

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.74

Трапезников Н.В., Шумков А.А., Матыгуллина Е.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАЛКИ

Аннотация. Описана методика разработки математической модели для численного расчета напряженно-деформированного состояния керамического стержня охлаждаемой лопатки ГТД в системе «керамический стержень-керамическая оболочковая форма». Для проведения численного расчета значений пластической деформации в системе «керамический стержень-керамическая оболочковая форма» при предварительной прокатке использован программный комплекс конечно-элементного анализа ESI ProCAST. Задачей математического моделирования является определение зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) керамического стержня при предварительном прокаливании литейного блока перед заливкой от режима прокатки. Для решения поставленной задачи сгенерирована сетка конечных элементов с размером, обеспечивающим оптимальную точность расчета. После построения сетки и ее оптимизации заданы граничные условия. В данном случае граничными условиями являются термическая нагрузка, стандартная земная гравитация, ограничение перемещения, интегральный коэффициент степени черноты тела. Анализ полученных расчетных данных представлен в виде зависимости значений НДС в керамическом стержне от режима прокатки. Разработанная схема расчета позволяет спрогнозировать деформацию керамического стержня при предварительной прокатке литейного блока и скорректировать значения параметров режима прокатки литейного блока для снижения брака и повышения выхода годных литых заготовок.

Ключевые слова: математическая модель, керамика, деформация, ProCAST, стержень, лопатка, прокатка.

Введение

В настоящее время наблюдается усложнение конструкции газотурбинных двигателей (ГТД), для нормальной работы которых необходимо более эффективное охлаждение лопаток ГТД. Эффективность охлаждения обеспечивается усложнением конфигурации внутренних полостей лопаток. Вследствие этого происходит усложнение технологического процесса изготовления и последующей обработки охлаждаемых лопаток ГТД [1-4]. Одним из наиболее распространенных видов брака при производстве лопаток ГТД является коробление керамического стержня, используемого для получения внутренних каналов лопатки. Коробление керамического стержня происходит в области высоких температур около 1300°C и зависит от большого числа факторов: геометрии стержня, зернового и химического состава керамики, от технологических режимов предварительной прокатки формы перед заливкой и самой заливки формы.

Для рационального выбора технологических режимов и определения свойств различных материалов применяется математическое моделирование литейных процессов (САМ ЛП). Наиболее известными представителями программного обеспечения такого типа являются ESI ProCAST и СКМ ЛП ПолигонСофт [5-7].

Метод конечных элементов (МКЭ), используемый в программах, позволяет с большой точностью учесть геометрию отливки и выявить незначительные металлургические дефекты.

Математическое моделирование позволяет выявить несовершенства технологических процессов, из-за которых может возникнуть брак, и способы их

устранения. Использование математического моделирования позволяет сократить длительность производственного цикла за счет оптимизации технологических процессов, снизить затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), проектирование оснастки и элементов литейной формы.

Задачей математического моделирования является разработка эффективных способов управления качеством отливок, в том числе по геометрическим показателям.

В работе [8] рассмотрены вопросы, связанные с определением напряженно-деформированного состояния кристаллизующейся блочной лопатки турбины низкого давления, однако они не в полной мере отражают факторы, влияющие на геометрическую точность стержневых лопаток ГТД.

Материалы и методы исследования

Технологией изготовления авиационных лопаток является литье по выплавляемым моделям с направленной кристаллизацией. Основной принцип технологии заключается в получении керамической оболочковой формы путем послойного нанесения огнеупорного материала на восковую выплавляемую модель, после чего восковую модель выплавляют, а изготовленную керамическую оболочковую форму прокаливают с целью удаления остатков модельной массы и влаги. Внутренние полости отливки формируются керамическими стержнями [9-14].

Технология изготовления лопаток ГТД достаточно трудоемкая, поэтому включает в себя несколько технологических операций. Первая операция заключается в предварительной прокатке керамической

оболочковой формы по определенному режиму до заданной температуры в устройстве предварительного подогрева форм (УППФ).

Второй технологической операцией является заливка керамических оболочковых форм (КОФ) расплавом в вакууме. Заливка прокаленного керамического блока осуществляется с высокой скоростью слива расплава, которая ограничена возможностями заливочной установки и конфигурацией литниково-питающей системы.

Залитую КОФ опускают в жидкий алюминий, являющийся охлаждающей средой. Скорость опускания залитой керамической формы задается с учетом соблюдения принципа направленной кристаллизации.

Во время технологических операций по изготовлению лопаток ГТД керамический стержень испытывает большой спектр нагрузок. Расчет НДС керамического стержня начинается с подготовки САД-модели стержня (рис. 1), отливки и литниково-питающей системы. Для САД-моделирования в работе использован программный комплекс высокого уровня Simens Unigraphics NX12. Для учета теплопередачи в процессах проковки и заливки керамической литейной формы подготовлена САД-модель УППФ.

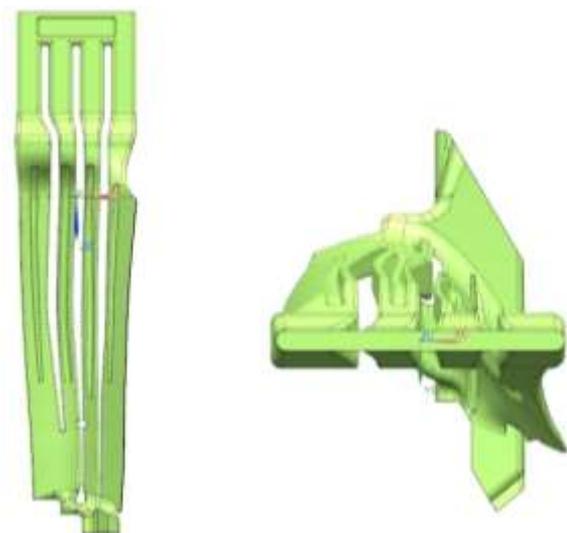


Рис. 1. САД-модель керамического стержня, подготовленная в Simens Unigraphics NX12

На основе подготовленной САД-модели генерируется конечно-элементная сетка с размером элемента, обеспечивающим оптимальную точность расчетов. Характерные размеры конечно-элементной модели (КЭМ): для лопатки и керамического стержня 0,5-1 мм, ЛПС 1,5-3 мм, для керамики 4-6 мм, для УППФ 8-10 мм. Для подготовки и оптимизации КЭМ использован программный комплекс ESI ProCAST.

Математическое моделирование процесса проковки керамической оболочковой формы проходит в полной постановке с использованием САД-модели, имитирующей УППФ (рис. 2). Задачей моделирования является исследование влияния режима предварительной проковки КОФ на температурные поля КОФ

и керамического стержня в процессе проковки, а также выявление мест концентрации напряжений, возникающих в процессе предварительной проковки и их численные выражения.

Напряжения возникают в керамическом стержне во время процесса проковки вследствие термического нагружения.

Задача тепломассопереноса от нагревателей к керамической оболочковой форме решается с помощью дифференциальных уравнений, учитывающих фактор видимости в общем виде [15, 16]:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_{ic} (T_i - T_c) - \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_c^4), \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – коэффициент теплоотдачи; индекс «с» соответствует параметрам окружающей среды; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцана.

Для материала формы и стержня дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho_\Phi \frac{\partial H_\Phi}{\partial \tau} - \text{div} [\lambda_\Phi (T) \text{grad}(T)] = 0, \quad (2)$$

$$H_\Phi (T) = \int_0^T C_{\rho_\Phi} (T) dT. \quad (3)$$

В дополнение к уравнению теплопроводности вводятся граничные условия на поверхности контакта керамическая форма–керамический стержень:

$$-\lambda_\Phi \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_o \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{o-\Phi} (T_o - T_\Phi). \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи в программном комплексе ProCAST подготавливается конечно-элементная модель литейного блока в сборе с нанесенной керамической оболочковой формой с установленной в УППФ (рис. 2).

Полная КЭМ представляет проковочную печь, в которую установлен литейный блок с нанесенной на него керамической оболочковой формой (рис. 2, в).

Расчет напряженно-деформированного состояния в форме и керамическом стержне ведется на протяжении всего расчетного времени задачи. Уравнение равновесия в этом случае имеет вид:

$$\text{div} \sigma = 0. \quad (5)$$

Физические и геометрические соотношения для этой задачи записываются в виде:

$$\sigma = {}^4 D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_r), \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T]. \quad (7)$$

Деформации, зависящие от температуры, вычисляются как

$$\varepsilon_k = \alpha(T) \hat{\Delta} T, \quad (8)$$

где $\alpha(t)$ – коэффициент теплового расширения (КТР).

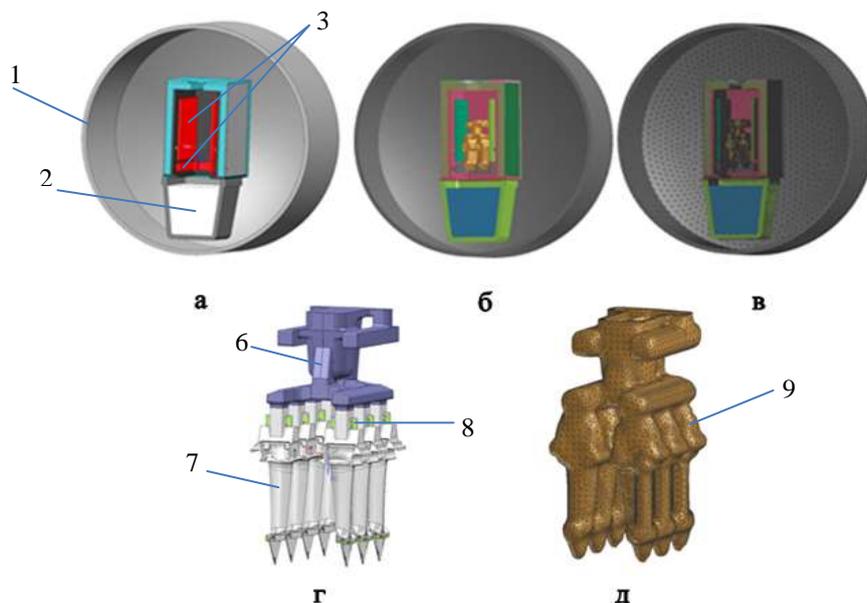


Рис. 2. CAD-модель УППФ (а) и литейного блока (г) в сборе (б), КЭМ литейного блока (д) и УППФ (в) в сборе: 1 – обечайка; 2 – алюминий; 3 – нагревательный элемент; 4 – корпус; 5 – ванна; 6 – литниково-питающая система; 7 – лопатка; 8 – керамический стержень; 9 – керамическая оболочковая форма

Граничные условия перемещений соответствуют установке керамической формы в печь: $\bar{U}_\phi = 0$ и задаются на нижней границе формы.

Касательные и нормальные напряжения непрерывны на контактных границах:

$$[\bar{\sigma}_\tau] = [\bar{\sigma}_n]. \quad (9)$$

Результаты и обсуждения

Численное моделирование процесса предварительной прокалики керамического литейного блока проведено в программном пакете ProCAST. Изменения температурного поля керамического литейного блока и стержня показаны на рис. 3.

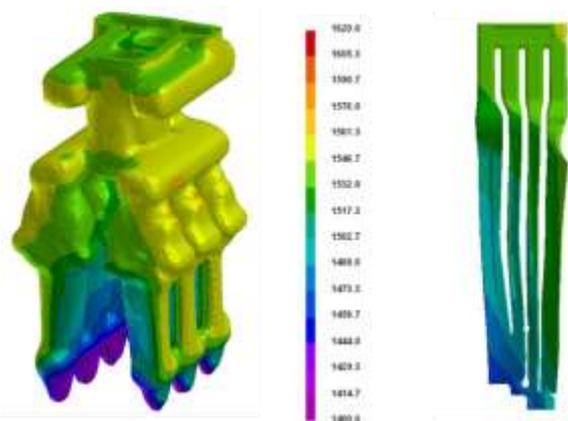


Рис. 3. Температурное поле керамической оболочковой формы и стержня перед заливкой, °C

В процессе предварительной прокалики керамическая оболочковая форма нагревается неравномерно.

Связано это с наличием жидкого алюминия, используемого в качестве охлаждающей среды. Из рис. 3 видно, что после достижения керамической формой температуры 700°C жидкий алюминий начинает охлаждать нижнюю ее часть (см. рис. 3), вследствие чего нижняя часть керамического стержня нагревается медленнее.

К концу процесса предварительной прокалики температурные поля керамической оболочковой формы и стержней неравномерные. Показатели температурных полей керамической оболочковой формы и стержней представлены в таблице.

Показатели температурного поля керамической оболочковой формы со стержнями в процессе прокалики

№ п/п	Наименование	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Средняя температура, °C	Градиент температур, °C
1	Керамическая форма	1399,4	1563,3	1528,4	164
2	Стержень 1	1461,04	1552,3	1513,5	91,26
3	Стержень 2	1457,2	1551,7	1512,5	94,5
4	Стержень 3	1469,6	1552,7	1518,3	83,1
5	Стержень 4	1460,5	1552,94	1514,4	92,44
6	Стержень 5	1472,1	1548,7	1517,3	76,6
7	Стержень 6	1468,5	1552,04	1519,9	83,54
8	Стержень 7	1486,5	1548,5	1526,6	62

Как видно из таблицы, в конце процесса предварительной прокалики на всех элементах керамической формы градиент температур имеет максимальное значение 164°C у оболочковой формы и среднее значение 90°C у керамических стержней.

Второй этап деформации происходит при температуре 1000°C и вызван появлением затруднённого термического расширения вследствие различных коэффициентов линейного расширения керамической формы и стержня. Этот этап лежит в упругой области деформации керамического стержня и не приводит к короблению.

Список литературы

1. Дибров И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства в России // Тр. VIII съезда литейщиков России. Т. 1. С. 3–11.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. М.: МИСиС, 2001. 632 с.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Bayley F.J. Performance and design of transpiration cooled turbine blading, AGARD Conference Proceedings No. 229. High Temperature Problems in Gas Turbine Engines, Paper 10, 1978.
5. Kovalyova T., Eremin E., Arinova S., Medvedeva I., Dostayeva A. Enhancing surface roughness of castings when sand-resin mold casting // Metallurgija. 2017. Т. 56. № 1-2. С. 135–138.
6. Cao, Y. & Zhang, H. & Shi, Y. & Huang, L. (2018). Numerical Simulation and Optimization of Investment Cast Thin-Wall Blade Based on ProCAST Software. Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys. 38. 1226-1229. 10.15980/j.tzzz.2018.11.017.
7. Широких Э.В., Перфилова В.Ю. Совершенствование литниковых систем с помощью компьютерного моделирования литейного процесса // Вестник Московского государственного областного социально-гуманитарного института. 2015. № 20 (4). С. 65–69.
8. Дубровская А.С., Донгаузер К.А. Численный анализ эволюции напряженно-деформированного состояния кристаллизующихся лопаток турбин // Вестник ПГТУ. Механика. Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2012. №1. С. 16–30
9. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: Моск. ин-т стали и сплавов, 2001. 632 с.
10. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 360 с.
11. Udalov, Yu & Guskova, Natalya & Sidorov, Alexander. (2020). THE CREEP OF OXYDE CERAMICS OF HYPEREUTECTIC COMPOSITION. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 53. 23-26. 10.36807/1998-9849-2020-53-79-23-26.
12. Wilkinson, D.S. (2017). Creep and Creep Rupture of Oxide Ceramics. 10.1016/B978-0-12-803581-8.02873-3.
13. 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.
14. Горюхин А.С., Енгулатова В.А. Оценка качества получения литых охлаждаемых лопаток // Сборник научных трудов. Барнаул: БАГТУ, 2001.
15. Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник. В 3 т. / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. Т. 3. М.: Машиностроение, 1968. 463 с.
16. Котовский В.Н. Теплопередача: конспект лекций. М.: МГТУ ГА, 2015. 76 с.

Сведения об авторах

Трапезников Никита Владимирович – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: niktrap@yandex.ru.

Шумков Алексей Александрович – старший преподаватель кафедры материалов, технологий и конструирования машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Матыгулина Елена Вячеславовна – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: matik68@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A CERAMIC ROD DURING CALCINATION

Trapeznikov Nikita V. – Graduate Student, Department of Materials, Technology and Construction Machines, Perm National Research Polytechnic University; Perm, Russia. E-mail: niktrap@yandex.ru.

Shumkov Aleksei A. – Senior Lecturer, Department of Materials, Technology and Construction Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Matygullina Elena V. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Materials, Technology and Construction Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: matik68@rambler.ru.

Abstract. *A method for developing a mathematical model for numerical calculation of the stress-strain state of a ceramic rod of a cooled gas turbine engine blade in the ceramic rod-ceramic shell form system is described. The ESI ProCAST finite element analysis software package is used for numerical calculation of plastic deformation values in the ceramic rod-ceramic shell form system during pre-calcination. The task of mathematical modeling is to determine the dependence of the stress-strain state (VAT) of a ceramic rod during pre-calcination of the casting block before pouring on the calcination mode. To solve this problem, a finite element grid is generated with a size that provides optimal calculation accuracy. After constructing the grid and optimizing it, the boundary conditions are set. In this case, the boundary conditions are the thermal load, the standard earth gravity, the restriction of movement, and the integral coefficient of the degree of blackness of the body. Analysis of the calculated data obtained is presented as a dependence of the VAT values in the ceramic rod on the calcination mode. The developed calculation scheme allows you to predict the deformation of the ceramic rod during pre-calcination of the casting block and adjust the values of the parameters of the calcination mode of the casting block to reduce scrap and increase the yield of suitable cast blanks.*

Keywords: *mathematical model, ceramics, deformation, ProCAST, rod, blade, calcining.*

Ссылка на статью:

Трапезников Н.В., Шумков А.А., Матыгуллина Е.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния керамического стержня в процессе проковки // Теория и технология металлургического производства. 2020. №4(35). С. 29-34.
Trapeznikov N.V., Shumkov A.A., Matygullina E.V. Mathematical modeling of the stress-strain state of a ceramic rod during calcination. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 35, no. 4, pp. 29-34.