

М449367

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
ордена Трудового Красного Знамени Высшее Техническое
Училище им. Н.Э.Баумана

НА АРМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи
Ильиных Виктор Анатольевич

УДК 621.88.086 - 422.3.001.2 (043.3)

РАСЧЕТ И ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С РАВНООСНЫМ КОНТУРОМ (НА ПРИМЕРЕ ТРЕХГРАННОГО СОЕДИНЕНИЯ)

Специальность 05.02.02 - Машиноведение и детали машин

А в т о р е ф е р а т

д и с с е р т а ц и и н а с о и с к а -
н и е у ч е н о й с т е п е н и
к а н д и д а т а т е х н и ч е с к и х
н а у к

МОСКВА - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени
станкоинструментальном институте

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Косов М.Г.

Официальные оппоненты:- доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник
Ушаков Б.Н.
- кандидат технических наук, доцент
Крахин О.И.

Ведущее предприятие - завод "Двигателей" КАМАЗ

Защита состоится " 7 " _____ 1987 г. в _____ часов на заседании специализирован-
ного Совета К.С. _____

Отзывы на _____ с гербовой
печатью органа _____
2-я Бауманская _____

С диссертацией _____

_____ 1987г.

М 449367

Ученый секрет
кандидат техн.
доцент

К.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1449367

Испытных В.А. Расчет и выбор

Актуальность темы. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года" перед машиностроением поставлена задача повышения качества надежности, экономичности и производительности, уменьшения шума и вибрации машин, оборудования и других изделий машиностроения.

Создание технологических конструкций деталей и узлов машин, обеспечивающих требуемые показатели качества при минимальной трудоемкости и себестоимости изготовления является одним из основных направлений современного машиностроения.

Надежная и долговечная работа машин и механизмов в значительной степени зависит от показателей качества соединений для передачи крутящего момента. К ним предъявляются высокие требования по сопротивлению усталости, крутильной жесткости, износостойкости и др.

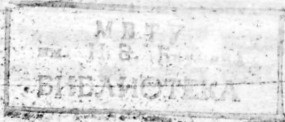
В ряде промышленных стран СССР, ФРГ, Венгрии и др. все более широкое применение находят профильные соединения с равноосным контуром ("РК" - профильные соединения), предназначенные для передачи крутящего момента. Эксплуатационные и точностные показатели данного вида соединений значительно превосходят показатели шлицевых соединений. Так например износостойкость и крутильная жесткость "РК" - профильных соединений в 1,8 - 2,4 раза и в 1,3 - 1,6 раза выше в сравнении со шлицевыми соединениями.

Анализ работ советских и зарубежных ученых показал, что трудоемкость и себестоимость изготовления "РК" - профильных соединений на 50-60% ниже, чем шлицевых соединений.

Однако широкое внедрение "РК" - профильных соединений сдерживается недостаточной изученностью эксплуатационных и точностных показателей, а также отсутствием теоретических расчетов контактной прочности и алгоритма выбора конструктивных параметров данного вида соединений, что важно на этапе их проектирования.

Вскрытие закономерностей изменения напряженного состояния стыков "РК" - профильных соединений при передаче внешней нагрузки, необходимо для выявления связи конструктивных параметров соединения с эксплуатационными и точностными показателями и обоснованного выбора перемычек.

В связи с этим обеспечение требуемых эксплуатационных и точностных показателей профильных соединений с равноосным контуром на



основе вскрытия закономерностей изменения напряженного состояния стыков и выбора конструктивных параметров является актуальной задачей.

Цель работы. Обеспечение требуемых показателей качества "РК"-профильных соединений (точности и контактной прочности) путем расчета и выбора конструктивных параметров (зазоров) на основе вскрытия закономерностей изменения напряженного состояния стыков.

Методы и средства исследования. В работе использованы методы теории упругости, теории случайных процессов и математического программирования. Экспериментальные исследования проведены на большой поляризационной установке (БПУ-ИМАШ-КБ-2) и испытательной машине УП-30М2. Для обработки результатов измерений применялись методы теории вероятностей, поверхности отклика.

Научная новизна. В работе получены следующие научные результаты:

- разработана модель контактного взаимодействия деталей "РК" - профильного соединения;
- разработана имитационная модель профиля вала с ранноосным контуром;
- установлен закон распределения величин контактных давлений во областях контакта;
- изучено влияние конструктивных параметров (зазоров, посадочной длины) и условий эксплуатации (схем нагружения) на напряженное состояние стыков и интенсивность изнашивания "РК" - профильных соединений.

Практическая ценность. На основании проведенных исследований создан методика расчета контактной прочности и алгоритм выбора конструктивных параметров "РК" - профильных соединений, позволяющие на стадии проектирования обеспечить требуемые показатели качества при минимальных затратах на изготовление.

Реализация результатов работы. Алгоритмы и программы, реализующие разработанную методику используются на ряде промышленных предприятий для расчета радиальных зазоров и выбора соответствующего типа посадки в "РК" - профильных соединениях.

Ожидаемый экономический эффект от их внедрения на Читинском станкостроительном заводе составит примерно 16 тыс.рублей в год.

Аттестация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на заседаниях кафедры "Основы конструирования машин" Московского станкоинструментального института в 1984-1985г.г., на заседании кафедры "Детали машин" Ленинградского политехнического института в 1985 году, на заседании кафедры "Детали машин" Московского

кого высшего технического училища им. Н.Э.Баумана в 1986 году.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано пять работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографического списка, включающего 101 наименование, пяти приложений. Объем работы составляет 110 машинописных страниц, включая 100 рисунков, 46 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, кратко сформулированы основные научные положения и результаты работы, вынесенные на защиту.

В первой главе произведен краткий обзор работ, посвященных изучению профильных соединений с равноосным контуром. Рассматриваются вопросы связанные с перспективами внедрения профильных соединений с равноосным контуром. Отмечаются преимущества данного вида соединений в сравнении с традиционными. Анализируются различные теоретические расчеты профильных соединений.

В основополагающих исследованиях, проведенных Рыковым Э.В., Индаковым Н.С., Чарико Д.В., Тимченко А.И., Боровичем Л.Б., и другими, заложены основы для расчета и исследования профильных соединений с равноосным контуром.

Исследования проведенные Рыковым Э.В., Индаковым Н.С. посвященные вопросам технологического обеспечения параметров качества поверхности деталей соединения, определяющих их эксплуатационные показатели, создали основу, на базе которой возможно дальнейшее исследование закономерностей изменения напряженного состояния стыков "РК" - профильных соединений под действием рабочих нагрузок.

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что недостаточно изучены вопросы изменения напряженного состояния стыков при передаче внешней нагрузки, отсутствует имитационная модель контактного взаимодействия деталей соединения, нет данных о функциональной зависимости величин зазоров в стыках соединения, нет алгоритма выбора конструктивных параметров "РК" - профильных соединений.

Решение отмеченных задач, позволит на этапе проектирования прогнозировать точность относительного положения, контактную прочность "РК" - профильных соединений, а следовательно это

долговечность.

Теоретические основы разработки модели контактного взаимодействия соединений типа вал-втулка с гарантированным зазором заложены в работах Герца Г., Беляева Н.М., Штаермана И.Я., Теплового М.И., Решетова Д.Н., Левиной Э.М., Цейтлина Н.И., Пинаска В.В. и в ряде работ других авторов.

Потребность в создании соединений, обладающих более высокими технико-экономическими показателями, обуславливает необходимость решения контактной задачи теории упругости с целью оценки напряженного состояния стыков профильного соединения с равноосным контуром.

Анализ состояния проблемы позволил сформулировать цели и задачи исследования, наиболее важными из которых являются следующие:

- оценить влияние зазоров и схем нагружения на напряженное состояние стыков "РК"-профильных соединений поляризационно-оптическим методом;
- разработать модель контактного взаимодействия деталей "РК" - профильного соединения;
- спроектировать и изготовить экспериментальный стенд, моделирующий условия эксплуатации соединения с целью последующей проверки разработанной модели на адекватность процессу контактного взаимодействия;
- оценить влияние зазоров и схем нагружения на износ "РК"-профильных соединений;
- разработать алгоритм выбора конструктивных параметров "РК" - профильных соединений.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию напряженного состояния стыков профильных соединений с равноосным контуром.

С целью изучения влияния зазоров и схем нагружения "РК" - профильных соединений на напряженное состояние стыков были проведены исследования поляризационно-оптическим методом. Были исследованы несколько моделей "РК" - профильного соединения с числом граней равным трем изготовленных с различными зазорами.

Для реализации различных схем нагружения было изготовлено специальное нагрузочное приспособление, с помощью которого были реализованы две схемы нагружения: соединение передает крутящий момент, соединение передает крутящий момент и радиальную

силу. Исследование проводилось при различных положениях соединения по направлению к линии действия радиальной силы.

В результате проведенных экспериментов была установлена закономерность изменения параметров контакта "РК" - профильных соединений, заключающаяся в несимметричном распределении величин контактных давлений по областям контакта.

Было установлено, что при передаче "РК" - профильным соединением комплексной нагрузки крутящего момента и радиальной силы под действием последней происходит существенное перераспределение контактных давлений в стыках.

Изучение относительного положения соединения относительно линии действия радиальной силы также показало, что с изменением положения происходит перераспределение контактных напряжений в стыках.

В случае передачи соединением крутящего момента и радиальной силы или только крутящего момента контакт взаимодействующих тел происходит по трем областям контакта (рис.1).

Проведенная качественная и количественная оценка напряженного состояния стыков "РК" - профильных соединений позволила правильно выбрать расчетную схему и на ее основе разработать модель контактного взаимодействия.

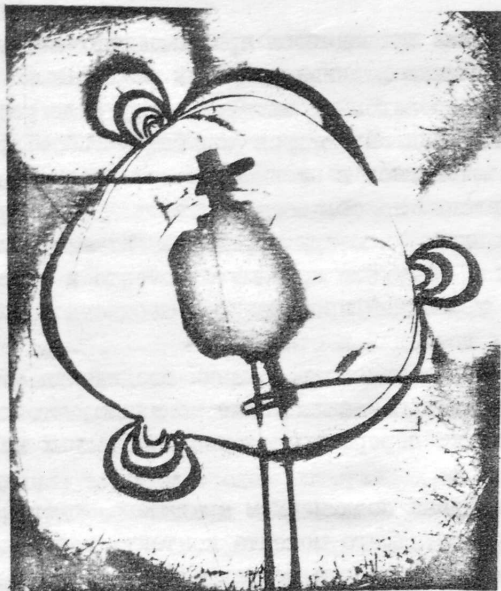
Третья глава посвящена разработке имитационной модели контактного взаимодействия деталей "РК" - профильного соединения.

Анализ работ, посвященных решению контактных задач теории упругости выявил отсутствие решений применительно к рассматриваемому типу соединений, особенностью которых является μ -связанное количество контактных областей.

Основываясь на предположении выдвинутом И.А.Штернманом, что в линейно-упругом контактном слое контактные перемещения пропорциональны нормальному давлению, при чем коэффициент пропорциональности является для данного материала величиной постоянной и используя интегральное уравнение Г.Д.Коваленко, полученное им при рассмотрении напряженного состояния цилиндрических тел в условиях нормальной и тангенциальной нагрузок была разработана модель контактного взаимодействия деталей "РК" - профильного соединения:

$$\sum_{i=1}^n R_i \cos(\alpha_i - \beta_i) h + \sum_{i=1}^n R_i \sin(\alpha_i - \beta_i) \rho \sin \alpha \cos \frac{h}{\rho} = M_{кр},$$

$$\sum_{i=1}^n R_i \cos \beta_i = P_n \sin \gamma,$$



$M_{кр.}; P_r=0$



$M_{кр.}; P_r>0$

Рис. I

$$\sum_{i=1}^n R_i \sin \beta_i = P_n \cos \gamma,$$

$$\delta_{1i} + \delta_{2i} + \varepsilon_{i,1,2} = f_i(\alpha, \gamma, \varphi), P_k(\varphi_{0,1,2}) = 0,$$

- где R_i — равнодействующая сила на поверхности контакта;
 h — плечо равнодействующей силы от действия нормальных нагрузок;
 ρ — радиус — вектор в точке контакта;
 β_i — угол, характеризующий направление равнодействующей силы на поверхности контакта;
 α_i — угол, характеризующий направление равнодействующей силы от действия нормальных нагрузок;
 γ — угол, характеризующий направление радиальной силы;
 n — количество контактных зон;
 $M_{кр}, P_k$ — внешняя нагрузка (крутящий момент и радиальная сила);
 $\delta_{1,2i}$ — упругие контактные перемещения точек, расположенных соответственно на наружной поверхности вала и от-
 верстия в ступице;
 $\varepsilon_{i,1,2}$ — случайная функция распределения величин зазоров в
 стыках;
 $f_i(\alpha, \gamma, \varphi)$ — функция сближения взаимодействующих поверхностей ва-
 ла и ступицы (рис.2).

Данные предложенной модели на ЭВМ, при варьировании величин зазоров и схем нагружения и положений, указывают на особенность взаимодействия поверхностей с равноосным контуром, которая заклю-
 чается в несимметричном распределении зазоров в стыках.

В ходе проведенных теоретических исследований установлена закономерность изменения параметров контакта от величины зазора в соединении при различных схемах нагружения. Так например, изме-
 нение величины зазора от 0,018 до 0,228 мм приводит к увеличению максимальных контактных напряжений на 41% при передаче крутящего
 момента 50 Н·м. Эпюра распределения контактных напряжений по об-
 ластью носит несимметричный характер (рис.3).

При теоретическом исследовании контактного взаимодействия в
 случае передачи крутящего момента и радиальной силы с учетом ее
 направления выявлены связи между областями контакта и установлен
 характер распределения напряжений по ним.

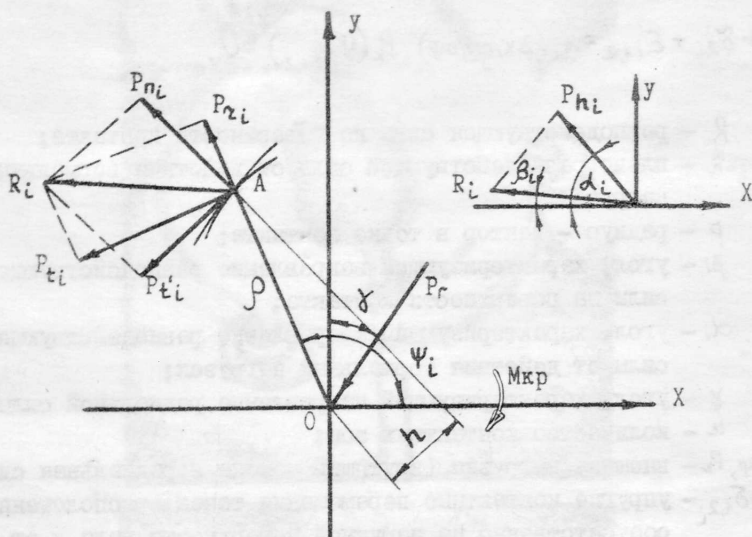


Рис. 2

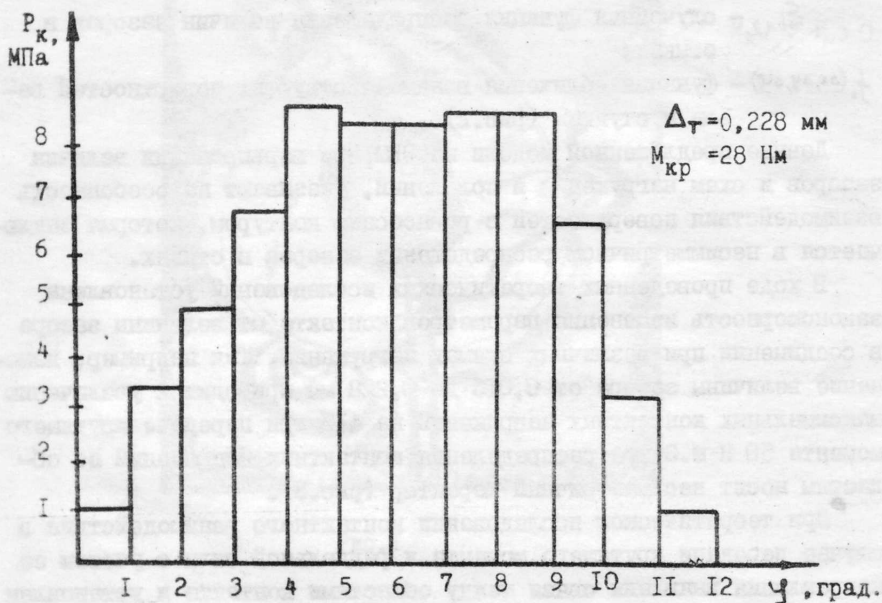


Рис. 3

При разработке имитационной модели "РК" - профильного вала, в рамках теории случайных процессов проанализированы три метода обработки "РК" - профильных валов: точение безвершинным резцом, шлифование прямым плоским кругом и шлифование торцем чашечного круга.

В результате были получены аналитические интервалы значений отклонений радиус-векторов точек кривой профиля вала. Математические ожидания и нормированные корреляционные функции аппроксимированные тригонометрическим рядом Фурье при числе гармоник равном шести дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Сравнение коэффициентов вариации показало, что при обработке поверхности вала прямым плоским кругом, кривая наиболее близка к теоретической, что позволяет взять его за предпочтительный из рассматриваемых.

На основе полученных данных была разработана имитационная модель профиля вала, позволяющая учитывать погрешности формы как результат действия систематических и случайных факторов и получить K - число реализаций формы. Анализ пятнадцати полученных реализаций показал, что погрешность формы вала может находиться в широких пределах от $+ 0,25211$ мм до $- 0,08064$ мм.

На основе алгоритма предложенного М.Г.Косовым была приближенно решена пространственная задача контактного взаимодействия в "РК" - профильном соединении.

Трехмерная задача контактного взаимодействия сводится к решению двумерных контактных задач. Это достигается сечением исходной схемы рядом поверхностей и последующим решением контактных задач для тел, форма которых получена в результате таких сечений. Связь между решениями устанавливается из условия равенства упругих перемещений для отдельных областей контакта. Зависимости между упругими перемещениями и равнодействующими нагрузками устанавливается на выше указанном предположении И.А.Штаермана. Решение каждой плоской контактной задачи ведется на базе интегрального уравнения Г.Д.Коваленко при использовании метода поверхности отклика.

Четвертая глава посвящена исследованию "РК" - профильных соединений на износ, а также проверка разработанной имитационной модели на адекватность процессу контактного взаимодействия.

С этой целью была спроектирована и изготовлена испытательная машина УП-30М2 на базе испытательной машины УП-30, разработанной в БИТме.

Испытания проводились на двух партиях "РК" - профильных соединений изготовленных с зазорами соответствующими посадкам $H7/e8$, $H7/f7$ и посадочной длиной ступиц (15 и 45 мм). Нагружение "РК" - профильных соединений осуществлялось с учетом реальных условий работы, а именно: величины перемещения вала относительно ступицы не превышала ± 50 мкм. За базу испытаний была принята база $5 \cdot 10^5$ циклов нагружения, которая соответствует установленному износу соединения.

В результате испытаний было установлено, что износ "РК" - профильного вала и ступицы происходит по трем областям.

Установлено, что величина износа соединений с величиной зазора по посадке $H7/e8$ при равных рабочих нагрузках выше, чем для соединений с величиной зазора по посадке $H7/f7$. Это объясняется возникновением в зоне контакта больших контактных напряжений вследствие уменьшения фактической поверхности контакта, а также возможно лучшим удалением продуктов износа из зоны. В соединении с меньшей величиной зазора наблюдалось скатывание металла на отдельных участках профиля вала. После испытаний на взаимодействующих поверхностях валов и ступиц наблюдались буро-красные пятна - характерный признак процесса фреттинга сталей.

На основе обработки реализаций отклонений радиус-векторов точек кривой профиля вала в рамках теории случайных процессов были получены интервалы значений интенсивности изнашивания, математические ожидания и дисперсии величин интенсивности изнашивания стоек.

Анализ кривых профиля вала до и после испытаний на износ показал, что эволюция изменений радиус-векторов точек кривой профиля вследствие износа, аналогична эволюции распределения величин контактных напряжений (рис.4).

В результате исследований был выявлен характер распределения износа по посадочной длине вала. Установлено, что распределение износа по длине аналогично распределению величин зазоров в стержнях "РК" - профильных соединений (рис.5).

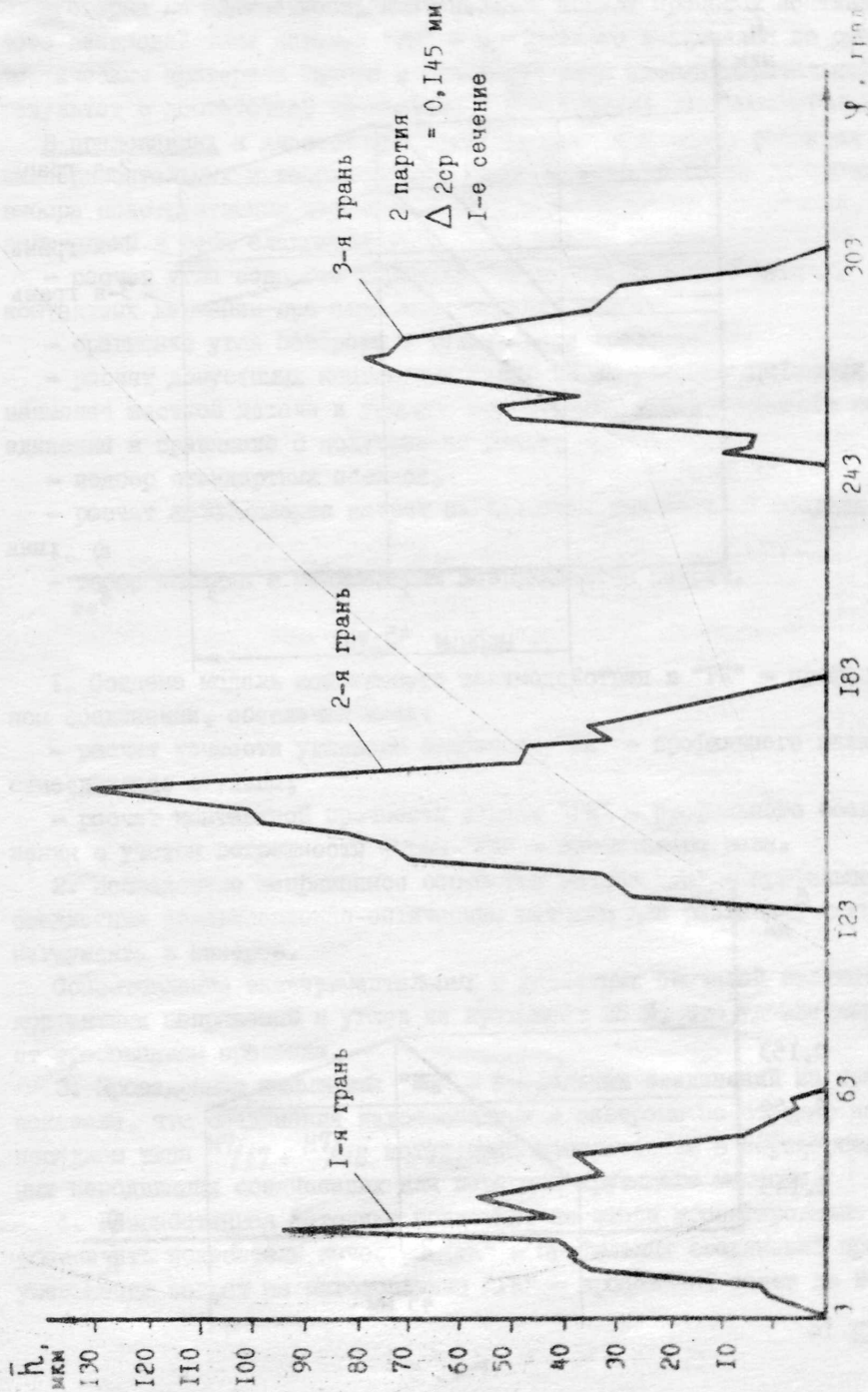
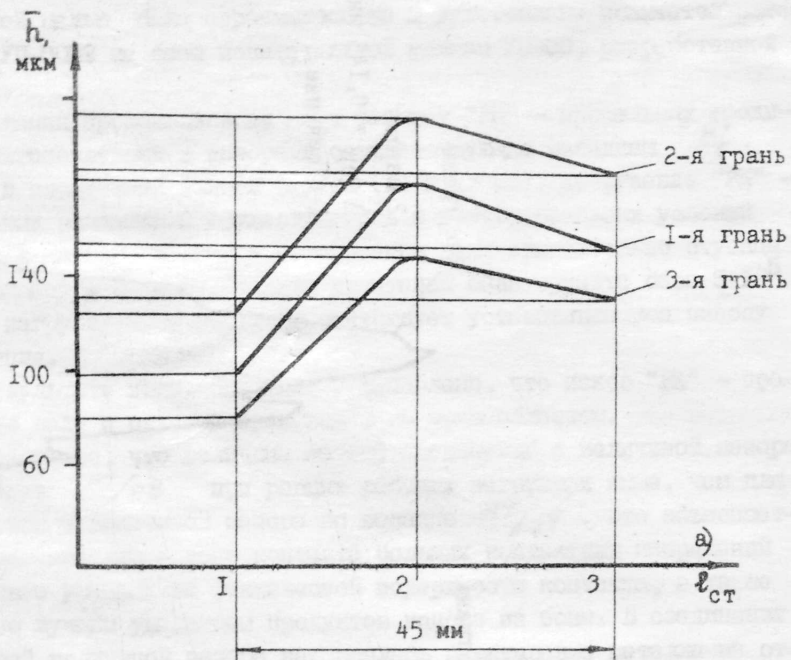
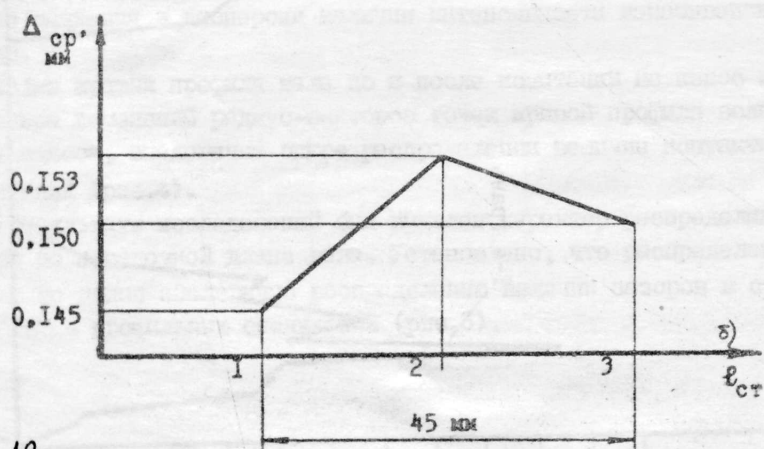


Рис. 4



Проверка на адекватность имитационной модели процессу контактного взаимодействия деталей "РК" - профильного соединения по статистическим критериям Фишера и Стьюдента дала удовлетворительный результат с достаточной точностью, 5 % - уровень значимости (табл. I).

В приложениях к диссертации представлены результаты расчетов экспериментальных и теоретических исследований, а также алгоритм выбора конструктивных параметров "РК" - профильного соединения, включающий в себя следующие этапы (рис. 6):

- расчет угла поворота в результате выбора зазора и величин контактных давлений при заданных исходных данных;
- сравнение угла поворота с техническим требованием;
- расчет допустимых контактных давлений из условия прочности наименее жесткой детали и условия обеспечения износостойкости соединения и сравнение с полученными ранее;
- подбор стандартных посадок;
- расчет коэффициента затрат на изготовление деталей соединения;
- выбор посадки с минимальным коэффициентом затрат.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Создана модель контактного взаимодействия в "РК" - профильном соединении, обеспечивающая:

- расчет точности углового положения "РК" - профильного вала относительно ступицы;
- расчет контактной прочности стыков "РК" - профильного соединения с учетом погрешности формы "РК" - профильного вала.

2. Исследовано напряженное состояние стыков "РК" - профильного соединения поляризационно-оптическим методом для различных схем нагружения и зазоров.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений величин контактных напряжений и углов не превышает 25 %, что удовлетворяет требованиям практики.

3. Проведенные испытания "РК" - профильных соединений на износ показали, что соединения изготовленные с зазорами по стандартным посадкам типа $H7/f7$, $H7/e8$ могут быть использованы в неревверсивных неподвижных соединениях для передачи крутящего момента.

4. Разработанная методика позволяет на этапе проектирования обеспечить показатели качества "РК" - профильных соединений при уменьшении затрат на изготовление "РК" - профильных валов на 20%.

Таблица I.

№	Наименование	Обозначение	Экспериментальные данные	Теоретические данные
1.	Объем выборки	$n (m)$	3	3
2.	Доверительный интервал	$\theta_B - \theta_H$	5,63186	-
3.	Доверительная вероятность	$1 - \alpha$	0,95	0,95
4.	Математическое ожидание	m_x	2,6002	2,68808
5.	Дисперсия	S^2	3,57804	0,66903
6.	Среднее квадра- тическое откло- нение	σ_x	1,37534	0,90440

$$F < F_{\text{табл.}} (0,18698 < 9,28),$$

$$t < t_{\text{табл.}} (0,05222 < 2,776),$$

где F - критерий ФИШЕРА;

t - критерий СТЬЮДЕНТА.

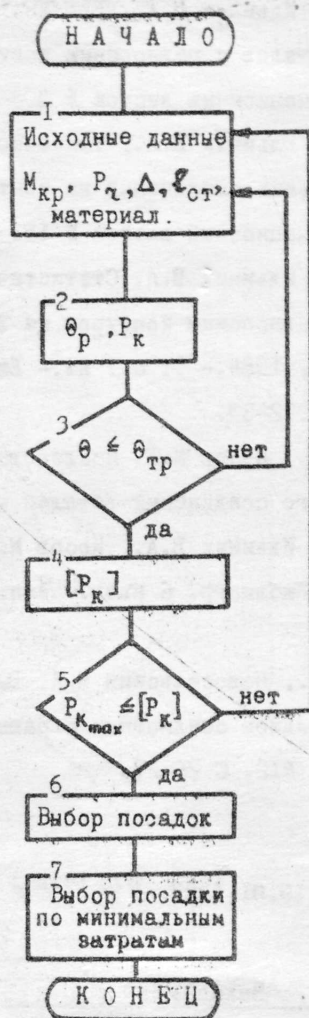


Рис. 6

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Косов М.Г., Ильиних В.А., Брыханов В.Н. Моделирование профилей некруглых валов с равноосным контуром на ЭВМ.-М.: ИГЦНТИ, 1983, Информационный листок № 308-83, -3 с.

2. Косов М.Г., Ильиних В.А., Тимченко А.И. Машина для исследования "РК"-профильных соединений на контактную прочность.-М.: ИГЦНТИ, 1984, Информационный листок № 153-84, -3 с.

3. Косов М.Г., Ильиних В.А. Статистическая оценка профилей некруглых валов с равноосным контуром на ЭВМ/ Косов М.Г., Ильиних В.А.; Мосстанкин.-М., 1984.- 31 с.: ил.- Библиогр. 7 назв.-Деп. в НИИМаш 23.08.83, № 272-83.

4. Ильиних В.А., Косов М.Г. Исследование напряженного состояния "РК"- профильного соединения деталей машин поляризационно-оптическим методом/ Ильиних В.А., Косов М.Г.; Мосстанкин.- М., 1985.- 36 с.: ил.- Библиогр. 6 назв.- Деп. в ВНИИТЭМР 03.04.85, № 142-85.

5. Ильиних В.А., Новосельский М.И. Выбор и назначение радиального зазора в профильном соединении с равноосным контуром// Станки и инструмент. 1985. №12. С 26-27.

Васильев
Подписано к печати 19.01.1987 ЛФ 17189

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Печать офсетная

Заказ 97

Усл.печ.л.0,93

Уч.-изд.л.1

Тираж 100

Бесплатно

Ротапринтный участок КамПИ 423810 г.Брежнев, Новый город,
проспект Мира, 13

