

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

На правах рукописи

ФАРИД ЭЛЬХАН оглы ВЕЛИЕВ

**ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ
ДЛЯ КОНЦЕНТРИЧЕСКИ СОПРЯГАЕМЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ**

2002.01 – Механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по математике

Баку – 2014

AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
RİYAZİYYAT VƏ MEXANİKA İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

FƏRİD ELXAN OĞLU VƏLİYEV

**KONSENTRİK QURAŞDIRILMIŞ SİLİNDRİK
CİSMLƏRİN ELASTİKLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN
TƏRS
MƏSƏLƏLƏRİ**

2002.01 – Deformasiya olunan bərk cismin mexanikası

riyaziyyat üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

Bakı – 2014

AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
RİYAZİYYAT VƏ MEXANİKA İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

FƏRİD ELXAN oğlu VƏLİYEV

**KONSENTRİK QURAŞDIRILMIŞ SİLİNDRİK
CİSMLƏRİN ELASTİKLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN
TƏRS
MƏSƏLƏLƏRİ**

2002.01 – Deformasiya olunan bərk cismin mexanikası

riyaziyyat üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

Bakı – 2014

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ**

На правах рукописи

ФАРИД ЭЛЬХАН оглы ВЕЛИЕВ

**ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ
ДЛЯ КОНЦЕНТРИЧЕСКИ СОПРЯГАЕМЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ**

2002.01 – Механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по математике

Баку – 2014

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие техники всегда ставит перед наукой о прочности материалов и изделий новые задачи. Они вызваны необходимостью повышения качества, надежности и долговечности машин и изделий. При проектировании изделий машиностроения следует учитывать допустимую величину трещиноподобных дефектов.

На современном этапе развития техники важное место занимает оптимальное проектирование конструкций, являющее одним из актуальных разделов механики деформируемого твердого тела. Это обусловлено тем, что задачи создания оптимальных конструкций возникают в самых различных прикладных областях: в машиностроении, в судостроении, в авиационной и космической технике, в строительстве сооружений и т.д. На основе оптимального проектирования достигается снижение материалоемкости конструкций, улучшение их физико-механических характеристик и т.д.

Задачи оптимального проектирования конструкций относятся к числу сложных задач механики, решение которых связано с определенными математическими трудностями.

Опытные данные показывают большую надежность и долговечность многокомпонентных конструкций перед однородными. В настоящее время в промышленности и технике широко применяются многослойные конструкции. При расчетах аппаратов высокого давления, наковален часто используется схема собранного с натягом композитного многокомпонентного кольца под внутренним давлением. Аналогичная схема реализуется в волоочильном производстве при волочении проволоки и прутков круглого сечения. Волочение представляет собой процесс протягивания проволоки, прутка или трубы через очко специального инструмента (волока), имеющее несколько меньшее сечение, чем исходная заготовка. Волоки в процессе эксплуатации могут выходить из строя по ряду причин: из-за

изнашивания, налипания частиц металла при повышенной шероховатости калибрующей части и разрушения.

Практика волочильного производства показывает, что при этом разрушение твердосплавных волок с подкрепляющими кольцами (оправой) происходит из-за развития чаще всего одной или двух симметричных диаметральных трещин, возникающих на границе рабочей и калибрующих зон волоки.

Точное решение задачи об упругом равновесии составного кольца с трещинами сопряжено с большими математическими трудностями. Таким образом, очевидна необходимость в разработке эффективных методов расчета составного кольца при наличии трещин и рекомендаций на их основе, выбора сочетания материалов, относительных размеров, допустимых рабочих давлений для получения необходимых прочностных характеристик волочильного инструмента.

Разработка эффективной расчетной методики напряженно-деформированного состояния и параметров разрушения составного кольца представляет собой интерес и для других областей техники, как то: аппараты высоких давлений, магистральные нефте-, газотрубопроводы и т.п.

Данная диссертационная работа посвящена вопросам оптимального проектирования и механики разрушения составного кольца (волока и оправы) с учетом реальной поверхности и дефектности волоки и температурного фактора.

Цель работы состоит в исследовании: напряженно-деформированного состояния составного кольца (твердосплавного волока и оправы) с учетом шероховатости внутреннего контура, дефектности и температуры, определение оптимального натяга между кольцами.

Научная новизна. На основе метода возмущений, аппарата теории функций комплексного переменного, метода сингулярных интегральных уравнений развит эффективный подход к решению обратной плоской задачи теории упругости для составного кольца с трещинами.

Разработан метод расчета критических параметров волокна на основе критерия теплового разрушения.

Получено решение нового класса плоских задач теории упругости и пластичности для составного кольца при силовом нагружении с учетом шероховатости обработанной поверхности и дефектов типа трещин. Найден натяг между кольцами, позволяющий предотвратить преждевременное разрушение твердосплавного волокна.

Найдены коэффициенты интенсивности напряжений вблизи конца трещин с учетом характера шероховатости поверхности.

На основе деформационного критерия разрушения установлены соотношения, описывающие докритическую и критическую стадии роста трещины в твердосплавном волокне.

Методика исследования. Работа носит теоретический характер. Решение задач осуществляется методом малого параметра и аналитическими методами теории функций комплексного переменного. Предлагаемый способ решения рассматриваемых в диссертации задач представляет собой комбинацию различных аналитических и численных методов. Основные из них - метод степенных рядов Мухелишвили, метод сингулярных интегральных уравнений, метод Гаусса с выбором главного элемента. Задачи приводятся к вычислительным схемам, реализация которых позволяет получить численные данные, на основе которых делаются выводы практического характера.

Достоверность полученных результатов обеспечивается математической корректностью поставленных задач, получением решений апробированными математическими методами; результатами численных расчетов, сравнением конечных аналитических и численных результатов в частных случаях с известными в литературе.

Практическая ценность результатов. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при проектировании и расчете волоочильного инструмента, а также при проектировании и расчете сопрягаемых деталей и

конструкций в машиностроении. Практическая значимость работы определяется широким классом отмеченных выше практических приложений, а также тем, что большинство полученных результатов в работе представлено в виде конечных формул, систем уравнений и доведены до счета, что позволяет их непосредственно использовать в инженерных расчетах прочности и долговечности волоочильного инструмента, обосновывать пути повышения их живучести, прогнозировать несущую способность поврежденных волок, на стадии проектирования волоочильного инструмента обоснованно выбирать конструктивные параметры.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на Международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики», посв. 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина, Тула, 19 – 23 сентября 2011 г.;
- на IV Международной научной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов – DFMN-2011, Москва, 25–28 октября 2011 г.;
- на Международной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики», посв. 90-летию со дня рождения Л.А.Голлоконникова, Тула, 17-20 сентября 2013г.;
- на научных семинарах кафедры «Соппротивление материалов» Азербайджанского технического университета.

Диссертация в целом доложена и обсуждена на расширенном заседании отделов «Теория упругости и пластичности», «теория ползучести» и «волновая динамика» Института математики и механики НАН Азербайджана.

Личный вклад автора. Все основные положения диссертации получены автором лично. В статьях, написанных в соавторстве, соавтору принадлежит только постановка задач.

Публикации. По теме диссертации опубликовано девять научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, двух глав, 19 рисунков, 5 таблиц, выводов, списка литературы. Объем диссертации 139 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, дан обзор публикаций по исследуемой проблеме, определяются цели исследования, приводится структура диссертационной работы; а также сведения об апробации работы и публикациях.

Первая глава посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния двухкомпонентного кольца, соединенного с натягом. Функция натяга заранее неизвестна и подлежит определению в процессе решения задачи оптимизации. Считается, что внутренний контур волокна имеет малые несовершенства технологического характера, образующие шероховатость обработанной внутренней поверхности.

Эта глава состоит из двух параграфов. В первом параграфе рассматривается напряженно-деформированное состояние составного кольца (волокна и оправы) при действии нормальных и касательных к внутреннему контуру усилий. Считается, что выполняются условия плоского напряженного состояния и внутренний контур волокна близок к круговому. Принято, что волокна запрессована с натягом $g(\theta)$ в оправу.

Отнесем составное кольцо к полярной системе координат $r\theta$, выбрав начала координат в центре концентрических окружности L_0 , L , L_2 с радиусами R_0 , R и R_2 .

Граница внутреннего контура L'_0 волокна представится в виде

$$\rho = R_0 + \delta(\theta); \quad \delta(\theta) = \varepsilon H(\theta) \quad (1.1)$$

Граничные условия задачи для составного кольца имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } r = R_2 \quad & \sigma_r = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 \\ \text{при } r = R \quad & \nu_r^b - i\nu_\theta^b = \nu_r^0 - i\nu_\theta^0 + g(\theta); \\ & \sigma_r^b = \sigma_r^0; \quad \tau_{r\theta}^b = \tau_{r\theta}^0 \\ \text{при } r = \rho \quad & \sigma_n = -p; \quad \tau_{nt} = -fp \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь ν_r^b, ν_r^0 - радиальные смещения волокна и оправы; $\nu_\theta^b, \nu_\theta^0$ - касательные смещения волокна и оправы, соответственно; f - коэффициент трения пары волокна-заготовка.

Рассматривая некоторую реализацию $H(\theta)$ шероховатости поверхности, развит метод возмущений для анализа напряженно-деформированного состояния составного кольца (волокна и оправы), внутренний контур которого имеет малые несовершенства технологического характера. Решение задач по определению напряжений и перемещений в каждом приближении получено методом степенных рядов в детерминистической постановке для каждого профиля обработанной поверхности рабочей и калибрующей зон волокна и с использованием аппарата теории случайных функций. Используя принципы равнопрочности для внутреннего контура волокна и наименьших квадратов, найдена функция натяга для запрессовки подкрепляющей обоймы твердосплавной волокна.

Второй параграф этой главы посвящен исследованию температурного фактора на напряженное состояние составного кольца.

Рассматривается обратная задача термоупругости для волокна подкрепленной кольцом. Пусть требуется определить натяг для запрессовки подкрепляющей обоймы волокна с учетом температурных напряжений.

Так как для линейных задач теории упругости справедлив принцип суперпозиции, то во втором параграфе исследуется

напряженное состояние, возникающее только от действия температурного фактора.

Общее напряженное состояние получим суммированием решений задач чисто силовой с температурной задачей теории упругости. При волочении на внутренней поверхности волокна на площадке контактного трения с проволокой действует поверхностный источник тепла, вызванный внешним трением. Касательные усилия $\tau = fp$ способствуют тепловыделению в области контакта инструмента и заготовки в процессе волочения. Причем общее количество тепла в единицу времени пропорционально мощности трения. В случае установившегося теплообмена определение температурного поля в составном кольце сводится к решению следующей сопряженной краевой задачи:

в волоке

$$\Delta T = 0 \quad (1.3)$$

в подкрепляющем кольце

$$\Delta T_0 = 0 \quad (1.4)$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} + \alpha_2 (T_0 - T_2) = 0$$

$$\text{при } r = R \quad T = T_0; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial n} \quad (1.5)$$

$$\text{при } r = \rho \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -Q; \quad Q = \alpha_{m..n} f p V$$

Здесь T – температура в волоке; T_0 – температура в кольцевой оправе; λ , λ_0 – коэффициенты теплопроводности, соответственно, волокна и оправы; Δ – оператор Лапласа; α_2 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности оправы с внешней средой; T_2 – температура окружающей среды на внешней поверхности оправы; Q – интенсивность поверхностного источника тепла, приходящаяся на волоку; V – скорость волочения; $\alpha_{m..n}$ – коэффициент разделения теплового потока для волокна.

Рассматривая некоторую реализацию шероховатости внутренней поверхности волокни, развит метод возмущений для анализа распределения температуры в составном кольце. Получены соотношения, с помощью которых для каждого профиля внутренней поверхности волокни, известной заранее, можно исследовать температурное состояние волокни.

В каждом приближении, используя метод степенных рядов, получены основные формулы для определения напряжений в составном кольце.

Используя общее напряженное состояние, а также принципы равнопрочности и наименьших квадратов, найдена функция натяга запрессовки волокни в обойму с учетом температурного фактора.

Вторая глава диссертации посвящена разработке расчетной методики предельно-равновесного состояния составного кольца (твердосплавной волокни и оправы), имеющего малые несовершенства технологического и структурного характера, образующие шероховатость обработанной поверхности и дефекты типа трещин. Исследуется влияние погрешностей изготовления волокни, режимов волочения на параметры разрушения (температура поверхности, коэффициенты интенсивности напряжений и критические давления). Эта глава состоит из шести параграфов. Первый параграф этой главы посвящен разработке метода расчета критических параметров волокни на основе критерия теплового разрушения. Исследуется критическое тепловое состояние волокни. Считается, что скорость волочения V превосходит или равна некоторому критическому значению V_c волочения, при котором температура поверхностных слоев волокни в зоне контакта достигает предельной температуры T_* для материала твердого сплава инструмента. Найдено распределение температуры и напряжений в составном кольце (волокни и оправы) при критическом тепловом состоянии

Получено соотношение, позволяющее определять области допустимых значений параметров волочильного инструмента, обоснованно управлять явлением теплового разрушения путем

конструкторско-технологических решений на стадии их проектирования. Второй параграф этой главы посвящен исследованию предельного равновесия составного кольца, ослабленного поверхностными трещинами. Считается, что волока ослаблена одной или двумя радиальными трещинами вдоль оси абсцисс, выходящими на край внутреннего шероховатого контура, и волочение происходит в двух режимах: граничного трения и жидкостного трения. В случае двух радиальных трещин рассмотрены случаи: а) равных трещин и б) неравных трещин.

Граничные условия рассматриваемой задачи механики разрушения имеют следующий вид

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_r = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{при } r = R \quad \nu_r^0 - i\nu_\theta^0 = \nu_r^b - i\nu_\theta^b + g(\theta)$$

$$\sigma_r^b = \sigma_r^0; \quad \tau_{r\theta}^b = \tau_{r\theta}^0$$

$$\text{при } r = \rho \quad \sigma_n = -p; \quad \tau_{nt} = -fp$$

а) режим граничного трения

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0; \quad \theta = 0 \text{ и } \theta = \pi \quad \text{на берегах трещин} \quad (2.2)$$

б) режим жидкостного трения

$$\sigma_\theta = -p_0; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad \theta = 0 \text{ и } \theta = \pi \text{ на берегах трещин} \quad (2.3)$$

Применяя развитую в первой главе расчетную методику, получим последовательность следующих краевых задач:

для нулевого приближения

$$\text{при } r = R_0 \quad \sigma_r^{(0)} = -p, \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = -fp \quad (2.4)$$

$$\text{при } r = R \quad \nu_r^{(0)b} - i\nu_{r\theta}^{(0)b} = \nu_r^{(0)} - i\nu_{r\theta}^{(0)} + g^{(0)}(\theta)$$

$$\sigma_r^{(0)b} = \sigma_r^{(0)}; \quad \tau_{r\theta}^{(0)b} = \tau_{r\theta}^{(0)}$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_r^{(0)} = 0, \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0$$

на берегах трещин

а) режим граничного трения

$$\sigma_\theta^{(0)} = 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0; \quad \theta = 0 \text{ и } \theta = \pi \quad (2.5)$$

б) режим жидкостного трения

$$\sigma_\theta^{(0)} = -p_0; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0; \quad \theta = 0 \text{ и } \theta = \pi \quad (2.6)$$

Для первого приближения задачи

$$\begin{aligned} \text{при } r = R_0 \quad \sigma_r^{(1)} &= 2\tau_{r\theta}^{(0)} \frac{1}{R_0} \frac{dH(\theta)}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \sigma_r^{(0)}}{\partial r} \\ \tau_{r\theta}^{(1)} &= (\sigma_\theta^{(0)} - \sigma_r^{(0)}) \frac{1}{R_0} \frac{dH(\theta)}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(0)}}{\partial r} \\ \text{при } r = R \quad \sigma_r^{(1)b} &= \sigma_r^{(1)0}; \quad \tau_{r\theta}^{(1)b} = \tau_{r\theta}^{(1)0}, \\ \nu_r^{b(1)} - i\nu_{r\theta}^{b(1)} &= \nu_r^{0(1)} - i\nu_{r\theta}^{0(1)} + g^{(1)}(\theta) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } r = R_2 \quad \sigma_r^{(1)} &= 0, \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = 0 \\ \text{на берегах трещин для обоих режимов} \\ \sigma_\theta^{(1)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = 0; \quad \theta = 0 \text{ и } \theta = \pi \end{aligned} \quad (2.8)$$

Комплексные потенциалы Колосова-Мусхелишвили, дающие решение краевой задачи в каждом приближении, ищем в виде

$$\begin{aligned} \Phi^{(0)}(z) &= \Phi_0^{(j)}(z) + \Phi_1^{(j)}(z) + \Phi_2^{(j)}(z); \quad j = 0, 1 \\ \Psi^{(0)}(z) &= \Psi_0^{(j)}(z) + \Psi_1^{(j)}(z) + \Psi_2^{(j)}(z) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Здесь комплексные потенциалы $\Phi_0^{(j)}(z)$ и $\Psi_0^{(j)}(z)$ определяют поле напряжений и деформаций в сплошном составном кольце (бездефектная волока и оправа) в нулевом и первом приближении, соответственно. Это поле напряжений и деформаций найдено в первой главе. Формально пока считаем функцию натяга известной.

Функции $\Phi_1^{(j)}(z)$ и $\Psi_1^{(j)}(z)$ ($j = 0, 1$) получены методом, сущность которого состоит в построении в явной форме потенциалов, соответствующих неизвестным смещениям вдоль контура. Неизвестная функция, характеризующая разрыв смещений при переходе через линию трещин и потенциалы $\Phi_2^{(j)}(z)$ и $\Psi_2^{(j)}(z)$ ($j = 0, 1$) должны быть определены из краевых условий на внутреннем контуре L_0 ($r = R_0$) и берегах трещин. Удовлетворяя краевым условиям на контуре L_0 и берегах трещин в каждом приближении получено сингулярное

интегральное уравнение. При этом для определения потенциалов $\Phi_2^{(j)}(z)$ и $\Psi_2^{(j)}(z)$ использовался метод Мухелишвили. Затем сингулярное интегральное уравнение сводилось к конечной алгебраической системе уравнений. Полученная система уравнений решалась методом Гаусса с выбором главного элемента для разных значений M (M - число чебышевских узлов разбиения интервала). Приведена процедура вычисления коэффициентов интенсивности напряжений для двух равных трещин, одной трещины и для двух неравных радиальных трещин.

Исследовано влияние геометрических параметров волокна, режимов волочения, температуры, натяга оправы на изменение предельного давления. Форма волок бралась № 9,11,13 (ГОСТ 9453-75). Механические характеристики материала волокна (твердый сплав ВК6) и оправы (среднеуглеродистая сталь) принимались равными $E_b = 6,28 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_b = 0,22$ и $E_0 = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_0 = 0,28$; $K_{IC} = 12,26$ МПа \cdot м^{1/2}.

Численный анализ результатов показывает, что при волочении в режиме жидкостного трения коэффициент интенсивности напряжений более чем в два раза превышает аналогичное значение при волочении в режиме граничного трения. Этот факт объясняет наблюдаемое на практике волочильного производства более частое разрушение твердосплавных волокон в режиме жидкостного трения.

Исследование показало, что подкрепляющее кольцо значительно снижает коэффициент интенсивности напряжений, а тем самым увеличивает предельные значения допустимых давлений по сравнению со случаем отсутствия подкрепления. Численный анализ полученных результатов показывает, что для предотвращения разрушения твердосплавного волокна необходимо, чтобы относительное контактное (подкрепляющее) давление p_1/p стремилось к единице при волочении в режиме жидкостного трения, а при волочении в режиме граничного трения - стремилось к 0,5.

В третьем параграфе этой главы исследуется влияние случайных отклонений от прямолинейной формы трещины на параметры разрушения волокна. В реальных материалах из-за структурных и технологических факторов поверхности дефектов типа трещин имеют место неровности и искривления.

Рассматривается задача о предельно-равновесном состоянии составного двухкомпонентного кольца, предполагая, что контур краевой радиальной трещины имеет шероховатость (малые отклонения от прямолинейной формы).

Граничные условия рассматриваемой задачи механики разрушения имеют вид (2.1), к которым добавляются следующие условия на берегах трещины

а) волочение в режиме граничного трения

$$\sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad (2.10)$$

б) волочение в режиме жидкостного трения

$$\sigma_n = -p_0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad (2.11)$$

Решение поставленной задачи в третьем параграфе этой главы получено методом, изложенным во втором параграфе. В расчетах функция $\delta(x)$, описывающая шероховатость трещины, принималась стационарной случайной функцией с нулевым средним значением и известной дисперсией.

Четвертый параграф этой главы посвящен исследованию роста трещины в составном кольце с учетом пластических деформаций. Волоку моделируем реальным хрупким телом в соответствии с моделью Леонова-Панасюка. По мере нагружения волокна будут возникать зоны предразрушения (области ослабленных межчастичных связей), где материал волокна деформируется за пределом упругости. Учет этих эффектов в задачах механики разрушения деформируемых тел представляет важную, но весьма трудную задачу. При этом размер зоны предразрушения заранее неизвестен и должен быть определен в процессе решения краевой задачи. Принято, что зона предразрушения (пластических деформаций) ориентирована в направлении максимальных растягивающих напряжений.

Рассматривается задача о начальном развитии пластических деформаций в конце трещины. В соответствии со схемой Леонова-Панасюка-Дагдейла, пластическая область представляет собой узкий слой на продолжении трещин со стороны концевых вершин. Размеры пластических зон заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи. Рассмотрены случай одной и двух симметричных радиальных трещин при двух режимах волочения. Используя решение упругопластической задачи, условия ограниченности напряжений, найдены длины отрезков пластических зон в зависимости от приложенной нагрузки, а также геометрических и физических параметров составного кольца. Используя критерий критического раскрытия трещины, получены зависимости, описывающие рост трещины в волоке. Получены соотношения, с помощью которых проведено исследование роста трещины в волоке в докритической стадии развития трещины.

Для снижения уровня напряженного состояния волоки с оправой и оптимизации торможения трещин в пятом параграфе этой главы рассматривается обратная задача теории упругости по определению оптимального натяга для составного кольца (волоки и оправы). Принято, что волока ослаблена одной или двумя радиальными трещинами. Ответственным за разрушение материала волоки считается величина максимального коэффициента интенсивности напряжений. Задача оптимизации сводится к минимизации максимального значения коэффициента интенсивности напряжений (минимаксный критерий) в окрестности кончика трещины в волоке в процессе волочения. Достижение этой цели способствует повышению работоспособности волочильного инструмента. Так как величина коэффициента интенсивности напряжений линейно зависит от параметров управления (коэффициентов разложения искомой функции натяга в ряд Фурье), то целевая функция оказывается линейной и задача оптимизации сводится к задаче линейного программирования, для решения которой используется

симплексный алгоритм. Численный расчет выполнялся на ЭВМ. В разложении функции натяга ограничивались пятью членами. Найдены параметры управления в зависимости от физико-механических и геометрических параметров волоочильного инструмента.

В этом же параграфе предложен упрощенный подход для определения натяга запрессовки, позволяющий предотвратить преждевременное разрушение твердосплавной волоки. Для предотвращения разрушения выберем величину натяга таким образом, чтобы в кончике трещины максимальный коэффициент интенсивности растягивающих напряжений K_p при произвольном угле отклонения β был равен нулю:

$$K_I \cos \frac{\beta}{2} - 3K_{II} \sin \frac{\beta}{2} = 0 \quad (2.12)$$

Дополнительное условие (2.12) позволяет определить величину натяга, причем в соотношении (2.12) оно входит линейным образом.

В последнем параграфе этой главы рассматривается плоская задача механики разрушения для концентрически сопрягаемых цилиндров. Считается, что волока (внутренний цилиндр) подкреплена с натягом с помощью внешнего цилиндра (обоймы), а вблизи поверхности волока имеется N произвольно размещенных прямолинейных трещин длиной $2\ell_k$ ($k = 1, 2, \dots, N$). На основе минимаксного критерия проведен теоретический анализ по определению натяга соединения, обеспечивающего минимизацию параметров разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений) волока. Отдельно рассмотрен упрощенный способ минимизации параметров разрушения твердосплавного волока.

Завершают работу выводы, где отражены **основные результаты** диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе методов плоской теории упругости с привлечением аппарата теории случайных функций разработана эффективная методика решения широкого класса задач механики разрушения для составного кольца, внутренний контур которого имеет малые несовершенства технологического и структурного характера. Разработанная методика позволяет проанализировать различные случаи распределения натяга запрессовки, шероховатости и расположения дефектов типа трещин при различных режимах волочения.

2. Впервые для оценки предельного состояния твердосплавных волок с помощью аппарата механики разрушения найдены коэффициенты интенсивности напряжений, зависящие от параметров стационарной случайной функции, описывающей профиль обработанной внутренней поверхности волокна, натяга запрессовки.

3. Исследовано напряженно-деформированное состояние составного кольца (волокна и оправы), соединенного с натягом с учетом шероховатости внутреннего контура волокна при силовых и тепловых воздействиях. Разработанная методика решения обратных задач о напряженно-деформированном состоянии составного кольца позволяет учесть не только отдельно каждую реализацию профиля шероховатости волокна (детерминистический подход), а также провести статистическое описание неровностей поверхности калибрующей зоны волокна, реализациями стационарной случайной функции.

4. Решен ряд задач для кусочно-однородного собранного с натягом кольца с внутренним шероховатым контуром с малыми трещинами. Рассмотрены случаи: одной; двух равных; двух неравных трещин и одной трещины, близкой к прямолинейной по форме, при двух режимах волочения. Подтверждено установленное ранее условие, согласно которому наиболее эффективно волочильный инструмент будет работать при отношении контактного давления на линии раздела материалов к

давлению, приложенному к внутреннему контуру, стремящимся к единице для волочения в режиме жидкостного трения и к 0,5 в режиме граничного трения.

5. Решен ряд упругопластических задач для кусочно-однородного собранного с натягом кольца с малыми краевыми трещинами.

Получены в рамках δ_k -модели соотношения для размера пластической зоны и для раскрытия трещины в ее конце в зависимости от приложенной нагрузки, геометрических и физических параметров составного кольца.

Найдена зависимость длины трещины от приложенной нагрузки (внутреннего давления), а также от физических и геометрических параметров составного кольца при монотонном нагружении.

6. Полученные основные разрешающие уравнения позволяют при заданном натяге численными расчетами, путем определения коэффициентов интенсивности напряжений, прогнозировать рост имеющихся трещин в волоке, установить допустимый уровень дефективности и максимальные значения рабочих нагрузок, обеспечивающие достаточный запас надежности.

Решение задачи оптимального проектирования по определению натяга соединения волока и подкрепляющего цилиндра позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальные геометрические параметры волока и подкрепляющего цилиндра, обеспечивающие повышение несущей способности.

7. Созданная методика, отличаясь простотой и малой трудоемкостью, позволяет достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние, определять оптимальный натяг и прогнозировать развитие трещины в составном кольце (твердосплавном волоке).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Велиев Ф.Э. Определение температурного поля в твердосплавном волокне, подкрепленного оправой // Елми ясярляр – фундаментал елмляр. 2010, №4, с. 86 – 89.
2. Мирсалимов В.М., Велиев Ф.Э. Расчет критических параметров твердосплавной волоки по критериям трещиностойкости // Механика. Машиностроение, 2010, №2, с. 29 – 32.
3. Велиев Ф.Э. Обратная задача термоупругости для твердосплавной волоки, подкрепленной кольцом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011, №3, с. 15 – 19.
4. Велиев Ф.Э. Напряженно–деформированное состояние волоки при критическом тепловом состоянии // Мат. IV Межд. научн. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN – 2011, М.: ИМЕТ РАН, 2011, с. 244 – 245.
5. Мирсалимов В.М., Велиев Ф.Э. Обратная задача теории упругости для концентрических сопрягаемых цилиндрических тел при наличии трещин // Мат. Межд. науч. конф. «Современные проблемы математики, механики, информатики», посв. 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина, Тула, 2011, с. 160 – 163.
6. Мирсалимов В.М., Велиев Ф.Э. Обратная задача теории упругости для волоки, подкрепленной обоймой // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН, 2012, № 4, с. 64 – 72.
7. Mirsalimov V.M. and Veliyev F.E. Reverse problem of the theory of elasticity for drawing die supported by a cage // J. of Machinery Manufacture and Reliability, 2012, vol. 41, No 4, p. 318 – 325.

8. Mirsalimov V.M., Veliyev F.E. Inverse problem of failure mechanics for a drawing die strengthened with a holder // Acta Polytechnica Hungarica, 2013, vol. 10, No I, p.121-138.
9. ВелиевФ.Э. Учёт зон предразрушения в кончике трещины в волоке // Elmi əsərlər-fundamental elmlər,2012, cild XI (44) s.96 – 100.

Fərid Elxan oğlu Vəliyev

**KONSENTRİK QURASHDIRILMIŞ SILİNDRİK
CİSİMLƏRİN ELASTİKLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN
TƏRS MƏSƏLƏLƏRİ**

ANNOTASIYA

Dissertasiya işi çəkmə alətinin real səthi və temperatur amili nəzərə alınmaqla konsentrik quraşdırılmış silindrik cisimlərin (çəkmə aləti və sağanağın) optimal layihələndirmə məsələlərinə və dağılma mexanikasına həsr olunub.

Çatları olan konsentrik quraşdırılmış silindrik cisimlər (çəkmə aləti) üçün tərs müstəvi elastiklik nəzəriyyəsinin həllinin effektiv metodikası inkişaf etdirilib. İstilik dağılması kriterisi əsasında çəkmə alətinin böhran parametrlərinin hesablanma metodikası işlənib.

İlk dəfə olaraq konsentrik quraşdırılmış silindrik cisimlər üçün qüvvə yüklənməsi halında emal olunan səthin kələ-kötürlüyü və çat tipli qüsurlar nəzərə alınmaqla elastiklik nəzəriyyəsinin və plastikliyin müstəvi məsələlərinin yeni sinfi həll edilib. Konsentrik quraşdırılmış silindrik cisimlər (çəkmə aləti və sağanaq) arasında, bərk ərintili çəkmə alətinin dağılmasının qarşısını almağa imkan verən gərilmə müəyyən olunub.

Çatın ucunun yaxınlığında, səthin kələ-kötürlüyünün xarakteri nəzərə alınmaqla gərilmənin intensivlik əmsalları müəyyən olunub.

Dağılmanın deformasiya kriterisi əsasında bərk ərintili çəkmə alətində çatın böhrana qədərki və böhran inkişaf mərhələlərini təsvir edən asılılıqlar təyin olunub.

Farid Elxan oglu Valiyev

**RETURN PROBLEMS OF THE THEORY
OF ELASTICITY FOR CONCENTRICALLY MATING
CYLINDRICAL BODIES**

SUMMARY

Dissertational work is devoted to questions of optimum designing and mechanics of fracture concentrically mating cylindrical bodies (die and a frame) in view of a real surface and deficiency die and the temperature factor.

The effective technique of the solution of the inverse plane theory of elasticity for concentrically mating bodies (die) with cracks is advanced. The method of calculation of critical parameters die is developed on the basis of criterion of thermal fracture.

For the first time the new class of plane problems of the theory of elasticity and plasticity for concentrically mating cylindrical bodies is solved at force loading in view of a roughness of the processed surface and defects such as cracks. The tightness between concentrically mating cylindrical bodies (die is found and the frame), allowing to prevent fracture hardmetal die.

Stress of intensity factors of near to the end of cracks are found in view of character of a roughness of a surface. On the basis of deformation criterion of fracture the parities describing subcritical and critical stages of growth of a crack in hardmetal die are established.