

УДК 631.7.04-197:631:7.019.13

В.О. ПОВГОРОДНИЙ*Украинская инженерно-педагогическая академия, Украина***ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ**

Экспериментально – теоретическое исследование термоупругих характеристик материалов приборов, а также элементов турбостроения осуществляется исходя из решения обратной задачи термоупругости. Обратная задача термоупругости решается с использованием уравнения Фредгольма и гранично-элементный аналог ядра интегрального оператора позволяет заменить эксперимент. К числу обратных задач термоупругости относятся задачи управления температурным (тепловым) режимом. Задача управления тепловым режимом основана на использовании различных критериев (в частности Преводаitelева), о котором будет упомянуто в данной статье.

Ключевые слова: температура, обратная задача, термоупругость, критерий, материал.

Введение

Современные достижения в самолетостроении, ракетной технике, атомной и теплоэнергетике и других областях техники требуют все более тонких и в тоже время практически удобных аналитических методов расчета термоупругих напряжений, вызванных неравномерным распределением температуры в элементах конструкций. Приближенные методы решения задач нестационарной теплопроводности и термоупругости позволяют обойти все эти трудности и предложить эффективные аналитические методы определения полей термоупругих (температурных, термических или тепловых) напряжений при любых переменных во времени тепловых воздействиях. Предложенное представление полей температурных напряжений при произвольных входных температурных возмущениях позволяет разработать аналитические методы решения обратных задач термоупругих напряжений, связанных с вопросами управления внешним температурным режимом, при котором обеспечиваются заданные допустимые термические напряжения в обрабатываемом теле или изделии.

В данной статье исследуются обратные задачи термоупругости (ОЗТУ) или обратные задачи термоупругих напряжений (ОЗТН), связанные с решением проблемы регулирования внешних или внутренних температурных нагрузок, при которых будут достигнуты термонапряжения в обрабатываемых изделиях в пределах допустимых значений. При произвольной температуре $T_0 + \phi(F_0)$, где $\lim \phi(F_0) = 0$, касательные напряжения на поверхности пластины, цилиндра и шара находят в первом

приближении в области изображений по Лапласу из соответствующих формул, полагая, что $q_V = 0$, в виде

$$\bar{\sigma}_\phi(\zeta, p, m) = \frac{\beta E(m+5)}{4(m+3)(1-\nu)} \frac{p \bar{\phi}(p)}{p + A(m)} * \left[m - (m+2)\zeta^2 \right].$$

Касательное термоупругое напряжение, как наиболее опасное по температурному полю, определяется по следующей зависимости.

Пусть задано локальное максимальное касательное напряжение, достигаемое на поверхности тела при $\zeta = 1$, т.е. известно $\sigma_\phi(1, F_0, m)$. Введя относительное напряжение

$$\sigma_\phi(1, F_0, m)(1-\nu) / (\beta E) = \Phi(F_0, m),$$

из вышеприведенной формулы при $\zeta = 1$ получим

$$\bar{\Phi}(p, m) = \frac{m+5}{2(m+3)} \frac{p \bar{\phi}(p)}{p + A(m)}.$$

После перехода в область оригиналов получим окончательную формулу. Эта формула решает вопрос об управлении температурой на поверхности цилиндра и шара, при которой термоупругое напряжение не будет превосходить допустимое критическое значение.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть при термической обработке на поверхности тела прямоугольной формы температура возрастает до постоянной величины. При этом, термоупругое касательное напряжение на поверхности цилиндра должно изменяться по заданной кривой, аппроксимация ко-

торой определяется некоторой функцией. Для изменения относительного касательного напряжения в виде, необходимо температуру на поверхности тела повышать по закону, близкому к экспоненциальному с темпом (критерий Предводителя) $Pd = 2$. Вторым примером управления нестационарным температурным режимом по допустимым значениям термических (температурных) напряжений на поверхности тела является **управление температурой среды (температурой газа в печи)**. Пусть температура печи изменяется от начальной температуры по некоторому произвольному закону $T_0 + \phi(F_0)$. Важной характеристикой поверхностного температурного слоя, является так называемый коэффициент теплоусвоения K_ϕ . Он показывает, какая доля тепла аккумулируется в стенке с определенной толщиной по сравнению с бесконечно тонкой стенкой. Коэффициент теплоусвоения является сложной функцией критерия Предводителя. Также часто в расчетах используется критерий Померанцева (Po). Критерий Померанцева имеет смысл обобщенной интенсивности внутренних источников теплоты в условиях нестационарного температурного поля. Po характеризует отношение количества теплоты, выделяемой в единицу времени в объеме 1 к максимально возможному количеству теплоты, передаваемой теплопроводностью через единицу поверхности при толщине стенки [1, 2].

Также используется такое свойство как огнеупорность. Огнеупорность – это свойство материалов противостоять, не расплавляясь, воздействию высоких температур. Огнеупорность не следует смешивать с температурой плавления. Огнеупорность материала определяют как температуру деформации образца (тела) – пироскопа (ПК), при которой вершина образца огнеупора в виде пирамиды стандартных размеров (30 мм * 8*2) и формы (пироскоп), нагреваемого в стандартных условиях, под действием силы тяжести коснется поддона. Величина этой температуры определяется сравнением с эталонными пироскопами. Маркировка ПК-172 обозначает, что пироскопу соответствует 1720. Для огнеупоров однокомпонентного состава огнеупорность практически равна его температуре плавления. У огнеупоров, представляющих собой, как правило, смесь химических соединений, нет определенной температуры, а существует температурный интервал плавления. Огнеупорность характеризует предельную температуру службы огнеупора в идеализированных условиях, при отсутствии механических и химических воздействий на огнеупор. Обычно, она существенно превышает предельную рабочую температуру службы огнеупора, которая является не физическим, а техническим понятием. Под

огнеустойкостью понимают температуру, выше которой в условиях эксплуатации (механические, физико-химические и др. разрушающие воздействия) данный огнеупор теряет свои свойства. Деформация под нагрузкой при высокой температуре учитывает воздействие на огнеупор механической нагрузки и является важнейшей его пиропластической характеристикой. Механическая прочность характеризуется температурой деформации под нагрузкой 200. Термостойкость характеризует способность огнеупоров не разрушаться от воздействия термических напряжений. Термические напряжения в огнеупорной конструкции возникают как при наличии градиента температур $gradT$ (одностороннее охлаждение стенки, нестационарные условия тепловой работы), так и в результате структурной неоднородности огнеупора – органической или приобретенной в процессе работы [3]. Растрескивание и скалывание огнеупора происходят в результате постепенного накопления остаточных деформаций и микротрещин при теплообменах, хотя в каждом цикле температурные напряжения могут не превышать допустимых (рис. 1, 2).

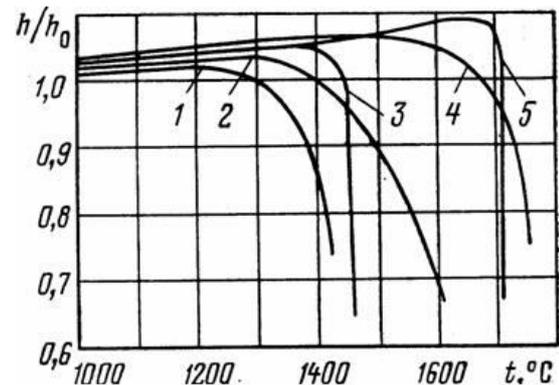


Рис. 1. Деформация под нагрузкой огнеупоров с различной структурой:

1 и 2 – шамот (2-а образца), соответственно; 3 – хромитовый; 4 – периклазовый; 5 – динасовый

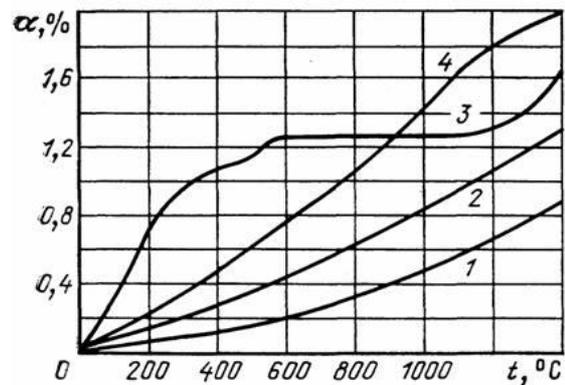


Рис. 2. Относительное удлинение при нагреве различных видов огнеупоров:

1 – шамот; 2 – корунд; 3 – динас; 4 – периклаз

На термостойкость влияют механические и теплофизические свойства огнеупорных изделий – прочность, модули упругости и сдвига, тепло- и температуропроводность, коэффициент линейного температурного расширения; макроструктура огнеупора: пористость, степень структурной неоднородности, размер кристаллических зерен; внешние условия службы – температура и скорость ее изменения во времени. Повышенную термостойкость имеют огнеупорные изделия небольших размеров с минимумом стекловидной фазы. Высокой термостойкостью обладают алюмосиликатные и глиноземные огнеупоры; низкой – периклазовые и динасовые огнеупоры. Еще один пример обратной задачи температурных напряжений или термоупругости – это **определение функции управления внутренними источниками теплоты**. В твэлах локальные внутренние источники теплоты в общем случае являются функциями координаты и времени. Для решения таких задач нестационарной теплопроводности утверждалась мысль, что вид оптимальной системы базисных координат функционального пространства, в котором находится наилучшее приближенное решение, зависит от вида функции $q_v(\zeta)$. Сказанное, естественно, относится и к вопросу оптимального решения прямых и обратных задач термических напряжений (ОЗТН), так как от точности определения температурных полей зависит точность решения указанных задач. Предположим, что локальные внутренние источники теплоты распределены равномерно вдоль координаты ζ и изменяются во времени по некоторому линейному закону. Теплообмен между твэлом и внешней средой происходит при граничных условиях третьего рода, и температура внешней (омывающей) среды считается постоянной. Поле температуры в твэлах при произвольной функции в области изображений по Лапласу можно определить из известных формул:

$$\frac{\sigma(\zeta = 1, p, Bi, m_j(1 - \nu))}{\beta E} = \Phi(p, Bi, m).$$

Переходя в область оригиналов, получаем окончательное выражение [3].

На рис. 3, 4 приведены некоторые результаты для равномерного начального распределения температурного поля $\theta_0 = 470^\circ\text{C}$ в процессе нагрева стального цилиндра радиусом $0,075$ [м], $x^* = 0,8R$, для значений $N = 10$ – количества членов разложения в ряд. В результате вычислений разница между действительной и заданной температурой $\Delta\theta(x, t)$ составляет менее 4°C . Также можно при-

вести пример процесса теплообмена при обжиге глины и каолинов, который протекает в сложных условиях физико-химических и структурно-механических превращений.

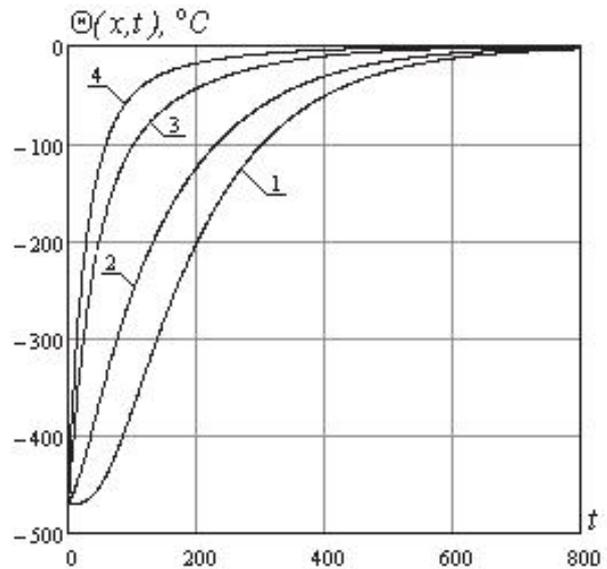


Рис. 3. Изменение во времени температуры в различных точках:

1 – $x=0$; 2 – $x = \frac{R}{2}$; 3 – $x=0,8R$; 4 – $x=R$

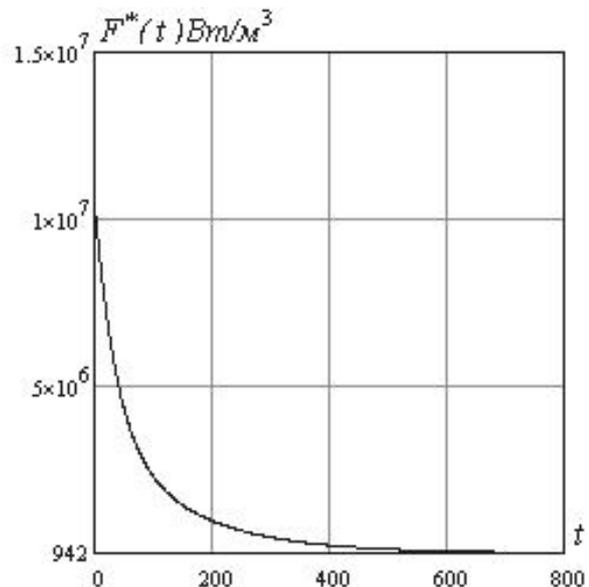


Рис. 4. Зависимость управляющего воздействия от времени в оптимальном процессе нагрева

При этом физико-химические превращения происходят в определенных интервалах температур и сопровождаются бурным выделением или поглощением значительного количества теплоты. Наиболее прочно удерживается химически связанная влага, которая удаляется при высоких температурах ($550\text{--}560^\circ\text{C}$), когда происходит разрушение кристал-

лической решетки минерала каолинита и образуется вещество метакаолинит с новой структурой и свойствами.

При этом интенсификация процессов термообработки (сушки, обжига) керамических изделий ограничивается, главным образом, допустимыми значениями термоупругих напряжений.

Также можно привести пример процесса теплообмена при обжиге глины и каолинов, который протекает в сложных условиях физико-химических и структурно-механических превращений. Наиболее прочно удерживается химически связанная влага, которая удаляется при высоких температурах (550–560°C).

Литература

1. Сергиенко, И.В. Системный анализ многокомпонентных распределенных систем [Текст] / И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека. – К.: Наук. думка, 2009. – 639 с.
2. Тихонов, А.Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении [Текст] / А.Н. Тихонов, В.Д. Кальнер, В.Б. Гласко. – М.: Машиностроение, 1990. – 263 с.
3. Мацевитый, Ю.М. Идентификация теплофизических свойств твердых тел [Текст] / Ю.М. Мацевитый, С.Ф. Лушпенко. – К.: Наук. думка, 1990. – 213 с.

Поступила в редакцию 23.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, Харьков.

ОБЕРНЕНІ ЗАДАЧІ ТЕРМОПРУЖНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

В.О. Повгородній

Експериментально-теоретичне дослідження термопружних характеристик матеріалів приладів, а також елементів турбобудування виконується виходячи з вирішення оберненої задачі термопружності. Обернена задача термопружності вирішується за допомогою інтегрального рівняння Фредгольма та гранично-елементний аналог дозволяє замінити експеримент. Обернені задачі широко використовуються в промисловості, де вимірювання можливо лише на обмеженій частині поверхні, а також задачі визначення термомеханічних характеристик матеріалів та зміни їх у часі. До обернених задач слід відносити задачі керування температурним (тепловим) режимом. Задача керування тепловим режимом заснована на використанні різних критеріїв (критерій Предводителя), який буде розглянуто в цій статті.

Ключові слова: температура, обернена задача, термопружність, критерій, матеріал.

INVERSE PROBLEMS OF THE THERMOELASTIC'S STRESSES ON UNCONSTANT REGIMEN

V.O. Povgorodny

The experimental and theoretical investigation of thermal and elastical characteristics of the material's considered and control of temperature regimen by discussed inverse problem of the thermoelasticity. The experimental and theoretical investigation of thermal and elastical characteristics of the material's considered by discussed inverse problem of the thermoelasticity. An inverse quotients thermoelasticity problem is discussed by Fredholm's equation without experiment. Assuming thermomechanical oscillation frequency small enough a solving equation was produced. Obtained results can be used to simulate the process of experimental determination of physical-mechanical properties of the materials used in aero- and spacecraft manufacturing and of the energetic and turbine's machine buildings.

Key words: temperature, inverse problem, thermoelasticity, criterion, material.

Повгородній Владимир Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедри охорони труда, стандартизації і сертифікації, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Україна, e-mail: povgorod@ukr.net