ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 12, с. 1821–1824

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ С КЕРАМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2021 г. А. Б. Кувалдин[1], А. Р. Лепешкин[1, 2, *], О. И. Ильинская[2], М. А. Федин[1], А. О. Кулешов[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия*

**E-mail: lepeshkin.ar@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.
После доработки 26.07.2021 г.
Принята к публикации 27.08.2021 г.

Приведены результаты исследований и моделирования нестационарного теплового состояния деталей с керамическими покрытиями в высокочастотном электромагнитном поле. Разработанную методику можно использовать для нагрева и моделирования нестационарного теплового состояния лопаток турбин с керамическими теплозащитными покрытиями и других охлаждаемых деталей газотурбинных двигателей.

DOI: 10.31857/S0367676521120218

ВВЕДЕНИЕ

В перспективных авиационных двигателях и энергетических установках предусматривается применение керамических теплозащитных покрытий (ТЗП) для улучшения работы лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей [ГТД] и газотурбинных энергетических установок [ГТУ]. Повышение температуры газа перед турбиной позволяет улучшить характеристики ГТД [1–4].

Для определения долговечности лопаток турбин с ТЗП проводятся их испытания на газодинамических стендах [4, 5] и на установках с использованием высокочастотного индукционного нагрева [6–13]. С точки зрения снижения стоимости испытаний и повышения точности моделирования теплового состояния деталей целесообразно проводить циклические испытания охлаждаемых деталей и лопаток турбин с ТЗП на установках индукционного нагрева.

В работах [8–10] получены результаты исследований стационарных распределений температуры по толщине стенки детали с ТЗП при высокочастотном индукционном нагреве.

Задачи моделирования нестационарного теплового состояния охлаждаемых лопаток ГТД и других деталей с керамическими теплозащитными покрытиями в высокочастотном электромагнитном поле при испытаниях являются актуальными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка методики моделирования и исследование нестационарного теплового состояния деталей и лопаток турбин с керамическими покрытиями в высокочастотном электромагнитном поле при испытаниях являются актуальными задачами. Их новизна состоит в моделировании и исследовании нестационарного теплового состояния детали с ТЗП и нестационарного перепада температуры по толщине керамического покрытия на разных частотах тока. Моделирование теплового состояния деталей и лопаток турбин с керамическими ТЗП в высокочастотном электромагнитном поле при циклических испытаниях проводили на двух установках, которые работают на частотах тока 0.4 и 2 МГц.

На рис. 1 показаны устройство индуктора и охлаждаемая лопатка турбины с ТЗП при циклических испытаниях. На данном рисунке можно увидеть свечение от нагретой лопатки турбины авиационного ГТД на максимальном режиме. Нестационарное тепловое состояние лопатки турбины с

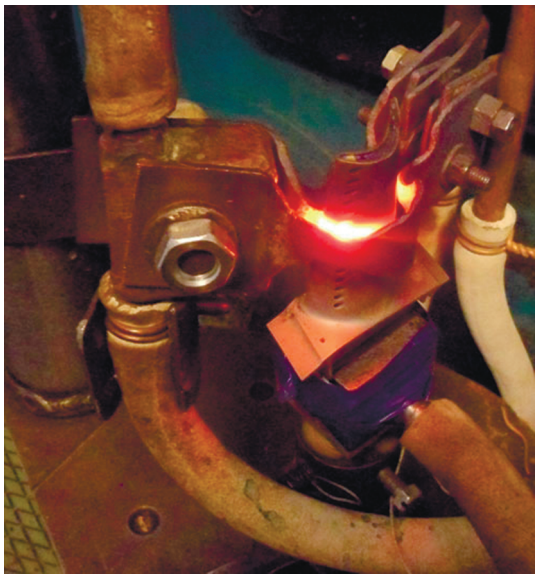

Рис. 1. Лопатка турбины и устройство индуктора при циклических испытаниях.

керамическим ТЗП обеспечивалось необходимыми режимами высокочастотного индукционного нагрева, режимами охлаждения с использованием внутреннего воздуха, подаваемого во внутренние каналы лопатки и внешнего воздуха, подаваемого на поверхность лопатки в конце испытательного термоцикла. Указанные параметры высокочастотного нагрева и охлаждения определялись перед испытаниями на основе расчетного моделирования нестационарного теплового состояния лопатки турбины с ТЗП с использованием метода конечных элементов. Регистрация температур на поверхности лопатки осуществлялась с помощью термопар и термографа Flir.

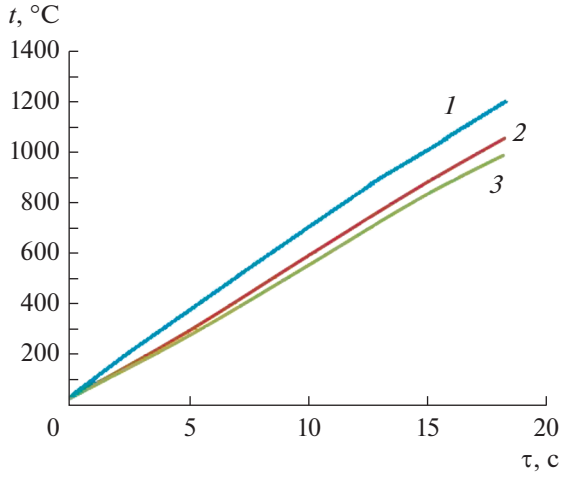

Рис. 2. Кривые нестационарного теплового состояния охлаждаемой детали с керамическим покрытием (на частоте тока 2 МГц): *1* – температура поверхности покрытия, *2* – температура наружной поверхности детали, *3* – температура внутренней поверхности детали.

При нормальной температуре керамические ТЗП имеют свойства диэлектрических материалов. При повышении температуры в керамических ТЗП появляются полупроводниковые свойства, что приводит к повышению электрических потерь и электропроводности (к появлению дополнительного теплового потока) в керамических покрытиях. Этот важный фактор необходимо учитывать при моделировании теплового состояния лопаток турбин с керамическими ТЗП.

В расчетном моделировании нестационарного теплового состояния охлаждаемой детали учитывались свойства жаропрочного никелевого сплава и керамического материала покрытия из диоксида циркония, различные граничные условия по температуре и коэффициентам теплоотдачи наружного и внутреннего воздуха, тепловые потоки на поверхности детали и по глубине поверхностного слоя детали с учетом частоты тока, а также дополнительный тепловой поток в керамическом покрытии из-за указанных выше диэлектрических потерь и некоторого повышения электропроводности. По результатам расчетного моделирования получены кривые нестационарного теплового состояния до температуры 1200°С и изменения перепада температур охлаждаемой детали с керамическим теплозащитным покрытием толщиной 0.22 мм в высокочастотном электромагнитном поле на частотах тока 2 МГц (рис. 2) и 0.4 МГц (рис. 3), а также с покрытием толщиной 0.1 мм на

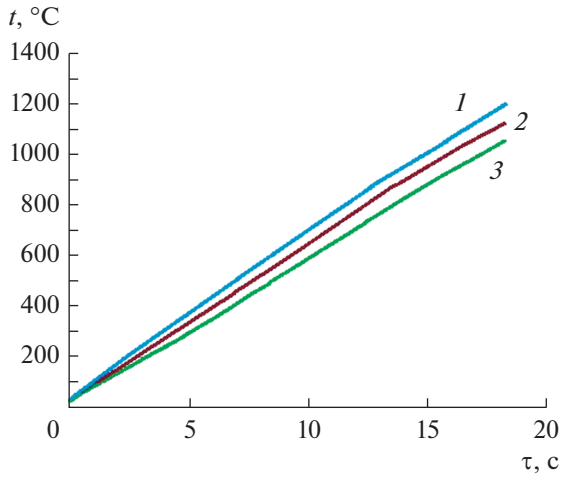

Рис. 3. Кривые нестационарного теплового состояния охлаждаемой детали с керамическим покрытием (на частоте тока 0.4 МГц): *1* – температура поверхности покрытия, *2* – температура наружной поверхности детали, *3* – температура внутренней поверхности детали.

частоте 2 МГц. Анализ полученных результатов показывает, что в конце нестационарного нагрева детали с толщиной покрытия 0.22 мм перепады температур составляют 70°С (на частоте 0.4 МГц) и 140°С (на частоте 2 МГц); для детали с толщиной покрытия 0.1 мм соответственно 75°С (на частоте 2 МГц), что хорошо согласуется с экспериментальными данными по измерениям температур с помощью термопар и термографа. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные и результаты моделирования нестационарного теплового состояния охлаждаемой детали показывают, что с помощью высокочастотного индукционного нагрева можно проводить циклические испытания охлаждаемых лопаток турбин авиационных ГТД. При этом условия нестационарного теплового состояния деталей и лопаток турбин и перепады температуры по керамическому ТЗП соответствуют эксплуатационным условиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследований моделирования нестационарного теплового состояния охлаждаемых деталей с керамическими теплозащитными покрытиями в высокочастотном электромагнитном поле. Анализ полученных расчетных и экспериментальных результатов показал, что нестационарное тепловое состояние охлаждаемых деталей и лопаток турбин и перепады температуры по толщине керамического ТЗП соответствуют эксплуатационным условиям. Разработанная методика позволила повысить темпы нагрева и эффективность ускоренных термоциклических испытаний (с сокращением их сроков) лопаток ГТД с керамическими ТЗП в высокочастотном электромагнитном поле. Разработанную методику можно использовать для высокочастотного нагрева и моделирования нестационарного теплового состояния лопаток турбин с керамическими теплозащитными покрытиями и других охлаждаемых деталей ГТД и ГТУ при испытаниях и исследованиях в различных отраслях машиностроения, в том числе при изучении тепловых деформаций деталей и в технологических процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балдаев Л.Х., Балдаев С.Л., Мазилин И.В. и др.* // Надежн. и безопасн. энергет. 2016. № 2(33). С. 70.

2. *Кашин Д.С., Стехов П.А.* // Труды ВИАМ. 2018. № 2(62). С. 84.

3. *Li B., Fan X., Li D et al.* // Math. Probl. Engin. 2017. V. 2017. Art. No. 147830.

4. *Lepeshkin A.R, Nazarov V.V., Ilinskaya O.I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 899. Art. No. 072002.

5. *Grinkrug M.S., Balli M.K., Tkacheva J.I. et al.* // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engin. 2020. V. 734(2). Art. No. 012022.

6. *Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.* Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. М.: Инфра-М, 2019. 282 с.

7. *Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. и др.* Способ нагрева диэлектрического или полупроводникового материала. Патент РФ № 2416869, кл. H05B 6/64. 2005.

8. *Лепешкин А.Р., Хамидуллин А.Ш., Ильинская О.И. и др.* // Насосы. Турбины. Системы. 2019. № 1(30). С. 48.

9. *Лепешкин А.Р., Ильинская О.И. и др.* // XLIII Акад. чтения по космонавтике. Сборник тезисов. Т. 2. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 88.

10. *Лепешкин А.Р. Бычков Н.Г., Першин А.В.* // Теплофиз. высок. темп. 2010. Т. 48. № 5. С. 734.

11. *Кувалдин А.Б., Федин М.А., Поляков О.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 161; *Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Polyakov O.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 122.

12. *Lepeshkin A., Remchukov S., Yaroslavtsev N. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 1925. Art. No. 012086.

13. *Lepeshkin A., Kuvaldin A., Lepeshkin C. et al.* // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engin. 2020. V. 950. Art. No. 012022.

Simulation of thermal state of parts with ceramic coatings in a high frequency electromagnetic field

A. B. Kuvaldin[a], A. R. Lepeshkin[a, b, *], O. I. Ilyinskaya[b], M. A. Fedin[a], A. O. Kuleshov[a]

[a] *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250 Russia*

[b] *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

**e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com*

The results of investigations and modeling the non-stationary thermal state of parts with ceramic coatings in a high-frequency electromagnetic field are presented. The developed technique can be used for heating and modeling the non-stationary thermal state of turbine blades with ceramic heat-shielding coatings and other cooled gas turbine engine parts.