

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЛИТЫХ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД

Е.С. Гайнцева¹, А.С. Горюхин¹, Р.Р. Ганиев¹, О.Б. Деменок¹, Б.А. Кулаков²

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Приведены уравнения прогиба и угла закручивания стержня в зависимости от геометрических характеристик стержня, условий его закрепления, силовых факторов и характеристик материала лопатки и формы. Полученное уравнение представляет собой теоретическую основу для исследования формирования геометрических параметров как самой лопатки, так и элементов формы (стержня, оболочки) на различных технологических этапах.

Ключевые слова: охлаждаемые лопатки, пространственная точность, разнотолщинность, коробление стержня, естественно закрученный стержень, прогиб стержня, угол закрутки стержня, деформация стержня в отливке, термическое расширение, система «оболочка – стержень – отливка», деформационные процессы при формообразовании лопатки.

Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в летательных аппаратах, в морских и земных транспортных установках и в качестве наземных энергетических объектов. Повышение параметров двигателя во многом определяется технологическими решениями, причем их роль от поколения к поколению возрастает по сравнению со схемными и конструкторскими решениями.

Главным направлением совершенствования характеристик ГТД является повышение температуры газа на входе в турбину. Это влечет за собой необходимость улучшения свойств материала лопатки и усложнение ее конструкции прежде всего за счет усложнения внутренней полости, предназначенной для обеспечения охлаждения лопатки. Отклонение геометрических параметров лопатки от параметров, заданных конструктором, снижает технические характеристики двигателя, а жесткие требования к геометрическим размерам наружного и внутреннего профиля (отклонение от теоретического 0,1...0,2 мм) приводят к значительному браку по геометрическим размерам (20...50 % от всех бракованных лопаток при общем браке порядка 30 % [1]).

Охлаждаемые лопатки получают литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). При литье лопаток имеет место совокупность температурных, деформационных, усадочных и других процессов, предопределенных специфиче-

ской технологии и предопределяющих, в свою очередь, качество лопатки, в том числе и по геометрическим параметрам.

Отклонения геометрии лопатки от заданной конструктором формируются в ходе всего цикла изготовления отливки, но главным образом, – в момент заливки формы сплавом и кристаллизации. Именно в это время элементы формы испытывают наибольшие тепловые нагрузки и деформируются, предопределяя соответствующую геометрию лопатки.

Характерными видами брака таких лопаток по геометрии являются разнотолщинность пера лопатки – результат деформирования стержня и пространственное отклонение наружного профиля – результат деформирования оболочки и лопатки в процессе кристаллизации и охлаждения.

Изначально причиной коробления считали низкую огнеупорность материала и связанное с этим снижение прочностных характеристик при высоких температурах, то есть предполагалось, что ведущим физическим фактором является изменение свойств материала стержня (огнеупорность при высоких температурах).

Практика не подтвердила это предположение, так как лопатки, отлитые со стержнями, обожженными при температуре, превышающей температуру заливки, часто давали такой же уровень брака, как и лопатки, отли-

тые с холодноотвержденными стержнями, хотя огнеупорность и прочность первых во много раз превышает аналогичные свойства вторых. В некоторых случаях исследователи отмечали связь величины коробления с огнеупорностью в сочетании с каким-либо другим свойством или технологическим параметром: термостойкостью, величиной термического расширения и др. [2]. Однако и эти зависимости не подтверждаются во всех случаях, так как отражают лишь какие-то частные, а не общие закономерности.

На кафедре СЛАТ УГАТУ предложена теория и последовательно развивается представление о потере пространственной точности лопатки как результате деформации элементов форм (конструкций) под воздействием внешних (по отношению к этой конструкции) факторов [3–6]. Действительно, сопоставляя размеры формы (оболочки и стержня), легко убедиться, что форма представляет собой сложную тонкостенную конструкцию, элементы которой вполне могут деформироваться и при низких температурах. При повышенных температурах склонность к деформациям будет увеличиваться, что характерно для любой конструкции из любых материалов.

Повышение температуры элементов формы, вес сплава и другие технологические параметры процесса надо рассматривать как термические и механические нагрузки, под воздействием которых происходят те или иные деформационные процессы.

Таким образом, ведущим объектом исследования должны быть деформационные процессы в системе «оболочка – стержень» на стадии прокаливания; в системе «оболочка – стержень – отливка» – на стадиях кристаллизации и охлаждения [7].

Особенность конструкции лопаток заключается в том, что перо лопатки имеет начальную (естественную) закрутку. Подобную закрутку имеют и оформляющие перо зоны стержня и оболочки. Конструкции, имеющие первоначальную закрутку, в теории упругости относятся к классу «естественно закрученных стержней». Особенность таких конструкций заключается в том, что при растяжении происходит раскручивание стержня, а при раскручивании происходит растяжение (соответственно, при сжатии происходит закручивание, а при закручивании – сжатие). Если жесткость лопатки (стержня) при из-

гибе (EJ_x) и кручении ($GT_{кр}$) мала (толщина поперечного сечения лопатки (стержня) в 5–10 раз меньше ширины), то возникающие в лопатке (стержне) различные виды напряжений и деформаций оказывают друг на друга взаимное влияние. Изгибные деформации вызывают появление крутильных, кручение вызывает сжатие, а сжатие вызывает изгиб и так далее.

С учетом особенностей конструкции лопатки решена система дифференциальных уравнений закрученного стержня. Система решалась вариационным методом Бубнова – Галеркина. Аппроксимирующие функции принимались в общем виде. В результате получена система уравнений, описывающих перемещение пера лопатки (стержня) в процессе получения отливки. Если жесткость стержня при изгибе и кручении относительно высокая, то система состоит из двух уравнений: уравнения прогиба и уравнения угла поворота. Это характерно для литейной формы, когда жесткость стержня при изгибе и кручении относительно высокая.

Если жесткость на кручение и изгиб будет относительно низкая, то система будет состоять из трех уравнений. В этом случае к уравнениям прогиба и угла поворота добавляется уравнение, описывающее осевую силу (оно представлено в неявной форме). Такая система характерна для литейных стержней, оформляющих внутренний профиль пера охлаждаемой лопатки [8, 9].

Формально такие уравнения могут иметь разный вид в зависимости от характера нагрузки (сосредоточенная, распределенная, механическая, термическая), например,

$$A = \left(\frac{f_0 N}{EJ_x} Z_1 + \frac{M_x}{EJ_x} Z_2 - \frac{l_0 M_y}{l EJ_x} Z_3 - \frac{B \cdot C}{D} \right) \times \frac{1}{H + \frac{W \cdot P}{M}},$$

где

$$B = -\frac{l_0 EJ_{px}}{l EJ_x} Z_4 + \frac{M_y}{EJ_x} Z_5;$$

$$C = \frac{N l_0 J_p}{l GT_0 F} Z_6 + \frac{M_{кр}}{GT_0} Z_7 - \frac{f_0 M_y}{GT_0} Z_8;$$

$$D = 1 + \frac{E l_0^2 J_r^0}{l^2 GT_0} Z_{14} - \frac{E J_p}{GT_0} - \frac{E J_p}{GT_0} - \frac{k_2 J_p}{GT_0} Z_{12};$$

$$H = 1 - \frac{N}{EJ_x} Z_9 + \frac{k_1}{EJ_x} Z_{10};$$

$$W = \frac{l_0 EJ_{px}}{l EJ_x} Z_4 + \frac{M_y}{EJ_x} Z_8;$$

$$P = \frac{l_0 EJ_{px}}{l GT_0} Z_{11} - \frac{M_y}{GT_0} Z_{13};$$

$$M = 1 + \frac{El_0^2 J_r^0}{l GT_0} - \frac{l_0^2 EJ_r^2}{l^2 FGT_0} - \frac{k_2 J_p}{GT_0} Z_{12}.$$

$$\Phi_T = \left(-\frac{Nl_0 J_p}{l FGT_0} Z_6 + \frac{M_{кр}}{GT_0} Z_7 - \frac{f_0 M_y}{GT_0} Z_8 - \frac{R \cdot P}{H} \right) \times$$

$$\times \frac{1}{L + \frac{B \cdot P}{H}},$$

где

$$R = \frac{M_x}{EJ_x} Z_2 + \frac{f_0 N}{EJ_x} Z_1 - \frac{l_0 M_y}{l EJ_x} Z_3;$$

$$L = 1 + \frac{El_0^2 J_r^0}{l^2 GT_0} - \frac{El_0^2 J_p^2}{l GT_0 F} - \frac{k_2 J_p}{GT_0} Z_{12}.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

A – максимальный прогиб пера лопатки в направлении оси y в результате деформации;

$w = AX(z)$ – текущий прогиб в результате деформации, где $X(z)$ – некоторая функция, отражающая закон изменения прогиба в направлении оси y в результате деформации;

f_0 – начальный прогиб оси z пера лопатки в направлении оси y до деформации;

$w_0 = f_0 X_0(z)$ – текущий прогиб вертикальной оси z лопатки, где $X^0(z)$ – некоторая функция, отражающая закон изменения прогиба в направлении оси y до деформации;

Φ_T – угол закрутки на торце пера в результате деформации;

$\varphi = \Phi_T Y(z)$ – угол закрутки текущего сечения в результате деформации, где $Y(z)$ – некоторая функция, отражающая изменение угла закрутки текущего сечения в результате деформации;

l_0 – начальный угол закрутки на торце пера;

$\varphi_0 = \frac{l_0 \cdot z}{l}$ – угол начальной закрутки пера (заданный конструктором), где l – начальная

длина пера, z – высота текущего сечения от корневого сечения;

$X_0(z), X(z), Y(z)$ – функции отвечающие соответствующим граничным условиям (условиям закрепления);

$Z_1 \dots Z_{14}$ – выражения, отражающие граничные условия (условия закрепления), например,

$$Z_1 = \frac{\int_0^l X^0(z)X(z)dz}{\int_0^l X^{ll}(z)X(z)dz}; \quad Z_7 = \frac{\int_0^l Y(z)dz}{\int_0^l Y'(z)Y(z)dz};$$

$$Z_{11} = \frac{\int_0^l X'(z)Y(z)dz}{\int_0^l Y'(z)Y(z)dz}; \quad Z_{13} = \frac{\int_0^l Y(z)dz \int_0^l X'(z)dz}{\int_0^l Y'(z)Y(z)dz};$$

$N, M_x, M_y, M_{кр}$ – силовые факторы – осевая сила, изгибающие и крутящий моменты соответственно;

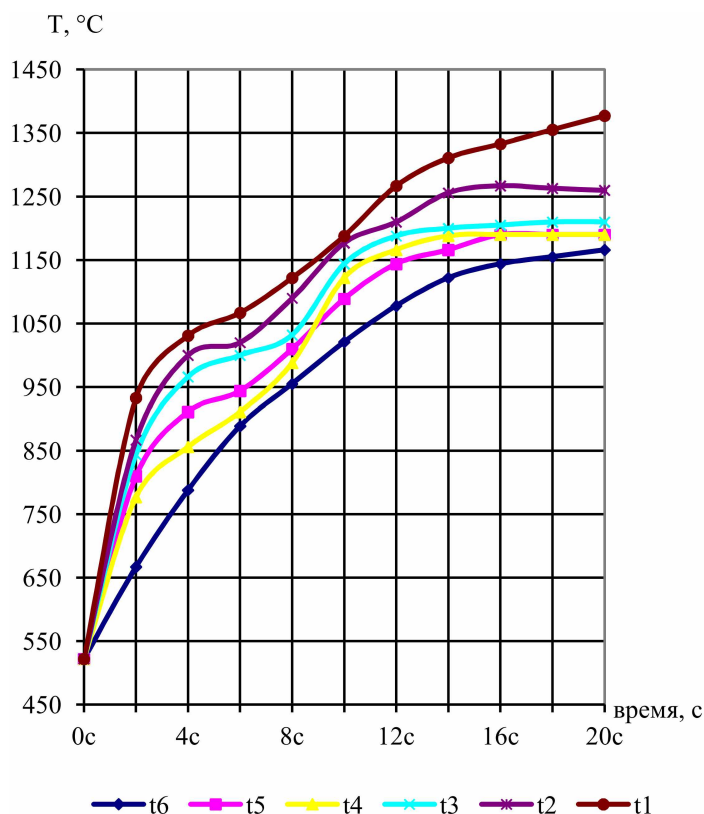
$l_0, l, J_x, J_p, J_{px}, J_r^0, T_0$ – геометрические характеристики лопатки;

E, G и k_1, k_2 – упругие характеристики материала лопатки и литейной формы.

Полученное решение представляет собой теоретическую основу для исследования формирования геометрических параметров как самой лопатки, так и элементов формы (стержня, оболочки) на различных технологических этапах.

Деформационные процессы при формообразовании лопатки (или элементов формы) могут быть обусловлены как механическим, так и термическим воздействием [10]. Естественно полагать, что в условиях проковки, заливки и кристаллизации термическое воздействие будет играть ведущую роль.

Выполненные ранее эксперименты подтвердили неравномерность распределения температуры в керамическом стержне при заливке охлаждаемой лопатки. Установлено, что неравномерное распределение температуры по толщине оболочки и стержня возникает даже при прокаливании формы со скоростью 4...6 °С/мин. Наибольшая разность температур при прокаливании достигает 30...40 °С, а при заливке расплава может достигать 200 °С и более (см. рисунок).



Распределение температуры по ширине керамического стержня при заливке расплава. Точка замера температуры t1 соответствует выходной кромке, точка t6 – входной кромке

Заключение

Таким образом, рассмотрена теоретическая основа для изучения и последующего управления технологическим процессом с целью повышения пространственной геометрической точности литых охлаждаемых лопаток ГТД. Получено экспериментальное подтверждение теоретическим предпосылкам по отдельным технологическим этапам.

Однако, как уже отмечалось, процесс литья охлаждаемых лопаток – один из самых сложных и многофакторных процессов. Сложность полученной аналитической математической модели отражает фактическую сложность процесса. Поэтому все аспекты аналитической модели еще не отработаны. Многофакторность и высокая стоимость литья охлаждаемых лопаток делает затруднительными прямые экспериментальные исследования, что повышает актуальность теоретических и моделирующих методов.

Литература

1. *Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей* / [А.Г. Братухин, Г.К. Язов, Б.Е. Карасев и др.]; под ред.

А.Г. Братухина и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.

2. *Ветров, П.В. Литье лопаток с готовым трактом* / П.В. Ветров // *Авиационная промышленность. Приложение.* – 1971. – № 3. – С. 20–22.

3. *Исследование термических факторов, влияющих на точность отливок* / А.С. Горюхин, А.С. Чёлушкин, В.М. Степанов, Е.Н. Герман // *Авиационная промышленность.* – 1976. – № 6. – С. 19–20.

4. *Чёлушкин, А.С. Теоретический анализ условий деформирования стержней при литье пустотелых лопаток* / А.С. Чёлушкин, А.С. Горюхин // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1976. – № 3. – С. 165–168.

5. *Чёлушкин, А.С. К теоретическому анализу условий деформирования стержней при литье тонкостенных отливок* / А.С. Чёлушкин // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1981. – № 1. – С. 107–108.

6. *Анализ математической модели процесса получения точнолитых охлаждаемых лопаток* / В.М. Паращенко, А.С. Чёлушкин, А.С. Горюхин, А.В. Истомин // *Прогрессивные технологические процессы, оборудование и*

экологические аспекты в литейном производстве: тр. Всерос. науч. конф. – Пенза, 1997.

7. Автоматизированная система технологической подготовки производства лопаток ГТД на базе экспертной системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: защищена 20.11.2013: утверждена 20.01.2014 / Е.С. Гайнцева. – Уфа: УГАТУ, 2013. – 146 с.

8. Павлинич, С.П. База знаний экспертной системы получения качественной отливки лопатки турбин / С.П. Павлинич, А.С. Горюхин, Е.С. Гайнцева // Вестник Уфимского государственного авиационного техническо-

го университета. – 2013. – Т. 17, № 1. – С. 86–91.

9. Павлинич, С.П. Технологическая подготовка производства лопаток газотурбинных двигателей на базе экспертной системы / С.П. Павлинич, А.С. Горюхин, Е.С. Гайнцева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 3. – С. 175–180.

10. Горюхин, А.С. Оценка качества получения литых охлаждаемых лопаток / А.С. Горюхин, В.А. Енгулатова // Сборник научных трудов. – Барнаул: БАГТУ, 2001.

Гайнцева Екатерина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; gaintsevae@yandex.ru.

Горюхин Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; GoruhinAS@yandex.ru.

Ганиев Радис Раилович, ассистент кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; radis95@bk.ru.

Деменок Олег Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; dobor999@mail.ru.

Кулаков Борис Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой литейного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kul@lit.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 1 июля 2019 г.

DOI: 10.14529/met190306

THEORETICAL BASES OF INCREASING THE SPATIAL GEOMETRIC ACCURACY OF CAST COLDED GTE BLADES

E.S. Gayntseva¹, gaintsevae@yandex.ru,

A.S. Gorukhin¹, GoruhinAS@yandex.ru,

R.R. Ganiev¹, radis95@bk.ru,

O.B. Demenok¹, dobor999@mail.ru,

B.A. Kulakov², kul@lit.susu.ac.ru

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article presents the equations of deflection and the angle of twist of the rod depending on the geometric characteristics of the rod, the conditions for its fixing, the force factors and the characteristics of the blade material and shape. The resulting equation is a theoretical basis for the study of the formation of geometric parameters, both the blade itself and the form elements (core, shell) at various technological stages.

Keywords: cooled blades, spatial accuracy, thickness variation, core buckling, naturally twisted rod, core deflection, core twist angle, core deformation in a casting, thermal expansion, shell-core-casting system, deformation processes during blade formation.

References

1. Bratukhin A.G., Yazov G.K., Karasev B.E. et al. *Sovremennyye tekhnologii v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley* [Modern Technologies in Production Gas-Turbine Engines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1997. 416 p.
2. Vetrov P.V. [Casting the Blades with the Finished Path]. *Aviatsionnaya promyshlennost'. Prilozheniye* [Aviation Industry. Appendix], 1971, no. 3, pp. 20–22. (in Russ.)
3. Goryukhin A.S., Chelushkin A.S., Stepanov V.M., German E.N. [Investigation of Thermal Factors Affecting the Accuracy of Castings]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 1976, no. 6, pp. 19–20. (in Russ.)
4. Chelushkin A.S., Goryukhin A.S. [Theoretical Analysis of the Conditions of the Deformation of the Rods when Casting Hollow Blades]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [University News. Ferrous Metallurgy], 1976, no. 3, pp. 165–168. (in Russ.)
5. Chelushkin A.S. [To the Theoretical Analysis of the Conditions of the Deformation of the Rods when Casting Thin-Walled Castings]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [University News. Ferrous Metallurgy], 1981, no. 1, pp. 107–108. (in Russ.)
6. Parashchenko V.M., Chelushkin A.S., Goryukhin A.S., Istomin A.V. [Analysis of a Mathematical Model of the Process for Producing Precision Cast Cooled blades]. *Progressivnyye tekhnologicheskiye protsessy, oborudovaniye i ekologicheskiye aspekty v liteynom proizvodstve: Trudy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Progressive Technological Processes, Equipment and Environmental Aspects in the Foundry. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference]. Penza, 1997. (in Russ.)
7. Gayntseva E.S. *Avtomatizirovannaya sistema tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva lopatok GTD na baze ekspertnoy sistemy: dis. kand. tekhn. nauk* [An Automated System for the Technological Preparation of the Production of GTE Blades Based on an Expert System. Cand. Sci. Diss.]. Ufa, 2013. 146 p.
8. Pavlinich S.P., Goryukhin A.S., Gayntseva E.S. Possibility of Application of Expert Systems in CALS Technologies at the Foundry. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2013, vol. 17, no. 1, pp. 86–91. (in Russ.)
9. Pavlinich S.P., Goryukhin A.S., Gayntseva E.S. Technological Preparation of Production Gas Turbine Engine Blades Based Expert System. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2014, vol. 18, no. 3, pp. 175–180. (in Russ.)
10. Goryukhin A.S., Engulatova V.A. [Assessment of the Quality of the Production of Cast Cooled Blades]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of Scientific Papers]. Barnaul, BAGTU Publ., 2001. (in Russ.)

Received 1 July 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Теоретические основы повышения пространственной геометрической точности литых охлаждаемых лопаток ГТД / Е.С. Гайнцева, А.С. Горюхин, Р.Р. Ганиев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 53–58. DOI: 10.14529/met190306

FOR CITATION

Gayntseva E.S., Gorukhin A.S., Ganiev R.R., Demenok O.B., Kulakov B.A. Theoretical Bases of Increasing the Spatial Geometric Accuracy of Cast Cooled GTE Blades. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 53–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190306