

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. Г. В. КАРПЕНКО

На правах рукописи
УДК 539.3

БУТВИННИК

Игорь Петрович

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОКРЫТИЙ И НАКЛАДОК
НА УПРУГОЕ РАВНОВЕСИЕ
КОМПОЗИЦИЙ С ДЕФЕКТАМИ ТИПА ТРЕЩИН

Специальность 01. 02. 04 — механика
деформируемого твердого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЬВОВ 1991



00815778 (-)

Работа выполнена в Физико-механическом институте им.
Г.В.Карпенко АН УССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник БЕРЕЖНИЦКИЙ Л.Т.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ВОРОБЕЙ В.В.; кандидат технических наук ГАНУЛИЧ Б.К.

Будущее предприятие - Львовский Государственный университет
им. И.Франко.

Защита диссертации состоится "19" ноября 1991 г.
в 15 часов на заседании специализированного совета
К 016.42.01 по присуждению ученой степени кандидата технических
наук в Физико-механическом институте им. Г.В.Карпенко АН
УССР / 290601, г.Львов, ГСП, ул.Научная, 5 /.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физико-
механического института им. Г.В.Карпенко АН УССР.

Автореферат разослан "19" октября 1991 г.

Ученый секретарь *Сиварук* М.М.СТАДНИК
специализированного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность проблемы. За последние десятилетия в производстве и технике широкое применение приобрели материалы с защитными покрытиями, способными работать в широком диапазоне температур, в условиях воздействия агрессивных сред, при одновременном воздействии разных механических напряжений, в условиях абразивного изнашивания и т.п. К настоящему времени хорошо разработаны теоретические основы и созданы средства для получения защитных покрытий различными способами. Этим проблемам посвящены работы Похмурского В.И., Борисенко А.И., Шатинского В.Ф., Коломыцева П.Т., Сосновского Л.А., Мокрова А.П. и др. За последнее время стали проводиться работы, изучающие прочность и работоспособность материалов с защитными покрытиями и элементов конструкций из них. Однако, исследований, посвященных оценке напряженно-деформированного состояния и прочности материалов с покрытиями и наклепами, с позиции механики разрушения немного. Здесь можно использовать отчасти работы, посвященные упругому равновесию слоистых композиционных материалов, в том числе пластичных элементов, подкрепленных различными стрингерами и ребрами жесткости.

Основные результаты работ в этом направлении исследований изложены в работах Грилицкого Д.В., Гупта И.Д., Куна Т.С.

* При выполнении работы и обсуждении полученных результатов автор широко использовал консультации чл.-корр. АН УССР, профессора Похмурского В.И. и кандидата физико-математических наук Стядуча Н.Г.

Кулиева В.Д., Эрдогана Т., Сулима Г.Т., Опанасовича В.К., Александрова В.М., Мхитаряна С.М., Шоршорова М.Х., Черепанова Г.П. Опубликованные работы относятся в основном к частным случаям композиций с конкретными физико-механическими характеристиками и содержащими заданные системы дефектов типа трещин. Решение таких задач сопряжено со значительными математическими трудностями, связанными со сложностью геометрии композиции и наличием в ней различных дефектов, многофакторность /обилием/ параметров, существенно влияющих на конечный результат.

Диссертационная работа выполнялась в рамках бюджетной темы "Исследование процессов образования и развития трещин в коррозионноустойчивых стеклопластинах и изучение работоспособности из них при одновременном воздействии механических напряжений, температур и агрессивных сред" /1985-1989 гг./, государственный регистрационный номер 81.04.17.06., а также координационного плана комплексных научных исследований по проблеме "Физико-химическая механика хрупкого разрушения конструкционных материалов"/Постановление Президиума АН УССР № 43 от 17.12.1979 г./.

В связи с этим у нас была поставлена задача.

Цель работы. Дальнейшая разработка и применение методов механики разрушения к материалам и пластичным элементам с покрытиями при оценке их упругого и граничного равновесия, а также выработка на этой основе рекомендаций по оптимальному сочетанию параметров, характеризующих исследуемые композиции.

Общая методика выполнения работы. Исследования произведены в рамках теории упругости с использованием интег-

ральных преобразований Фурье. Решение соответствующих граничных задач было сведено к сингулярным интегральным уравнениям с ядрами типа Коши или их системам. Методы решения этих уравнений известны в литературе и дают возможность непосредственно определить коэффициенты интенсивности напряжений у обеих вершин дефекта. Отладка составленных программ и все расчеты выполнены на ЭВМ-1022.

Научная новизна. 1. Впервые изучено порядок сингулярности и распределение напряжений у вершины жесткого пластичатого включения, перпендикулярного линии раздела сред /эластог задачи Зака в случае трещины/. 2. Решена задача о поведении трещины в трехслойной композиции, средний слой которой имитирует буферный /переходный/ слой между покрытием и основой. 3. Представлен вариант тонкой упругой накладки, впервые изучено влияние разрушенного и неразрушенного подкрепляющего слоя на поведение трещины в основе.

Практическое значение работы. Сформулированные в работе на основании решений задач о поведении трещины в трехслойной композиции и вытекающих из нее частных случаях, рекомендации об оптимальном сочетании физико-механических свойств покрытия и основы, а также их геометрических параметров переданы заинтересованным организациям. Показано, что жесткость покрытия по сравнению с жесткостью основного материала, целесообразно увеличивать более чем в четыре раза. Для каждого физически возможного сочетания материалов покрытие - основа существует оптимальная толщина покрытия, превышение которой не приводит к существенному эффекту торможения трещины в основе. Часть результатов была использована для разработки "Аналити-

ческого метода прогнозирования долговечности из корпусной стали для реакторов АЭС" и передана заинтересованному предприятию, что дало возможность сократить объем автоклавных испытаний в три раза и составило годовой эффект, с учетом долевого участия диссертанта, 33 тыс.руб. в год.

На защиту выносятся следующие научные и практические результаты:

- данные об изменении порядка сингулярности напряжений возле вершины жесткого включения у границы раздела сред при плоской и антиплоской деформации;

- выводы о поведении трещины в трехслойной композиции, средний слой которой имитирует границу раздела между двумя средами или переходную зону между основой и покрытием, внедрение сформулированных на этой основе рекомендаций;

- рекомендации о влиянии разрушенной и неразрушенной накладки /покрытия/ на торможение прикраевых трещин в исследуемых композициях.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на УП семинаре по диффузионному насыщению и защитным покрытиям /Львов-1980/, на XIX семинаре по диффузионному насыщению и защитным покрытиям /Львов-Дрогобыч, 1982/, на I Всесоюзном совещании по жаростойким покрытиям /Тула, 1983/, на XX семинаре по диффузионному насыщению и защитным покрытиям /Львов-1984/, на I Всесоюзной конференции "Механика неоднородных структур", /Львов-1984/, на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Неклассические проблемы механики композиционных материалов и конструкций из них" /Львов-1984/, на IV Всесоюзной конференции "Смешанные задачи механики деформируемого тела" /Одесса-1989/, а также на научных семина-

рах ФМИ им. Г.В.Карпенко АН УССР /Львов-1991/.

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 8 опубликованных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы и кратких выводов, списка цитируемой литературы. Основная часть работы содержит 135 страниц машинописного текста, 24 рисунка, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении дано обоснование актуальности темы диссертации, определена цель работы, кратко изложено ее содержание и основные результаты.

В первой главе, которая носит вспомогательный характер, дан анализ литературных данных о поведении трещин вблизи границы раздела сред, приведены некоторые общие сведения из теории сингулярных интегральных уравнений, а также основные положения плоской задачи математической теории упругости и линейной механики разрушения.

Во второй главе изучены особенности в распределении напряжений у вершины абсолютно жесткого пластичного включения /трещины/, перпендикулярного границе раздела сред, когда композит пребывает в условиях плоской или антиплоской деформации. Прием для определенности здесь и в дальнейшем, что полубесконечный дефект находится в материале с модулем сдвига G_2 , и коэффициентом Пуассона ν_2 . При решении этой задачи применен метод собственных функций, аналогично тому, как в случае трещины применимы Зак и Вильямс. Выявлено в обоих случаях уравнения для нахождения собственных

чисел λ_{min} , определяющие порядок сингулярности напряжений у вершины дефекта $\sigma \sim r^{-q}$, где $q = 1 - \lambda_{min}$, λ_{min} - минимальное из всех λ , удовлетворяющее условию $0 < \lambda < 1$, r - малое расстояние от вершины дефекта. Это характеристическое уравнение в случае жесткого включения имеет вид:

$$(1 + \lambda) \left\{ \lambda^2 (-4\alpha^2 + 4\alpha\gamma) + \alpha^2 \alpha_1^2 - \alpha \alpha_1^2 + \alpha^2 - \alpha\gamma + 2\alpha + 1 - \gamma + (2\alpha^2 \alpha_1 + 2\alpha \alpha_1 - 2\gamma \alpha_1) \cos \lambda\pi \right\} \cos \lambda\pi = 0,$$

где

$$\alpha = \frac{\eta - 1}{1 + \alpha_1}; \quad \gamma = \frac{\eta - 1}{1 + \alpha_1}; \quad \eta = \frac{G_1}{G_2},$$

$\alpha = \frac{3 - 4\nu}{3 - \nu}$ - в условиях плоской деформации;

$\alpha = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$ - в условиях плоского напряженного состояния.

Положив в данном уравнении $\alpha = -1$ получим известное характеристическое уравнение для трещины со свободными границами, перпендикулярной границе раздела сред /известная задача Зенка/.

Для жесткого включения, выходящего под углом β на границу раздела двух полупространств с различными модулями сдвига, характеристическое уравнение при продольном сдвиге имеет вид:

$$[(G_1 - G_2)/(G_1 + G_2)] \cos \lambda (2\beta - \pi) + \cos \lambda\pi = 0$$

Если же жесткое включение перпендикулярно линии сдвига, то

$$\lambda_{min} = \frac{\beta}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{G_2}{G_1}}$$

Показано, что для одних и тех же типов дефектов в случае деформации нормального разрыва, поперечного и продольного сдвигов существует общие качественные зависимости порядка сингулярности напряжений от соотношения упругих свойств материалов, составляющих композицию. Произведен детальный анализ зависимости $\lambda_{\text{ти}}$ от соотношения $\frac{G_1}{G_2}$, коэффициентов Пуассона ν_1 и ν_2 , характеризующих композицию. Эти данные необходимы в дальнейшем для целенаправленного выбора решений соответствующих сингулярных интегральных уравнений и при выяснении ситуации о напряженно-деформированном состоянии у вершин дефекта вблизи границы раздела сред.

В третьей главе работы изучено упругое равновесие трехслойной композиции, каждый слой которой содержит сквозную /туннельную/ трещину с краями свободными от нагрузки. Трещины различной длины расположены в слоях эксцентрически и перпендикулярны границе раздела сред. Слои представляют собой бесконечные полосы различной ширины и с различными упругими свойствами. Граница раздела слоев — идеальный спай. К краям полос на бесконечности приложены растягивающие усилия интенсивности P_1, P_2, P_3 , которые в свою очередь связаны между собой, ввиду выполнения условий идеального спая вдоль границы раздела слоев. При помощи интегрального преобразования Фурье задача сведена к системе трех сингулярных интегральных уравнений с ядрами типа Коши. Подробно рассмотрены частные случаи.

Путем граничного перехода получен случай двухслойной композиции, один слой которой содержит трещину. При этом задача сводится к решению одного сингулярного интегрального уравнения с ядром типа Коши, которое решалось численно с по-

пользовались интегральной формулы Гауса-Чебышева.

Решение этого уравнения непосредственно дает значения коэффициентов интенсивности напряжений у обеих вершин трещины. Показано, что условием оптимальности различного класса покрытий, предназначенных для защиты основы от внешней среды с позиции механики разрушения, может служить минимизация коэффициентов напряжений у ближе расположенной к свободной поверхности вершины трещины.

Из расчетов, в частности, вытекает, что увеличение жесткости покрытия более четырех раз в сравнении с жесткостью основного материала нецелесообразно, поскольку это увеличение не приводит к заметному влиянию на коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины, выходящейся в основном материале. Детально изучено также, как частный случай вышерассмотренной задачи, упругое равновесие полуплоскости с трещиной, подкрепленной полосой. Здесь также получены подтверждения вышесказанный вывод.

Сформулированы рекомендации, позволяющие выбрать физико-механические свойства материалов составляющих, а также геометрические параметры задачи таким образом, чтобы уменьшить риск зарождения и распространения трещины в основе или покрытии. Например, показано, в частности, что толщина покрытия, которое жестче основного материала в пять раз, для торможения трещины длиной l мм и расположенного на расстоянии l мм от границы раздела сред, колеблется в пределах $0,1$ мм.

В четвертой главе используя имитацию покрытий ряда авторами тонкими упругими накладками, подкрепляющими край упругой полуплоскости, рассмотрена задача об упругом подкреплении полуплоскости с прикреповой трещиной. Предполагается, что

накладку представляет собой тонкую упругую пластинку малой толщины, которая лишена изгибной жесткости и жестко сцеплена с краями полуплоскости, которая на бесконечности растягивается равномерно распределенными усилиями σ_{xx}^{∞} . В такой постановке значительно упрощаются граничные условия задачи. При помощи интегрального преобразования Фурье, задача свелась к решению сингулярного интегрального уравнения с ядром типа Коши.

Особое внимание уделимо влиянию на коэффициенты интенсивности напряжений треснутого и нетреснутого покрытия. При решении сингулярного интегрального уравнения в случае прикраевых дефектов использовалось условие однозначности смещений, т.е. трещины даже близко подходящие к границе раздела, рассматриваются как изолированные, с нулевым скачком перемещений у верхних трещины.

При расчетах разрушенной накладки или покрытия, принимали, что допустим скачок перемещений в точке выхода дефекта на упруго подкрепленный край полуплоскости. Практически дополнительным условием служило равенство нулю коэффициента интенсивности напряжений K_I у вершины трещины, лежащей на границе раздела сред поскольку порядок сингулярности напряжений в этом случае меньше $1/2$. В таблице приведены данные во сколько раз неразрушенное покрытие понижает коэффициент интенсивности напряжений по сравнению с разрушенным.

G_3 / G_1	:	0,1	:	1	:	10	:	∞
$K_I^{тр.} / K_I^{н.тр.}$:	1,08	:	1,12	:	2,0	:	4,1

где: G_3 - модуль сдвига накладки;

G_1 - модуль сдвига основного материала;

$K_I^{тр.}$ - коэффициент интенсивности напряжений
разрушенного покрытия;

$K_I^{н.тр.}$ - коэффициент интенсивности неразрушенного
покрытия.

В продолжении задач, рассмотренных в главе IV, найдена система сингулярных интегральных уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние полуплоскости, подкрепленной абсолютно жесткой накладкой и содержащей систему дефектов типа трещин и включений. Путем граничного перехода получено сингулярное уравнение, описывающее напряженно-деформированное состояние подкрепленной полуплоскости с прикрываемой системой параллельных периодически повторяющихся трещин. Рассмотрен случай, когда система трещин разрывает абсолютно жесткую накладку. Показано, что в этом случае существует граничное насыщение композиции дефектами, превышение которого не приводит к изменению упругого и граничного состояния композиции. Приведенные результаты полностью подтверждают, полученные ранее в этой главе.

В заключение приведен графический материал, позволяющий оценить эффективность работы неразрушенного покрытия.

Достоверность результатов подтверждается физической обоснованностью математической постановки задач слоистых композиционных материалов с трещинами, строгостью применения для их решения математического аппарата, согласованностью с основными положениями механики разрушения, а также совпадением полученных конечных результатов в частных случаях с известными в литературе данными, приведенными ранее другими авторами и другими методами.

Основные результаты и краткие выводы:

1. В дополнение и развитие известной задачи Зака о трещине, перпендикулярной границе раздела двух сред, детально изучено изменение степени сингулярности $q / b \sim z^{-q}$ у вершины жесткого пластинчатого включения. Показано, что если жесткое включение находится в более жесткой полуплоскости и перпендикулярно границе, то $1/2 < q < 1$, если в менее жесткой полуплоскости, то $0 < q < 1/2$. При одинаковых материалах полуплоскостей $q = \frac{1}{2}$. Аналогичная задача решена и в случае антиплоской деформации.

2. С целью моделирования границы раздела сред полосой конечной ширины, поставлена и решена задача о трехслойной композиции, средняя область которой имитирует буферную /переходящую/ зону между двумя контактирующими телами, что приближает расчетную схему к реальной.

3. Показано, что если жесткость одного материала /покрытия/ в десять раз больше жесткости другого материала /основного/, то по мере приближения трещины к линии раздела сред наблюдается разное падение коэффициента интенсивности напряжений у вершины находящейся ближе к линии раздела, причем коэффициент интенсивности напряжений у второй вершины тоже резко падает. Это затрудняет выход трещины на свободную поверхность, что важно для композиций, работающих в агрессивных средах. Для различных классов оптимальности с позиции механики разрушения может служить минимизация коэффициента интенсивности напряжений у вершины трещины, расположенной ближе к свободной или подкрепленной поверхности. Выбирая достаточную толщину защитного слоя и оптимальные физико-механические характеристики составляющих в значительной степени, удается

повысить прочность и трещиностойкость композиции в целом. Показано, что увеличение жесткости покрытия более чем в пять раз от жесткости основного материала нецелесообразно, поскольку дальнейшее ее увеличение не приводит к заметному влиянию на коэффициент интенсивности напряжений. Приведенный графический материал дает возможность сделать подробные выводы и о минимальной достаточной толщине покрытия для конкретных композиций.

4. С целью оценки прочности материалов с покрытиями с позиции механики разрушения, подробно исследовались задачи об упругом подкреплении полуплоскости с прикреповой или кривой трещиной. Влияние покрытия имитировалось упругой, в частности абсолютно жесткой накладкой, подкрепляющей край однородной изотропной полуплоскости.

5. Изучив взаимодействие подкрепляющей наклейки с имеющимися в основном материале трещинами и жесткими включениями, следует отметить, например, что неразрушенная упругая накладка $\frac{G_5}{G_1} = 10$, примерно в 2 раза понижает коэффициент интенсивности напряжений по сравнению с разрушенной, а абсолютно жесткая примерно в четыре раза и т.п.

6. Результаты работы были использованы при внедрении метода прогнозирования долговечности изделий из корпусной стали для реакторов АЗУ. Экономический эффект от внедрения с учетом долевого участия автора составляет 33 тыс. рублей в год.

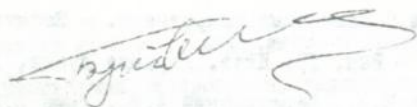
Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бугаевский И.П., Березинский Л.Т., Похмурский В.И. О

порядке сингулярности напряжений возле дефектов в компо-

- затех при антиплоской деформации. - ФХИМ, 1983, №2,
с. 102-103.
2. Похмурский В.И., Бережницкий Л.Т., Бутвинник И.П., Гнып И.П.
Оценка хрупкой прочности материалов с защитными покрытиями.
Диффузионное насыщение и покрытия на металлах /Сборник на-
учных трудов, Киев, "Наукова думка", 1982, с. 19-25.
 3. Похмурский В.И., Бережницкий Л.Т., Гнып И.П., Бутвинник И.П.,
Бенько Л.И. Аналитическое определение условий разрушения
материалов с защитными покрытиями. - Защитные покрытия на
металлах. - Вып. 18, Киев, Наукова думка, 1984, с.23 - 25.
 4. Похмурский В.И., Бережницкий Л.Т., Гнып И.П., Бутвинник И.П.
Бенько Л.И. К оценке разрушения плоскости с жестким подкре-
плением элементом. В кн.: Механика неоднородных структур.
Материалы I Всесоюзной конференции, Киев, Наукова думка,
1984, с. 221-226.
 5. Похмурский В.И., Бережницкий Л.Т., Стешук И.Т., Бутвинник И.П.
Бенько Л.И. Оптимизация строения покрытий при наличии в них
трещино-подобных дефектов. - Тезисы докладов II Всесоюзного
научно-технического семинара "Неклассические проблемы меха-
ники композиционных материалов и конструкций из них". Львов,
октябрь, 1984 г., Киев. Наукова думка, 1984, 58 с.
 6. Похмурский В.И., Бережницкий Л.Т., Стешук И.Т., Бутвин-
ник И.П. Оценка влияния дефектов типа трещин и включений
на напряженно-деформированное состояние материалов с пок-
рытиями. - Защитные покрытия на металлах, 1986, вып. 20,
с. 30-33.
 7. Бутвинник И.П. К теории дефектов типа трещин вблизи линии
раздела сред. - ФХИМ, 1989, №4, с. 102 - 103.

8. Сташук Н.Г., Бутвинник И.П. Смешанные задачи об упругом равновесии полуплоскости с прикресными краевыми дефектами типа трещин и включений. - Смешанные задачи механики деформируемого тела. II Всесоюзная конференция. Тезисы докладов, II часть, Одесса, 1989, с. 96.

A handwritten signature in cursive script, appearing to read "В.И. Сташук" (V.I. Stashuk), written in dark ink.

888.888

11

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

111111

Ab 25.388
Ab 25.388

42

Подписано к печати 9.10 91. Формат 60×84¹/₁₆. Усл. п. л, 0,93.
Тираж 100. Зак. 1822. Бесплатно.
Тип. ПТУ № 58. 290008. Львов, Ив. Федорова, 9.

61