

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ЩЕГЛОВ Александр Александрович

**НЕКОТОРЫЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ
ДЛЯ ПЛАСТИН С ПОДКРЕПЛЕННЫМ КРАЕМ**

Специальность 01.02.03. — строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск 1980

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре высшей математики Николаевского
ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительного института
им. адм. С. О. Макарова

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент РУДЕНКО А. Г.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,
профессор ГУБЕНКО В. С.
кандидат физико-математических наук,
ст. научный сотрудник КУЛИК А. Н.

ведущее предприятие – Львовский ордена Ленина политехни-
ческий институт им. Ленинского ком-
сомола

Защита состоится "30" Октября 1980 г в "15⁰⁰ часов на
заседании специализированного совета К П4.07.02 Днепропетровского
института инженеров железнодорожного транспорта им. И. И. Калинина.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные пе-
чатью, просим направлять по адресу: 320 629, ГСП, г. Днепропетровск,
10, ул. Университетская, 2, ДИИТ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "24" сентября 1980 г

Ученый секретарь специализированного совета, к. т. н., доцент
Ю. А. РАДЗИХОВСКИЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В современном машиностроении, судостроении широко распространены пластинчатые элементы, сочетающие в себе высокую прочность и легкость. Особенно важным является учет этих свойств при проектировании легких и компактных высоконапряженных конструкций из дорогостоящих материалов. Поэтому пластинки широко используются в конструкциях летательных аппаратов, ядерных реакторов, турбин и парогенераторов. Часто в пластинчатых элементах выполняются отверстия различной формы по эксплуатационным соображениям (люки, двери, лазы, технологические вырезы) или для уменьшения веса.

Вокруг отверстий возникает зона повышенных напряжений.

Подкрепление контуров отверстий снижает концентрацию напряжений в пластине.

6958a
Эксплуатация конструкции под нагрузкой, приводящей к появлению зон пластических деформаций в подкрепляющих элементах, позволяет использовать дополнительные резервы материала и увеличить несущую способность конструкции.

Допущение работы материала за пределом упругости требует, в свою очередь, решения соответствующей упруго-пластической задачи.

Теоретические решения ряда упруго-пластических задач для пластин с неподкрепленными отверстиями различной формы получены в работах Л.А.Галина, Д.Д.Ивлева, Р.Д.Керимова, А.С.Космодамианского, О.С.Парасюка, Г.Н.Савина, И.Ю.Хомы, Л.П.Хорошуна, Г.П.Черепанова, К.Н.Шевченко, *V. Budiansky*, *R. Vidensek* и др.

Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния пластин с отверстиями за пределом упругости представ-

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

НТБ
ДНУЖТ

лены в работах Я.А.Александрова, М.Х.Ахметзянова, П.Г.Богдыль, Н.И.Пригоровского, П.С.Тескариса, *Kašata K* и др.

В настоящей работе методами теории функций комплексного переменного получены решения некоторых упруго-пластических задач для пластинок с отверстиями, имеющими по контуру локальное изменение толщины в виде подкрепляющих колец или выточек. В основу решений положены уравнения упруго-пластического изгиба кривого бруса для упрочняющихся материалов.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является: исследование напряженного состояния пластин с подкрепленными отверстиями с учетом работы материала подкреплений за пределом упругости; изучение влияния физико-геометрических характеристик подкрепляющих колец на величину и распределение зон пластических деформаций возле отверстий различной формы и на несущую способность пластинки.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Впервые рассмотрено упруго-пластическое деформирование пластинок с отверстиями, имеющими по контуру локальное изменение толщины в виде подкрепляющих колец или выточек.

В работе получены уравнения упруго-пластического изгиба кривого бруса для упрочняющихся материалов. На их основе построен алгоритм решения упруго-пластических задач для пластинок с круговым, эллиптическим отверстиями и двумя неравными круговыми отверстиями, имеющими по контуру локальное изменение толщины.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Полученные в работе результаты могут быть использованы в расчетах для определения несущей способности пластинчатых элементов с отверстиями, имеющими по контуру подкрепления или выточки. Обширная числовая информация представлена в форме таблиц и графиков, удобных для использования в практических расчетах.

В результате обработки числовой информации получены формулы для определения допустимых значений параметра нагружения.

ДРУКЪ

По договорам о творческом содружестве, заключенным Николаевским ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительным институтом им. адм. С. О. Макарова с одним из ведущих конструкторских бюро и с предприятием г. Николаева результаты диссертационной работы используются в расчетах пластинчатых конструкций. Ожидаемый экономический эффект от внедрения - 18 тыс. руб. в год.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на межвузовских научно-технических конференциях в Николаевском кораблестроительном институте (г. Николаев, 1974-1978 г.г.), на семинарах кафедры механики Львовского государственного университета (г. Львов, 1977 г), кафедры высшей математики Новороссийского высшего инженерного морского училища (г. Новороссийск, 1977 г) и в отделе Института прикладных проблем математики АН УССР (1978 г).

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликованы статьи [1-5].

ОБЪЕМ. Работа состоит из введения, 4 глав, добавления, общих выводов, списка литературы из 62 наименований, приложения, содержащего документы о внедрении, и содержит 160 страниц машинописного текста, 80 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан обзор литературы по исследованиям за пределом упругости напряженного состояния пластин с отверстиями различной формы, кратко изложено содержание работы, отмечены полученные в ней новые результаты и основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе приведены основные соотношения плоской задачи теории упругости для изотропной среды, дан вывод уравнений упруго-пластического изгиба кривого бруса, имеющего трапециевидное поперечное сечение, получены граничные условия сопряжения многосвязной пластинки с подкрепляющими кольцами.

Уравнения упруго-пластичного изгиба кривого бруса для материала с полигональной аппроксимацией кривой деформирования, полученные с учетом гипотез плоских сечений и в предположении, что давление продольных волокон друг на друга не сказывается существенно на распределение напряжений в брус, имеют вид:

$$\xi_0 = \frac{D^*(P^* - M) + (F - R_p^*)(A^* - \tau D^*)}{\tau E [B^*(A^* - \tau D^*) - (D^*)^2]} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D^*(R_p^* - F) - B^*(R_p^* - M)}{E [B^*(A^* - \tau D^*) - (D^*)^2]} \quad (2)$$

где $A^* = (\tau_e - \tau) S_e + \beta_n^* S_p (\tau_p - \tau);$

$$C_e^* = S_e - \tau J_e; \quad C_p^* = S_p - \tau J_p;$$

$$D^* = C_e^* + \beta_n^* C_p^*; \quad R_p^* = \alpha_n^* \sigma_T S_p;$$

$$R_p^* = R_p^* (\tau_p - \tau); \quad B^* = J_e + \beta_n^* J_p;$$

$$J_e = \iint_{S_e} \frac{dS}{\rho}; \quad J_p = \iint_{S_p} \frac{dS}{\rho};$$

$\xi_0 = \frac{\delta \alpha l}{d l}$ - относительная деформация волокна, проходящего через центр тяжести сечения;

$\beta = \frac{\delta \alpha d \theta}{d \theta}$ - относительное приращение угла поворота сечения при деформации;

S_e и S_p - соответственно площади упругой и пластической зон в поперечном сечении бруса;

τ_e и τ_p - соответственно радиусы кривизны центров тяжести упругой и пластической зон;

ρ и τ - соответственно радиусы кривизны рассматриваемого волокна и волокна, проходящего через центр тяжести поперечного сечения бруса;

σ_T - напряжение, равное пределу текучести материала бруса;

НИИ
ДНУЖТ

α_n^* и β_n^* - коэффициенты полигональной аппроксимации;
 M и F - соответственно изгибающий момент и растягивающая сила, действующие в поперечном сечении бруса;
 E - модуль упругости материала бруса.

Из уравнений (1) и (2) следуют важные частные случаи:

1) упругий изгиб кривого бруса; 2) упруго-пластический изгиб кривого бруса для материала с линейным упрочнением.

В последнем параграфе главы получены граничные условия сопряжения многосвязной пластинки с подкрепляющими кольцами.

Общие соотношения и уравнения, приведенные в первой главе, используются в последующих главах для решения конкретных задач.

Во второй главе для полигональной аппроксимации кривой деформирования дана постановка и приведено теоретическое решение упруго-пластической задачи о двухосном неоднаковом растяжении усилиями p и q бесконечной изотропной пластинки с круговым отверстием, имеющим по контуру локальное изменение толщины.

Величина растягивающих усилий p и q такова, что пластинка деформируется упруго, а в кольце возникают зоны пластических деформаций. Необходимо определить напряженное состояние пластинки и кольца, а также распределение пластических зон в кольце.

Напряженное состояние пластинки будем описывать комплексными потенциалами Колосова-Мусхелишвили, а напряженное состояние кольца - уравнениями упруго-пластического изгиба кривого бруса для материала с полигональным упрочнением.

Граничные условия сопряжения пластинки с кольцом имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - e^{-2i\theta} [t \overline{\Phi_1'(t)} + \overline{\Psi_1(t)}] &= \frac{p_1}{\mu_2 h}; \\ \alpha \Phi_2(t) - \overline{\Phi_2(t)} + e^{-2i\theta} [t \overline{\Phi_2'(t)} + \overline{\Psi_2(t)}] &= 2\mu \Pi_2; \quad (3) \end{aligned}$$

ДРУЖИТ

где $\Pi_1 = (F - LQ) - i \frac{d}{d\theta} (F - LQ); \quad \Pi_2 = \varepsilon_2 + i\Theta;$

$$Q = \frac{1}{\rho_2} \frac{d}{d\theta} [M - (\rho_2 - r)F];$$

ε_2 и Θ - соответственно относительное удлинение элемента контура dS и угол поворота касательной к L при деформации;

μ и \varkappa - соответственно модуль сдвига и упругая постоянная для пластинки;

F, Q и M - соответственно растягивающая, перерезывающая силы и изгибающий момент, действующие в поперечном сечении подкрепляющего кольца;

r - радиус кривизны осевой линии кольца;

ρ_2 - радиус отверстия;

h - толщина пластинки.

Используя конформное отображение $z = \rho_2 \zeta$, граничные условия

(3) приведем к виду:

$$\Phi(\sigma) + \overline{\Phi(\sigma)} - \frac{1}{\sigma^2} [\sigma \overline{\Phi'(\sigma)} + \overline{\Psi(\sigma)}] = \frac{\Pi_1(\sigma)}{h\rho_2}; \quad (4)$$

$$\varkappa \Phi(\sigma) - \overline{\Phi(\sigma)} + \frac{1}{\sigma^2} [\sigma \overline{\Phi'(\sigma)} + \overline{\Psi(\sigma)}] = 2\mu \Pi_2(\sigma),$$

где $\sigma = e^{i\theta}$

Выражение для напряжений, действующих в упругой области поперечного сечения кольца, с учетом принятых выше гипотез запишется следующим образом:

$$\sigma = E \left[\frac{\rho_2}{\rho} (\varepsilon_2 - \beta) + \beta \right] \quad (5)$$

Условие пластичности для данной задачи имеет вид:

$$\sigma = \sigma_T \quad (6)$$

Используя выражение (5), условие пластичности (6) перепишем

в таком виде:

$$\sigma_T = E \left[\frac{\rho_2}{\rho_T} (\varepsilon_2 - \beta) + \beta \right],$$

откуда

$$\rho_r = \frac{\rho_2}{\epsilon_r} \cdot \frac{(\epsilon_2 - \beta)}{(\epsilon_r - \beta)} \quad (7)$$

Здесь ρ_r — радиус кривизны волокна, отделяющего пластическую зону от упругой;

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r}{E}$$

Присоединяя выражение (7) к граничным условиям (4), получим полную систему уравнений, необходимых для решения задачи.

Представляя искомые функции Φ , Ψ , ϵ_2 , β и ρ_r в виде рядов Фурье в комплексной форме, методами теории функций комплексного переменного получаем бесконечную систему нелинейных алгебраических уравнений. Усеченная система уравнений решалась на ЭВМ методом последовательных приближений. За первое приближение принималось решение упругой задачи. После нахождения корней системы уравнений определялось напряженное состояние пластинки и кольца и распределение пластических зон в кольце.

Если по контуру отверстия пластинки имеется локальное изменение толщины в виде выточек различного профиля, то, охватывая выточку цилиндрической поверхностью радиуса ρ_2 , получаем кольцо, к которому применяется та же расчетная схема, что и для случая пластинки с подкрепляющим кольцом.

Во втором и третьем параграфах главы представлена числовая информация для пластинки с подкрепленным круговым отверстием и для пластинки с круговым отверстием, имеющим по контуру выточки различного профиля.

Исследовано влияние физико-геометрических характеристик пластинки и кольца на коэффициент концентрации напряжений.

НТБ
ДНУЖТ

$$K_i = \frac{\sigma_a}{q} \text{ и параметр пластических зон } (\omega) = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{B}$$

где B - ширина кольца,

σ_{a_i} - напряжение, определяемое на внутреннем контуре кольца или на контуре спая пластинки с кольцом.

Обработка числовой информации позволила получить приближенные формулы инженерного вида, позволяющие определить допустимые значения параметра нагружения $(\frac{q}{\sigma_T})_{\text{доп.}}$ для подкреплений и выточек с различными геометрическими и физическими параметрами. Здесь под допустимым понимается то значение параметра нагружения $\frac{q}{\sigma_T}$, при котором пластические зоны достигают контура спая пластинки с кольцом.

В случае пластинки с подкрепленным круговым отверстием, подверженной на бесконечности двухосному одинаковому растяжению, эти формулы имеют вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{q}{\sigma_T}\right)_{\text{доп.}} = & \frac{1}{2} + 0,725 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) + (0,48 - 0,45 \frac{\rho_1}{\rho_2}) \\ & \left(\frac{h_2}{h} - 1\right) + 0,0215 (K^* - 0,052) \end{aligned} \quad (8)$$

$$1 \leq \frac{h_2}{h} \leq 2, \quad 0,8 < \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1$$

где h и h_2 - соответственно толщина пластинки и кольца,

$K^* = \frac{E_p}{E}$ - параметр упрочнения материала кольца.

Отношение $\frac{h_2}{h} = 1$ характеризует пластинку с неподкрепленным круговым отверстием, а $K^* = 0$ характеризует идеально пластический материал кольца.

Для частного случая задачи, т.е. для случая неподкрепленного отверстия, проведено сравнение с точным решением, полученным Г.П.Черепановым, которое показало хорошее совпадение результатов.

В третьей главе дано теоретическое решение упруго-пластической задачи для пластинки с эллиптическим отверстием, имеющим

по контуру локальное изменение толщины в виде подкрепляющих колец или выточек. Задача решалась в той же постановке, что и для пластинки с круговым отверстием. Для материала кольца принята линейная аппроксимация кривой деформирования.

Граничные условия на контуре L имеют вид:

$$\begin{aligned} \psi_1(t) + t \overline{\psi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} &= f_1 + C_1^*; \\ \pm \psi_1(t) - t \overline{\psi_1'(t)} - \overline{\psi_1(t)} &= f_2 + C_2^*; \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь

$$f_1 = \frac{i}{h} \int_0^{\Delta} \frac{e^{i\alpha}}{\rho_2} p_1 ds; \quad f_2 = 2\mu i \int_0^{\Delta} e^{i\alpha} p_2 ds;$$

α - угол между внешней нормалью к L^0 и осью Ox , отсчитываемый от этой оси;

Δ - дуга контура L , отсчитываемая от произвольной его точки;

C_1^* и C_2^* - произвольные комплексные постоянные.

В правые части граничных условий (9) входят уравнения упруго-пластического изгиба кривого бруса, которые для случая линейной аппроксимации кривой деформирования запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{F}{ES} + \frac{M}{\tau ES} \cdot \frac{(C_e^* + C_p^* + S)}{(C_e^* + D_p)}; \\ \xi_0 &= \frac{F}{ES} + \frac{M}{\tau ES} \cdot \frac{(C_e^* + C_p^*)}{(C_e^* + D_p)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь: $D_p = A_p + K^* \tau J_p$; $A_p = (1 - K^*) \left(1 - \frac{\tau - \tau_p}{\rho_\tau}\right) S_p$;

$$C_p^* = \tau (B_p + K^* J_p); \quad B_p = \frac{(1 - K^*)}{\rho_\tau} S_p; \quad C_e^* = \tau J_e - S;$$

S - площадь поперечного сечения кольца.

Методами теории функций комплексного переменного решение задачи приводится к решению бесконечной системы нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложений функций ξ_2 , β и ρ_τ в ряды Фурье. Усеченная система уравнений решалась на ЭВМ методом последовательных приближений.

За первое приближение принималось упругое решение задачи.

Числовая информация представлена для случаев, когда пластические зоны частично или полностью охватывают контур эллиптического отверстия. Исследовано влияние физико-геометрических характеристик на напряженное состояние пластинки и кольца и распределение пластических зон в кольце.

Для случая двухосного одинакового растяжения пластинки получены формулы вида (8), позволяющие определять допустимые значения параметра нагружения для колец и выточек с различными физико-геометрическими характеристиками.

В четвертой главе рассматривается двухосное неодинаковое растяжение за пределом упругости пластинки с двумя неравными круговыми отверстиями, имеющими по контуру подкрепления или выточки.

Граничные условия на контуре L_ν одного из отверстий имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi_\nu(t) + (t - \bar{t}) \overline{\varphi'_\nu(t)} + \overline{\chi_\nu(t)} &= f_1^{(\nu)} + C_1^{(\nu)}; \\ \mp \varphi_\nu(t) - (t - \bar{t}) \overline{\varphi'_\nu(t)} + \overline{\chi_\nu(t)} &= f_2^{(\nu)} + C_2^{(\nu)}; \\ (t \in L_\nu; \nu = 1, 2). \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} f_1^{(\nu)} &= \frac{i}{h} \int_0^{2\pi} \frac{e^{i\alpha\nu}}{R_\nu} \Pi_1^{(\nu)} dS_\nu; & f_2^{(\nu)} &= 2\mu i \int_0^{2\pi} e^{i\alpha\nu} \Pi_2^{(\nu)} dS_\nu; \\ \varphi_\nu(t) &= \Gamma \omega_\nu(\sigma_\nu) + \sum_{\kappa=1}^{\infty} \alpha_\kappa^{(\nu)} \sigma_\nu^{-\kappa} + \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(\nu)} \sigma_\nu^m; \\ \chi_\nu(t) &= (\Gamma + \Gamma') \omega_\nu(\sigma_\nu) + \sum_{\kappa=1}^{\infty} \beta_\kappa^{(\nu)} \sigma_\nu^{-\kappa} + \sum_{m=0}^{\infty} B_m^{(\nu)} \sigma_\nu^m; \\ \omega_\nu(\sigma_\nu) &= \varrho + R_\nu \sigma_\nu; \end{aligned}$$

$$A_m^{(n)} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m,k} \psi_{m,k}^{(j)} \alpha_k^{(j)};$$

$$B_m^{(n)} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m,k} \psi_{m,k}^{(j)} \beta_k^{(j)};$$

$$\sum_{m,k} \psi_{m,k}^{(j)} = (-1)^k \frac{C_{m+k-1} \cdot R_0^m \cdot R_j^m}{e^{m-k}};$$

R_0 - радиус j -ого отверстия;

e - расстояние между центрами отверстий,

$C_1^{(n)}$ и $C_2^{(n)}$ - произвольные комплексные постоянные.

Методом рядов решение этой задачи приводится к бесконечной системе нелинейных алгебраических уравнений, которая после усе-
чения решается на ЭВМ методом последовательных приближений.

На основе полученного решения изучалось взаимное влияние
двух равных круговых отверстий, имеющих по контуру локальное
изменение толщины в виде подкрепляющих колец или выточек, на
величину пластических зон в кольцах и на напряженное состояние
пластинки и колец.

В "Добавлении" выясняются границы применимости выбранной
расчетной схемы и проводится сравнение теоретических результа-
тов с экспериментальными, полученными нами и другими авторами.
Сравнение результатов показывает хорошее их совпадение.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Методами теории функций комплексного переменного с ис-
пользованием уравнений упруго-пластического изгиба кривого бру-
са в работе получено решение некоторых упруго-пластических за-
дач для пластинок с отверстиями, имеющими по контуру локальное
изменение толщины в виде подкрепляющих колец или выточек.

Исследовано напряженное состояние пластинок, колец и уста-
новлены границы зон пластических деформаций в кольцах.

ИТБ
ДРУЖТ

2. Бесконечные системы нелинейных алгебраических уравнений, получаемые при решении рассматриваемых задач, после усечения решались на ЭВМ методом последовательных приближений.

Результаты численной реализации каждой из рассмотренных задач представлены в виде таблиц и графиков, удобных для использования в инженерных расчетах.

3. Показано, что использование дополнительных резервов материала существенно увеличивает несущую способность пластинки с кольцом по сравнению со случаем их упругого деформирования.

4. Значения коэффициента концентрации напряжений на свободном контуре кольца (при наличии в нем зон пластических деформаций) уменьшаются с увеличением нагрузки, приложенной к пластинке, а на контуре слая пластинки с кольцом практически неизменны. С увеличением внешних нагрузок зоны пластических деформаций, возникающие в кольцах, увеличиваются.

Установлены те значения допустимых нагрузок, при которых зоны пластических деформаций достигают контура пластинки.

5. Диапазон допустимых нагрузок, при котором рабочий режим пластинки остается еще упругим, с увеличением ширины и высоты подкрепляющих колец расширяется, что важно во многих прикладных задачах.

6. Установлено, что наличие различного рода выточек (прямоугольных, трапецидальных, треугольных) приводит к увеличению зон пластических деформаций.

7. Показано, что выбор материала подкрепляющих колец влияет на значения допустимых нагрузок. В кольце, изготовленном из материала с большим параметром упрочнения, пластические зоны достигают контура слая при больших значениях внешней нагрузки. Таким образом, увеличивая параметр упрочнения материала кольца, можно повысить несущую способность конструкции в целом.

8. Показано, что даже небольшое стиличие характера нагружения от двухосного одинакового приводит к существенному изменению формы границы зон пластических деформаций у контуров рассматриваемых типов отверстий, что необходимо учитывать при проектировании пластинчатых элементов конструкций.

9. Установлено, что степень неравномерности распределения напряжений по контуру отверстий можно уменьшить, если допустить упруго-пластическое деформирование пластинки. Если же контур отверстия подкреплен кольцом, то упруго-пластическое деформирование подкрепляющего кольца в еще большей степени сглаживает неравномерность распределения напряжений по контуру отверстия и по свободному контуру кольца.

10. В результате обработки числовой информации получены удобные в инженерных расчетах формулы для определения допустимых значений параметра нагружения. Формулы получены для случая двухосного одинакового растяжения пластинки с круговым или эллиптическим отверстием, имеющим по контуру локальное изменение толщины в виде кольца или выточки.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих статьях автора:

1. Об одном виде уравнений упруго-пластического изгиба кривого бруса. - Труды Николаевского кораблестроительного института, вып. 90, Николаев, 1973 (в соавторстве с А.Г.Руденко и А.В.Щербаной).

2. Исследование напряженного состояния пластинки с подкрепленным круговым отверстием при упруго-пластическом деформировании подкрепляющего кольца. - Труды Николаевского кораблестроительного института, вып. 105, Николаев, 1975 (в соавторстве с А.Г.Руденко и А.В.Щербаной).

3. Напряженное состояние пластинки с эллиптическим отверстием, подкрепленным кольцом при его упруго-пластическом деформировании. -

Труды Николаевского кораблестроительного института, вып.129, Николаев, 1977 (в соавторстве с А.Г. Руденко).

4. Упруго-пластическая задача для пластинки с двумя равными круговыми отверстиями, имеющими по контуру локальное изменение толщины.- Труды Николаевского кораблестроительного института, вып.129, Николаев, 1977.

5. Упруго-пластическая задача для пластинки с двумя неравными круговыми отверстиями, имеющими по контуру выточки. Труды НКИ, вып. 141, Николаев, 1978, с.78-81.