

МПС - СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

Тонконог А.В.

НАПРЯЖЕНИЯ В ОПАСНЫХ СЕЧЕНИЯХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПЛАСТИН, ОСЛАБЛЕННЫХ ПОЛУКРУТЛЫМИ ВЫРЕЗАМИ И
ВЫРЕЗАМИ ТИПА "ГАЛТЕЛЬ"
(упругий и упругопластический расчет)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени канди-
дата технических наук

Научный руководитель, доктор
технических наук, профессор

АБРАМОВ В.В.

Днепропетровск

1966 год

НТБ
ДНУЖТ

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого совета или прислать свои отзывы о работе по адресу :

Днепропетровск, Севастопольская ул., 15 .
Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Публичная защита диссертации состоится на заседании Ученого совета " 14 " февраля 196 7 года.

НТБ
ДНУЖТ

Развитие современного машиностроения тесно связано с созданием и внедрением новых материалов (пластмасс, плакированных материалов, композиционных материалов и, в частности, биметаллов).

Отличительной особенностью биметаллов является то, что они позволяют получить совершенно новые физико-механические свойства, которыми каждый компонент в отдельности не обладает. Применение композиционных материалов позволяет намного снизить расходы дорогостоящих металлов, уменьшить вес элементов конструкций, сделать их долговечными, надежными и, вместе с тем, сравнительно дешевыми.

Однако внедрение биметаллов в машиностроении в настоящее время затруднено и не только по технологическим причинам, но и потому, что до сих пор нет достаточно надежного и простого метода исследования напряженного состояния в элементах конструкций из биметаллов, ослабленных различными концентраторами, при упругих и упругопластических деформациях.

Между тем в процессе проектирования перед конструктором неизбежно возникает вопросы: в каком соотношении и расположении следует назначить компоненты биметаллических элементов конструкций сложной формы, чтобы уменьшить концентрацию напряжений; каким образом влияет на концентрацию напряжений работа рассматриваемого элемента за пределами упругости; какой эффект дает расчет деталей за пределами упругости с учетом упрочнения материалов.

На эти вопросы отвечает реферируемая работа, являющаяся приложением к расчету элементов конструкций сложной формы метода, предложенного профессором В.В. Абрамовым.

Цель настоящей работы: получить простые и удобные для инже-

нерной практики решения по определению напряжений в опасных сечениях многослойных элементов конструкций сложной формы. В работе рассматривается целый класс, объединенных единым решением, элементов конструкций: однородные и биметаллические пластины (прямоугольные и конусные) с боковыми односторонними и двухсторонними полукруглыми вырезами и вырезами типа "галтель". Решения даются как при упругих, так и при упругопластических деформациях без учета и с учетом упрочнения материала.

Диссертационная работа состоит из пяти глав, введения, заключения и приложения.

В введении дается краткий критический обзор работ отечественных и зарубежных авторов по рассматриваемому вопросу. Показано, что развитие вопроса о концентрации напряжений шло, в основном, по трем направлениям: чисто аналитическому (Н.И. Мухелишвили, Г.В. Колосов, Г.Н. Савин, Г. Нейбер и др.), экспериментальному (М.М. Фрохт, С. Тимошенко, Э. Кокер, Л. Фэйлон, А. Гомза, Х. Липсон и др.) и экспериментально-теоретическому (Ю.А. Шиманский, Хетенъи, Н.Н. Афанасьев, А.В. Верховский, В.В. Абрамов). Наиболее широкое распространение в инженерной практике получили экспериментально-теоретические методы. Однако существующие методы дают возможность решить поставленную задачу лишь частично (только для однородных пластин и, как правило, только при упругих деформациях). Метод, используемый в диссертационной работе, позволяет исследовать напряженное состояние в многослойных пластинах при упругопластических деформациях. Решения для однородных пластин получаются как частные.

Сущность метода заключается в том, что вид гипотетического сечения не предполагается, а устанавливается путем физического или математического моделирования или на основании известных ре-

шений в теории упругости.

Общее решение задачи по определению напряжений в опасных сечениях пластин сложной формы дается в главе I.

Напряжения в волокнах, заключенных между двумя жесткими (гипотетическими) сечениями какого-либо тела произвольной формы, испытывающего линейное напряженное состояние, определяются по формуле:

$$\sigma = [e + (-y + y_0)\varphi] \lambda \cos \alpha E \quad (I)$$

в которой: $e = P/R_0$ - поступательное перемещение жесткого сечения,

$$\varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{M_0}{(R'_1)^2/R'_0 - R'_2} \quad - \text{ относительный угол поворота жесткого сечения или кривизна при изгибе,}$$

y - координата волокна, в котором определяется напряжение,

$$y_0 = \frac{R'_1}{R'_0} \quad - \text{ положение нейтрального волокна.}$$

Коэффициенты R'_0 , R'_1 и R'_2 соответственно равны:

$$R'_0 = \int_F \lambda E \cos^2 \alpha dF$$

$$R'_1 = \int_F \lambda E y \cos^2 \alpha dF$$

$$R'_2 = \int_F \lambda E y^2 \cos^2 \alpha dF$$

Когда не удается получить закон изменения входящих в приведенные формулы величин в виде непрерывной функции, а также при упругопластических расчетах данные формулы могут быть записаны в виде сумм.

Во всех приведенных выражениях функция $\lambda = f(x, y, z)$ представляет собой аналитическое выражение закона распределения длины волокон между жесткими сечениями рассматриваемого тела или функцию неразрывности деформаций:

$$\lambda_i = \frac{\frac{\sigma_i}{E_i} \cos \alpha_i}{\frac{\sigma_1}{E_1} \cos \alpha_1}, \quad \text{где}$$

σ_i - напряжение в любом „i“ -том волокне,

σ_1 - напряжение в каком-либо волокне, принятом за единицу измерения,

α_i - угол наклона рассматриваемого волокна к вертикали.

Для однородного тела с рядом параллельных вертикальных волокон

$$\lambda_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_1}$$

Выведенные для линейного напряженного состояния, эти формулы могут быть использованы и при плоском напряженном состоянии, когда

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \mu \sigma_x) \quad (2)$$

Если по ширине пластины соотношение между компонентами напряжений остается постоянным т.е.

$$\sigma_x = A \sigma_z,$$

то из формулы (2) получим:

$$\sigma_z = \epsilon_z \frac{E}{1 - \mu A} = \epsilon_z E'$$

В этом случае задача решается точно, для чего в формуле (I) достаточно подставить вместо E приведенный модуль

$$E' = \frac{E}{1 - \mu A}$$

Коэффициент пропорциональности A имеет вполне определенное значение ($A = 1$ при равноосном растяжении-сжатии и шаровом изгибе пластины, $A = \mu$ при цилиндрическом изгибе пластины и т.д.).

В опасном сечении пластин сложной формы соотношение между σ_1 и σ_2 по ширине пластины меняется. Между тем для рассматриваемого класса задач наибольшая величина σ_2 не превышает 10-15% от σ_1 , т.е. $\max A = 0,1 + 0,15$, поэтому с ошибкой не более 100. μ % полученное решение можно распространить и на данный случай (к примеру, для материалов с коэффициентом поперечной деформации $\mu = 0,3$ наибольшая ошибка составит 100. $0,15 \cdot 0,3 = 4,5$ %).

Функция непрерывности деформаций $\lambda = f(x, y, z)$ определялась экспериментально для опасного сечения пластины как отношение напряжения в любом слое σ ; к напряжению на контуре выреза σ_{\max} .

Эксперимент осуществлялся на моделях больших размеров с помощью тензометрирования. Аппроксимация функции дала единое аналитическое выражение $\lambda = f(x, y, z)$ для всех, рассмотренных в работе, пластин. Определенная при осевом растяжении однородной пластины функция $\lambda = f(x, y, z)$ остается практически неизменной и для других видов нагружения (чистый изгиб, внецентренное растяжение-сжатие). Значения λ справедливы как для однородных, так и для биметаллических пластин при упругих и упруго-пластических деформациях.

Во второй главе дается упругое решение при осевом растяжении

-сжатии, чистом изгибе и внецентренном растяжении-сжатии прямоугольных пластин с двумя боковыми симметричными полукруглыми вырезами и вырезами и типа "галтель". Получены простые и удобные для практического использования расчетные формулы, а также формулы для определения максимальных напряжений и теоретических коэффициентов концентрации напряжений при осевом растяжении-сжатии и чистом изгибе. В таблице I приводятся значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений при осевом растяжении-сжатии биметаллической пластины $a/\rho = 3,0$, ослабленной двухсторонними симметричными вырезами типа "галтель" (a - половина ширины пластины в ослабленном сечении, ρ - радиус галтели). Пластина состоит из материалов А и В. Из "n" слоев, на которое разбивается опасное сечение пластины, "m" слоев составляет материал А. Отношение модулей упругости компонентов может быть любым ($k = E_A/E_B$). При $k = 1$ пластина является однородной.

Таблица I

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжения при осевом растяжении биметаллической пластины с двумя боковыми вырезами типа "галтель" ($a/\rho = 3,0$)

$k \setminus \frac{m}{n}$: 0,1	: 0,2	: 0,3	: 0,4	: 0,5
0,3	1,925	1,961	1,992	1,95	1,998
0,5	1,89	1,93	1,94	1,942	1,94
0,75	1,87	1,88	1,882	1,905	1,882
1,0	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84
1,5	1,80	1,79	1,785	1,788	1,79
2,0	1,765	1,74	1,74	1,745	1,76

Из анализа таблицы следует, что с увеличением коэффициента $K > 1$ (на контуре пластины материал с большим модулем упругости) величина коэффициента концентрации существенно уменьшается и наоборот.

Сравнение частных решений для однородных пластин с данными других авторов показало хорошую точность приведенных решений.

Прямоугольные пластины с односторонними боковыми вырезами и вырезами типа "галтель" рассматриваются в главе III. В результате проведенного эксперимента доказано, что функция неразрывности деформации $\lambda = f(x, y, z)$ для пластин с односторонними вырезами остается такой же, как и в пластинах с аналогичными двухсторонними вырезами, а поэтому все основные формулы, полученные в главе II, справедливы также и для данной задачи.

В главе IV дается решение для конусных пластин с боковыми полукруглыми вырезами и вырезами типа "галтель", представляющих большой практический интерес (зуб шестерни, конусная втулка с кольцевой выточкой и др.). Расчеты показали, что коэффициенты R'_1, R'_2 и R'_2 для прямоугольных и соответствующих конусных пластин остаются практически постоянными, а значения λ от контура выреза до нейтральной линии изменяется на $\cos(\theta - \beta)$ (где $\theta - \beta$ - угол, соответствующий дуге окружности между контуром выреза и нейтральной линией). Очевидно и для конусных пластин также справедливы формулы, выведенные в главе II.

Главе V посвящена расчету пластин за пределами упругости. За условие перехода из упругого состояния в пластическое принята энергетическая теория предельного состояния, согласно которой при

плоском напряженном состоянии, имеющем место в опасном сечении пластин сложной формы, эквивалентные (обобщенные) напряжения σ_i равны

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}$$

Анализ расчетных данных показал, что наибольшие расхождения между обобщенными σ_i и первыми главными напряжениями σ_1 для пластин с полукруглыми вырезами не превышают 10%, а для пластин с галтельным сопряжением - 8%. В местах же, непосредственно прилегающих к контуру выреза, эти расхождения еще меньше (4-6%). На основании этого в расчетах используются формулы, полученные в предыдущих главах.

Решения приводятся для материалов неупрочняющихся, упрочняющихся по линейному и степенному закону, а также по любому известному закону (графо-аналитический метод).

Для каждого указанного случая даются простые и удобные формулы для определения максимальных напряжений и величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений.

В приложении собраны таблицы значений функции непрерывности деформаций $\lambda = f(x, y, z)$ для рассматриваемых пластин, величины теоретических коэффициентов концентрации, а также расчетные данные, соответствующие приведенным в работе числовым примерам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. В работе решены задачи по определению напряжений в опасных сечениях прямоугольных и конусных (однородных и биметаллических) пластин с боковыми двухсторонними и односторонними полукруглыми вы-

резами и вырезами типа "галтель" при упругих и упругопластических деформациях. Решение при упругопластических деформациях приводится для пластин, изготовленных из материалов неупрочняющихся, а также для материалов, упрочняющихся по линейному и степенному закону. Применение графо-аналитического метода позволило решить задачу для материалов, упрочняющихся по любому известному закону (закон упрочнения при этом может задаваться диаграммой $\sigma - \epsilon$).

2. Определены теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_T при упругих и упругопластических деформациях.

3. Получено аналитическое выражение для гипотетического сечения рассматриваемых пластин. В работе показано, что для весьма большого класса пластин (прямоугольные пластины с односторонними и двухсторонними полукруглыми вырезами, прямоугольные пластины с односторонними и двухсторонними вырезами типа "галтель", конусные пластины с аналогичными вырезами), вид гипотетического сечения описывается одним и тем же уравнением. Полученные уравнения простые и поэтому позволяют с малыми вычислительными работами решать также сложные задачи, как исследование напряженного состояния в опасных сечениях биметаллических пластин с различными концентраторами напряжений за пределами упругости.

4. Выполнены большие вычислительные работы по определению теоретического коэффициента концентрации напряжений α_T для различных относительных размеров выреза и различного соотношения компонентов, составляющих биметаллическую пластину, при упругих и упругопластических деформациях.

5. Формулы, выведенные при решении упругопластической задачи с учетом линейного упрочнения материала, могут быть применены

и при решении задач, связанных с ползучестью. Для этого достаточно по известным кривым ползучести при постоянных напряжениях построить изохронные кривые ползучести для различных промежутков времени.

6. Полученные решения позволяют наиболее рационально назначать составляющие биметаллических элементов конструкций, их процентное соотношение и взаимное расположение, уменьшить вес и увеличить долговечность данных конструкций.

НТБ
ДНУЖТ

Материалы диссертационной работы опублико-
ваны в работах :

1. Тонконог А.В. Прямоугольные пластины с боковыми симметричными вырезами типа "галтель". В сб. "Напряжение в опасных сечениях элементов конструкций сложной формы", под ред. проф. Абрамова В.В., изд. ХГУ, 1966 г (на укр. языке).

2. Тонконог А.В. Прямоугольные пластины с односторонними вырезами типа "галтель" (там же).

3. Тонконог А.В., Чеботарев В.А. Прямоугольные пластины с односторонней выкружкой (там же).

4. Тонконог А.В., Кубиков К.Ф. Конусные пластины с боковыми полукруглыми вырезами (Там же).

5. Тонконог А.В., Киреев А.А. Конусные пластины с боковыми вырезами типа "галтель" (там же).

6. Тонконог А.В., Чеботарев В.А. Пластины, ослабленные боковыми полукруглыми вырезами и вырезами типа "галтель". В сб. "Упругопластическая деформация биметаллических элементов конструкций Под ред. проф. Абрамова В.В., Изд. ХГУ, г. Харьков (в печати).

Диссертационная работа доложена на :

1. Отчетной научно-технической конференции Запорожского машиностроительного института 12. III - 1966 г.

2. Научном семинаре Запорожского филиала Днепропетровского металлургического института 22. X - 1966 г.

3. Семинаре по механике Днепропетровского Государственного Университета 17. XII - 1966 г.