

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ И МАТЕМАТИКИ

На правах рукописи

ПАУК
Владимир Иосифович

**ПЛОСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА
ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ СЛОЯ С УЧЕТОМ
ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

(01.02.04 — механика деформируемого твердого тела)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



00816089 (W)

Робота виконана на кафедрі механіки Львівського госуніверситету ім. І. Франко.

Научний керівник — доктор технічних наук, професор ГРИЛИЦКИЙ Д. В.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук, професор АЛЕКСАНДРОВ В. М., кандидат фізико-математических наук, зав. лаб. ШВЕЦ Р. Н.

Ведущая організація — Фізико-механічний інститут АН УРСР.

Захист дисертації состоится « 25 » февраля 1991 г. в 15 час. ауд. № _____ на засіданні спеціалізованого совета по присуждению ученой степени кандидата физико-математических и технических наук при Институте прикладных проблем механики и математики по адресу: 290000, Львов-центр, ул. Матейки, 4.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інститута прикладних проблем механіки і математики АН УРСР (г. Львів, ул. Научна, 3-6).

Отзыв на автореферат просим направлять по адресу: 290053, ГСП, г. Львов, ул. Научная, 3-б, ученому секретарю специализированного совета.

Автореферат разослан « 23 » января 1991 г.

Учений секретарь
спеціалізованого совета,
кандидат фізико-математических наук

ШЕВЧУК П. Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию плоских контактных задач термоупругости для олюя с учетом микрогеометрии поверхности, износа, теплообразования от действия сил трения и появления пластических полос в зоне контакта.

Актуальность темы. В связи с необходимостью эксплуатации машин и механизмов в экстремальных условиях при повышении их надежности и долговечности все большее значение приобретают контактные задачи трибологии. Являясь разделом механики деформируемого твердого тела, эти задачи тесно примыкают к актуальным проблемам инженерной практики, к расчетам величины износа и тепловых режимов подвижных сопряжений машин.

В настоящее время решено много контактных задач, при постановке которых учитываются микрогеометрия поверхностей, силы трения, теплообразование и изнашивание тел.

Микрогеометрия поверхностей учитывалась в работах И.Я. Штаермана, Л.А.Галина, В.М.Александрова, И.Г.Горячевой, Г.Я.Попова, М.Д.Мартыненко, А.С.Рабиневича, С.М.Мхитаряна, В.А.Галанова, И.И.Кудыша, М.Н.Добьчина и др.

Износосеконтактные задачи исследовались М.В.Коровчинским, Л.А.Галиным, И.Г.Горячевой, В.М.Александровым, Е.В.Коваленко, В.В.Панасюком, А.Е.Андрейкивым, М.В.Чернецом, М.И.Теплым, Ю.Н.Дроздовым, П.П.Усовым, Б.Л.Галехом, А.Г.Кузьменко, И.А. Солдатенковым и др.

Контактные задачи термоупругости с учетом теплообразования рассматривались в работах F.F.Ling'a, М.В.Коровчинского, В.М.Александрова, Д.В.Грилицкого, Е.В.Коваленко, В.А.Бабешко, В.Г.Левинского, М.И.Теплого, М.Б.Генералова, В.А.Кудрявцева, Э.Э.Партона, J.R.Barber'a и др.

Появление зон пластических деформаций в области контакта в виде полос нулевой толщины изучалось в работах Л.А.Галина, Г.П.Черепанова, Д.В.Грилицкого.

В большинстве работ влияние перечисленных факторов на основные характеристики контактной задачи изучается независимо друг от друга. Но, как показывают результаты экспериментальных и теоретических исследований, указанные явления и процессы необходимо учитывать в комплексе.

Поэтому уточнение математической постановки таких задач, разработка эффективных численных методов их решения и расчета контактных площадок и напряжений, температурных полей, тепловых потоков и величины износа представляет актуальную научно-техническую проблему.

Цель работы заключается в постановке новых контактных задач термоупругости для шероховатых тел с учетом износа, теплообразования и пластических полос в области контакта; в разработке эффективных численных методов решения систем нелинейных интегральных уравнений задач; в исследовании влияния перечисленных факторов на основные характеристики контактной задачи и друг на друга.

Научная новизна. В диссертационной работе исследован новый класс плоских задач термоупругости о взаимодействии жесткого штампа с упругим слоем с учетом микрогеометрии его поверхности, полос пластичности на площадке контакта, износа и теплообразования от действия сил трения. Научная новизна содержится в постановках задач, в методах их решений, в полученных результатах. Впервые при постановке контактных задач одновременно учтены шероховатость упругого тела, его износ, теплообразование от действия сил трения и неидеальность теплового контакта. Задача сведена к системе нелинейных интегральных уравнений, для решения которой разработан эффективный численный метод. Также впервые при постановке контактных упруго-пластических задач учтено теплообразование от действия сил трения.

Обнаружен ряд особенностей в решении рассмотренных задач, обусловленных учтенными при постановке факторами. В широком диапазоне изменения характерных физико-механических и геометрических параметров контактируемых тел исследованы закономерности изменения контактного давления, температур, тепловых потоков и величины износа.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при расчете износа и тепловых режимов подвижных сопряжений машин. Они могут быть применены при определении рабочего ресурса тормозных устройств машин, деталей и механизмов, работающих как направляющие, а также при исследовании процессов точения, шлифования и др.

Достоверность полученных результатов обеспечивается отрогим и последовательным применением использованных математических методов. При решении поставленных задач применялись метод интегрального преобразования Фурье, метод последовательных приближений для решения систем нелинейных интегральных уравнений, метод квадратур для вычисления интегралов. Доказаны достаточные условия сходимости метода последовательных приближений. При вычислении интегралов используются квадратурные формулы высокой алгебраической точности.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей согласованностью с известными в литературе частными случаями и их физической правдоподобностью.

Апробация работы. Отдельные этапы исследований по теме диссертационной работы докладывались на научных конференциях профессорско-преподавательского состава Львовского госуниверситета (1987-1990 гг.), на XIII и XIV научных конференциях молодых ученых Института механики АН УССР (г.Киев, 1988 г., 1989 г.), на выездных заседаниях Межведомственного Научного Совета по трибологии (г.Ереван, 1988 г., г.Ростов-на-Дону, 1990 г.), на IV Всесоюзной конференции по смешанным задачам механики деформируемого тела (г.Одесса, 1989 г.).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на научном семинаре кафедры механики Львовского госуниверситета (1990 г.), на научном семинаре Инст.тута проблем механики АН СССР по механике сплошной среды им. Л.А.Галина (г.Москва, 1990 г.), на научном семинаре по механике деформируемого твердого тела Института прикладных проблем механики и математики АН УССР (г.Львов, 1990 г.), на научном семинаре отдела № 10 Физико-механического института АН УССР (г.Львов, 1990 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано шесть научных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и изложена на 150 страницах машинописного текста. Работа содержит 41 рисунок, 4 таблицы и список литературы, включающий III наименований советских и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, кратко определена цель, научная новизна выполненной работы. Приведен обзор близких по направлению работ. Указан круг обсуждаемых вопросов и кратко изложены основные результаты работы.

Первая глава носит вспомогательный характер. В ней изложены некоторые сведения из трибологии.

В первом параграфе представлен экспериментальный и теоретический материал по контактированию шероховатых поверхностей. Приведены зависимости для оближения шероховатых тел, вызванного сминанием микронеровностей.

Во втором параграфе проанализированы законы внешнего трения твердых тел. Рассмотрена молекулярно-механическая теория трения. Приведены зависимости коэффициента трения от скорости относительного движения тел и от температуры на контакте.

Третий параграф главы посвящен вопросу изнашивания пар трения. Описан механизм изнашивания, проанализированы законы износа, описывающие разные виды этого процесса.

В четвертом параграфе собраны сведения о теплообразовании при трении твердых тел. Описан механизм выделения тепла при диссипации механической энергии. Приведены условия неидеального теплового контакта двух тел с учетом теплообразования от трения.

Материал первой главы используется в дальнейшем для постановки контактных задач с учетом микрогеометрии поверхностей, трения, изнашивания и теплообразования.

Во второй главе путем применения интегрального преобразования Фурье решается задача термоупругости для полосы со смешанными граничными условиями.

В первых двух параграфах приведены система дифференциальных уравнений термоупругости и некоторые соотношения и свойства интегрального преобразования Фурье.

В третьем параграфе получено интегральное представление для температуры в полосе, когда на части ее поверхности $x \in [a, b]$ задана функция теплового потока $\alpha(x)$, а на других частях осуществляется теплообмен с внешней средой по закону Ньютона. Вводя в граничных условиях усредненную температуру по области контакта и используя интегральное преобразование Фурье, получаем выражение для температуры в полосе

$$T(x, y) = s(x, y)T_0 + u(x, y)T_1 + \frac{1}{\pi \lambda_1} \int_a^b K(x, x, y) q(\xi) d\xi \quad (1)$$

где T_0, T_1 - температуры окружающей среды, λ_1 - коэффициент теплопроводности материала полосы. $s(x, y), u(x, y)$ и ядро $K(x, x, y) q(\xi)$ - известные функции.

В четвертом параграфе главы с помощью интегрального преобразования Фурье решена система дифференциальных уравнений термоупругости для полосы, когда на части ее границы действует тепловой поток $q(x)$ и нормальное давление $p(x)$, а на остальной части заданы граничные условия другого вида. Получено интегральное представление для вертикального перемещения верхней границы полосы в виде

$$u(x, 0) = s_0(x)T_0 + s_1(x)T_1 + \frac{\alpha_1(1+\nu)}{2\pi \lambda_1} \int_a^b K_0(\xi, x) q(\xi) d\xi + \frac{1}{\pi k} \int_a^b K_1(\xi, x) p(\xi) d\xi \quad (2)$$

где α_1 - коэффициент линейного температурного расширения материала полосы, $k = \mu / (1 - \nu)$, μ, ν - упругие постоянные материала полосы. Функции $s_0(x), s_1(x)$ и ядра $K_0(\xi, x)$ и $K_1(\xi, x)$ известны. Нижняя грань полосы предполагается жестко закрепленной.

В пятом параграфе проведен асимптотический анализ ядер $K(x, x, y), K_0(\xi, x)$ и $K_1(\xi, x)$ интегральных представлений для температуры (1) и вертикального перемещения верхней границы полосы (2) случае толстых полос. Показано, что в этом случае ядро можно представить в виде простых аналитических выражений.

В шестом параграфе построено решение задачи термоупругости для полосы, когда тепловые и силовые факторы имеют периодический характер. Задача рассматривалась при условиях теплоизоляции границы полосы $y=0$ вне области контактов и теплообмена по закону Ньютона при $y=-h$.

С использованием интегрального преобразования Фурье получены выражения для температурного поля в полосе

$$t(x, y) = \frac{1}{\pi \lambda_1} \int_{\Gamma} K^* (\xi - x, y) q(\xi) d\xi + \frac{1}{\pi \lambda_1} \int_{\Gamma} M(\xi - x, y) q(\xi) d\xi, \quad (3)$$

Интегральное представление для вертикального перемещения верхней границы полюсы в этом случае имеет вид

$$u(x) = u_y(x) + u_z(x), \quad (4)$$

где

$$u_y(x) = \frac{1}{\pi k} \int_{\Gamma} K_0^* (\xi - x) q(\xi) d\xi + \frac{1}{\pi k} \int_{\Gamma} N_0 (\xi - x) q(\xi) d\xi, \quad (5)$$

$$u_z(x) = \frac{\alpha_1 (1 + \nu)}{4 \lambda_1} \int_{\Gamma} K_0^* (\xi - x) q(\xi) d\xi + \frac{\alpha_1 (1 + \nu)}{2 \pi^2 \lambda_1} \int_{\Gamma} N_0 (\xi - x) q(\xi) d\xi, \quad (6)$$

Ядра этих представлений $K^* (\xi - x, y)$, $M(\xi - x, y)$, $K_0^* (\xi - x)$, $N_0 (\xi - x)$, $K_0^* (\xi - x)$, $N_0 (\xi - x)$ известны. Символ Γ обозначает участки контакта в пределах одного периода $0 \leq x < l$.

Результаты главы II используются для получения интегральных уравнений рассматриваемых в дальнейшем контактных задач.

В главе III рассмотрена плоская контактная задача термоупругости для шероховатого слоя с учетом теплообразования и износа.

Постановка контактной задачи приведена в первом параграфе.

Рассматривается задача о давлении штампа на упругий шероховатый слой. Штмп прижимается вертикальной силой P , приложенной с эксцентриситетом e и движется с постоянной скоростью V вдоль своих образующих. Вне области контакта внешние усилия отсутствуют. Нижнее основание слоя жестко закреплено. Ширина полюсы контакта либо известна заранее, либо определяется в процессе решения задачи.

В результате движения штампа в области контакта возникают силы трения $\tau_{xy}(x)$, которые овязаны с контактным давлением $q(x)$ обобщенным законом Кулона

$$\tau_{xy}(x) = f(q, T, V) q(x), \quad (7)$$

причем коэффициент трения f есть функцией контактного давления, температуры на контакте и скорости движения штампа.

В результате действия сил трения происходит износ поверх-

ности слоя (штамп не изнашивается).

Результатом работы сил трения является также разогрев соприкасающихся тел, т.е. образуются тепловые потоки $q_1(x)$ и $q_2(x)$, направленные соответственно внутрь слоя и штампа. Возникающие тепловые поля в телах приводят к перераспределению контактного давления под штампом и к изменению ширины полосы контакта.

Тепловой контакт между телами считается неидеальным. Условия теп. этого контакта имеют вид¹⁾

$$\begin{cases} q_1(x) + q_2(x) = \gamma \tau_{xy}(x), \\ q_1(x) - q_2(x) - h(T_1(x) - T_2(x)) = 0, \quad y = 0, \quad x \in [a, b], \end{cases} \quad (8)$$

где h - тепловая проводимость площадки контакта.

Между поверхностями тел вне области контакта и внешней средой происходит теплообмен по закону Ньютона.

При сделанных предположениях требуется определить длину области контакта, распределение контактного давления, температур, тепловых потоков и величину износа.

Шероховатость поверхности слоя и ее износ учитывается при помощи дополнительных вертикальных перемещений верхней границы слоя. Таким образом на площадке контакта будем иметь следующее условие

$$w(x) = v_1(x) + v_2(x) + v_3(x) + v_4(x), \quad x \in [a, b] \quad (9)$$

Здесь $v_1(x)$ - вертикальное перемещение граничных точек слоя вследствие деформирования микронеровностей; $v_2(x)$ - вертикальное перемещение границы слоя вследствие ее износа; $v_3(x) - v_4(x)$ - вертикальное термоупругое перемещение.

Для величины $v_1(x)$ принимается зависимость²⁾

$$v_1(x) = A [\varphi(x) \cdot k]^\alpha, \quad 0 < \alpha \leq 1, \quad A \geq 0, \quad (10)$$

где A, α - постоянные, зависящие от степени шероховатости слоя.

¹⁾Трилицкий Д.В., Баран В.П. О постановке контактных задач термоупругости при неидеальном тепловом контакте тел // Вестник Львовского университета, сер. мех.-мат. вып.27. 1987. С.10-13.

²⁾Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 228 с.

Перемещение воледрствя износа берем в виде¹¹

$$v_2(x) = R[T_1(x), V] \{ [T_{xy}^m(x) t + 1]^l - 1 \}, \quad (11)$$

где $R(T_1, V)$, m , l - функция и постоянные, которые зависят от физико-механических и тепловых условий на контакте, t - время изнашивания.

Удовлетворив с помощью соотношений (2), (9) - (11) условию

$$u(x) = \delta + \mu x - \sigma(x), \quad x \in [a, b] \quad (12)$$

где $\delta + \mu x$ - перемещение штампа, $\sigma(x)$ - функция, описывающая его основание, а при помощи выражения (1), записанного для олоя и штампа, условиям неидеального теплового контакта (8) с учетом закона трения (7), получим систему нелинейных интегральных уравнений задачи

$$\left\{ \begin{aligned} & A [q(x)/k]^\alpha + R[T_1(x), V] \{ [(f q(x))^m t + 1]^l - 1 \} + \\ & + \frac{1}{\pi k} \int_a^b K_0(\xi - x) q(\xi) d\xi + \frac{\alpha_1 c(1 + \nu \lambda)}{2\pi \lambda_1^{(1+s)}} \int_a^b K_2(\xi, x) Q_1(\xi) d\xi = \\ & = \delta + \mu x - \sigma(x) - S_0(x) T_0 - S_1(x) T_1, \quad x \in [a, b] \\ & Q_1(x) + Q_2(x) = V / q(x), \quad x \in [a, b], \\ & Q_1(x) - Q_2(x) - \frac{h}{\pi} \left\{ \frac{1}{\lambda_1^{(1+s)}} \int_a^b K_1(\xi, x) Q_1(\xi) d\xi - \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{\lambda_1^{(1+s)}} \int_a^b K_2(\xi, x) Q_2(\xi) d\xi \right\} = \\ & = h \{ [S_1(x, 0) - S_2(x, 0)] T_0 + [U_1(x, 0) - U_2(x, 0)] T_1 \}, \quad x \in [a, b] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Кроме того, имеют место условия равновесия штампа

¹¹ Ал. Коандров В.И. О постановке плоских контактных задач теории упругости при износе взаимодействующих тел // Докл. АН СССР. 1983. т. 271, № 4. С. 827-831.

$$\int_a^b q(x) dx = P, \quad \int_a^b x q(x) dx = \theta P \quad (14)$$

Для решения системы нелинейных интегральных уравнений в случае известной области контакта во втором параграфе этой главы предложен метод последовательных приближений. Вводя новую функцию

$$v(x) = A [q(x)/k]^{\alpha} - \delta - \mu x + \sigma(x),$$

получаем следующую числовую схему для решения системы нелинейных интегральных уравнений (13), (14)

$$v_{j+1}(x) = - \frac{A^{-1/\alpha}}{nk} \int_{-a}^a K_0(\xi-x) [v_j(\xi) + \delta_j + \mu_j \xi - \sigma(\xi)]^{\alpha/\alpha} d\xi -$$

(15)

$$- R_j^{(1)}(v) \left\{ \left[(f_j A^{-1/\alpha} [v_j(x) + \delta_j + \mu_j x - \sigma(x)]^{\alpha/\alpha})^{m_j+1} - 1 \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{\alpha_j(1+\nu)}{2\pi\lambda_j^{(1)}} \int_{-a}^a K_0(\xi, x) Q_j^{(1)}(\xi) d\xi - \sigma_0(x) T_0 - \sigma_1(x) T_0, \quad j=0, 1, 2, \dots \right.$$

$$Q_j^{(1)}(x) = \frac{\lambda}{2\pi} \int_{-a}^a K_{12}(\xi, x) Q_j^{(1)}(\xi) d\xi - \frac{\lambda V A^{-1/\alpha}}{2\pi\lambda_j^{(1)}} \int_{-a}^a K_2(\xi, x) f_{j-1}(\xi) [v_j(\xi) +$$

(16)

$$+ \delta_j + \mu_j \xi - \sigma(\xi)]^{\alpha/\alpha} d\xi - \frac{\lambda}{2} \left\{ [S_1(x, 0) - S_2(x, 0)] T_0 + [U_1(x, 0) - U_2(x, 0)] T_0 \right\}.$$

$$j=0, 1, 2, \dots \quad |x| \leq a$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-a}^a [v_j(\xi) + \delta_j + \mu_j \xi - \sigma(\xi)]^{\alpha/\alpha} d\xi = P A^{1/\alpha} \\ \int_{-a}^a \xi [v_j(\xi) + \delta_j + \mu_j \xi - \sigma(\xi)]^{\alpha/\alpha} d\xi = \theta P A^{1/\alpha}, \quad j=0, 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad (17)$$

где

$$K_{i,2}(\xi, x) = \frac{1}{\lambda_1} K_{i,1}(\xi, x) + \frac{1}{\lambda_2} K_{i,2}(\xi, x)$$

Алгоритм вычислений состоит в следующем. Задаем значение силы P и эксцентриситета e . Выбираем начальное приближение функции $w_0(x)$ и коэффициента трения $f_0(x)$.

Для определения δ_0 и κ_0 из системы нелинейных интегральных уравнений (17) используем метод Ньютона.

Для решения интегрального линейного относительно функции $q_0^{(i)}(x)$ уравнения второго рода (16) применяем метод простой итерации.

После этого из соотношения (15) определяется следующее приближение функции $w_{i+1}(x)$. На каждом шаге итерации определяются температуры $T_i(x)$, $(i=1, 2)$ и коэффициент трения $f(q, T, v)$.

Процесс вычислений продолжается до тех пор, пока не удовлетворяется условие

$$\max_{|x| \leq a} |w_{N+1}(x) - w_N(x)| < \epsilon$$

Функция $w(x)$ определяется как предел последовательности $w_j(x)$. Зная ее, находим функцию контактного давления $q(x)$.

Вопросы оходимости метода, единственность решения численной схемы рассмотрены в третьем параграфе. Получены достаточные условия оходимости метода последовательных приближений в виде системы неравенств на параметры задачи. Доказана теорема единственности решения предложенного метода.

Результаты численного анализа задачи в случае известной области контакта приведены в четвертом параграфе. Рассмотрены случаи симметричного и несимметричного вдавливания штампа с плоским и параболическим основанием в слой относительно большой толщины. Численная реализация задачи осуществлена для разных значений параметров шероховатости, износа и теплообразования.

Приведенные в виде графиков и таблиц результаты, иллюстрируют закономерности изменения контактного давления, тепловых потоков, температур, величины и характера износа в зависимости от геометрических и физико-механических параметров задачи.

В третьем параграфе приведено решение системы нелинейных интегральных уравнений задачи в случае заранее неизвестной области контакта. Рассмотрен случай симметричного приложения прижимающей силы.

Для решения системы нелинейных интегральных уравнений (13), (14) предложена следующая численная схема.

Выбираем начальное приближение полудлины области контакта a_0 . Для данного значения a по предложенной выше методике решаем систему нелинейных интегральных уравнений задачи. Определяем $q(x)$, $q_1(x)$, $q_2(x)$ и δ . Следующее приближение ширины полосы контакта определяем из условия равенства нулю контактного давления в крайних точках площадки контакта

$$q(\pm a) = 0 \quad (18)$$

по формулам

$$a_1 = a_0 (1 + 0.5 \operatorname{sign}(q(a_0))),$$

$$a_{k+1} = \left[a_{k-1} - a_k \frac{q(a_{k-1})}{q(a_k)} \right] / \left[1 - \frac{q(a_{k-1})}{q(a_k)} \right], \quad k=1, 2, \dots \quad (19)$$

Вычисления продолжают до тех пор, пока условие (18) не удовлетворится с заданной точностью.

Проведен численный анализ задачи.

Периодическая контактная задача термоупругости для шероховатого олова с учетом теплообразования и износа поставлена и решена в шестом параграфе этой главы. С использованием интегральных представлений, полученных во второй главе, задача сведена к системе нелинейных интегральных уравнений. Для ее решения используется предложенная численная методика.

Проведен численный анализ. Исследовано влияние периода на основные характеристики задачи.

В главе IV рассмотрена контактная термоупруго-пластическая задача для олова с учетом теплообразования от трения.

Математическая постановка задачи осуществлена в первом параграфе главы.

Рассматривается контактная задача о давлении длинного жесткого штампа на плоско-параллельный слой из идеально упруго-пластического материала, подчиняющегося условию пластичности Треска-Сен-Венана.

Штамп прижимается нормальным усилием P , приложенным с эксцентриситетом e . Кроме того, штамп движется с постоянной скоростью V вдоль образующих.

Предполагается, что зоны пластических деформаций представ-

ляют полосы нулевой толщины. Исходя из этого, предположим, что область контакта L состоит из L' - области упругих деформаций и L'' - области пластических деформаций. Длина полос пластических деформаций заранее не известна. Их количество и расположение определяется из физических соображений. На пластических полосах контактное давление достигает некоторой постоянной величины - предела текучести на сжатие σ_* .

В результате окользнения под штампом возникают силы трения $\tau_{xy}(x)$, которые связаны с контактным давлением $q(x)$ законом Амонтона

$$\tau_{xy}(x) = f q(x), \quad f = \begin{cases} f_1, & x \in L' \\ f_2, & x \in L'' \end{cases} \quad (20)$$

$$f_i = \text{const.} \quad (i=1,2)$$

Возникающие в результате работы сил трения тепловые поля приводят к изменению длины полос пластичности и к перераспределению контактного давления на упругих участках.

Тепловые граничные условия этой задачи такие же как и в предыдущей задаче.

Удовлетворив при помощи соотношений (2) условию (12), а при помощи выражения (1), записанного для слоя и штампа, условиям неидеального теплового контакта (8) с учетом закона трения (20), получаем систему интегральных уравнений задачи

$$\left[\begin{aligned} & \frac{1}{\pi k} \int_{L'} K_1(\xi-x) q(\xi) d\xi + \frac{\alpha_1(1+\nu)}{2\pi\lambda_1^{(1)}} \int_L K_1(\xi,x) Q_1(\xi) d\xi - \sigma_1(x) = -q(x) - \\ & - \sigma_0 q(x) - T_0 \sigma_0(x) - T_c \sigma_1(x), \quad x \in L' \\ & Q_1(x) + Q_2(x) = V \begin{cases} f_1 q(x), & x \in L' \\ f_2 \sigma_0, & x \in L'' \end{cases} \quad (21) \\ & Q_1(x) - Q_2(x) - \frac{\lambda}{\pi} \left\{ \frac{1}{\lambda_1^{(1)}} \int_L K_1(\xi,x) Q_1(\xi) d\xi - \frac{1}{\lambda_2^{(2)}} \int_L K_2(\xi,x) Q_2(\xi) d\xi \right\} = \\ & = \lambda \left\{ T_0 [S_1(x,0) - S_2(x,0)] + T_c [U_1(x,0) - U_2(x,0)] \right\}, \quad x \in L \end{aligned} \right.$$

Здесь принято обозначение

$$\psi(x) = \frac{1}{\pi k} \int_{L''}^L K(x, \xi) d\xi.$$

Для замкнутости системы интегральных уравнений (21) служат условия равновесия штампа

$$\int_{L'} q(x) dx = P - \sigma_0 \int_{L''} dx, \quad \int_{L'} x q(x) dx = \sigma P - \sigma_0 \int_{L''} x dx \quad (22)$$

Во втором параграфе главы предложена численная схема нахождения длины полос пластичности и решения системы интегральных уравнений задачи в случае штампа с прямолинейным горизонтальным основанием. В этом случае пластические полосы появляются в окрестностях крайних точек штампа. Длина полос пластичности определяется итерационным способом из условия непрерывности контактного давления под штампом. С использованием квадратурных формул высокой алгебраической точности по узлам полиномов Лежандра и интерполяционных формул Лагранжа система интегральных уравнений задачи сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Результаты численного анализа задачи приведены в третьем параграфе. Численная реализация задачи осуществлена для разных значений геометрических и физико-механических параметров. Приведенные в виде графиков и таблиц результаты, показывают закономерности изменения контактного давления, тепловых потоков, температур, длины пластических полос в зависимости от входных параметров задачи. Выявлено качественное и количественное их влияние на решение задачи.

Периодическая контактная термо-упруго-пластическая задача для слоя с учетом теплообразования от трения исследована в четвертом параграфе. Задача сведена к системе интегральных уравнений. Для ее решения используется предложенная численная методика.

Проведен численный анализ задачи. Исследовано влияние периода на длину полос пластичности, на распределение контактного давления, тепловых потоков, температур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Поставлен и решен новый класс плоских контактных задач термоупругости о взаимодействии жесткого штампа с упругим и упруго-пластическим слоем с учетом микрогеометрии его поверхности, износа и теплообразования от действия сил трения. Разработаны эффективные численные методы решения систем интегральных уравнений задач. В широком диапазоне изменения характерных физико-механических и геометрических параметров соприкасающихся тел исследованы закономерности изменения контактного давления, температур, тепловых потоков и величины износа.

2. Решена стационарная задача термоупругости для полосы, когда на части ее поверхности задана функция теплового потока и нормальное давление, а на других частях заданы граничные условия другого вида. С использованием интегрального преобразования Фурье получены интегральные представления для температуры в полосе и для вертикального перемещения верхней границы полосы. Построено решение аналогичной периодической задачи.

3. Впервые рассмотрена контактная задача термоупругости для шероховатого слоя с учетом теплообразования и износа при неидеальном тепловом контакте. Задача сведена к системе нелинейных интегральных уравнений. Для ее решения предложен метод последовательных приближений. Получены достаточные условия сходимости метода. Доказана теорема единственности решения предложенной численной схемы. Результаты численного анализа задачи приведены для случая известной и неизвестной заранее области контакта, для симметричного и несимметричного вдавливания штампа с плоским и параболическим основанием в слой относительно большой толщины. Выявлено качественное и количественное влияние учетных факторов на решение задачи.

Поставлена и решена периодическая контактная задача термоупругости для шероховатого слоя с учетом теплообразования и износа. Проведен численный анализ задачи. Исследовано влияние периода на искомые характеристики задачи.

4. Рассмотрена контактная термоупруго-пластическая задача для слоя с учетом теплообразования от трения при неидеальном тепловом контакте. Задача сведена к системе интегральных уравнений. Для ее решения в случае штампа с прямолинейным горизонтальным основанием предложена численная схема. Приведены результаты числен-

ного анализа задачи.

Поставлена и решена периодическая контактная термо-упруго-пластическая задача для слоя с учетом теплообразования от трения. Проведен численный анализ задачи. Показано влияние периода на искомые характеристики задачи.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Грилицкий Д.В., Паук В.И. Контактная задача для толстого шероховатого слоя с учетом изнашивания и теплообразования// Физико-химическая механика материалов. 1989. Т.25, №3. С.78-83.

2. Грилицкий Д.В., Паук В.И. Плоская контактная задача термоупругости для слоя с учетом шероховатости, теплообразования и износа// Вездное заседание по современным проблемам теории контактных взаимодействий. Тез. докладов. Ереван. 1988. С.41-44.

3. Грилицкий Д.В., Паук В.И. Плоская контактная термоупруго-пластическая задача для слоя с учетом теплообразования// Смешанные задачи механики деформируемого тела. Тез. докладов IV Всесоюзной конференции. Одесса. 1989. Ч. I. С.99.

4. Паук В.И. Контактная задача для толстого шероховатого слоя с учетом теплообразования от трения//Труды XIII научной конференции молодых ученых ИМ АН УССР. Киев. 1988. С.481-485.

5. Паук В.И. Контактная задача для шероховатого слоя с учетом теплообразования и конвективного теплообмена//Труды XIV научной конференции молодых ученых ИМ АН УССР. Киев. 1989. С.294-298.

6. Паук В.И. Периодическая контактная задача для шероховатого слоя с учетом теплообразования и изнашивания//Проблемы контактного взаимодействия, трения и износа. Тез. докладов выездной сессии. Ростов-на-Дону. 1990. С.91.

Подписано в печати 24.12.90 Формат 60x84/16 Печать офсет. Усл. л. к.
0,93. Усл. кр.-отт 1,17 Уч. изд. л. 0,8 Тираж 100 экз. Зак. 2023
Бесплатно.

Областна книжна типографија, 290000, Львов, ул. Сталенина, 11

466943

Бесплатно.

AB 25.291

AB 25.291

~~AB~~

[Handwritten signature]