

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «СТАНКИН»

На правах рукописи

Корзаков Александр Анатольевич

**ДИСКРЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ
СТЫКУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальности: 05.13.06 - Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (технические системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2005г.

Работа выполнена в Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН»

Научный руководитель	- кандидат технических наук, профессор Ю.Ж. Гуревич
Научный консультант	- доктор технических наук, профессор М.Г. Косов
Официальные оппоненты	- доктор технических наук, профессор Н.М. Султан-заде - кандидат технических наук, доцент А.Х. Алешин
Ведущее предприятие	- ОАО «АвтоВАЗ», г. Тольятти

Защита состоится « ___ » _____ 2005г в _____ часов на заседании диссертационного совета К212.142.01 при Московском Государственном Технологическом Университете «СТАНКИН» по адресу: 127055, Москва, Вадковский пер., 3-а.

Отзыв о работе, заверенный печатью, в 2-х экземплярах, просьба направлять по указанному адресу в специализированный совет К212.142.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ «Станкин»

Автореферат разослан « ___ » _____ 2005г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент.

И.М. Тарарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современном машиностроительном производстве первостепенное значение приобретает проблема точности, надежности и конкурентоспособности выпускаемых изделий в связи с увеличением их быстроходности, мощности и производительности. Улучшение вышеперечисленных показателей в основном определяется точностью изготовления отдельных деталей и узлов, что в свою очередь зависит от точности технологического оборудования.

В настоящее время при проектировании машин контакт поверхностных слоев для макро отклонений моделируется взаимодействием различных геометрических примитивов: граничных и конечных элементов. Для описания волнистости и шероховатости, приближенных к реальным поверхностям, контакт моделируется стержневыми, треугольными, сферическими и параболоидными геометрическими примитивами.

В настоящее время при моделировании жесткости шероховатых поверхностей в работах Косова М.Г. предложен профиль шероховатости, приближенный к реальному. Однако в указанных работах жесткость контактируемых слоев определяется под действием силы, направленной нормально к поверхности стыка. При таком подходе к описанию модели не учитывают влияние тангенциальных сил на жесткость стыкуемых поверхностей, поэтому оценка жесткости стыкуемых поверхностей под действием всего комплекса сил требует разработки дополнительных математических и программных средств. В этом состоит актуальность работы.

Цель работы. Повышение качества и сокращение сроков проектирования технологического оборудования на основе построения дискретной модели жесткости стыкуемых поверхностей при автоматизированной оценке точности технологического оборудования.

Научная новизна. В результате проведенного исследования и анализа физической природы контакта деталей, с учетом шероховатости их поверхностей, разработана дискретная модель взаимодействия поверхностей деталей для оценки точности технологического оборудования состоящая в том, что контактирующие шероховатые поверхности представляются максимально приближенными к реальным, а усилия, действующие на стыкуемые детали, характеризуются не только нормальными составляющими, но и тангенциальными.

На защиту выносятся:

1. Методика аналитического решения контактных задач, описывающих реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей,

2. Конечно-элементная математическая модель шероховатой поверхности, учитывающая действия как нормальных, так и тангенциальных сил,
3. Информационное, алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее моделировать и рассчитывать реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей.

Методы исследования:

Теоретические исследования проводились на базе основных положений теории упругости, технологии машиностроения, метода конечных элементов, имитационного моделирования, машинных экспериментов.

Практическая ценность:

Методика, алгоритмы и программное обеспечение под операционные системы MS DOS и MS WINDOWS, расчета контактной жесткости деталей с учетом реального процесса взаимодействия шероховатых поверхностей при действии как нормальных, так и тангенциальных сил.

Реализация работы:

Результаты работы были использованы в учебном процессе на кафедре «Основы конструирования машин» МГТУ «Станкин».

Апробация работы:

Основные положения и результаты работы докладывались на семинарах кафедр «Теория технологических машин», «Основы конструирования машин» МГТУ «Станкин», VII научная конференция проводимая учебно-научным центром математического моделирования МГТУ «СТАНКИН» - ИММ РАН, Москва 2004г.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и приложений на 183 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 103 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы и обосновывается ее актуальность.

В первой главе проводится аналитический обзор научных трудов, посвященных современному состоянию моделирования точности технологического оборудования. Вопросам точности технологического оборудования посвящено значительное количество работ Балакшина Б.С., Базрова Б.М., Колесо-

ва И.М., Султан-Заде Н.М., Митрофанова В.Г., Корчака С.Н., Худобина Л.В. Ими разработаны основные положения точностного анализа технологического оборудования.

В точностном анализе технологического оборудования можно выделить два направления: 1) Исследование точности с учетом макроотклонения детали и их жесткости, 2) Оценка точности технологического оборудования связанная с поведением поверхностных слоев контактирующих деталей. Во втором направлении разработаны такими учеными как Крагельский И.В., Овсенко А.Н., Рыжев Э.В., Суслов А.Г., Михин Н.М., Сердобинцев Ю.П. вопросы контактирования деталей с учетом жесткости контактируемого слоя.

Анализ точности с учетом жесткости поверхностных слоев проводили различные авторы. Анализ показал, что в основном используются модели поверхностного слоя различными примитивами (сечения правильных геометрических тел, таких как сфера, конус, цилиндр, сечения параболоида и эллипсоида)

Также большой вклад внесли в это направление ученые: Демкин Н.Б., Левина З.М., Решетов Д.Н., Косов М.Г., Верховский А.Я., Боуден Ф.П., Журавлев В.А., Дьяченко П.Е., Тихомиров В.П., Горленко О.А., Соколовский А.П. и др.

Таким образом, преследуя цель повысить качество проектирования технологического оборудования, необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику аналитического решения контактных задач описывающих реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей,
- разработать алгоритмическое и программное обеспечение позволяющее моделировать и рассчитывать реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей.

Учитывая вероятностную природу шероховатости необходимо решать контактную задачу как имитационную. Сложность поставленной задачи позволяет ограничиться рассмотрением и решением плоской контактной задачи.

Во второй главе рассматриваются вопросы постановки имитационной контактной задачи (ИКЗ) и концепции дискретной модели точности (КДМТ), производится вывод основных соотношений теории упругости с учетом моделирования контакта в стыке.

Постановка ИКЗ осуществляется следующим образом:

- Рассматривается взаимодействие упругих тел T_1, T_2, \dots, T_k .
- Тела соприкасаются между собой по некоторым областям $\{D_{ij}\}$ ($i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, M$, где N – число участков на одном стыке, M – число стыков)

- Величина области $\{D_{ij}\}$ не задана заранее и подлежит определению.
- Подлежат определению законы распределения нормальных $\{N\}$ и касательных $\{N^T\}$ контактных давлений, действующих на каждой области.
- Контуры границ тел до деформации заданы с учетом отклонения их формы, положения и состояния рельефа.
- Задан главный вектор $\{F\}$ и главный момент $\{M\}$, прижимающие тела T_1, T_2, \dots, T_k к друг другу.

Математическая модель дискретной модели точности строится на основе схемы взаимодействия конечных элементов. Это взаимодействие рассматривается как совокупность воздействий каждого из элементов на все остальные.

Концепция дискретной модели точности, разработанная на основе объемных и граничных элементов, строится следующим образом (рис.1): 1) Описание геометрической формы исследуемой детали множеством $\{\Phi\}$ фиксированных узлов, 2) Описание деталей в виде совокупности тел T_1, T_2, \dots, T_k , 3) Описание геометрической формы исследуемых поверхностей подмножество $\{\Phi^*_S\}$, 4) Замена идеального L_1, L_2 контактирующего контура на реальный S_1, S_2 контактирующий контур, для чего выделяется подмножество $\{\Phi_S\}$ поверхностных узлов, 5) Описание узлов контактирующих тел имеющих заранее заданные перемещения подмножеством $\{\Phi_\Phi\}$ фиксированных узлов, 6) Соединение воображаемыми линиями узлов образующих множества $\{\Phi\}$, $\{\Phi^*_S\}$, $\{\Phi_S\}$, 7) Аппроксимация непрерывных величин, 8) Связывание между собой конечных элементов, в заранее заданных узлах, 9) Определяется действующих на контактирующие тела система сил $\{Q\}$, температурные факторы $\{t\}$, характер распределения зазоров $\{\Delta\}$ в стыках, 10) Вводится множество $\{\Phi_C\}$ стержневых конечных элементов для жесткой фиксации узлов модели, 11) Выбирается принцип, на основе которого строится схема сопряжения элементов конструкции, после нахождения значений векторов $\{U\}$, $\{N\}$, $\{D\}$, $\{\delta_S\}$ можно считать задачу решенной, 12) Аппроксимация отклонений $\{\delta_S\}$ по методу наименьших квадратов.

При выводе выражений для определения перемещений контактирующих узлов (рис.2) принималось во внимание, что при приложении внешней нагрузки точки m и n соприкасаются:

$$\delta_m - \delta_n = \Delta_{mn}, \quad (1)$$

где δ_m и δ_n – контактные и изгибные перемещения точек m и n , Δ_{mn} – расстояние между точками m и n по нормали к поверхности S_m ,

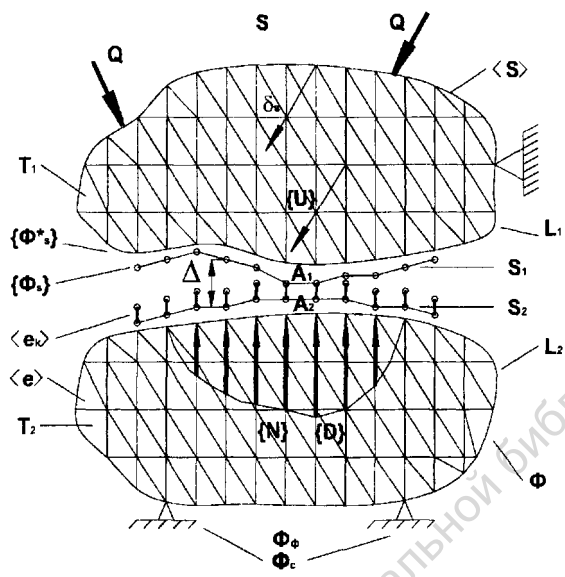


Рис. 1. Два упругих тела

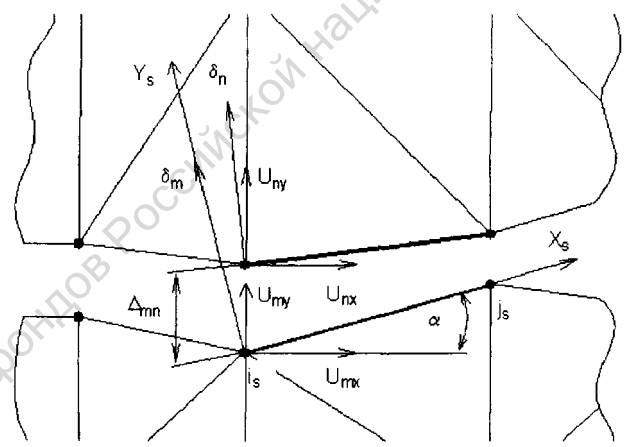


Рис. 2. К определению перемещений контактирующих узлов

При $\Delta_{mn} > 0$ - имеет место зазор, а при $\Delta_{mn} < 0$ - имеет место натяг.

Выражение для определения зазора (натяга) при δ_{mx} и δ_{nx} равных нулю, при учете матрицы преобразования от глобальной XOY системы координат к локальной X_sOY_s системе координат:

$$\delta_m - \delta_n = -\sin\alpha \cdot U_{mx} + \cos\alpha \cdot U_{my} - (-\sin\alpha \cdot U_{nx} + \cos\alpha \cdot U_{ny}) = \Delta_{mn}$$

$$\Delta_{mn} = -\sin\alpha \cdot U_{mx} + \cos\alpha \cdot U_{ny} + \sin\alpha \cdot U_{nx} - \cos\alpha \cdot U_{ny} \quad (2)$$

В матричном виде после перехода к глобальным номерам Δ_{mn} запишется:

$$[-\sin\alpha + \cos\alpha + \sin\alpha - \cos\alpha] \{U_{2m-1} \ U_{2m} \ U_{2n-1} \ U_{2n}\}^T = \Delta_{mn} \quad (3)$$

При выводе выражений для определения контактных нагрузок (рис.3) учитывалась связь между составляющими P_{mx} , P_{my} , P_{nx} , P_{ny} контактных нагрузок при переходе от глобальной XOY к локальной X_sOY_s системе координат;

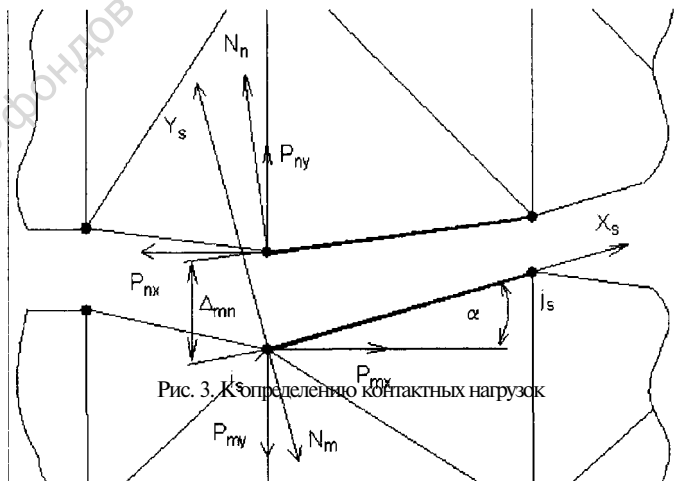
$$\begin{Bmatrix} N_{nx} \\ N_{ny} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{nx} \\ P_{ny} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} N_{mx} \\ -N_{my} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{mx} \\ P_{my} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

После преобразования выражения для определения контактных нагрузок:

$$[K^{(e)}] \begin{Bmatrix} U_{mx} \\ U_{my} \\ U_{nx} \\ U_{ny} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{mx} \\ P_{my} \\ P_{nx} \\ P_{ny} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -N_m \\ 0 \\ N_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

В матричном виде после перехода к глобальным номерам выражений для определения контактных нагрузок запишется:

$$-(P_{2n-1} \ P_{2n} \ P_{2m-1} \ P_{2m})^T = N[-\sin\alpha \ \cos\alpha \ \sin\alpha \ -\cos\alpha]^T \quad (6)$$



Решение контактной задачи методом конечных элементов осуществляется следующим образом: 1) К неизвестным узловым перемещениям добавляются дополнительные неизвестные - контактные силы, 2) К системе необходимо добавить столько уравнений совместности перемещений, сколько находится в контакте узлов первого тела. Тогда систему уравнений равновесия для всего соединения можно записать в виде:

$$[G]\{\delta\}=\{F\}, \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} [G] & 0 & [P_1] \\ 0 & [G_2] & [P_2] \\ [A_1] & [A_2] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{D_1\} \\ \{D_2\} \\ \{N\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \\ \{D_{mn}\} \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где $[G]$ - матрица жесткости, $\{\delta\}$ -- матрица перемещений узловых точек, $\{F\}$ - матрица внешних сил, $[A]$ - матрица порядка $[i, j]$, определяющаяся выражением 3, $[P]$ - матрица порядка $[j, i]$, определяющаяся выражением 6, $\{A^*\}$ - матрица порядка $[i]$ неизвестных контактных сил, $\{\Delta_{mn}\}$ матрица порядка $[g]$ зазоров или натягов соответственно, i - число пар узлов обоих тел, находящихся в контакте, j -- число неизвестных узловых перемещений.

При решении задачи используется метод приращения нагрузок.

В третьей главе проводится верификация программного комплекса КЕМКАА, для чего рассматривается упругая полуплоскость, нагруженная сосредоточенной силой, перпендикулярной к границе (задача Фламана) (рис.4). Проводится сравнение функциональных возможностей разработанного программного комплекса КЕМКАА с программным комплексом БАЗИС. Для задачи Фламана сравниваются результаты расчета, полученные аналитическим методом с результатами машинного эксперимента.

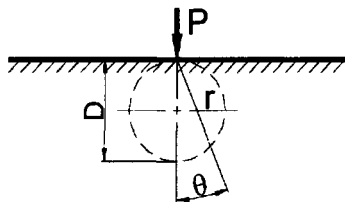


Рис. 4. К задаче Фламана: схема нагружения

8. Частное решение общей задачи Фламана (mm):

$$D=40(\text{mm}), r=40\cos 45^\circ=28,2843(\text{mm}), h=20(\text{mm}), P=1000(\text{H})$$

$$u = -\frac{2(1-\nu^2)P}{\pi E} \left[\ln \frac{r}{h} \cos \theta + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \theta \sin \theta \right] =$$

$$-\frac{2(1-0,3^2)2000}{3,14 \cdot 200000} \left[\ln \frac{28,2843}{20} \cos 45 + \frac{1-2 \cdot 0,3}{2(1-0,3)} \frac{3,14}{4} \sin 45 \right] = -0,00234$$

$$v = \frac{2(1-\nu^2)P}{\pi E} \left[\left(\ln \frac{r}{h} + \frac{1}{2(1-\nu)} \right) \sin \theta - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \theta \cos \theta \right] =$$

$$\frac{2(1-0,3^2)2000}{3,14 \cdot 200000} \left[\left(\ln \frac{28,2843}{20} + \frac{1}{2(1-0,3)} \right) \sin 45 - \frac{1-2 \cdot 0,3}{2(1-0,3)} \frac{3,14}{4} \cos 45 \right] = 0,00343$$

КЕМКАА написан на языке C++ и предназначен для решение 2D задачи теории упругости с использованием МКЭ (рис.5а). Входная информация для системы подготавливается в виде конечно-элементной модели. Самостоятельные программные модули: mke2.exe, mkegraph.exe, mkehelp.exe, mketrans.exe. Для решения задачи программа составляет систему линейных уравнений, неизвестными в которых являются перемещения в узлах модели.

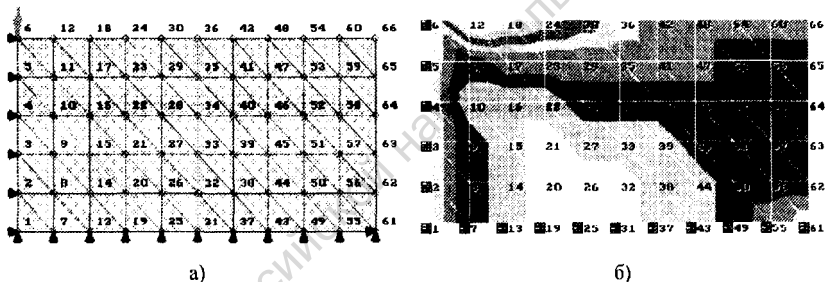


Рис. 5. а) Визуализация модели в КЕМКАА,
б) Результаты расчета модели в BASYS-изолинии V_x

BASYS предназначен для решения 2D и 3D задачи теории упругости с использованием МКЭ (рис.5б). Входная информация для системы: конечно-элементная модель, макро модель. Самостоятельные программные модули БАЗИС: 1) Преппроцессор и диагностика создают следующие файлы: <имя модели>.baw, baa, bar, bad. 2) При расчете модели на статику создаются следующие файлы: <имя модели>.bap, bam, bag, bar. 3. Для графической проверки модели и анализа результатов расчета служит графические пре- и постпроцессоры BPP, FLY.

Результаты расчета модели выполненные с использованием программных расчетных комплексов КЕМКАА и BASYS идентичны. Погрешность расчетов модели не превышает 15% от теоретических.

В четвертой главе проводится верификация программного комплекса КЕМКАА для решения контактной задачи, для чего рассматриваются две задачи: задача о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором и задача о плоской деформации двух соприкасающихся цилиндров с параллельными осями. Рассматриваются функциональные возможности измененного под решение контактной задачи программного комплекса КЕМКАА (рис.6). Сравниваются результаты расчета, полученные аналитическим методом с результатами машинного эксперимента.



Рис.6. Блок-схема вычислительного процесса контактной задачи

КЕМКАА (Контактная задача) написан на языке С++ и предназначен для решения 2D задачи теории упругости с использованием МКЭ. Входная информация для системы подготавливается в виде конечно-элементной модели. Самостоятельные программные модули: kemkaa.exe, kont3.exe, konthelp.exe, mkegraph.exe, mketrans.exe. Для решения задачи программа составляет систему линейных уравнений, неизвестными в которых являются перемещения в узлах модели, контактные реакции в узлах области контакта и область их распределения. Программа имеет ряд преимуществ: полнофункциональное WINDOWS приложение, удобный интерфейс пользователя, удобный ввод исходных данных, возможность графического отображения полученных результатов.

9. Частное решение общей задачи о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором:	
$\Delta = 0,1(\text{мм})$ $q = 2000(\text{Н})$ $\varphi_0 = 20^\circ = 0,3489(\text{рад})$ $d = 60(\text{мм})$	$c_{\max} = c_{\text{ср}} \frac{2(1 - \cos j_0)}{j_0 - \sin j_0 \cos j_0}, \quad c_{\text{ср}} = \frac{q}{d}$ $P_{\max} = \frac{2000}{60} \frac{2(1 - 0,9397)}{0,3491 - 0,3421 - 0,9397} = 33,33 \cdot 4,37 \cdot 10 = 1450(\text{Н})$

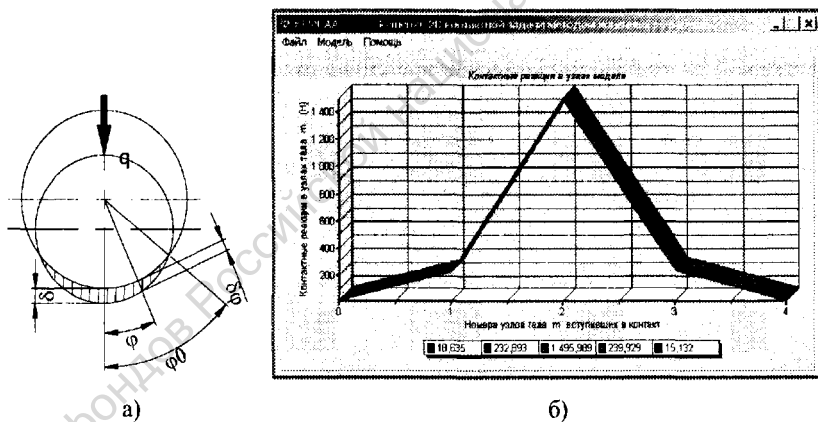


Рис. 7. К задаче о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором: а) схема нагружения, б) результаты расчета

Результаты полученные расчетом модели с использованием программного расчетного комплекса КЕМКАА приведены на рис. 7, Погрешность расчетов не превышает 5% от теоретических.

Для задачи о плоской деформации двух соприкасающихся цилиндров с параллельными осями, проводились аналогичные задаче о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором эксперименты, в результате ко-

торых погрешность полученных результатов расчета удельных давлений на площадке контакта не превышает 15% от теоретических.

В пятой главе рассматривается моделирование контактной жесткости с учетом рельефа неровности поверхности, а так же проводится моделирование микрошероховатости и волнистости. При помощи разработанного программного комплекса PROFIL предлагается алгоритм моделирования случайного профиля поверхности. Результаты расчета моделей показывают рост площадки контакта от добавления к нормальной нагрузке тангенциальной составляющей.

В известных работах при определении областей контакта фактических профилей рассматривается взаимодействие единичных идеализированных выступов, представляемых в виде цилиндрических, конических, кубических, полусферических, эллиптических и т.д. сегментов, используются также пилообразные и синусоидальные неровности благодаря простоте их математического списания. Форма идеализированных сегментов может уточняться введением распределения как по высоте, так и по шагу. Затем вероятностными методами с учетом геометрических параметров рельефа полученные зависимости распространяются на всю исследуемую область. При этом взаимное влияние напряженно-деформированного состояния сегментов, смежных с рассматриваемыми, **современные схемы контакта микрорельефа не учитываются.** Последнее обстоятельство особенно важно принимать во внимание, когда на тела действуют не только нормальные, но и касательные нагрузки.

Модель расчета контактной жесткости микрорельефа, учитывающая отмеченные особенности, может быть построена путем сведения задачи контакта микрорельефа к схеме общей упруго-пластической контактной задачи между телами, микроструктура и волнистость рельефа которых носит случайный характер. Сведения контакта микрорельефа к схеме имитационной контактной задачи позволяет уточнить значение целого ряда факторов, таких как область контакта, закон распределения контактных давлений по выступам, концентрация напряжений у ножки микровыступа, деформационная составляющая коэффициента трения и т.д. для произвольной нагрузки. Такая схема позволяет объяснить эффект увеличения области контакта при действии на стык боковой нагрузки. Известно, что при действии нормальной силы возникает площадь контакта, представляющая одну круговую область, При приложении постепенно увеличивающейся тангенциальной нагрузки до появления полного скольжения, оказывается, что площадь контакта увеличивается в три-четыре раза до начала скольжения. Это можно объяснить тем, что при действии тангенциальной силы вследствие упругих тангенциальных перемещений выбираются зазоры между

боковыми сторонами микро выступов. Таким образом вступают в соприкосновение дополнительно новые выступы.

Рассмотрим последовательность расчета взаимодействия двух соприкасающихся поверхностей. Предположим, что поверхности S_1 и S_2 тел T_1 и T_2 удалены одна от другой на некоторое расстояние и между ними нет контакта (рис.8). Реальную форму поверхностей S_1 и S_2 и площади (потому как рассматривается двумерная область) тел T_1 и T_2 аппроксимируем множествами одномерных конечных элементов n_i, n_{i+1} и m_i, m_{i+1} и двумерных конечных элементов $a_i b_i c_i$ и $d_i e_i f_i$, принадлежащих телам T_1 и T_2 соответственно.

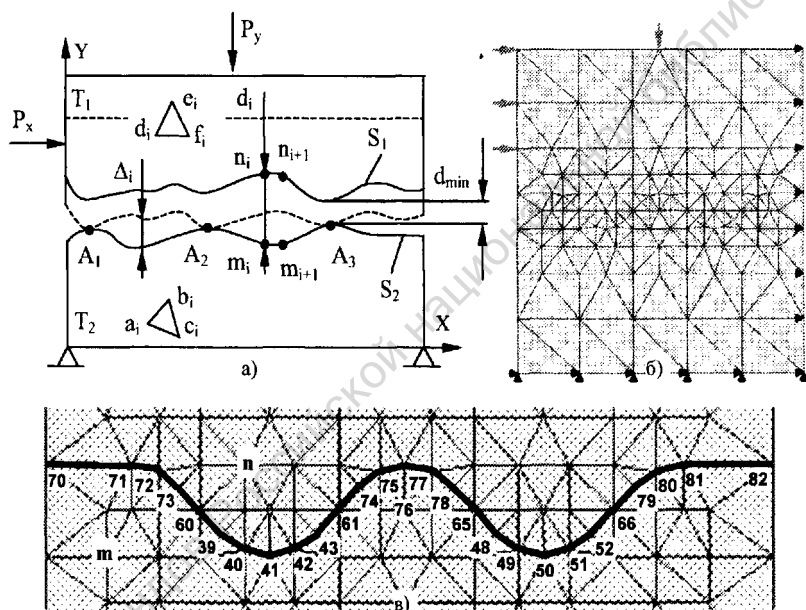


Рис. 8. а) Схема расчета, б) КЭМ модель расчетной схемы, в) КЭМ модель схемы профиля

Связь между телами целесообразно описывать, используя кинематические условия контакта или стержни. После приложения сжимающей нагрузки возникает упруго пластическая деформация тел, и контакт распространяется на некоторые области вдоль поверхностей S_1 и S_2 . Области контакта и упругопластические перемещения узлов определяют методом конечных элементов. Для определения границ областей используют условия: $N_{ri} > 0$ - узел внутри области, $N_{ri} = 0$ - узел на границе или вне области, где N_{ri} - результирующая сил N_{xi} и N_{yi} на /-ом узле.

С помощью предложенной модели хорошо виден эффект роста площади контакта соединения (рис. 9), схема профиля которых описана синусоидальной функцией, подтверждающего увеличение площади контакта при действии сдвигающей силы P_x . При отсутствии боковой силы P_x площадь контакта минимальна, однако, если приложить силу, постепенно увеличивая ее до появления скольжения, то площадь контакта начинает расти. При этом, области контакта перераспределяются и могут возникнуть новые вследствие дополнительной выборки зазоров при деформации на отдельных участках, чем и объясняется эффект роста площади соединения.

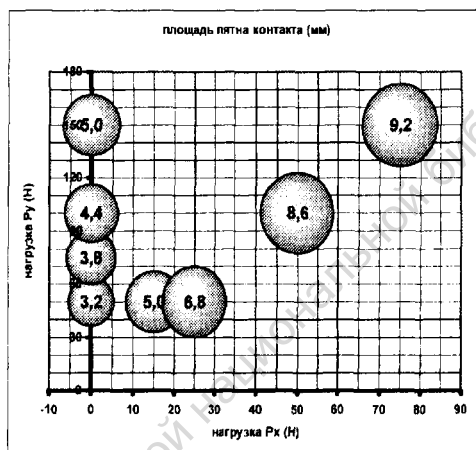


Рис. 9. Пятна контакта

Стремление упростить решение задачи реального взаимодействия контактирующих поверхностей деталей и узлов приводит к представлению схемы контакта соприкасающихся поверхностей моделями различных типов: 1) Модель основывается на использовании единого конечно-элементного представления микро и макро структуры, 2) Модель использует представление, предложенное И.Я. Штаерманом, при котором собственные деформации тел, определяемые макроструктурой, описываются МКЭ, что позволяет уменьшить порядок разрешающей системы уравнений, 3) Модель в которой собственная деформация реальных тел приравнивается к деформации идеальных тел, параметры которых определяются номинальными размерами, а влияние макрорельефа учитывается односторонними упругими связями, между которыми устанавливаются зазоры, определяемые микрогеометрией и волнистостью.

Наиболее простая модель волнистости представленная И.В. Дунин-Барковский, приведена на рис.10. На основе анализа профилограмм и по аналогии с представлением микрошероховатости принимается модель волнистости в виде суммы периодической и случайной составляющих (в системе координат $X\alpha OY\omega$)

$$y_{\omega} = -A_{\omega}(1 - \cos(\omega_0 x + \psi_{\omega})) + x_{\gamma_{\omega}}(x), \quad (10)$$

где y_{ω} - высота неровностей волнистости, ψ_{ω} - фаза процесса волнистости, представляющая равномерно распределенную величину на отрезке $[0, 2\pi]$, A_{ω} - детерминированная амплитуда процесса, $x_{\gamma_{\omega}}(x)$ - нормальный эргодический процесс с равным нулю средним. Дисперсия этого процесса находится приближенно по правилу «трех сигм».

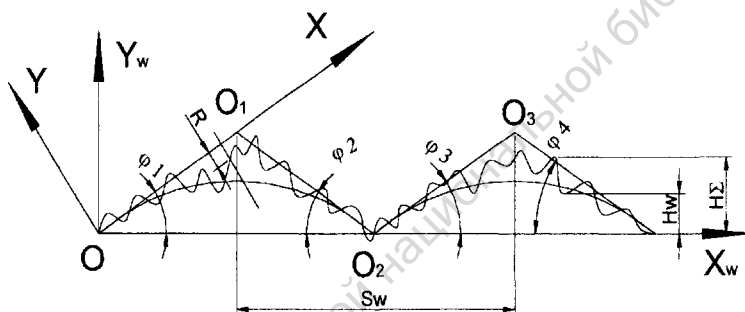


Рис. 10. Моделирование волнистости

Для моделирования случайного профиля поверхности разработан на языке C++ программный комплекс PROFIL (рис.11). С помощью двух стандартных функций языка C++ определяется случайное расположение точек описывающих профиль. Функция srand() задает случайное число, которое функция rand() использует для генерации последовательности квазислучайных чисел.

Предложенную ранее модель двух соприкасающихся технических поверхностей объясняющую эффект роста площади соединения, за счет учета горизонтальной составляющей усилия можно легко распространить на диапазон волнистости и шероховатости (рис.12) уменьшением ее габаритных размеров до границ диапазона. Действительные размеры пятен контакта получаются умножением параметра R_a на число, показывающее размер пятна контакта на графике.

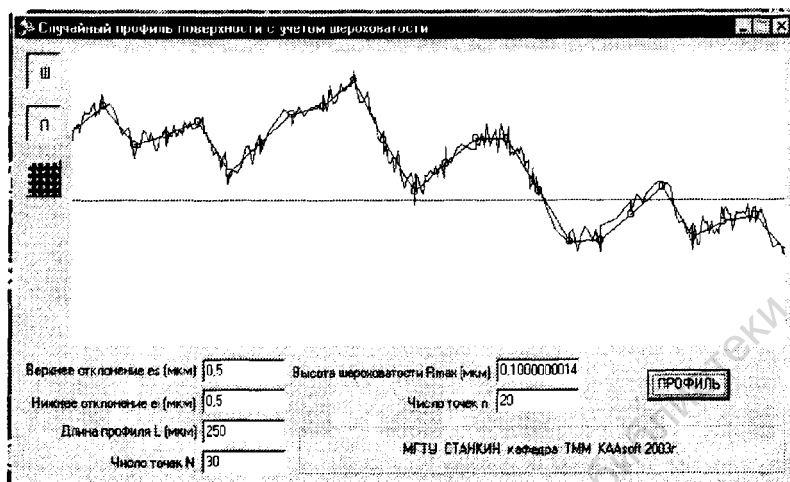


Рис. 11. Внешний вид приложения PROFIL (Вид механической обработки - притирка, высота волны $W_z = 0,75 \pm 2$ (мкм), среднее арифметическое отклонение профиля $Ra = 0,1 \div 3,2$ (мкм)

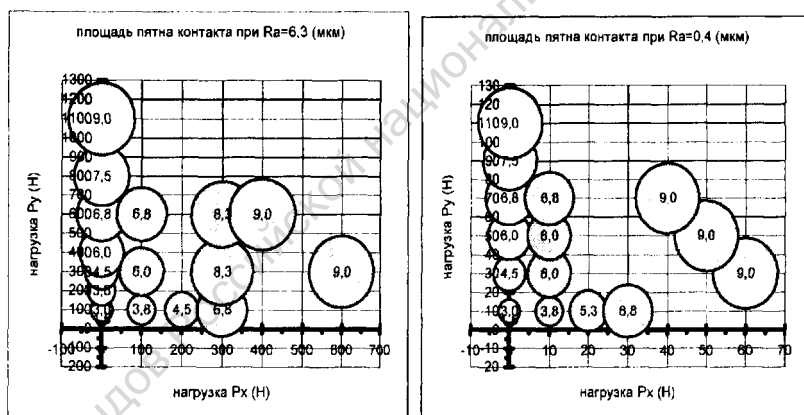


Рис. 12. Пятна контакта при $Ra = 6,3$ (мкм) и $Ra = 0,4$ (мкм)

Модель представленная на рис.8 не описывает случайный процесс контактирования двух технических поверхностей, поскольку все ее выступы и впадины совмещены. Под случайностью же, в данном случае понимается несовпадение выступов, описывающих шероховатый профиль контактирующих поверхностей (рис.13.). При переносе такой модели на диапазон волнистости и шероховатости так же виден процесс увеличения площади контакта за счет приложения тангенциальной силы (табл.1.) Действительные размеры пятен контакта получаются умножением параметра Ra на число, показывающее размер пятна контакта.

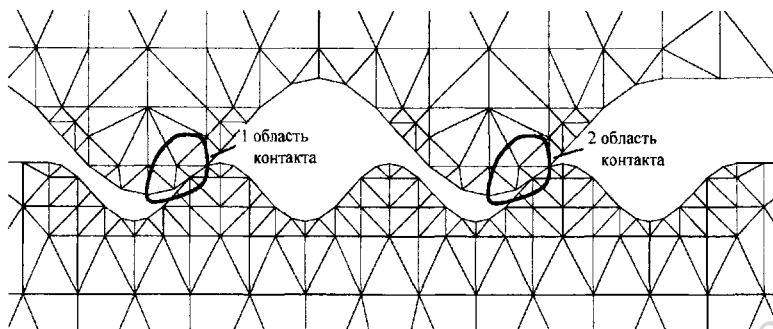


Рис. 13. Моделирование случайного процесса (область контакта).

Таблица 1

Пятна контакта при различных Ra и нагрузках:

Ra , (мкм)	Q_x , (Н)	Q_y , (Н)	кол-во точек в контакте	кол-во поверхностных элементов	Пятна контакта (относительные единицы)
0,025	5	10	8	6	38,8
	0,5	1	6	4	28,6
	0,05	0,1	4	2	14,4
0,4	500	1000	8	6	38,8
	50	100	7	5	33,7
	5	10	4	2	14,4
6,3	750	2000	8	6	38,8
	500	1000	7	5	33,7
	50	100	4	2	14,4

Анализ технической литературы (работы З.М. Левиной, Д.Н. Решетова, Э.В. Рыжева) показывает, что моделирование стыков деталей и узлов, как правило осуществляется стержневыми элементами, имеющими определенную жесткость. Недостатки такого подхода заключаются в необходимости определять при разработке расчетной модели каждого нового стыка количество стержневых элементов расчетной модели и жесткость каждого из них, а также порядок их расположения в пределах номинальной площади стыка. Для устранения перечисленных недостатков стык предлагается моделировать тонким слоем материала, имеющего упругие свойства, соответствующие реальному стыку. Такой подход означает переход от конечного числа стержней, моделирующих стык, к непрерывному их распределению.

Модель созданная по условиям задачи о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором решалась как контактная задача. Данную задачу возможно смоделировать без учета контакта между телами, где стык предла-

гается моделировать тонким слоем материала, имеющего упругие свойства, соответствующие реальному стыку. Расчет двумерной модели, в этом случае, проводится с использованием не модифицированного под контактную задачу МКЭ, а результат расчета модели можно проанализировать опираясь только на понятие о кинематических условиях контакта.

Для проверки данной гипотезы создана модель, аналогичную рассмотренной выше, но не использующую дополнительные данные характеризующие (описывающие) контакт между поверхностями. В зазор между «контактирующими» поверхностями монолитного тела, внедрялись дополнительные конечные элементы, характеризующие тонкий слой материала, имеющего упругие свойства, соответствующие реальному стыку. На рис.14 представлены три варианта расчета модели при разных значениях модуля упругости ($E=45000 \div 55000$ (Н/мм²·мм)) который подбирался из условия выполнения кинематических условий контакта. Из рис.14 видно, что созданная модель не противоречит высказанному предположению о возможности моделировать область контакта тонким слоем материала с упругими свойствами реального стыка.

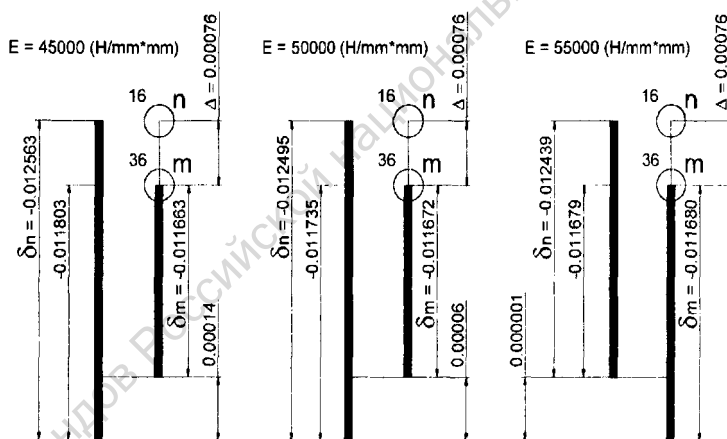


Рис. 14. Стык смоделирован тонким слоем материала.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ рассмотренных работ показал, что моделирование реальной поверхности с учетом шероховатости и волнистости осуществляется математически или телами правильной геометрической формы, такими как конус, сфера, эллипсоидами и т. д. Это означает, что моделирование поверхности осуществляется схемами не похожими своей геометрией на реальные поверхности.

2. Влияние шероховатости и волнистости на контактную жесткость стыкуемых поверхностей учитывается на основе представления шероховатости телами правильной геометрической формы. В работе М.Г. Косова по моделированию жесткости шероховатых поверхностей предложено рассматривать профиль шероховатости приближенный к реальному. Однако в указанной работе жесткость контактируемых слоев определяется под действием силы направленной нормально к поверхности стыка. При таком подходе к описанию модели не учитывают влияние тангенциальных сил на жесткость стыкуемых поверхностей.
3. Учитывая вероятностную природу шероховатости необходимо решать контактную задачу как имитационную. Сложность поставленной задачи позволило ограничиться рассмотрением и решением плоской контактной задачи.
4. Разработана методика аналитического решения контактных задач описывающих реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей. Сформулированы в матричном виде основные соотношения поставленной контактной задачи с учётом кинематических условий контакта. Для решения численной контактной задачи используется метод приращения нагрузок, по которому при каждой итерации отбрасываются связи в которых не выполняются кинематические условия контакта, а на основании отброшенных связей определяются новые связи между контактирующими точками.
5. В аналитическом виде рассмотрены задачи: о действии сосредоточенной силы на упругую полуплоскость (задача Фламана), о упругих перемещениях в цилиндрических соединениях с зазором, о двух соприкасающихся цилиндрах с параллельными осями. Для аналитического решения рассмотренных задач при заданных исходных данных получены числовые результаты.
6. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее моделировать и рассчитывать реальный процесс взаимодействия шероховатых поверхностей. С целью проверки адекватности полученных решений проведено сопоставление результатов полученных с помощью программного продукта КЕМКАА с данными, приводимыми в известных решениях. Погрешность решения составила $3\pm 15\%$.
7. Моделирование контактной жесткости с учетом рельефа неровности поверхности при совместном действии на контактирующие тела не только нормальных, но и касательных нагрузок показало эффект роста площади соединения. По этому рассматривать жесткость шероховатых поверхностей под действием только нормальной нагрузки не целесообразно.

8. Разработан алгоритм построения случайного профиля поверхности, учитывающий как волнистость так и шероховатость поверхности. Подробно рассмотрены функциональные возможности, перечень необходимых исходных данных и алгоритм построения случайного профиля поверхности при использовании разработанного программного комплекса PROFIL. Дано подробное описание ввода данных и вывода получаемых результатов, а так же подробно описаны процессы, происходящие во время расчета координат точек профиля.
9. Проведенные исследования подтвердили высказанное предположение о возможности моделирования стыка контактирующих деталей и узлов тонким слоем материала и показали преимущества по сравнению с классической дискретной моделью стыка.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. *Корзаков А.А. Косое М.Г.* Моделирование контактной жесткости деталей с учетом рельефа шероховатости их поверхности // СТИН. 2003г. №12. - С.23-26
2. *Корзаков А.А. Косое М.Г.* Контактная жесткость стыкуемых поверхностей с учетом реальной модели шероховатости поверхности // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Сборник научных трудов МГТУ «СТАНКИН». Выпуск 2. Том 1. -М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2003. -С. 16 23
3. *Корзаков А.А. Белякова М.С.* Сравнительный анализ методов расчета точности // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Сборник научных трудов МГТУ «СТАНКИН». Выпуск 2. Том 1. -М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2003. -С. 67-74
4. *Корзаков А.А. Белякова М.С.* Информационная модель пространственных размерных связей при автоматизированном проектировании технологических процессов // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Сборник научных трудов МГТУ «СТАНКИН». Выпуск 2. Том 1. -М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2003. -С. 64-67
5. *Корзаков А.А. Косое М.Г.* Моделирование контактной жесткости двух соприкасающихся тел // VII-я научная конференция МГТУ «СТАНКИН» и ИММ РАН. Сборник докладов. М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2004. -С. 174-177

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Корзаков Александр Анатольевич

**Дискретное моделирование жесткости
стыкуемых поверхностей при автоматизированной
оценке точности технологического оборудования**

Лицензия на издательскую деятельность ЛР №01741 от 11.05.2000

Подписано в печать 14.02.2005. Формат 60x90¹/₁₆

Уч.изд. л. 1,75. Тираж 80 экз. Заказ № 19

Отпечатано в Издательском Центре МГТУ «СТАНКИН»

103055, Москва, Вадковский пер., д.3а

05.12 - 05.13

я

Из фондов Российской национальной библиотеки

22 12 2015

279