

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСЛОЕНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В.

Термобарьерные покрытия (ТБП) используются для защиты деталей, работающих в напряженных условиях температурно-силового нагружения. Это лопатки турбин, элементы двигателей и т.д.

Защита деталей проводится нанесением покрытия, обычно керамического, на поверхность детали, воспринимающей тепловой удар. Перепад температур внутри детали (подложки) и покрытия приводит к возникновению температурных напряжений, в том числе за счет различий в теплофизических характеристиках покрытия и подложки.

В работе приведены схема и результаты расчетов параметров полей напряжений и деформаций в плоской постановке. Показано влияние наличия и свойств промежуточного слоя между ТБП и подложкой на значения экстремальных напряжений.

Исследована возможность потери устойчивости покрытия при действии сжимающих напряжений как пластины, лежащей на упругом основании. Показано влияние упругих свойств подложки и толщины ТБП на характер потери устойчивости покрытия. Это позволяет прогнозировать отслоение его от подложки в виде шахматного распределения, что согласуется с известными экспериментальными данными.

Введение

Термобарьерные покрытия (ТБП) представляют класс объектов, которые должны обеспечивать защиту подложки от воздействия высокой температуры, обладать высокой адгезией, жаропрочностью и жаростойкостью в условиях многократного циклического приложения термомеханических нагрузок. Исследования, направленные на повышение свойств ТБП, являются актуальными, а компьютерное моделирование поведения ТБП позволяет понять физику процессов разрушения покрытий.

Основная проблема ТБП связана с различием коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) хрупкого керамического покрытия, нанесенного на поверхность пластической подложки, и самой подложки. При температурном воздействии деформация подложки оказывается существенно выше, что приводит к возникновению мощных концентраторов напряжений на границе раздела «покрытие-подложка», релаксация которых протекает путем формирования трещин.

Вследствие потери устойчивости может быть получено регулярное двумерное распределение деформаций. Наглядное экспериментальное подтверждение «шахматного» распределения напряжений и деформации при термическом циклировании медного образца с наноструктурным теплозащитным покрытием показано в работах академика В.Е.Панина [1].

В настоящей работе была поставлена задача с использованием «классических» подходов механики деформируемого твердого тела на примере термического нагружения медного образца с керамическим покрытием показать возможность возникновения неустойчивостей, имеющих периодический характер и провести исследования их характерного периода от свойств сопрягаемых материалов.

1. Описание параметров модели

В работе (решение строится в плоской постановке) рассматривается область AEDB, представляющая собой с термопокрытие CDEF (рис. 1), нанесенное на подложку ABCF. Со стороны ED подводится интенсивный тепловой поток Q . Материалом термопокрытия служит оксид алюминия Al_2O_3 , подложка выполнена из меди.

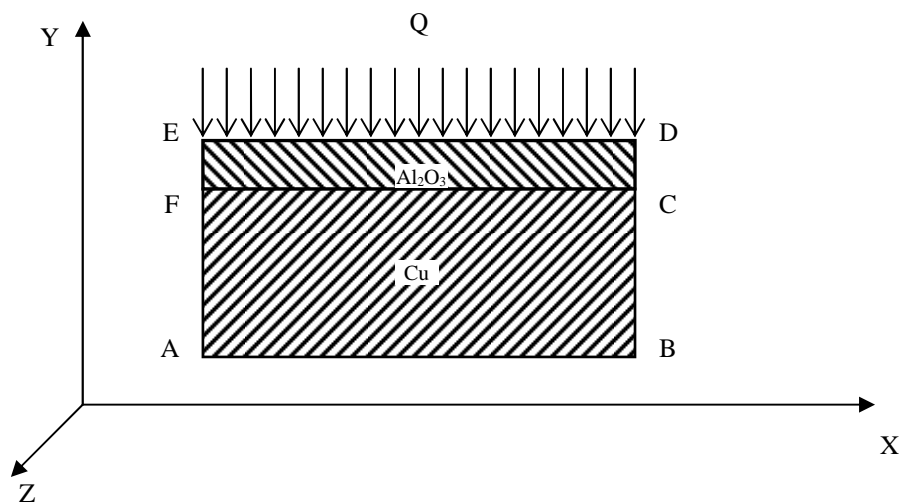


Рис. 1. Расчетная схема

Сетка конечных элементов содержит 7200 элементов и 3721 узел. При решении задачи о распределении температуры в расчетной области система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), соответствующая этой сетке, содержит 3721 уравнения. Нестационарная задача теплопроводности решалась по неявной схеме [2].

Для оксида алюминия удельная теплоемкость $C = 1106$ Дж/кг·град, плотность $\rho = 3970$ кг/м³, коэффициенты теплопроводности в направлении осей x и y равны $K_{xx} = K_{yy} = 40$ Вт/м·град. Для меди удельная теплоемкость $C = 380$ Дж/кг·град, плотность $\rho = 8900$ кг/м³, коэффициенты теплопроводности $K_{xx} = K_{yy} = 385$ Вт/м·град.

2. Решение задачи теплопроводности

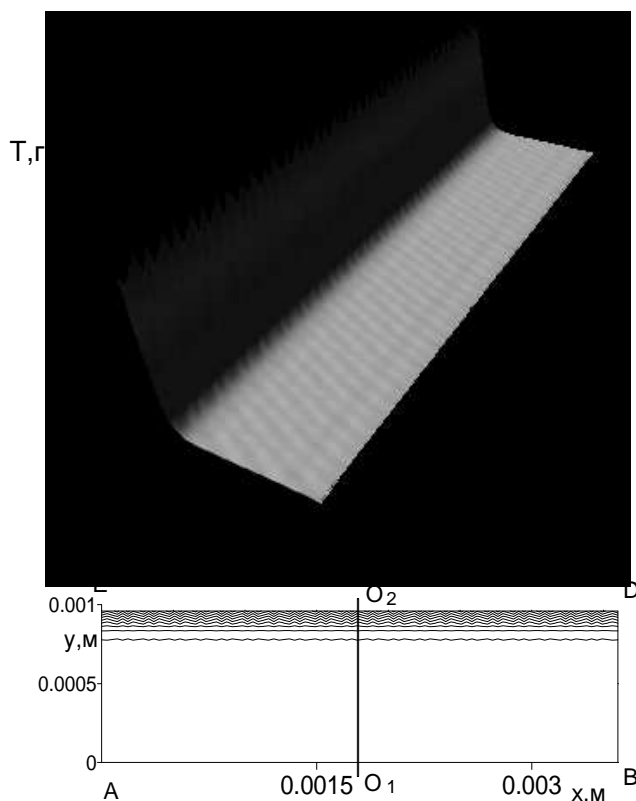


Рис. 2. а) поверхность, иллюстрирующая распределение температуры, б) изолинии температуры в момент времени $t = 400$ мкс.

Для определения поля температуры в двухслойной пластинке методом конечных элементов (МКЭ) [3] решается нестационарная задача теплопроводности для области ABCDEF. На границе материалов с различными физико-механическими характеристиками (линия FC) ставятся условия идеального теплового контакта: равенства температуры и тепловых потоков [14]. На кромках AE и BD ставятся условия симметрии:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{AE} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{BD} = 0;$$

Постановка таких условий означает, что вводимые границы искусственно ограничивают размеры области, подвергаемой анализу, а в реальной ситуации примыкающая область имеет точно такие же характеристики, как расчетная.

На кромках AB и ED ставятся условия Дирихле:

$$T|_{AB} = 0; T|_{ED} = 700$$

В момент времени $t=0$ температура во всей области ABCDEF была равна нулю:

$$T(x, y) = 0$$

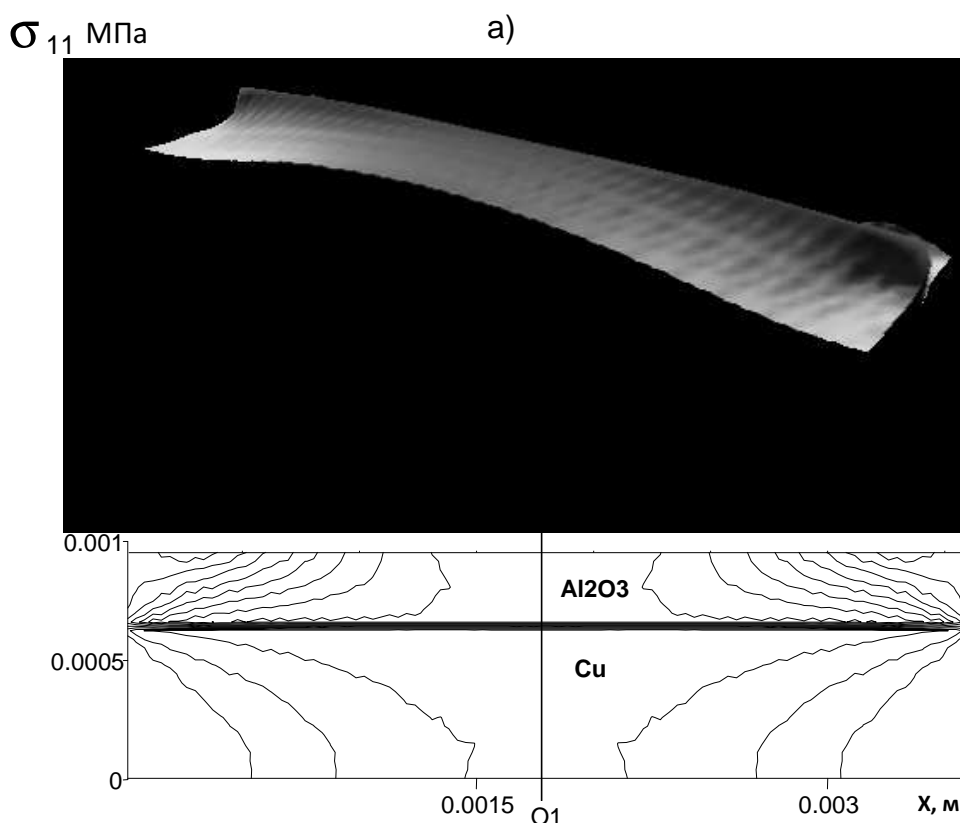
Поле температуры и изолинии в неоднородной пластинке в момент $t=400$ мкс приведены на рис. 2.

3. Анализ напряженно – деформированного состояния

Интенсивный нагрев неоднородной пластинки вызывает возникновение температурных напряжений. Для их вычисления решается задача определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС). Предполагается, что на границе контакта слоев (линия FC) существует идеальная адгезия: равны перемещения и напряжения. Решение строится с использованием МКЭ [2].

Физико-механические характеристики материалов: для оксида алюминия (Al_2O_3): модуль упругости $E = 382$ ГПа, коэффициент температурного расширения $\alpha = 7.0 \cdot 10^{-6}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.35$; для меди (Cu) модуль упругости $E = 123$ ГПа, коэффициент температурного расширения $\alpha = 16.5 \cdot 10^{-6}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.35$.

На рис. 3а приведена поверхность, иллюстрирующая распределение напряжений σ_{11} , вызванных неравномерным распределением температуры по толщине пластинки; на рис.3б приведены соответствующие изолинии напряжений σ_{11} ; на рис. 3с приведена кривая, характеризующая распределение напряжений σ_{11} вдоль линии O_1O_2 (рис. 3б). Из приведенных на рис. 3 результатов следует, что в слое FCDE (оксид алюминия) возникают сжимающие напряжения порядка $450 \div 470$ МПа, причем сжимающие напряжения действуют вдоль осей x и z . Таким образом, слой оксида алюминия, нанесенный на медную подложку и подверженный неравномерному нагреву, находится в условиях двустороннего сжатия.



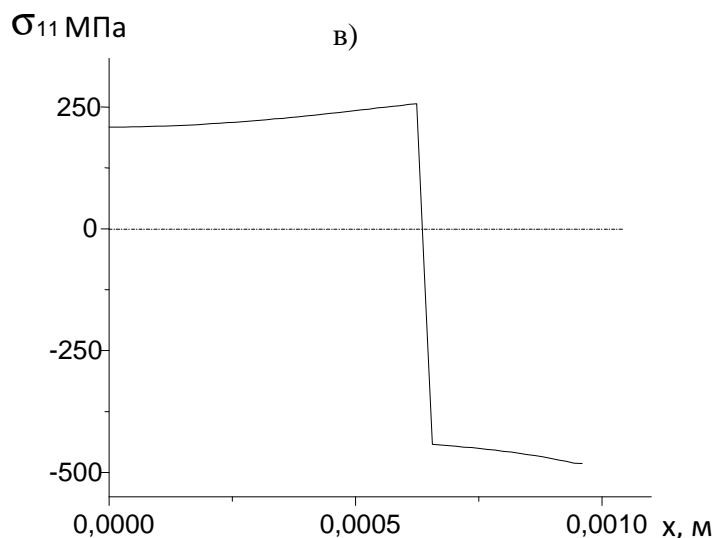


Рис. 3. Поверхность напряжений σ_{11} (а), изолинии температурных напряжений (б), распределение напряжений σ_{11} вдоль линии O_1O_2 (с).

Поскольку на границе раздела возникают значительные сжимающие напряжения, возникает вопрос, могут ли температурные напряжения быть причиной отслоения тонкого слоя оксида алюминия от медной подложки. Для исследования этого вопроса были проведены расчеты на устойчивость термопокрытия.

4. Устойчивость термопокрытия

В данном разделе работы слой оксида алюминия на медной подложке моделируется как пластинка на упругом винклеровском основании [5].

Уравнение устойчивости пластинки на упругом основании имеет вид [5, 6]:

$$\frac{D}{h} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\tau \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - kw = 0; \quad (1)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; h – толщина пластинки; k – коэффициент

постели упругого основания; ν – коэффициент Пуассона; w – нормальный прогиб; σ_x , σ_y , τ – нормальные напряжения и касательное напряжение, действующие в срединной поверхности пластинки в момент потери устойчивости.

Однородное уравнение (1) решается совместно с однородными граничными условиями.

Нахождение критической нагрузки сводится к определению собственных чисел дифференциального уравнения в частных производных. В работе эта проблема решалась с применением метода конечных разностей (МКР). Заменяя в (1) дифференциальные операторы их конечно-разностными аналогами во всех узлах конечно-разностной сетки, получим однородную систему линейных алгебраических уравнений, в которой число уравнений меньше числа неизвестных [5, 7]. Заменяя в граничных условиях дифференциальные операторы их конечно-разностными аналогами, получим СЛАУ которая добавляется к уже существующей. В получается однородная СЛАУ, в которой число уравнений равно числу неизвестных. Для существования нетривиального решения этой системы необходимо, чтобы ее определитель был равен нулю.

Для вычисления определителя в процедуре Гаусса [8] достаточно выполнить прямой ход, обратный ход делать нет необходимости. Значение напряжения, при котором определитель равен нулю (точнее говоря, интервал напряжений, в котором определитель меняет знак), принималось критическим. После того, как определено собственное число (критическое напряжение), определяется собственный вектор системы алгебраических

уравнений. Для этого полагалось, что одна компонента (с номером n) собственного вектора равна константе, другие компоненты собственного вектора находились в результате решения системы $(n - 1)$ уравнений. Таким образом, находился собственный вектор СЛАУ (форма потери устойчивости) с точностью до постоянного множителя.

Критические нагрузки и формы потери устойчивости пластинки на упругом основании приведены на рис. 4. В качестве граничных условий использовано шарнирное опирание по всем краям. Отношение толщины пластинки к длине стороны вдоль оси x и y

$$\text{равно } \frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{200}.$$

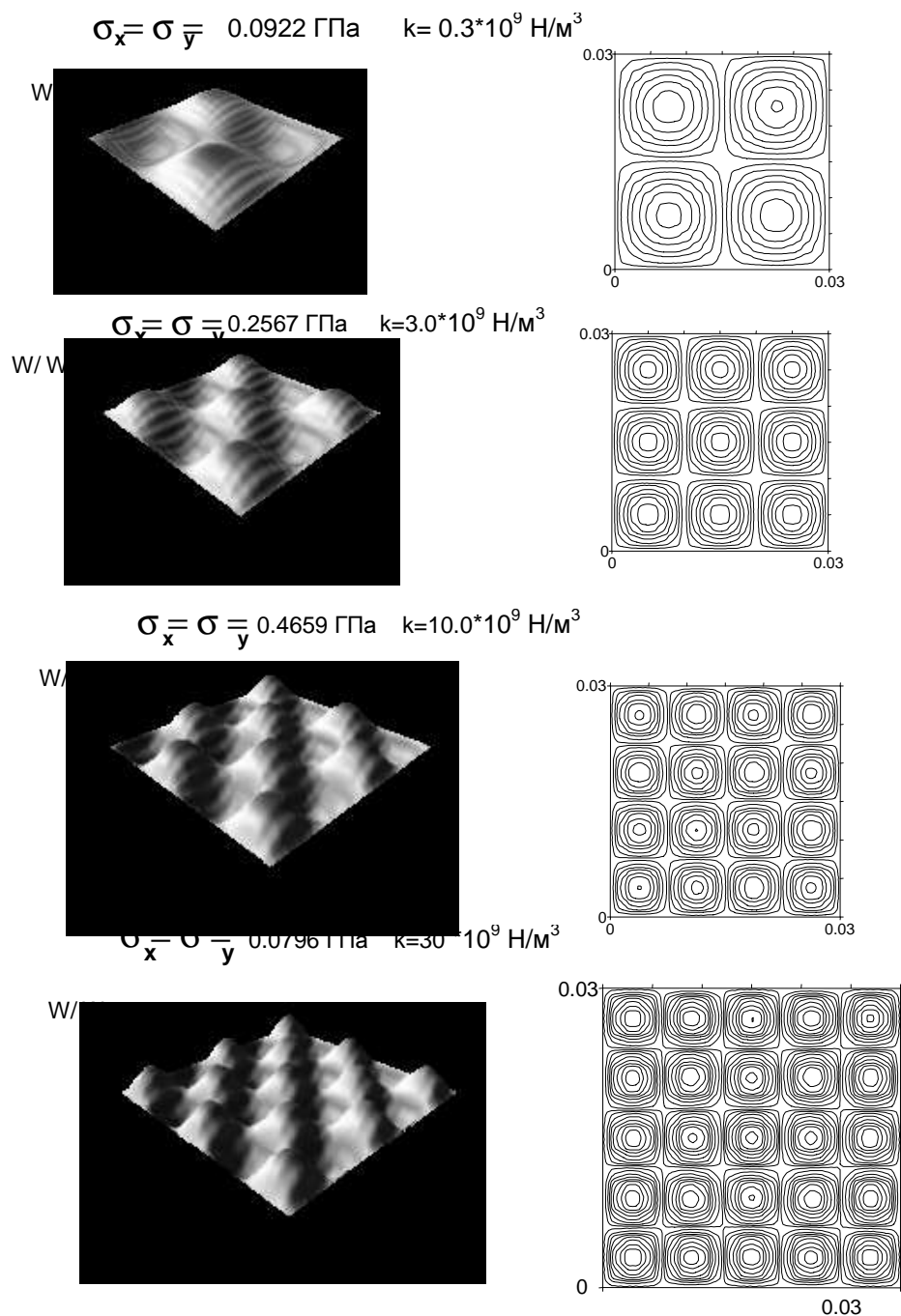


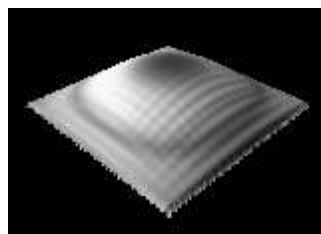
Рис. 4. Критические напряжения пластинки на упругом основании при двустороннем

сжатии. Отношение $\frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{200}$.

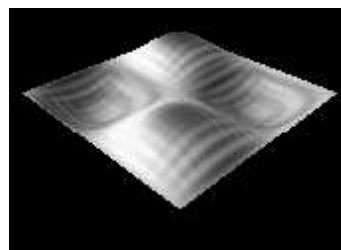
Нетрудно видеть, что с увеличением жесткости упругого основания растет число волн на одной и той же площадке. Так, если коэффициент постели $k = 0.3 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3$, то число полуволн при потере устойчивости равно 2 вдоль каждой из осей, если коэффициент постели $k = 3.0 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3$, то число полуволн равно 3 вдоль каждой из осей, если коэффициент постели $k = 30.0 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3$, то число полуволн возрастает до 5 вдоль каждой из осей, причем размеры площадки не изменяются.

Если отношение толщины пластинки к длинам сторон вдоль осей x и y увеличить до $\frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{100}$, то число полуволн при потере устойчивости уменьшается при той же жесткости основания и размерах пластинки. На рис. 5 приведены критические напряжения и формы потери устойчивости пластинки с отношением толщины к длине и ширине пластинки $\frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{100}$.

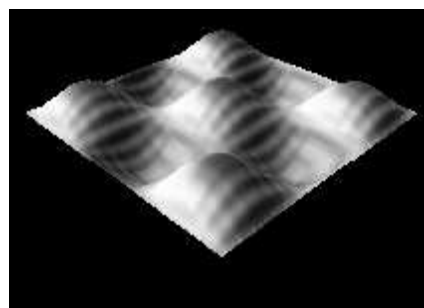
$$\sigma_x = \sigma_y = 0.0776 \text{ ГПа}$$



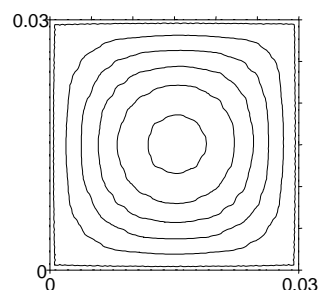
$$\sigma_x = \sigma_y = 0.392 \text{ ГПа}$$



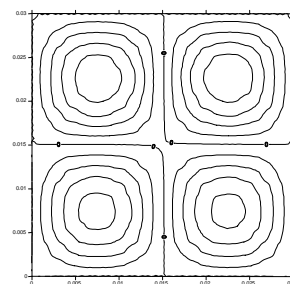
$$\sigma_x = \sigma_y = 11.288 \text{ ГПа}$$



$$K=0.0 \text{ Н/м}^3$$



$$K=3.0 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3$$



$$K=30.0 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3$$

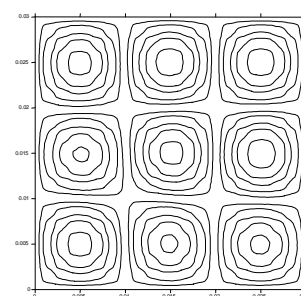


Рис. 5. Критические напряжения пластинки на упругом основании при двустороннем сжатии. Отношение $\frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{100}$.

Выводы

1. При тепловом ударе в термопокрытии возникают значительные сжимающие напряжения, которые могут служить причиной потери устойчивости и отслоения покрытия.
2. При потере устойчивости пластинки на упругом основании экстремальные значения напряжений расположены в порядке, напоминающем шахматную доску.
3. При потере устойчивости пластинки на упругом основании число волн на кривых потери устойчивости увеличивается с увеличением жесткости упругого основания и уменьшением отношения толщины пластинки к ее ширине и длине (h/a , h/b).

Список литературы

1. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104. – № 6. – С. 650–660.
2. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Пер. с англ., – М.: Мир, 1986. – 318 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ., – М.: Мир, 1979. – 392 с.
4. Плятт Ш.Н. Расчеты температурных полей бетонных сооружений. М.: Энергия, 1974. – 407 с.
5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки: Пер. с англ. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Том 3. – М.: Машиностроение, 1968. – 567 с.
7. Кармишин А.В., Лясковец В.А., Мяченков В.И., Фролов А.Н. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. – 376 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 541 с.