

УДК 536-539.4

Д-р техн. наук А. Р. Лепешкин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, г. Москва

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРОУСКОРЕНИЙ

Предложена методика исследования температуропроводности и теплопередачи в металлических материалах в поле действия виброускорений. Разработано устройство для определения указанных характеристик на вибростенде в поле действия виброускорений. Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников из никелевого и медного сплавов при воздействии виброускорений. Теплоизолированные теплопроводники с электронагревателем и терморезисторами установлены на балке прямоугольного сечения. Из анализа результатов экспериментальных исследований и скоростей нагрева следует, что температуропроводность теплопроводников возрастает при увеличении амплитуды колебаний балки на вибростенде. При этом, время передачи тепла по теплопроводникам существенно сокращается, т.е. наблюдается ускорение теплопередачи в поле действия виброускорений.

Ключевые слова: методика, нагрев, виброускорение, теплопередача, теплопроводники, температуропроводность, температура.

Введение

Для определения теплового состояния различных деталей двигателей и машин требуется знание теплофизических свойств материалов, в частности, температуропроводности.

Исследование температуропроводности металлических материалов в поле действия ускорений и сил является новой фундаментальной проблемой и имеет важное значение для авиакосмической техники.

Необходимо отметить, что любые виды ускорений: линейные, центробежные и виброускорения влияют на температуропроводность материалов [1–4].

Предложена методика исследования распространения тепла во вращающихся деталях и температуропроводности материалов в поле действия центробежных ускорений и сил.

Развитие авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) устойчиво идет по пути повышения температуры газа перед турбиной. Однако, разработка двигателей пятого поколения, как в России, так и за рубежом наталкивается на серьезные трудности при освоении более высоких температур. Тепловые расчеты ГТД и их элементов выполняются по классическим моделям и во многих случаях плохо согласуются с экспериментом. Максимальные измеренные температуры на реальных объектах значительно превышают расчетные величины, что не обеспечивает не-

обходимую прочность, надежность и ресурс деталей перспективных авиадвигателей. При оценке температурного состояния деталей ротора турбины используются коэффициенты теплопроводности, которые были получены в стационарных условиях земного тяготения ($g = 1$) на ненагруженных образцах.

В реальных условиях лопатки турбин работают при значительных виброускорениях и изменение температуропроводности материала в этих условиях можно ожидать существенным. Вероятно, неучет этого обстоятельства приводит к дополнительному различию температурных полей лопаток турбин прогнозируемых расчетом и наблюдаемых в эксперименте. Кроме виброускорений на роторные детали действуют центробежные ускорения и растягивающая центробежная сила. Влияние центробежных ускорений и сил на температуропроводность материалов представлено в [1, 3].

Влияние сжимающих сил на теплопроводность соединения GaSb ранее исследовалось сотрудниками института физики Даг. НЦ РАН. На этих соединениях при повышении давления до 250...350 МПа теплопроводность повышалась на 15...20% [5]. Исследования влияния растягивающих сил на теплопроводность металлов ранее не проводились.

В [6, 7] приводятся сведения по электронному явлению в металлах, которое опытным путем установили известные русские ученые-физики

Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси в 1913 г. В тридцатые и сороковые годы прошлого столетия академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси работали в ФИАН им. П. Н. Лебедева. Они внесли большой вклад в развитие теории колебаний и других разделов физики. В их опытах 1913 г. при вращении катушки на концах провода возникала разность потенциалов, и, подключенный к концам провода телефон издавал звук. Эти опыты в 1916 г. были усовершенствованы американским ученым Р. Ч. Толменом. Катушка в его опыте приводилась в быстрое вращение и затем резко тормозилась. При этом с помощью баллистического гальванометра регистрировался импульс тока, связанный с инерционным движением свободных электронов (имеющих массу) в тонком медном проводе на катушке. В данных опытах также подтверждается, что ускорения оказывают влияние на электронные явления в металлах, в частности, при торможении. Однако из указанных опытов не было сделано выводов и предположений о возможности появления электронного явления в условиях виброускорений и его влиянии на тепловые процессы в коротких проводниках и в деталях. В [8] приводятся результаты исследований влияния ускорений на появление разности потенциалов на участках проволоки (из-за инерционного движения свободных электронов — эффекта Толмена) при ее скоростном волочении.

Данная работа посвящена актуальной проблеме по исследованию передачи тепла в деталях и теплопроводности металлических материалов деталей в поле действия виброускорений. В работе [9] приведены результаты первых исследований теплопроводности при виброускорениях с использованием устройства с одним теплопроводником.

Методика и результаты исследований

В данной работе предложена методика определения теплофизических характеристик материалов в поле действия виброускорений. Разработано устройство для определения указанных характеристик на вибростенде V8-40 [10] фирмы LDS (рис. 1, 2).

Методика исследований предусматривала закрепление на конце балки 4 двух теплопроводников (хромелевого 1 и медного 2 проводов длиной 55 мм и диаметром 0,5 мм) и небольшого электронагревателя 3 длиной 10 мм, состоящего из нескольких витков провода, который был намотан на скрутке двух указанных теплопроводников (рис. 3). На концах двух теплопроводников и перед электронагревателем приваривались термопары, с помощью которых измерялись температуры (рис. 3): T_1 — температура на конце хромелевого теплопроводника, T_2 — температура

на конце медного теплопроводника, T_3 — температура в начале теплопроводников перед нагревателем. Теплопроводники и электронагреватель были теплоизолированы от балки, установленной на вибростенде.

В соответствии с разработанной методикой исследования проводились на вибростенде, оснащенном автоматической системой управления и поддержания заданной амплитуды и частоты колебаний. Контроль за температурным состоянием теплопроводников, размещенных на балке с электронагревателем, производился компьютерной системой, оснащенной крейтом и измерительными платами. Обработка результатов осуществлялась по разработанной программе. Для питания электронагревателя использовался стабилизированный источник питания. Перед проведением испытаний подавалось стабилизированное питание на нагреватель и записывались базовые показания термопар в течение работы нагревателя.

Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников в поле действия виброускорений при разных амплитудах (размахах) колебаний на частоте 120 Гц. После обработки данных экспериментальных исследований получены кривые скоростей нагрева в зависимости от времени нагрева (или времени передачи тепла), представленные на рис. 4.

По полученным результатам представлены оценки теплопроводности и теплопроводности теплопроводников. Из анализа результатов экспериментальных исследований и скоростей нагрева (рис. 4) следует, что теплопроводность хромелевого теплопроводника при виброускорении 120 g возрастает на 50% по сравнению со статическим состоянием.



Рис. 1. Вибростенд



Рис. 2. Устройство для исследования теплопроводности материалов в поле действия виброускорений

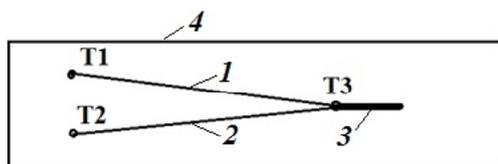


Рис. 3. Расположение теплопроводника на конце балки

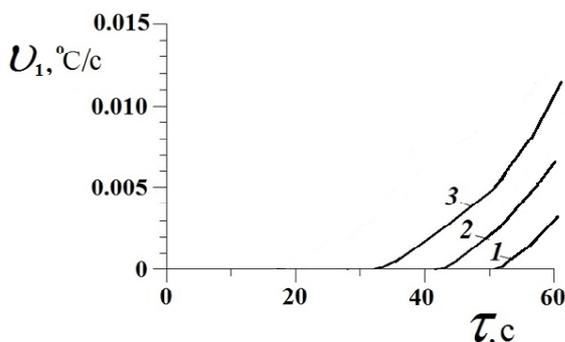


Рис. 4. Кривые скоростей нагрева на конце теплопроводника в зависимости от времени нагрева при воздействии виброускорений:

1 – статическое состояние; 2 – размах колебаний $2A = 3,5$ мм ($f = 120$ Гц), 60 г; 3 – размах колебаний $2A = 7,0$ мм ($f = 120$ Гц), 120 г

На рис. 5 и рис. 6 показаны кривая времени t передачи тепла от начала хромелевого теплопроводника (рис. 5) к его концу и кривая времени t передачи тепла от начала медного теплопроводника (рис. 6) к его концу при разных размахах колебаний $2A$: 0, 3,5 и 7,0 мм. Из анализа данных (рис. 5, 6) следует, что время передачи тепла по хромелевому и медному теплопроводникам сокращается соответственно в 1,6 и 1,3 раза при 120 г по сравнению со статическим состоянием.

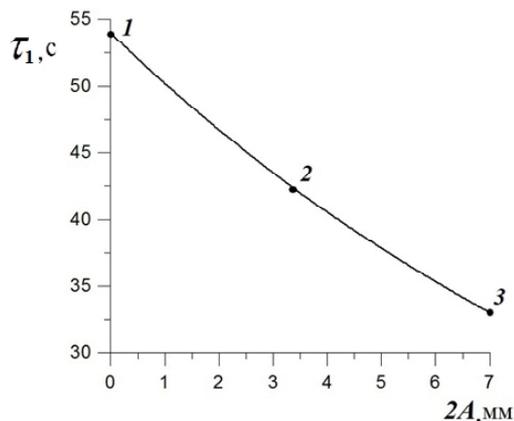


Рис. 5. Кривая времени передачи тепла по теплопроводнику из никелевого сплава в зависимости от размаха колебаний $2A$ при воздействии виброускорений:

1 – статическое состояние; 2 – размах колебаний $2A = 3,5$ мм ($f = 120$ Гц), 60 г; 3 – размах колебаний $2A = 7,0$ мм ($f = 120$ Гц), 120 г

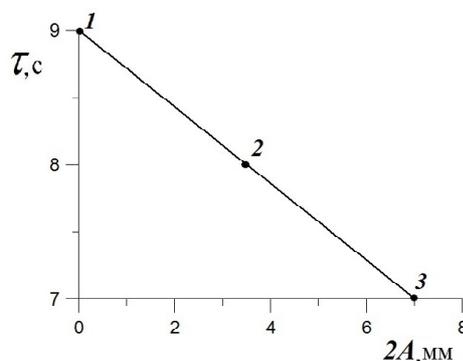


Рис. 6. Кривая времени передачи тепла по теплопроводнику из медного сплава в зависимости от размаха колебаний $2A$ при воздействии виброускорений:

1 – статическое состояние; 2 – размах колебаний $2A = 3,5$ мм ($f = 120$ Гц), 60 г; 3 – размах колебаний $2A = 7,0$ мм ($f = 120$ Гц), 120 г

При увеличении частоты колебаний до 700 Гц (680 г) при размахе колебаний $2A = 1$ мм теплопроводность хромелевого теплопроводника возрастает на 100% по сравнению со статическим состоянием.

В данной работе также проведены электронно-инерционные опыты с использованием специального камертона, ножки которого ударно возбуждались, и современной чувствительной аппаратуры. Следует отметить, что ножки камертона по своим размерам и геометрии идентичны балке, на которой были наклеены теплопроводники.

В концевой части на одной из ножек размещался изолированный медный проводник длиной 55 м и диаметром 0,5 мм в продольном направлении. Соединительные провода от данного проводника были подключены к анализатору сигналов и спектра МПС-200. Перед началом опы-

тов на анализаторе зарегистрирован уровень шума, не превышающий $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ В.

После удара по одной из ножек камертона он возбуждался на частоте 120 Гц. При этом воздействие виброускорений приводило к появлению электрического сигнала переменного тока в медном проводнике с учетом электронно-инерционного эффекта. Максимальная величина виброускорений составила 120 g. Данный электрический сигнал и его спектр частот были зарегистрированы и записаны в анализаторе спектра. На рис. 7 представлен зарегистрированный электрический сигнал, который имеет максимальную амплитуду в импульсе $450 \cdot 10^{-6}$ В и спектр данного сигнала на рис. 8. Возникновение электрического сигнала (рис. 7, 8) в проводнике дополнительно подтверждает, что виброускорения влияют на перемещение свободных электронов в металлах и в результате скорость их дрейфа возрастает.

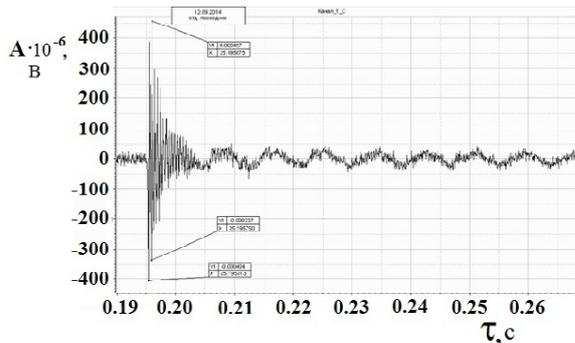


Рис. 7. Электрический сигнал в проводнике при ударном возбуждении камертона

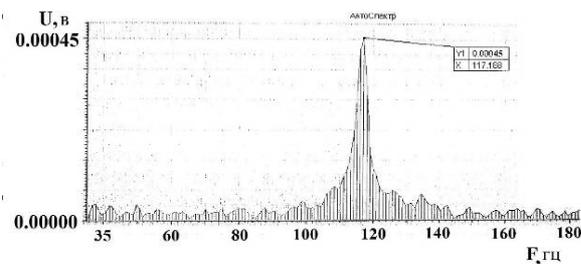


Рис. 8. Спектр электрического сигнала в проводнике при ударном возбуждении камертона

Таким образом, указанный рост температуропроводности из анализа экспериментальных данных связан с увеличением электронной проводимости (скорости дрейфа) в металле за счет перемещения теплоносителей (имеющих массу) — свободных электронов при воздействии виброускорений.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния деталей авиационных двигателей и других

турбомашин, работающих при значительных виброускорениях и других эксплуатационных нагрузках.

Заключение

Разработана методика исследования температуропроводности материалов в поле действия виброускорений. Разработано устройство для определения указанных характеристик на вибростенде в поле действия виброускорений. Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников из никелевого и медного сплавов при воздействии виброускорений. Из анализа результатов экспериментальных исследований и скоростей нагрева следует, что температуропроводность теплопроводников возрастает при увеличении амплитуды колебаний балки на вибростенде. При этом время передачи тепла по теплопроводникам существенно сокращается, т. е. наблюдается ускорение теплопередачи в поле действия виброускорений. Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что температуропроводность теплопроводника из никелевого сплава возрастает на 50 % при размахе колебаний 7 мм при виброускорении 120 g по сравнению со стационарным состоянием без колебаний, а время передачи тепла сокращается в 1,5 раза, а для медного теплопроводника — в 1,3 раза. При исследованиях на камертоне был зарегистрирован электрический сигнал в проводнике при воздействии виброускорений. Указанный рост температуропроводности существенно связан с увеличением электронной проводимости (скорости дрейфа) в металле за счет теплоносителей (имеющих массу) — свободных электронов при воздействии виброускорений. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния деталей авиационных двигателей и других турбомашин, работающих в условиях вибраций.

Список литературы

1. Пат. 2235982 Российская Федерация, МПК H02N 11/00. Способ и установка для определения теплофизических характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил / А. Р. Лепешкин, Н. Г. Бычков ; заявитель и патентообладатель ЦИАМ — № 2010117026/07 ; заявл. 30.04.2010 ; опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.
2. Лепешкин А. Р. Исследование ускорения теплопередачи в поле действия центробежных ускорений и сил / А. Р. Лепешкин, Н. Г. Бычков, П. А. Ваганов // Вестник двигателестроения. — 2012. №2. — С. 269–272.
3. Лепешкин А. Р. Исследование нового эффекта температуропроводности материалов в поле действия центробежных ускорений и сил на

- разгонном стенде / Лепешкин А. Р., Бычков Н. Г. // *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков : Национальный аэрокосмический ун-т «ХАИ», – 2011. – Вып. 8/85. – С. 20–23.
4. Лепешкин А. Р. Исследование температуропроводности металлов с учетом инерции электронов в поле центробежных ускорений / А. Р. Лепешкин // *Сб. тр. конф. «Актуальные проблемы физики»*. 11–15 ноября. 2012 г. – М. : ФИАН, 2012. – С. 65–66.
 5. Эмиров С. Н. Влияние давления и температуры на теплопроводность моно- и поликристаллических образцов антимонида галлия / С. Н. Эмиров, Н. М. Булаева, Э. Н. Рамазанова // *Тезисы докладов XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ*. – М. : Наука. – 2008. – 306 с.
 6. Гинзбург В. Л. Памяти А. А. Андреева / В. Л. Гинзбург. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 622 с.
 7. Карякин Н. И. Краткий справочник по физике / Н. И. Карякин, К. Н. Быстров, П. С. Киреев. – Изд. 3-е. – М. : Высшая школа, 1969. – С. 198–199.
 8. Троицкий О. А. Эффект Стюарта-Толмэна при скоростном волочении проволоки и при столкновении пули с мишенью / О. А. Троицкий, В. И. Сташенко // *Известия Академии Электротехнических наук*, – 2011. – № 1. – С. 37–43.
 9. Лепешкин А. Р. Исследование температуропроводности материалов в поле действия виброускорений / А. Р. Лепешкин // *Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок»*. 23–28 сентября 2013 г. Украина. Запорожье-Алушта, 2013. – С. 45–47.
 10. Экспериментальные исследования частотных характеристик и определение предела выносливости лопаток паровой турбины по 1-й крутильной форме колебаний / [А. Н. Петухов, А. Н. Стадников, М. Ю. Миллер, Е. С. Руденко] // *Вестник двигателестроения*. – 2012. – № 2. – С. 199–202.

Поступила в редакцию 10.02.2015

Лепешкін О.Р. Методика дослідження температуропровідності металевих матеріалів при дії віброприскорень

Запропоновано методику дослідження температуропровідності і теплопередачі в металевих матеріалах в полі дії віброприскорень. Розроблений пристрій для визначення вказаних характеристик на вібростенді в полі дії віброприскорень. Приведено результати досліджень нестационарного нагріву теплопровідників з нікелевого і мідного сплавів при дії віброприскорень. Теплоізолювані теплопровідники з електронагрівачем та термопарами встановлені на балці прямокутного перетину. З аналізу експериментальних досліджень і швидкостей нагріву визначено, що температуропровідність теплопровідників збільшується при збільшенні амплітуди коливань балки на вібростенді. При цьому, час передачі тепла по теплопровідникам суттєво скорочується, тобто спостерігається прискорення теплопередачі у полі дії віброприскорень.

Ключові слова: методика, нагрів, віброприскорення, теплопередача, теплопровідники, температуропровідність, температура.

Lepeshkin A. Method for investigation of thermal conductivity in the metal materials under the action of vibration accelerations

A method for the study of thermal conductivity and heat transfer in metal materials in the field of vibration accelerations. A device for the determination of these characteristics on a vibration rig in the field of action of vibration accelerations. The results of investigations of nonstationary heating of the heat conductors from nickel and copper alloys under influence vibration accelerations. The insulated heat conductors, electroheater and thermocouples are mounted on the rectangular beam. From the analysis of experimental results and heating rates it follows that the thermal conductivity of the heat conductors increases with increasing of the amplitude of oscillations of a beam on a vibration rig. Wherein the time of a heat transfer on the conductors is significantly reduced and the acceleration of heat transfer is observed in the field of vibration accelerations.

Key words: method, vibration acceleration, heat transfer, heat conductors, thermal conductivity, temperature.