Увеличение максимального давления необходимо учесть при выборе оборудования для успешного проведения процесса СПФ.

Сравнение толщин отформованной детали кольца воздухозаборника в одинаковых местах показывает успешность проведенного оп-

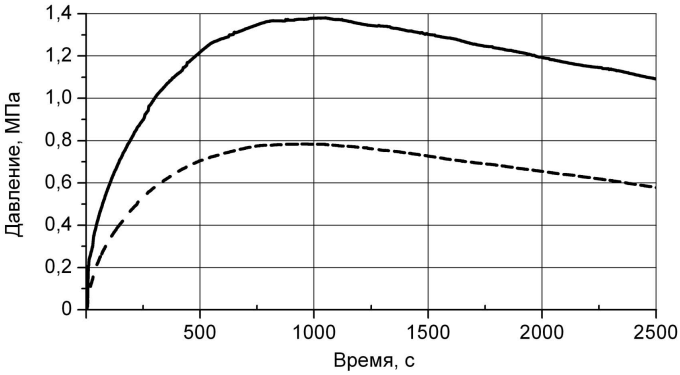


Рис. 9. Зависимости подачи давления оптимизированной (—) и исходной (---) заготовок от времени

тимального проектирования (рис. 10), так как в конечной детали отсутствует чрезмерное утонение, а все толщины корпуса не меньше заданных значений.

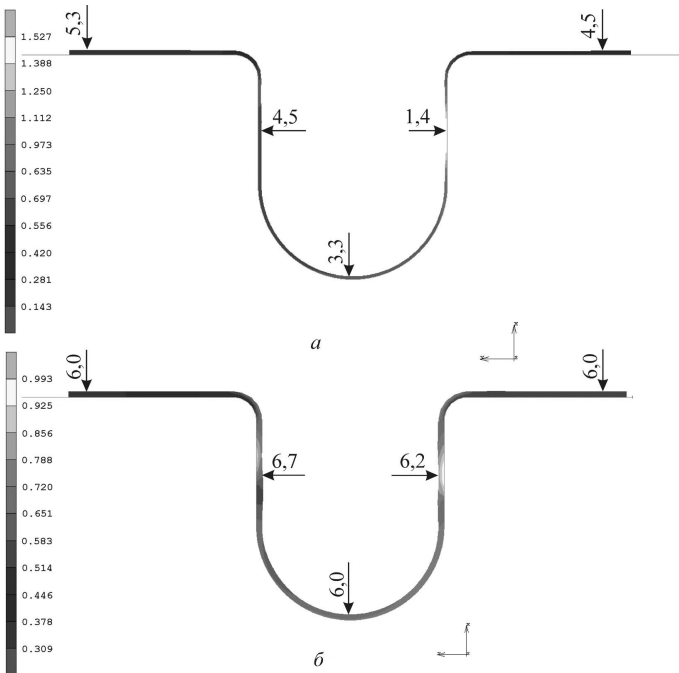


Рис. 10. Распределение толщин в кольце воздухозаборника при использовании неоптимизированной (а) и оптимизированной (б) заготовок

В результате решения обратной задачи проектирования с помощью методов оптимизации получена заготовка с коэффициентом разнотолщинности $S_d = 1,22$ (для начальной заготовки постоянной толщины $S_d = 3,86$), а значение целевой функции для этой заготовки равняется $J(\bar{x}_*) \approx 0,4$ (для начальной заготовки $J(\bar{x}_*) \approx 2,8$).

Одной из особенностей решения задачи технологической оптимизации является достаточно большое время, необходимое для вычисления целевой функции, так как эти значения должны быть получены в результате численного моделирования всего технологического процесса.

При переходе к деталям более сложной формы и структуры для успешного решения задачи оптимизации необходимо тщательно выбирать параметры оптимизации и их количество и более подробно рассмотреть вопрос о выборе алгоритма оптимизации. После учета этих факторов предложенная методика проектирования заготовок и деталей, изготавливаемых с помощью технологического процесса СПФ, может быть успешно перенесена на другие тонкостенные детали ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васин Р.А., Еникеев Ф.У. *Введение в механику сверхпластичности*. В 2 ч. Ч. I. Уфа, Гилем, 1998, 280 с.
- [2] Васин Р.А., Еникеев Ф.У. *Введение в механику сверхпластичности*. В 2 ч. Ч. II. Уфа, Гилем, 1999, 190 с.
- [3] Темис Ю.М., Якушев Д.А. Оптимальное проектирование конструктивных элементов ГТД. *Техника воздушного флота*, 2009, № 1 (694), с. 54–64.

Статья поступила в редакцию 20.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чердниченко А.В., Темис Ю.М., Факеев А.И., Худяков А.П. Технологическая оптимизация процесса сверхпластической формовки тонкостенного кольца воздухозаборника газотурбинных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/895.html>

Чердниченко Александр Всеволодович — канд. техн. наук, доц. кафедры «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ст. науч. сотр. ЦИАМ им. П.И. Баранова. e-mail: alexvcher@gmail.com

Темис Юрий Моисеевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник отдела ЦИАМ им. П.И. Баранова. e-mail: tejourm@ciam.ru

Факеев Александр Игоревич — мл. науч. сотр. ЦИАМ им. П.И. Баранова.

Худяков Артем Павлович — инж. 2-й кат. ЦИАМ им. П.И. Баранова.