

**К РЕШЕНИЮ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ МКЭ С УЧЕТОМ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА**

П. П. Гонгаровский, Н. Г. Гармаш

*Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина*

Some issues of realization of thermocontact problems with account of frictional heating by means of finite-element method are considered. The examples of a solution of stationary and non-stationary axially symmetric problems with sliding of contact surfaces at the expense of a difference of angular velocities are presented. The essential influence of frictional heating on the distribution of contact pressure and temperature fields in structures is shown.

Контактные задачи с учетом теплообмена между взаимодействующими поверхностями вызывают связанность задач теплопроводности и термомеханики через условия контактного взаимодействия, которые, в свою очередь, первоначально неизвестны [1]. Контактные давления, получаемые из решения задачи термомеханики, определяют контактные термические сопротивления, влияющие на распределение температурных полей, и, следовательно, результаты задачи термомеханики. В этом случае используется единый итерационный процесс решения задач теплопроводности и термомеханики на каждом временном шаге для нестационарной задачи.

Метод конечных элементов (МКЭ) очень удобен для создания универсальных программных комплексов, реализующих связанные задачи, поскольку позволяет учесть и сложную геометрию взаимодействующих тел с произвольным числом заранее неизвестных зон контакта, и произвольные граничные условия, а также сложные реологические свойства материала, зависящие от температуры. Для реализации сложных условий контактного взаимодействия был разработан специальный контактный конечный элемент для решения двумерных задач [2], основанный на концепции контактного слоя, не имеющего толщины. Он позволяет учитывать термическое контактное сопротивление в зависимости от контактного давления, теплопроводности взаимодействующих деталей, среды, заполняющей зазоры между микровыступами; высоту микрошероховатости контактных поверхностей; и другие факторы, согласно зависимости, предложенной в работе [3]; а также одностороннее силовое взаимодействие; наличие сил сухого трения; граничных условий, зависящих от зон контакта; фрикционное тепловыделение [1].

С помощью модернизированного программного комплекса KROK [4] успешно был решен ряд стационарных и нестационарных термоконтактных задач. Это позволило получить новые результаты для таких элементов машин, как замковые соединения лопаток газовых турбин, гильзы цилиндра

двухтактного оппозитного дизеля, жаровые кольца двухтактного двигателя, а также рассмотреть термонапряженную посадку турбинного диска на вал в новой постановке.

При решении задач было выяснено, что для сходимости итерационного процесса в ряде случаев необходимо прибегать к неявным схемам. Задание начального приближения по распределению контактных давлений оказалось важным, как для сокращения числа итераций, так и для решения задач с периодическими во времени быстроизменяющимися условиями контактного взаимодействия, которые имеют место например в жаровых кольцах, гильзах цилиндров и т.д.

В качестве начальных условий для нестационарной задачи теплопроводности может быть принято заданное температурное поле или получено решение стационарной задачи теплопроводности при известных граничных условиях. Для определения контактного термического сопротивления в начальный момент времени или же в качестве начального приближения для стационарной задачи задается ориентировочное распределение контактных давлений, одновременно определяющее зону контакта. Это позволяет получить начальное приближение для температурного поля и не только сократить число итераций, но и попасть в зону сходимости итерационного процесса.

При скачкообразном изменении термического сопротивления в зависимости от контактного давления бывают случаи, когда решения термоконттактных задач в стационарных постановках не существуют (пример, приведенный в работе [5], стр.440). При этом задача имеет решение в нестационарной постановке, как периодическая во времени.

В отличие от стационарных термоконттактных задач, которые не имеют решения, можно привести примеры подобных задач, для которых существует два решения, получаемые из различных начальных приближений. Предположим, что теплоизолированный по боковой поверхности стержень длиной  $l$  с одного конца имеет идеальный контакт с холодной стенкой, а с другого – зазор  $\delta$  с горячей, для которой температура на  $\Delta T$ °C выше. Одно из тривиальных решений: температура стержня равна температуре холодной стенки, контакт с горячей отсутствует. Если в начальном приближении допустить идеальный контакт с горячей стенкой, то температура стержня будет распределена по линейному закону  $T(x) = T_x + \Delta T \cdot x$ . Стержень получит дополнительное удлинение  $\alpha \Delta T l^2 / 2$ . Если зазор  $\delta$  окажется меньше, чем эта величина, возникнут температурные сжимающие напряжения, равные контактному давлению

$$\sigma_x = E(\alpha \cdot \Delta T l^2 / 2 - \delta) / l$$

Таким образом решение стационарных термоконттактных задач может зависеть от начальных условий или предыстории нагружения и нагрева.

Например, если в случае малого зазора путем растяжения или подогрева стержня ввести его в контакт с горячей стенкой, то с течением времени контактное взаимодействие будет продолжаться. Если же для зазора справедливо соотношение  $\delta > \alpha \Delta T l^2 / 2$ , решение соответствует тривиальному, независимо от предыстории.

Наличие сил сухого трения, а также необратимых пластических деформаций требует учета истории нагружения, поскольку решение задачи может зависеть от последовательности прикладываемых нагрузок, а для упругопластических задач – от организации итерационного процесса.

Наличие подвижных, с учетом трения, взаимодействий деталей приводит к тепловыделению в зонах контакта (например, в тормозных устройствах). В этих случаях необходимо учитывать источники тепла такого рода, поскольку они могут оказывать существенное влияние на результаты. С другой стороны, тепловыделение при трении используется в технологических процессах, например, сварка деталей при помощи трения. Мощность источников тепла в зоне контакта при этом определяется по следующему соотношению:

$$Q = |\sigma_k| \cdot f_{mp} \cdot v \text{ Вт/см}^2,$$

где  $\sigma_k$  – контактное давление,  $f_{mp}$  – коэффициент трения,  $v$  – скорость относительного проскальзывания.

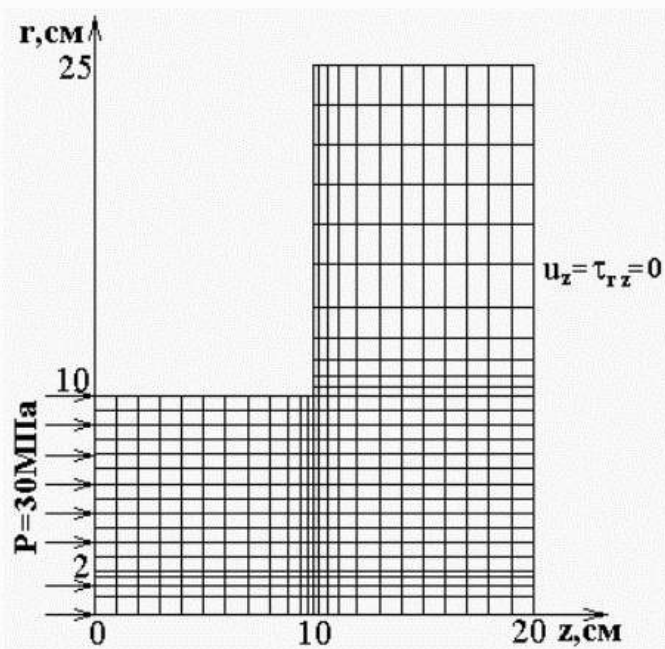


Рис. 1 Расчетная схема конструкции.

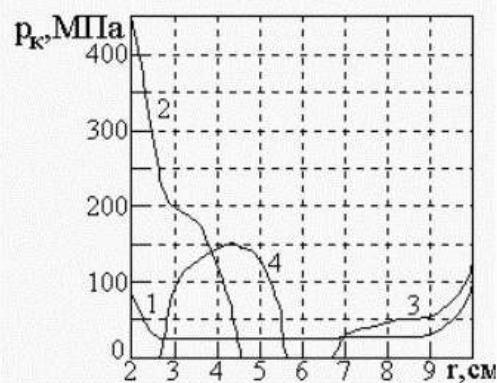


Рис. 2. Распределение контактных давлений

Рассмотрим в качестве примера стационарную контактную задачу о воздействии вращающегося цилиндрического стального подпятника на упругий слой из алюминиевого сплава АК-4, лежащий на жестком основании.

Расчетная схема с дискретизацией на конечные элементы изображена на рис.1. Свойства материалов, зависящие от температуры, приведены в табл.1. и табл.2. Коэффициент Пуассона для обоих материалов принимался равным 0,3. Жесткость контактного слоя –  $C = 10^6$  МПа. На плоскостях  $z = 0$  и  $z = 20$  см принимались условия теплообмена третьего рода  $\alpha = 0,25$  Вт/(см<sup>2</sup>град),  $T_{\infty} = 20^{\circ}$  С, на остальных поверхностях –  $\alpha = 0,005$  Вт/(см<sup>2</sup>град),  $T_{\infty} = 20^{\circ}$  С. Мощность фрикционного нагрева определялась по соотношению  $Q = |\sigma_{\kappa}| \cdot f_{mp} \Delta\omega \cdot r$ , где  $f_{mp} \Delta\omega = 15,7$  рад/с.

Задавшись начальным распределением контактных давлений по всей поверхности контакта  $2 < r < 10$ , в случае плоского подпятника при воздействии нагрузки, без учета тепловыделения от вращения, получим распределение контактного давления, представленное кривой 1 на рис.2.

При учете тепловыделения в зоне контакта распределение контактного давления примет вид, представленный кривой 2 (рис. 2).

Был также рассмотрен случай, когда зазор между подпятником и слоем определяется соотношением  $\Delta = 0,0025 (r - 10)^2$  см. Контактные давления, полученные без учета и с учетом тепловыделения в зоне контакта изображены кривыми 3 и 4 на рис.2.

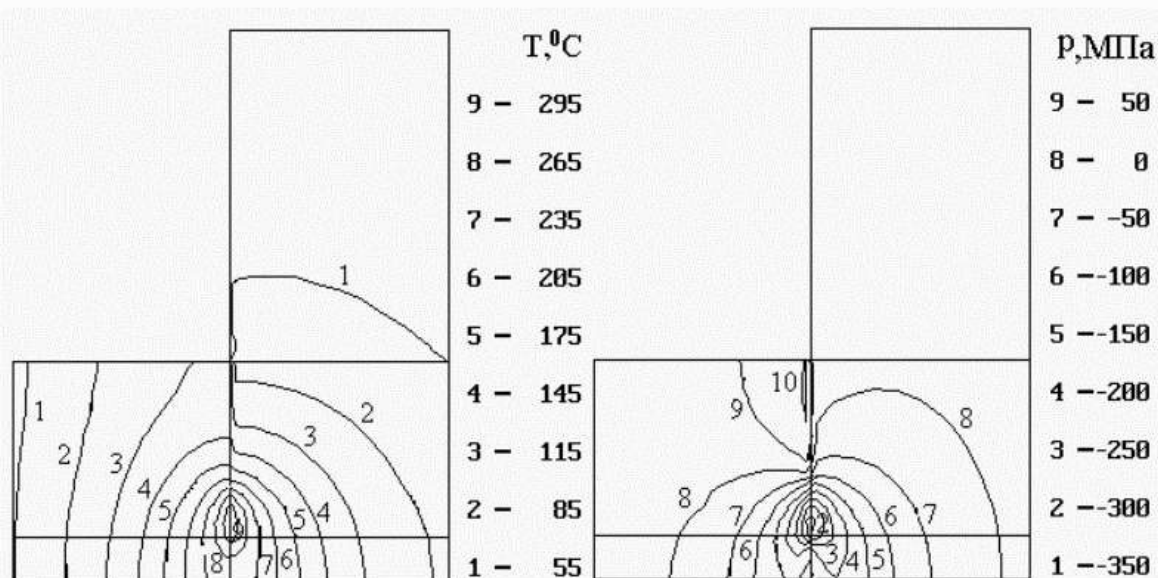


Рис. 3. Распределение температурного поля и окружающих напряжений для плоского подпятника.

Таблица 1. Теплофизические свойства стали.

T, °C	20	200	300	400
$\alpha \cdot 10^5$ 1/град	1,12	1,15	1,19	1,23
K, Вт/(см·град)	0,385	0,331	0,314	0,306
E·10 <sup>-5</sup> , МПа	2,1	2,0	1,93	1,86

Распределение температурных полей и окружающих напряжений при учете фрикционного нагрева для плоского и скругленного подпятников приведены соответственно на рис.3 и рис.4.

Таблица 2. Теплофизические свойства алюминиевого сплава АК-4.

$T, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	370
$\alpha \cdot 10^5 \text{ 1/град}$	2,12	2,18	2,26	2,43	2,46
$K, \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$	1,46	1,51	1,59	1,67	1,74
$E \cdot 10^{-5}, \text{ МПа}$	0,7	0,67	0,64	0,55	0,39

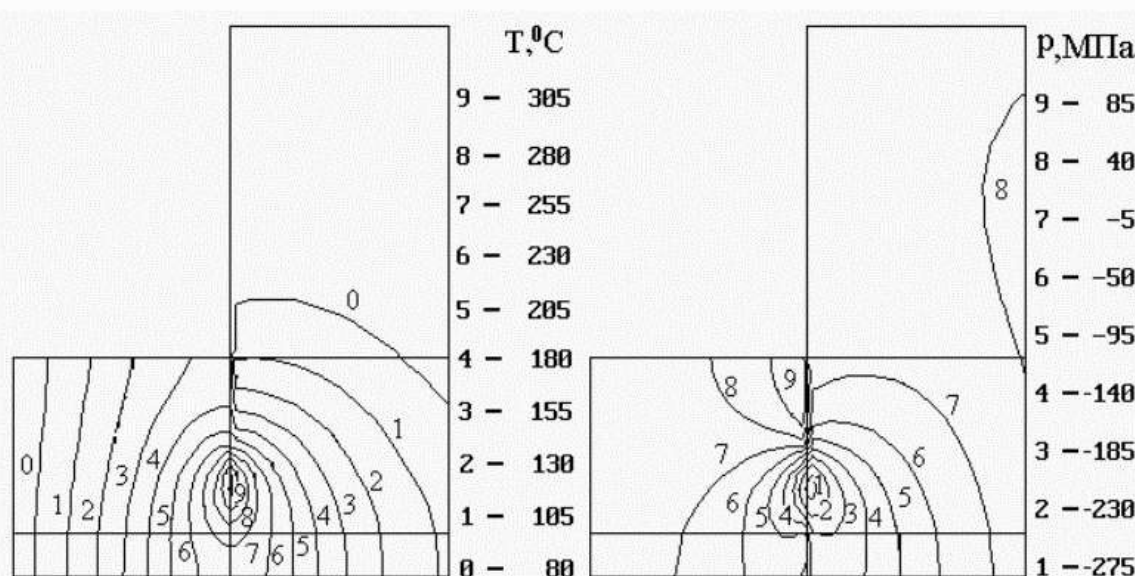


Рис. 4. Распределение температурного поля и окружающих напряжений для скругленного подпятника.



Рис. 5. Расчетная схема конструкции.

Моделирование технологического процесса сварки деталей трением покажем на примере, расчетная схема с разбивкой на конечные элементы для которого приведена на рис. 5. Материал деталей – сталь со свойствами, приведенными в табл.3. Начальная температура деталей –  $20^0\text{ C}$ . На боковых поверхностях

цилиндров коэффициент теплообмена  $\alpha=0,005$  Вт/(см<sup>2</sup>град), на торцах –  $\alpha=0,1$  Вт/(см<sup>2</sup>град), температура среды  $T_{\infty}=20^{\circ}\text{C}$  на всех поверхностях. Произведение скорости относительного вращения на коэффициент трения принималось 100 рад/с. Рассмотрено два случая нагружения деталей –  $P=50$  МПа и  $P=75$  МПа.

Таблица 3. Теплофизические свойства материала.

$T, ^{\circ}\text{C}$	0	100	200	400	600	800	1000	1200
$\alpha \cdot 10^5$ 1/град	0,36	0,54	0,72	1,12	1,33	1,51	1,66	1,75
$K, \text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{град})$	0,49	0,48	0,47	0,42	0,35	0,3	0,26	0,25
$\rho \cdot c, \text{Вт} \cdot \text{сек}/(\text{см}^3 \cdot \text{град})$	4	4,5	5	6	6,1	6,4	6	6,7
$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	2,03	1,99	1,97	1,85	1,69	1,43	1,08	0,6
Коэф. Пуассона	0,3	0,301	0,311	0,315	0,32	0,33	0,35	0,36

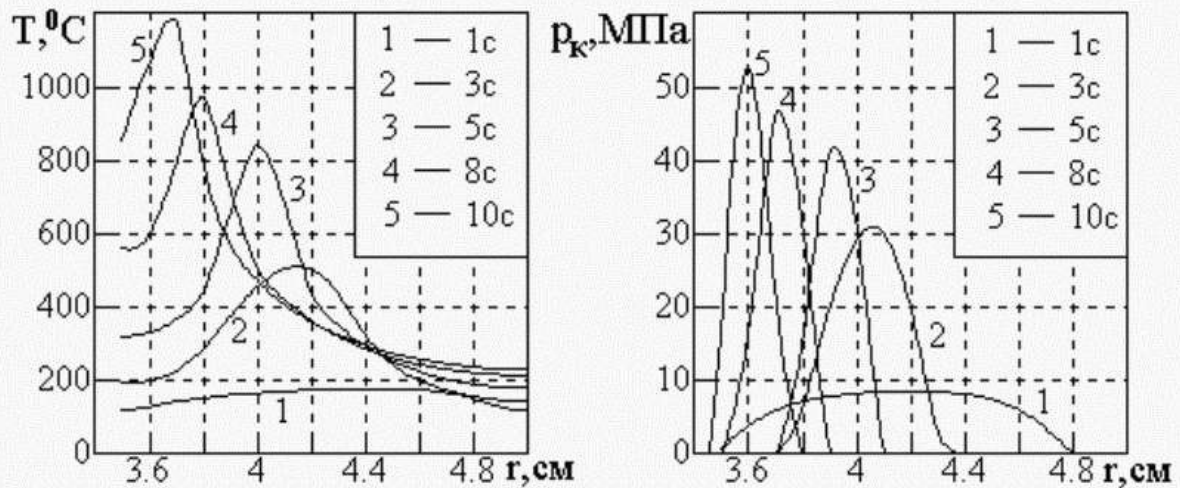


Рис. 6. Распределение температур и контактных давлений ( $P=50$  МПа).

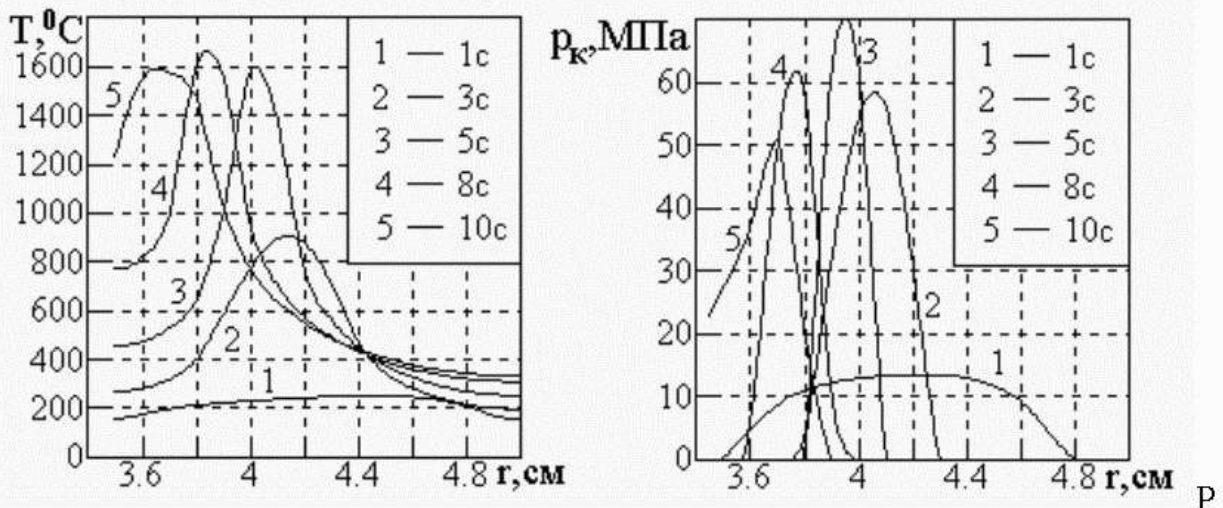


Рис. 7. Распределение температур и контактных давлений ( $P=75$  МПа).



На рис.6 и 7 приведены распределения контактных давлений и распределение температур в зоне контакта в различные моменты времени для первого и второго случая нагружений.

На рис.8 представлено распределение температур в деталях, установившееся к концу процесса разогрева для нагрузок: а - P=50 МПа; б - P=75 МПа.

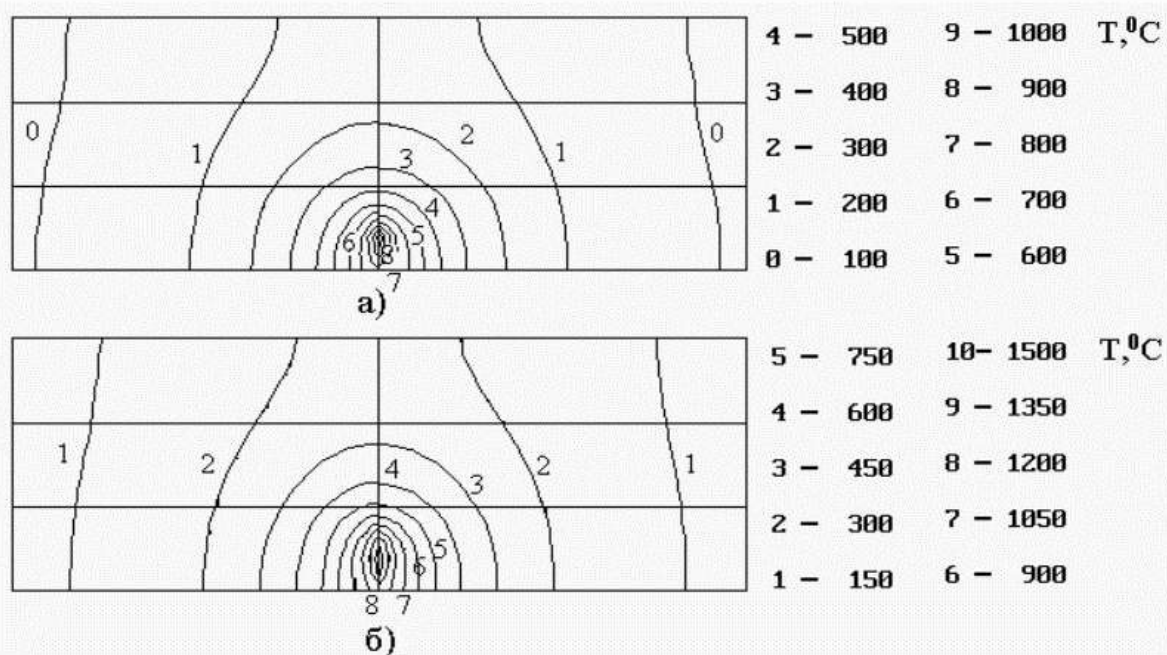


Рис. 8. Распределение температур для момента времени t=10 с.

Таким образом, фрикционный нагрев существенно влияет на распределение контактных давлений. Для обеспечения сходимости итерационного процесса при вычислении контактных давлений от итерации к итерации используется неявная схема [1]

$$\sigma_{\kappa}^{n+1} = \sigma_{\kappa}^n \cdot \beta + \sigma_{\kappa}^{n+1}(1 - \beta), \text{ где } 0 < \beta < 1$$

Обычно принимается  $\beta \approx 0,5$ .

Из полученных результатов расчета можно сделать вывод, что зона контактного взаимодействия с течением времени локализуется и по мере разогрева деталей перемещается от большего радиуса к меньшему. Картина распределения контактных давлений существенно зависит от мощности источников тепловыделения. Причем при большой скорости разогрева температура быстро изменяется в последний период времени, когда зона контакта становится малой, а контактные давления – большими. Результаты позволяют сделать вывод, что сварка деталей будет происходить по небольшому кольцевому участку контактной поверхности.

Следует отметить, что в рассматриваемых задачах значительный интерес может представлять износ контактных поверхностей, приводящий к перераспределению и выравниванию контактных давлений. Износ может

учитываться, как местное увеличение зазора между взаимодействующими поверхностями, по модели, предложенной в работе [6]  $\dot{\delta} = K \cdot \sigma_{\kappa}^{\alpha} \cdot v$ , где  $\dot{\delta}$  означает производную изменения зазора по времени,  $K$  и  $\alpha$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и состояния поверхностей,  $v$  – скорость относительного проскальзывания. При учете износа необходимо использовать неявные временные схемы, сходные с использующимися при решении задач ползучести [6]. В противном случае имеет место неустойчивый вычислительный процесс даже при достаточно малых временных шагах.

## Литература

1. Гармаш Н. Г. Двовимірний скінченноелементний аналіз контактних задач із врахуванням теплообміну: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук, Харків, 1999.
2. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г. Расчет напряженно-деформированного состояния замковых соединений лопаток турбомашин с учетом термоконтактных взаимодействий, 533-536, Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования, Харьков, ИПМаш им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997.
3. Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. О применении неявной схемы интегрирования по времени в конечноэлементном расчете ползучести конструкций по теории течения с анизотропным упрочнением, Проблемы машиностроения, 1998, **3-4**, 68–75.
4. Шлыков Ю. П., Ганин Б. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление, Энергия, Москва, 1977.
5. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций, Наук.думка, Киев, 1989.
6. Крагельский Н. В., Добрынин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ, Машиностроение, Москва, 1997.
7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия, Мир, Москва, 1989.

Поступила в редколлегию 04.09.2001

УДК 539.3:534.1

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Н.В. Долгополова, С.В. Угримов, А.Н. Шупиков

*Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина*

In work the problem of non-stationary deformation of free-supported multilayer plates and cylindrical shells which lay on the elastic two-parameter foundation is considered. The behaviour of multilayer thin-walled constructions is described by the refined theory of multilayer plates and shells. The influence of parameters of the elastic foundation on the stress-strained state of multilayer constructions is investigated.