

На правах рукописи

Автономова Людмила Владимировна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ИНТЕНСИВНО НАГРУЖЕННЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИИ

01.02.06 -- динамика и прочность машин,  
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Харьков - 1993

21.01  
581.2



Робота виконана на кафедрі  
ковського політехнічного інституту

Научний керівитель - кандидат технічних наук,  
доцент Хавин В.Л.

Офіційні опоненти - член-кореспондент АН України  
доктор технічних наук  
професор Подгорний А.Н.

- кандидат технічних наук,  
доцент Крижук Н.Г.

Ведущая організація - Український науково-технічний Центр  
Харківський Фізико-технічний  
інститут

Захита дисертації состоится " " июня 1993 года в " " часов  
на заседании специализированного совета Д 068.39.06 при Харь-  
ковском политехническом институте (310002 Украина, г. Харьков,  
ул.Фрунзе 21).

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розослан " " мая 1993 года.

Учений секретарь  
спеціалізованого ради  Бєртовой В.В.

3

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современной технике и промышленности многие элементы конструкций работают в условиях взаимодействия полей различной природы: температурных, электромагнитных и механических.

При проектировании современных контактных соединений, когда величины токов, протекающих через контакты, могут достигать в импульсных режимах сотен килоампер, из-за кратковременности процесса возникают большие трудности при проведении измерений температурного поля, возникающих в процессе работы напряжений и деформаций. Кроме того, экспериментальные исследования приводят к большим материальными затратами. В связи с этим, представляется целесообразным проведение теоретических исследований связанной задачи электротермомеханики электрических контактов для изучения тепловых и механических процессов и выработки рекомендаций по их проектированию.

Целью работы является создание и внедрение в исследовательскую практику методики анализа и алгоритмов расчета контактного взаимодействия электрических пар контактов, подвергающихся интенсивным термомеханическим и электромагнитным воздействиям, а также алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для расчета двумерных связанных задач.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчета электротермомеханического состояния силовых контактных соединений, учитывающая связанность протекающих физических процессов.
2. Выполнено исследование влияния неоднородности контактного

ся на термомеханическое состояние и работоспособность электрических контактных соединений.

3. Предложена модель, одновременно учитывающая зависимости переходного электрического и теплового контактного сопротивлений от величины контактного давления и состояния поверхности.

4. Проведены исследования оригинальных электрических разъемов стеллараторов и навесных зажимов шинопроводов для промышленных установок.

5. Разработаны рекомендации для конструирования токовых разъемов, подвергающихся интенсивным механическим воздействиям и выбора режимов эксплуатации.

6. На основании научных моделей предложены новые решения и конструкции высокоточных контактных соединений, защищенные авторскими свидетельствами.

Достоверность расчетных методик, выводов и рекомендаций подтверждается:

- сравнением результатов численного эксперимента с известными точными и приближенными решениями ряда контактных задач;
- удовлетворительным согласованием результатов расчета н.д.с. гнездового зажима с данными натурного тензометрирования.

Практическая ценность полученных результатов заключается в создании эффективной методики и программного обеспечения, позволяющих исследовать в двумерной постановке распределения независимых либо связанных характеристик электрического и теплового полей, напряженно-деформированного состояния объектов сложной конфигурации.

Разработанные методики, матобеспечение, выводы и рекомендации по проведенным исследованиям внедрены в Физико-техническом институте Академии Наук Украины при проектировании и создании

разъемных контактных соединений магнитной системы стелларатора У-2М для экспериментальной установки термоядерного синтеза.

Методика решения связанных контактных задач электромагнито-термопластики внедрена в практику научных исследований НИИ "Электроаппаратостроения" г. Санкт-Петербург. Предложенный подход позволил провести сравнительный анализ работоспособности различных конструкций соединений, осуществить выбор конструкций и рекомендаций по эксплуатации.

На защиту выносятся следующие основные положения работы:

1. Методика и алгоритмы решения прикладных контактных задач МКЭ для систем деформируемых и теплопроводящих двумерных тел, подвергающихся воздействию внешних нагрузок и электрического тока.

2. Модель контактного взаимодействия деталей электрического соединения, реализующая граничные условия и обеспечивающая связанность краевых задач в рамках единого вычислительного процесса. Рекомендации по изменению конструкций разъемов, позволяющие улучшить их работоспособность и увеличить срок службы.

3. Численные исследования электротермомеханического состояния узла разъема стелларатора У-2М и навесных гнездовых зажимов, а также рекомендации по проектированию и выбору режимов эксплуатации.

Апробация работы. Основные материалы работы докладывались и обсуждались на: III Всесоюзной конференции "Смешанные задачи теории упругости" (г. Харьков, 1984 г.), Четвертой (1987 г.) и Пятой (1990 г.) Всесоюзных конференциях по инженерным проблемам термоядерных реакторов, IV Всесоюзной конференции "Смешанные задачи механики деформируемого твердого тела (Одесса, 1989 г.), Всесоюзных семинарах "Электрические контакты и электроды" (Киев - Одесса

1999 г., 1990 г.), на Республиканской научно-технической конференции "Качество и надежность узлов трения" (г.Хмельницкий, 1992 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, включая 4 статьи и 2 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 143 наименования; содержит 40 рисунков, 3 таблицы - всего 143 страницы

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая значимость, сформулирована цель работы.

В первой главе проведен анализ выполненных к настоящему времени исследований по контактному взаимодействию в сложных взаимодействующих полях различной природы (механических, тепловых, электромагнитных). Приведены данные о различных подходах к изучаемым процессам, основные результаты, полученные как аналитически, так и численными методами. Особое внимание уделено моделям контактирования, реализованных методом конечного элемента. Это обосновано большей гибкостью и возможностями этого метода численного моделирования.

Следует отметить, что рассмотренные алгоритмы решения прикладных контактных задач ориентированы на задачи определенной физической природы, в которых не учитывается взаимосвязь протекающих процессов. Поэтому сделан вывод о необходимости создания эффективной методики решения контактных связанных задач электротермоупругости и пластичности, учитывающей одновременно сложную геометрию и различную физическую природу воздействия на контактирую-

щие тела. Отмечена целесообразность построения алгоритма, объединяющего процессы отыскания неизвестных и учета различного рода нелинейностей в рамках единой итерационной схемы. Отмечена практическая направленность и значимость таких исследований для анализа электротермомеханического состояния реальных конструкций и их проектирования.

Во второй главе рассмотрена постановка задачи.

В общем случае система уравнений, описывающих исследуемый класс задач, включает в себя: уравнения электромагнитного поля и законы сохранения импульсов, энергии (энтропии) и момента количества движения.

При получении разрешающей системы уравнений были приняты следующие допущения:

- ограничена длительность рассматриваемых процессов от 0,01 до 10000 сек;
- пренебрежимо мало влияние процессов поляризации и намагничивания ( $\epsilon - \mu - 1$ );
- электромагнитное поле в каждый момент времени  $t$  сохраняет структуру стационарного поля, изменяясь только по величине ( $dD/dt \ll j$ ;  $\rho = 0$  и  $\Delta t \gg \epsilon/b$ );
- влияние термоэлектрических эффектов на тепловыделение в контактной зоне мало;
- работа сил деформирования и сил Лоренца много меньше энергии тепловыделения ( $\rho c_v dT/dt \gg \epsilon^{1/2} \cdot \epsilon_{1j}$  и  $j \cdot E \gg j \cdot [v \cdot B]$ );
- не учитывается влияние гометрической нелинейности;
- влиянием объемных инерционных сил пренебрегаем;
- зависимость физических параметров от температуры в рассматриваемом диапазоне температур не учитывается;
- исследуются двумерные постановки задач.

Исходя из перечисленных ограничений основные уравнения описывающие протекающие процессы сводятся к следующим:

- уравнение квазистатического электромагнитного поля

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\phi/\rho_0) = 0 \quad (1)$$

- уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c_v \partial T / \partial t - \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + j^2(r, t) * \rho_0 j(r, t) - I_0(t) * (-\operatorname{grad}\phi/\rho_0) \quad (2)$$

- уравнения квазистационарной механики твердого тела

$$\varepsilon \delta^{ik} / \varepsilon x^k = 0; \quad \varepsilon_{ik} - (\varepsilon u^k / \varepsilon x^j + \varepsilon u^j / \varepsilon x^k) / 2; \quad \delta^{ij} - \delta^{ji}; \\ \varepsilon^2 \varepsilon_{in} / \varepsilon \zeta^j \varepsilon \xi^m + \varepsilon^2 \varepsilon_{jm} / \varepsilon \zeta^i \varepsilon \xi^n - \varepsilon^2 \varepsilon_{jn} / \varepsilon \zeta^i \varepsilon \xi^m - \varepsilon^2 \varepsilon_{im} / \varepsilon \zeta^j \varepsilon \xi^n = 0$$

или уравнение Дюгамеля-Неймана для формулировки задачи в перемещениях:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} u_i) + [\operatorname{grad}(\operatorname{div} u_i)] / (1 - 2\nu) - [3\alpha_t E / (1 - 2\nu) G] * \operatorname{grad} T \quad (3)$$

и уравнение состояния (Прандтля-Рейсса):

$$d\varepsilon_{ij} - [d\delta_{ij} - \nu(3d\delta_{ij} - d\delta_{jj})] / E + 3d\varepsilon_{ij}^P(\delta_{ij} - \delta g_{ij}) / 2E + \alpha_t dT g_{ij}$$

Связность разрешающей системы уравнений следует из зависимости контактных сопротивлений (электрического и термического) от величин соответствующих напряжений на контактной поверхности в контактных граничных условиях:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) / \delta_1 (\partial \varphi_1 / \partial n) - R_0(\delta_{ij}); \\ (T_1 - T_2) / \lambda_1 (\partial T_1 / \partial n) - R_t(\delta_{ij}) \quad (4)$$

Контактные сопротивления зависят также от качества обработки поверхностей, свойств среды в газоре и ряда других параметров.

В начальный момент времени  $t_0$  должна быть также задана конфигурация контактного соединения, начальные напряжения  $\delta^{ij}_0(r, 0)$ , температура, распределение плотности токов, термомеханические и электромагнитные свойства сред (теплопроводность, проводимость, плотность, упругие постоянные и пр.).

Граничные условия задаются в интервале времени  $[0, t]$ , в ко-

тором происходят наблюдаемые электротермомеханические процессы. В качестве граничных условий уравнения электромагнитного поля используются условия Дирихле, Неймана или Коши, для уравнения теплопроводности - граничные условия 1-го, 2-го, 3-го и 4-го рода и для уравнений теории упругопластичности: заданы компоненты перемещений  $u_i - u_i(r, t)$ ; заданы напряжения  $p^i - b^i k_{nk}$  и смешанные условия, а также граничные условия для точек, лежащих на границе раздела контактирующих поверхностей в следующем виде:  $u_1^1 - u_1^2$  (для зоны прилипания -  $\Sigma_0$ ) и закон трения Кулона  $b^t_{ij} - f * b^n_{jk}$  (для зоны скольжения -  $\Sigma_v$ ), где  $b_{ij}$  - напряжение трения,  $b_{nn}$  - нормальное давление,  $f$  - коэффициент трения в приконтактном слое; условие непроникновения тел друг в друга  $(u^i_{i-1} + u^i_{i+1} - \delta_i) < 0$  и  $b^i_{ij} < 0$ , где  $u^i_{i-1}, u^i_{i+1}, \delta_i$  - перемещения точек и начальный натяг в направлении общей нормали к контактной поверхности.

Граница между зонами прилипания  $\Sigma_0$  и скольжения  $\Sigma_v$  заранее не известна и подлежит определению в процессе решения задачи. Также подлежит определению и граница -  $\Sigma_p$  между упругой и пластической областями, которая заранее не известна. Для этого используются условия пластичности Губера-Мизеса.

В общем случае поставленная задача является связанной по граничным условиям. Однако, в рассматриваемом диапазоне воздействий нелинейность параметров (по температуре) не существенна.

Численное решение выполнялось на базе эквивалентной вариационной постановки задачи электротермопластичности, для которой  $\delta J = 0$ , где  $J$  - функционал соответствующей задачи. Приведем вид функционала для каждой из задач системы уравнений электротермопластичности:

- для задачи теплопроводности

$$J(T) = \int \lambda * (\text{grad} T)^2 dv / 2 + \int \rho c T * (\partial T / \partial t) dv - \int f_q T dv +$$

$$+ \int (T_2^2 - \alpha \theta T) ds_a + \int q T ds_q - \int q_k (T_2 - T_1) ds_k,$$

где  $s_q$  - поверхность, на которой задан тепловой поток;  $s_a$  - поверхность с условиями конвективного теплообмена;  $s_k$  - контактная поверхность;  $f_q$  - мощность внутренних источников тепла;  $\theta$  - температура окружающей среды;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;

- для задачи электромагнитного поля

$$J(\varphi) = \int \sigma \star (\text{grad} \varphi)^2 dv / 2 + \int \varphi \sigma \star (\text{grad} \varphi / s_n) ds_j - \int R_k (\varphi_2 - \varphi_1) ds_k,$$

где  $\varphi$  - потенциал;  $\sigma$  - электропроводность;  $s_j$  - поверхность с заданными токами;  $R_k$  - электрическое переходное сопротивление;

- для задачи контактного механического взаимодействия

$$J = \int W \star \epsilon_{ij} dv - \int s_i u_i ds_n + \int f \star |s_v^{p-1}| \star |\Delta u_t| ds_k,$$

где  $W$  - потенциальная энергия деформирования;  $u_i$  и  $\epsilon_{ij}$  - компоненты вектора перемещений и тензора деформаций, соответственно;  $s_i - b_{ij} \star v_j$  - на границе  $s_n$ ;  $f$  - коэффициент трения на границе  $s_k$ ;  $\Delta u_t$  - вектор относительных перемещений, контактирующих тел.

Записанные вариационные формулировки позволяют привести поставленную задачу к некоторой экстремальной задаче, численная реализация которой выполняется стандартными процедурами вычислительной математики. Решение вариационной задачи осуществляется МКЭ на единой сетке треугольных элементов с билинейной аппроксимацией искомых функций.

Для численной реализации граничных условий в контактных зонах вводился слой бестолщинных контактных элементов с параметрами, учитывающими неоднородность электрического и термического контактных сопротивлений, трение и проскальзывание на поверхности. На базе такой модели формировались модифицированные системы матричных уравнений МКЭ.

В третьей главе описан алгоритм решения и структура программного обеспечения для решения связанной задачи электромагнитотер-

мопластичности и рассмотрен ряд тестовых задач, подтверждающих надежность его программной реализации.

Суть алгоритма расчета заключается в следующем:

1. На первом этапе рассчитывается н.д.с. контактного соединения без токовых и тепловых нагрузок. Определяются величины начальных термического и электрического контактного сопротивления. Поскольку наиболее инерционным из рассматриваемых физических полей (электромагнитное, тепловое и механическое) является тепловое, то последующие временные итерации выполняются по минимальной величине временного шага, обеспечивающего устойчивость решения уравнения теплопроводности.

2. Затем выполняется расчет электромагнитного поля в квазистатическом приближении, т.е. для каждого временного шага находится решение уравнения электромагнитного поля (методом последовательных приближений: после вычисления поля для произвольно заданных постоянных, определяется ток на электродной площадке и начальные значения постоянных изменяются пропорционально соотношению полученного интегрального тока и заданного тока на электроде). Зависимость плотности тока от времени пропорциональна амплитуде импульса тока на соответствующем шаге по времени.

3. По найденному распределению плотности тока определяются плотности источников джоулева тепловыделения, причем их зависимость от времени пропорциональна квадрату значения плотности тока на соответствующем шаге по времени. То есть, определяется временная зависимость объемных источников тепловыделения для дальнейшего решения нестационарной задачи теплопроводности.

4. Далее определяется термомеханическое н.д.с. по известному распределению температур и внешних усилий на каждом временном шаге.

Б. Рассматривается влияние результирующего н.д.с. на величину контактного сопротивления, как теплового, так и электрического, что вызывает изменение распределения токов и температур в зоне контактирования на каждом временном шаге. По изменению этих параметров выполняется дополнительный цикл итераций расчета электромагнитного и теплового полей для соответствующего временного шага.

Расчет электрического и теплового полей завершается, когда различие в распределении полей при последующих итерациях становится пренебрежимо мало. Поскольку наиболее инерционным из рассматриваемых физических полей (электромагнитное, теплое и механическое) является теплое, то итерации выполняются по минимизации ошибки расчета этого поля, после чего рассчитывается окончательное н.д.с. на данном временном шаге, включая определение зон контактирования и пластичности.

В. Вышеизложенная процедура повторяется на каждом последующем шаге времени протекания импульса тока.

При создании математического обеспечения для решения такого класса контактных задач в качестве базовых программных модулей были использованы разработки Киевского политехнического института. Открытая структура этих программ позволила подключить управляющий итерационным процессом программный блок и дополнительные программы, реализующие приведенную модель контактного взаимодействия и постпроцессорной обработки результатов, чтобы реализовать вышеизложенный алгоритм расчета.

Ориентация работы на создание специального программного обеспечения, реализующего вышеизложенный алгоритм, предопределяет внимание к вопросам сходимости решений итерационных задач.

Учет нелинейностей, обусловленных неупругим поведением мате-

риала соединений, изменением границ контактных площадок и условиями фрикционного взаимодействия выполняется по единой итерационной схеме метода переменных параметров упругости. Последовательность итерационных приближений при решении упругопластической задачи завершается при выполнении условий сходимости по пластическим деформациям и стабилизации участков контактирования и проскальзывания.

Учет нестационарности задачи теплопроводности выполняется с применением конечно-разностного подхода. Условие сходимости для двухслойных конечно-разностных схем выполняется безусловно при ограничении весового множителя снизу величиной 0,5. Для устранения осцилляций решений временной шаг ограничивается сверху с учетом выбранного весового множителя.

Использование приведенных схем расчета в поставленной задаче обеспечивает быструю сходимость решения при небольшом числе итераций.

Рассмотрены тестовые задачи:

- токораспределения для соединения плоских шин с двухступенчатыми стыками;
- упругого деформирования неравномерно нагретой кольцевой области, решения которых сравнивались с известными аналитическими;
- нелинейная задача нестационарной теплопроводности для двухслойной пластины;
- контактная задача для упругих тел конечных размеров с учетом трения, решение которых сравнивалось с экспериментальными и численными результатами, полученными другими авторами.

Для указанных тестов было получено хорошее соответствие известных результатов с полученными в работе.

В четвертой главе приведены конкретные примеры применения

предложенной методики решения связанной задачи электротермопластичности.

Первый рассмотренный пример связан с проектированием установок термоядерного синтеза, в которых магнитное поле создается криволинейными разъемными винтовыми обмотками и используются контактные соединения, подверженные воздействию ponderomotorных нагрузок и температурного поля.

Основной элемент обмотки - узел разъема У-2М (рис.1) представляет собой контактное соединение плоских шин магнитной обмотки, имеющих ступенчатую геометрию стыков, с помощью плоской накладки. Величина максимальной амплитуды импульса тока, протекающего через узел разъема равна 80 кА, длительность одного импульса тока до 3 с.

В результате протекания тока узел разъема подвергается воздействию механических усилий, уровни которых в общем случае определяются всей геометрией магнитной системы. Вследствие напряженного характера работы узла разъема картина распределения напряжений в таком контактном соединении характеризуется наличием зон высокой концентрации, а также общей неравномерностью распределения сжимающих усилий в контактной зоне, что существенно влияет на прохождение тока через узел разъема и работу всей электрофизической установки.

Поскольку толщина шины имеет конечные размеры, задача рассматривалась в постановке плоского напряженного состояния. В многоугольной двумерной области разъема генерировалась конечноэлементная сетка из треугольных элементов с линейной аппроксимацией перемещений.

В работе выполнен анализ н.д.с. разъема в зависимости от различных условий опирания обмотки в области разъема, что приво-

дит к различным уровням нагрузок  $q$ ,  $b$ ,  $t$ . Было рассмотрено напряженно-деформированное состояние угла разъема обмотки магнитной системы без опоры над зажимом (граница  $\Gamma_2$ ) - первый вариант механического нагружения контактного соединения, и второй вариант - н.д.с. угла разъема обмотки с дополнительным опиранием.

В результате расчета показано, что максимальное значение интенсивностей напряжений в зоне вывода токопроводящей шины в первом варианте нагружения на 25% превышает аналогичное значение для второго варианта. Кроме того, для первого варианта нагружения характерно более неравномерное распределение контактных усилий сжатия и спад при подходе к стыку, что приводит к дополнительному джоулевому нагреву. Во втором варианте возникает дополнительное поджатие на поверхности контактирования, что благоприятно оказывается на протекании тока и общем н.д.с. конструкции.

Исходя из полученных результатов, было рекомендовано провести дополнительное опирание угла разъема. За основу был принят второй вариант нагружения угла разъема и исследовано его электротермомеханическое состояние.

При расчете электротермомеханического состояния контактного соединения реализована модель, учитывающая неравномерность контактного сопротивления по поверхности контакта. На рисунке 2 представлены кривые распределения давления на контактной поверхности в момент времени, соответствующий максимальному нагреву контакта. На кривой 2 (рис.2) приведен график сжимающего контактного давления на поверхности контакта с учетом неравномерного распределения контактных сопротивлений. На кривой 1 - сжимающие усилия при постоянном контактном сопротивлении. Максимальное отличие амплитуд составляет 12% и отмечается более плавный характер распределения контактных давлений (кривая 2).

Учет связанности при решении задачи выявляет эффект стабилизации поджатия, снижения переходного электрического и теплового контактного сопротивления и уменьшения температуры в контактной зоне. Полученный результат известен в практике эксплуатации электрических контактов как процесс самовосстановления.

Анализ н.д.с. в уале разъема установки У-2М при пропускании тока и интенсивном механическом воздействии показал, что разъем в номинальном режиме будет находиться в упругопластической зоне, однако распространение области пластических напряжений в выводе шины вдоль выточки стыка незначительно влияет на зону непосредственного контакта. Т.е. при проектировании разъема с необходимыми геометрическими и механическими параметрами может быть обеспечена его работоспособность.

Дополнительно было также проведено исследование геометрии уала разъема в зоне контакта. Предложено оригинальное выполнения контактирующей поверхности, что приводит к уменьшению тепловыделения и улучшению работоспособности контактного соединения. Эти результаты защищены авторскими свидетельствами и внедрены в проектируемую установку.

Другим конкретным примером использования предложенной методики является анализ н.д.с. гнездового зажима фирмы "Pflisterer", термомеханические свойства которого и конструктивное исполнение, позволяют стабилизировать его переходное сопротивление в отличие от обычного для других моделей электрических контактов возрастания сопротивления при нагреве. Конструкция зажима в рабочем состоянии включает в себя: корпус - 1, изготовленный из алюминиевого сплава, латунные планку и прижимной болт - 2, медную клемму - 3 и алюминиевый провод - 4 (рис.3).

Для обоснованного выбора расчетной схемы и оценки достовер-

ности получаемых результатов на начальном этапе расчетов было проведено сравнение деформаций на наружной стенке корпуса с результатами тензометрирования, полученными в ЦП ВНИИПЭМ (г. Санкт-Петербург).

В результате расчетов найдено распределение изолиний интенсивностей напряжений в стенке корпуса гажима при нагреве до 50°C; зависимость максимальной интенсивности напряжений от температуры; зависимость распространения глубины зоны пластичности по толщине стенки от нагрева; распределение контактных усилий от момента сжатия и нагрева протекающим током. Полученные результаты показывают, что рост величины тока приводит к углублению зоны пластичности, а это, в свою очередь, приводит к перераспределению напряжений, релаксации в нагруженных зонах.

В частности, с увеличением величины номинального тока, вызывающего нагрев до 40°C, при моменте сжатия 2 Н\*м происходит рост прижимного давления по линейному закону, что дает основание утверждать о упругом состоянии гажима (рис. 4). Далее с увеличением температуры до 70°C происходит его спад по нелинейному закону, что свидетельствует о работе гажима в пластической области. Это приводит к росту переходного сопротивления на границе и нарушению токопередачи между проводом и клеммой.

Таким образом, для того, чтобы в процессе работы гнездового гажима происходила стабилизация переходного сопротивления и режим пропускания тока не нарушался, необходимо обеспечить упругое напряженно-деформированное состояние в процессе работы подбором материалов составных частей, прижимного усилия и величины тока. Соответственно, протекание тока происходит по гнездовому гажиму, находящемуся в предварительно напряженном состоянии.

На рис. 5 приведена зависимость максимального момента сжатия

ки болта от нагрева пропускаемым током, обеспечивающего работу конкретного гнездового зажима в зоне упругости. Величина номинального тока, обеспечивающего необходимый уровень установившейся температуры, определяется в общем случае условиями теплообмена и параметрами токопроводящей шины.

Полученные в рассмотренном примере результаты позволили не только выяснить причины необычных свойств электрического разъема фирмы "Pfisterer", но и выработать рекомендации по проектированию аналогичных конструкций электрических контактных соединений, обеспечивающих наибольший срок службы и высокую работоспособность разъемов.

В выводах сформулированы основные полученные результаты, возможности их применения в расчетах и при проектировании электротехнических установок, подвергающихся сложным видам термомеханического нагружения.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ:

1. В работе рассмотрена связанная электротермомеханическая контактная задача в двумерной постановке для электрических контактных соединений. Ее решение достигается последовательным решением краевых задач электромагнитного поля, теплопроводности, и механики деформируемого твердого тела, связанных посредством зависимости контактного электрического и термического сопротивлений от уровня контактного давления, микрогеометрии, электрических, тепловых и механических характеристик взаимодействующих поверхностей.

2. Поставленная прикладная задача реализована в едином алгоритме МКЭ с использованием модели неоднородного бестолщинного

слю, учитывающего связь контактирующих подобластей по соответствующим параметрам состояния. Решение последовательности краевых задач осуществляется на единой сетке при линейной аппроксимации искомых функций.

3. Разработан алгоритм решения связанных электротермомеханических задач для контактных соединений, реализующий последовательное решение краевых задач в итерационном процессе переменных параметров состояния (контактное давление, электро- и термосопротивления, поля температур, плотностей тока, механических напряжений и т.д.). Решение задач токораспределения и механики осуществлялось в квазистатической постановке, а задача теплопроводности рассматривалась как нестационарная, вследствие значительной инерционности тепловых процессов.

4. Создано эффективное специализированное программное обеспечение, использующее автономные блоки решения частных краевых задач, разработанные на кафедре ДИПМ КПИ (г. Киев).

5. Проведены численные исследования сходимости и достоверности результатов путем их сравнения с данными других авторов и натурным экспериментом на реальном контактом соединении - гнездовом зажиме.

6. Выполнены исследования закономерностей контактного взаимодействия шин электрических разъемов обмотки магнитной системы стелларатора У-2М. Проанализированы зависимости распределения температурного и электрического полей, контактных давлений и н.д.с., а также влияние данных параметров на работоспособность узла разъема. Даны практические рекомендации по совершенствованию конструкции контактного соединения.

7. Путем серии численных экспериментов, проведенных для гнездового зажима, установлено влияние наличия зоны пластических

деформаций на величину результирующего прижимного усилия контактирующих токоведущих элементов. Получена обобщающая зависимость начального момента сжатия от средней температуры нагрева зажима протекающим током, обеспечивающая обоснованный выбор эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ:

1. Автономова Л.В., Литвиненко Ю.А., Хавин В.Л. Исследование соединения плоских шин с различной геометрией контактных переходных частей. - В сб.: Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности. - Киев: ИПМ, 1987 - с.86-92.

2. Автономова Л.В., Хавин В.Л., Конохов В.И. Исследование контактного взаимодействия элементов узла разъема магнитной системы торсатрона. Тезисы докл. на III Всесоюз. конф. "Смешанные задачи теории упругости". - Харьков, 1984.

3. Автономова Л.В., Хавин В.Л., Литвиненко Ю.А. Исследование распределения тока и температуры контактного соединения винтовой обмотки стелларатора. Тезисы докладов Пятой Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1990, 356с. - С.70.

4. Автономова Л.В., Ингульцов С.В., Окороков А.С., Хавин В.Л., Литвиненко Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния разъемной винтовой обмотки стелларатора. Тезисы докладов Четвертой Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1987, 344с. - С.131.

5. Автономова Л.В., Дрозд Л.А., Хавин В.Л. Концентрация напряжений в ступенчатых контактных соединениях силовых шин. Тезисы докладов IV Всесоюз. конф. "Смешанные задачи механики де-

формируемого тела". - Одесса, 1989.

6. Автономова Л.В., Хавин В.Л. Термонапряженное состояние разъема стелларатора при протекании больших токов. - Динамика и прочность машин: Респ. междувед. научн.техн. сб. - Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1993. - Вып.53.

7. Автономова Л.В. Изнашивание при фреттинге силовых контактов. Тезисы докладов на научно-технической конф. "Качество и надежность узлов трения". - Хмельницкий, 1992.

8. Автономова Л.В. Вибрационное проскальзывание в замкнутых силовых контактах. Тезисы докл. семинара "Электрические контакты и электроды. Материалы. Физические процессы". - Киев-Одесса, 1990.

9. Автономова Л.В. и др. Разъемное контактное соединение винтовой обмотки стелларатора. Тезисы докл. семинара "Электрические контакты и электроды. Материалы. Физические процессы". - Киев-Одесса, 1990.

10. Авторское свидетельство СССР. Контактное соединение плоских шин / ХПИ, Автономова Л.В., Литвиненко Ю.А., Хавин В.Л. N 1379837, М.кл. <sup>4</sup> H01R 4/58, A1, N, 1987г.

11. Авторское свидетельство СССР. Контактное соединение для силовых цепей / ХПИ, Автономова Л.В., Литвиненко Ю.А., Сергеев Ю.Ф., Хавин В.Л. N 1686541, М.кл. <sup>4</sup> H01R 4/58, A1, N, 1991г.

12. Щеглов В.И., Автономова Л.В., Хавин В.Л. Определение перемещений вызванных несимметричным воздействием в кольцевой области. - Динамика и прочность машин: Респ. междувед. научн.техн. сб. - Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. - Вып. с.41-43.

*Автономова*

Схема механического нагружения узла рамы  
установки У-2М

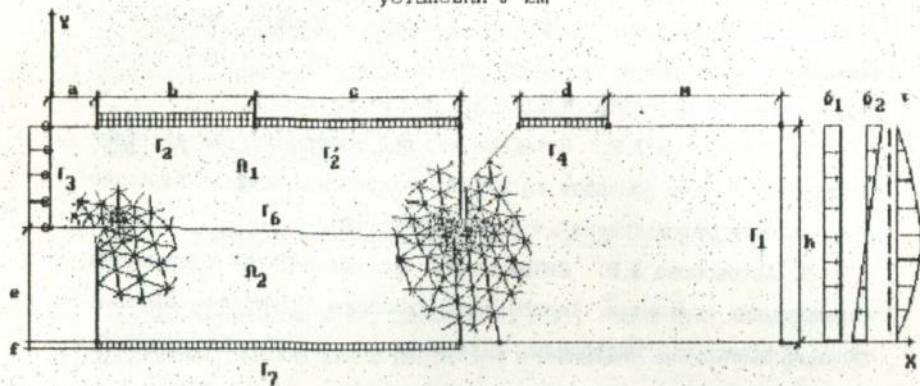


Рис. 1

Распределение  $\bar{D}_{\text{К}}$  на контактной поверхности для однородного  
и неоднородного распределения контактных сопротивлений

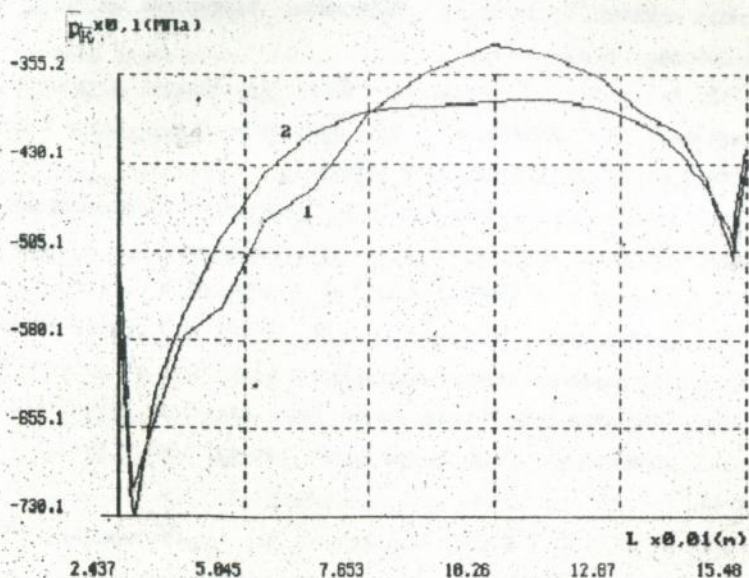


Рис. 2

Расчетная схема гнездового сильноточного гажима

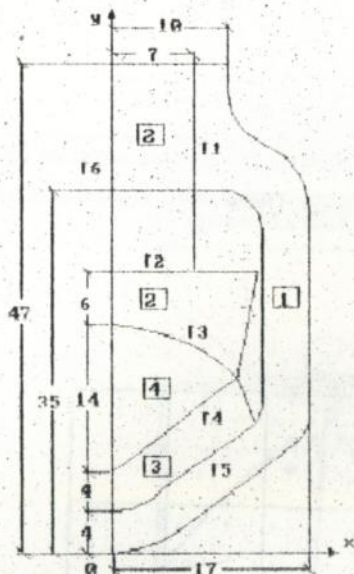


Рис. 3

Зависимость прижимного усилия на контактной поверхности  
гнездового гажима  $\Gamma_2$  от температуры нагрева

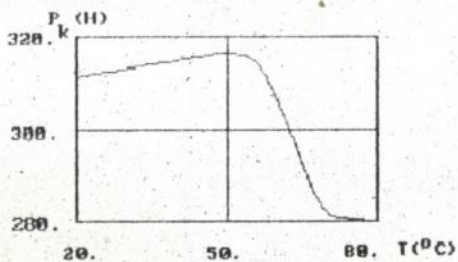


Рис. 4

Зависимость максимального момента затяжки от нагрева, обеспечивающего работу гнездового зажима в зоне упругости

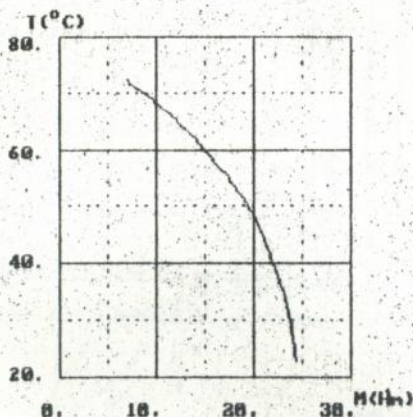


Рис. 6

Распределение изолиний  $\sigma_1$  в районе установки У-2М  
в процессе эксплуатации

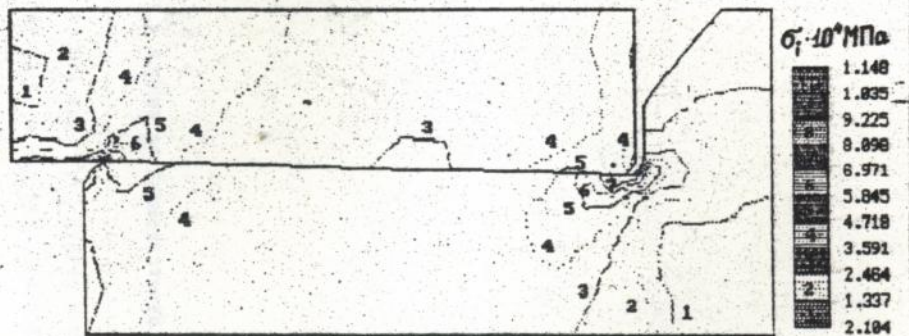


Рис. 6

Ответственный за выпуск к.т.н., доц. Киркач Б.Н.

---

Подписано к печати "11" мая 1993 г. Формат 60x84 1/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100. Зак. № 454 Бесплатно.

---

Харьковское арендное Межвузовское полиграфическое предприятие  
Украина, 310093, Харьков, ул. Свердлова 115

SP 1357

177025

AB 27.442