

УДК 536-12, 621.78

DOI: 10.17223/00213411/62/9/20

М.В. ЧЕПАК-ГИЗБРЕХТ

ТЕРМОДИФфуЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ*

Изучены закономерности формирования термодиффузионных напряжений в вязкоупругом двухслойном материале при температурных воздействиях. Установлена возможность использования аналитического решения задачи о механическом равновесии двухслойной вязкоупругой пластины для оценки напряжений и деформаций, возникающих вследствие нагрева и диффузии с учетом эффекта Соре. Продемонстрировано, что эффект вязкоупругости важен, когда процессы переноса происходят за времена порядка 0.01 с и менее.

Ключевые слова: напряжения, диффузия, эффект Соре, метод аналогий, двухслойный образец.

Введение

При воздействии высоких температур на материалы с покрытиями вследствие наличия градиентов температуры и концентрации возникают механические напряжения [1, 2], которые могут привести как к упрочнению поверхности, так и к ее разупрочнению, что зависит от соотношения свойств слоев и подвижности элементов в разных материалах [3, 4]. Оценка сопутствующих напряжений является важной научной задачей, поскольку определяет работоспособность конструкций с покрытиями [5]. Например, в [2] показано, что на величину остаточных температурных напряжений в покрытии, полученном магнетронным распылением, помимо температуры влияет также толщина покрытия. В других работах [6–8] содержатся данные о том, что механические свойства покрытий и поверхностей существенно зависят от диффузии, которая происходит при нагреве. Так, в ходе экспериментальных исследований обнаружено, что диффузионная термообработка приводит к смещению максимальных растягивающих напряжений в сторону пластичной подложки, и это подавляет образование трещин в условиях термоциклирования [8, 9]. Расчет механических напряжений, вызванных нагревом и диффузией, как правило, проводится на основе простых моделей в предположении, что свойства материалов упругие [4, 6, 8]. Однако свойства материалов не всегда допустимо считать упругими, поскольку в условиях теплового нагружения вследствие наличия градиентов температуры и состава они могут превышать предел упругости. Следовательно, требуется анализ характера напряжений с учетом разных реологических свойств материалов. Воспользуемся одной из известных реологических моделей вязкоупругого тела [10] – моделью Масквелла, которая допускает переход от упругого тела к вязкому при изменении вязкости. В рамках этой модели справедливы следующие соотношения:

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dt} + \frac{\mu}{\eta}\sigma_{ij} = 2\mu\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} + \delta_{ij}\left[\lambda\frac{d\varepsilon_{kk}}{dt} - K\frac{d\omega}{dt} + \frac{\mu K}{\eta}(\varepsilon_{kk} - \omega)\right], \quad (1)$$

$$\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz},$$

$$\omega = 3\left[\alpha_T(T - T_0) + \alpha(C - C_0)\right].$$

Здесь σ_{ij} – тензор напряжений; ε_{ij} – тензор деформаций; t – время; λ и μ – коэффициенты Ламе; K – модуль всестороннего сжатия; η – вязкость; δ_{ij} – символ Кронекера; T – температура; T_0 – температура в начальный момент времени; C – концентрация диффузанта (массовая концентрация); C_0 – концентрация диффузанта в начальный момент времени; α_T – линейный коэффициент теплового расширения; α – коэффициент концентрационного расширения.

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23.1.4.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>