

ОЦЕНКА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИДЕ ОТВЕРСТИЙ*

В. С. ГУДРАМОВИЧ, А. В. РЕПРИНЦЕВ, С. А. РЯБОКОНЬ, Е. В. САМАРСКАЯ

Ин-т технической механики НАНУ и Гос. космического агентства Украины. 49005, г. Днепрпетровск-5,
ул. Лешко-Попеля, 15. E-mail: office.itm@nas.gov.ua

Исследованы оболочечные конструкции ракетно-космической техники с отверстиями, которые являются основным видом концентраторов напряжений при пластическом деформировании материала. При исследовании напряженно-деформированного состояния применены разработанные проекционно-итерационные схемы реализации вариационно-точного метода конечных элементов, существенно уменьшающие машинное время расчета по сравнению с традиционным методом конечных элементов (на одной мелкой сетке). На основе разработанного программного обеспечения исследованы задачи напряженно-деформированного состояния при осевом нагружении оболочечно-пластинчатых элементов конструкций с отверстиями с учетом их взаимного влияния при пластических деформациях. Соответствующий анализ дает возможность выбора геометрических параметров элементов конструкций, отверстий, их формы и расстояний между ними, стратегии нагружения, влияющих на несущую способность. Проведен численный анализ влияния подкреплений отверстий. Предложена схема прогнозирования несущей способности отсеков с учетом трансформации зон пластических деформаций при нагружении. Проведено внедрение результатов при расчетах конкретных ракет-носителей. Библиогр. 12, рис.13.

Ключевые слова: оболочечные конструкции ракетно-космической техники, пластическое деформирование, методология оценки ресурса, несущая способность

Одним из приоритетных направлений научно-технических разработок в Украине является ракетно-космическая техника (РКТ). Конструкции РКТ находятся под действием интенсивных нагрузок разного вида (осевая сила – действие двигателей; давление (внутреннее – наддув в топливных баках, внешнее – поверхностное давление); поперечные нагрузки – маневры на активном участке полета, транспортировка, хранение; импульсное нагружение – старт, включение и выключение двигателей, аварийное прекращение пуска и др.). Основную опасность для прочности представляет концентрация напряжений, возникающая вследствие наличия отверстий-люков или других концентраторов напряжений (КН) (подкреплений, накладок, структурных дефектов и повреждений). Люки предназначены для проведения технологических операций в элементах внутренней структуры ракет-носителей (РН). Концентрация напряжений является опасной при эксплуатации объектов РКТ. Она может вызвать преждевременное разрушение или появление недопустимых деформаций.

Конструкции РКТ эксплуатируются при высоком уровне нагрузок. Определение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности (НС), необходимых для оценки и продления ресурса элементов конструк-

ций РКТ, должно осуществляться с учетом пластического деформирования материала (ПД).

Разработана методология численных исследований НДС и оценки ресурса неоднородных конструктивных элементов объектов РКТ в зонах расположения КН.

Исследования проводились по таким направлениям:

- анализ конструктивного оформления современных РН с концентраторами напряжений. Постановка задач оценки прочности, НС и ресурса;
- разработка общих численных методов расчета прочности пластинчато-оболочечных конструкций РН на основе новых проекционно-итерационных (ПИ) схем метода конечных элементов (МКЭ) с учетом ПД для оценки ресурса конструкций РКТ;
- разработка численных методов решения задач оценки прочности и ресурса конструкций РН при учете взаимного влияния КН в виде отверстий;
- численный анализ НДС отсеков РН с одним прямоугольным отверстием при ПД;
- численный анализ НДС отсеков РН с несколькими (одинаковыми и различными) прямоугольными отверстиями с учетом их взаимовлияния при ПД;

* По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2013–2015 гг.)

– численный анализ (ЧА) НДС отсеков РН при наличии подкреплений (прямоугольных и треугольных) в углах отверстий и влияние на НДС изменения ориентаций отверстий;

– анализ влияния появления и трансформации зон ПД на несущую способность.

Конструктивное оформление современных РН с концентраторами напряжений. Задачи оценки прочности, несущей способности и ресурса. Для космической техники характерны экстремальные условия эксплуатации; для обеспечения безотказной работы ее конструкций необходим поиск новых решений задачи прочности и динамики конструкций РКТ. Для оптимального сочетания необходимых параметров прочности и жесткости с минимальной массой используются пластинчато-оболочечные конструкции. Такие конструкции в РКТ имеют неоднородную структуру, связанную в большинстве случаев с наличием отверстий-люков разной формы. Наиболее распространенной является прямоугольная форма отверстий. Осевая сжимающая сила является основной для отсеков РН (полет на активном участке траектории, стоянка на стартовой установке). Наличие вырезов приводит к концентрации НДС [1–3]. При этом усложняется характер взаимодействия элементов конструкции и нагрузки при последующем нагружении. Так, в известных испытаниях баков при внутреннем давлении вначале давление может вызывать появление несовершенств формы возле люков днища, уменьшающих давление разрушения.

На рис. 1 показано разрушение днища бака горючего первой ступени РН «Циклон-3» при испытаниях на действие внутреннего давления (контрольно-выборочные испытания). На рис. 2 приведены модели сферических днищ с отверстиями при поперечных нагрузках (локальное нагружение при транспортировке и хранении РН). Такое нагружение приводит к появлению локальных вмятин возле краев отверстий в связи с КН. При высоких уровнях нагрузки необходимо учитывать ПД.

Особенности НДС и НС элементов конструкций РКТ с вырезами и необходимость учета ПД приводит к постановке сложных задач НДС и НС.

Значительный вклад в разработку методов определения НДС и НС конструкций РКТ внесли известные ученые А. В. Кармишин, В. И. Моссаковский, П. И. Никитин, И. Ф. Образцов, В. И. Феодосьев и др.

Несмотря на значительное развитие наук о прочности остаются без ответа многие важные вопросы: разработка эффективных вычислительных алгоритмов решения задач НДС и НС для конструкций с одним или несколькими отверстиями разной формы, учет ПД и исследование взаимодействия отверстий, разработка новых подходов при определении НС и др.

К наиболее эффективным численным методам решения соответствующих задач относится метод конечных элементов (МКЭ). Основные достижения в разработке МКЭ для расчета тонкостенных конструкций связаны с именами многих ученых. Одной из последних фундаментальных исследований является работа [4].

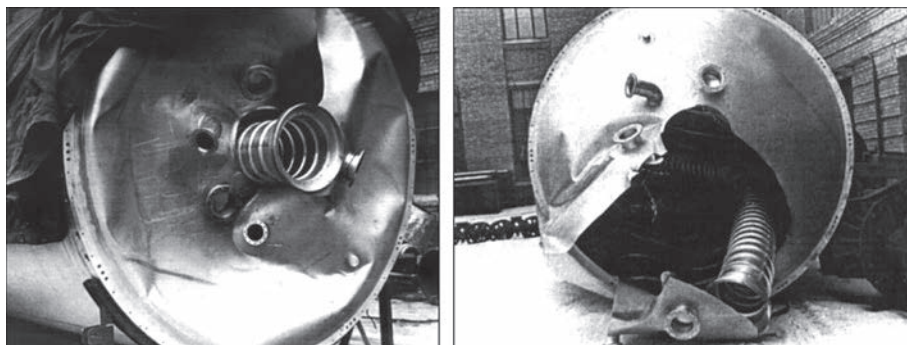


Рис. 1. Бак горючего первой ступени РН «Циклон-3» после контрольно-выборочных испытаний на действие внутреннего давления

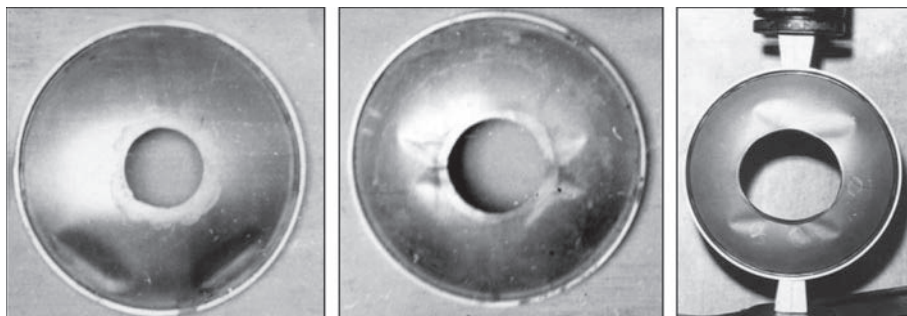


Рис. 2. Вид моделей сферических днищ с отверстиями после испытаний (локальное нагружение от транспортировочных ложементов)



Рис. 3. «Циклон-3» на стартовой позиции (космодром Плесецк) (а), «Зенит-2» на стартовой позиции (Байконур) (б), РН «Антарес» во время успешного пуска с космодрома о. Уоллопс (США) (в)

Особенность применения МКЭ для РКТ заключается в том, что заказчик обычно требует применения лицензионных программ-пакетов (ЛПП). Они определяют начальный и конечный этапы расчетов, но при этом отсутствует возможность их корректировки на промежуточных этапах. Необходимость использования сложных моделей деформирования (пластичность, ползучесть) требует покупки дополнительных дорогостоящих модулей. Это делает целесообразным создание расчетных схем МКЭ, уменьшающих время компьютерных расчетов, что позволяет проводить большое количество расчетов (это важно на этапах проектирования и отработки конструкций РКТ).

Уменьшение времени расчетов для МКЭ связано с созданием ПИ схем его реализации. Основы таких схем заложены в трудах известных ученых-математиков: Л. В. Канторовича, М. А. Красносельского, Г. И. Марчука, А. А. Самарского, Р. Хакбуша и др. При использовании таких схем следует подтверждать их достоверность сравнением с расчетами на основе ЛПП в тестовых задачах.

Рассмотрим типичные конструкции РН. К ним относятся РН «Циклон-3», РН «Зенит», РН «Антарес» – разработка Украины и США (рис. 3) [1].

Конструктивное исполнение ряда «сухих» отсеков показано на рис. 4.

Для разных классов РН характерны конкретные нормы прочности. В них формулируются расчетные случаи и методики расчетов нагрузок, прочно-

сти и коэффициентов безопасности. По сути дела, это стандарты, регламентирующие основы расчетов и испытаний прочности. От норм прочности зависят масса и надежность конструкций РН. При вероятностно-статистическом подходе вероятность неразрушения P элемента конструкции: ($P = P(N - Q > 0)$) (N, Q – случайные величины НС и нагрузки).

Величина P может быть найдена аналитически или статистическим моделированием. Аналитический подход возможен при описании распределения НС нормальным законом.

Укажем, что нормы прочности не содержат требования о необходимости проведения прочностных испытаний до разрушения с целью определения НС.

При отработке РН с целью использования материальной части, прошедшей прочностные испытания, допускается снижение уровня максимальной испытательной нагрузки до 90 % расчетной.

Общие численные методы расчета прочности и НС элементов пластинчато-оболочечных конструкций РКТ при наличии КН в виде отверстий на основе ПИ вариантов МКЭ с учетом ПД. Конструкции современной РКТ неоднородные, что обусловлено существованием отверстий (люков), подкреплений (стрингеры, шпангоуты, накладки), различных геометрических несовершенств и др. Это обуславливает актуальность проблем прочности и сложность их решения.

Отверстия (вырезы, люки) являются основными факторами, определяющими неоднородность. Физические аспекты влияния отверстий в основном связаны с возникновением концентрации НДС. К такой концентрации приводят также некоторые нагрузки (локальные, возникающие при контакте элементов конструкций).

Расчет на основе МКЭ связан с разбиением объектов на элементы разной формы и использованием вариационных принципов. При этом строится система линейных алгебраических уравнений высокого порядка с матрицами специального вида.

Для повышения эффективности решения соответствующих задач прочности целесообразно использовать ПИ схемы МКЭ, которые ведут к значительной экономии компьютерного времени

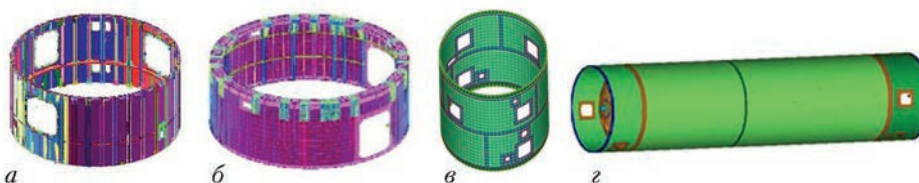


Рис. 4. Переходной отсек первой ступени РН «Циклон-3» (а), приборный отсек РН «Зенит» (б), корпус хвостового отсека вафельного типа (в) и топливный отсек РН «Антарес» (г)

расчета. Основная идея ПИ схем МКЭ для вариационных задач состоит в том, что на основе МКЭ проводится достаточно «грубое» разбиение области, при котором характерный размер конечного элемента h не очень мал. Дискретизированная исходная вариационная задача решается с помощью какого-либо итерационного метода (условного градиента, сопряженных градиентов, последовательной верхней релаксации), причем не до конца, а с построением лишь нескольких k_n приближений к решению. Последнее приближение на данной сетке интерполируется на новую, более мелкую сетку (характерный размер конечного элемента равен при этом $h/2$ и является новым начальным приближением в итерационном процессе. Вычисления на последовательности вложенных КЭ сетках продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность между соседними приближениями. Такой многосеточный алгоритм значительно ускоряет процесс получения решения (по сравнению с традиционным использованием МКЭ на одной мелкой сетке). При построении ПИ схем используется методика, в которой нет необходимости хранить матрицу жесткости в явном виде, а значения перемещений в текущем узле выражаются через узловые значения перемещений четырех прилегающих к узлу конечных элементов. ПИ схемы МКЭ успешно применялись для решения краевых задач теории упругости, определения НДС пластин и оболочек с различными видами неоднородностей, деформирования сред, содержащих трещины, включения, поры [2, 5–8]. Отметим, что разработка проекционно-итерационных схем важна и для других сеточных методов, в частности, метода локальных вариаций, где проблема уменьшения компьютерного времени расчета является особо острой [9, 10].

Для учета ПД можно использовать различные подходы. Эффективен метод переменных параметров упругости (МППУ). Для деформационной теории пластичности соотношения МППУ имеют вид, аналогичный представленному в теории упругости с переменными модулем сдвига \tilde{G} и коэффициентом Пуассона $\tilde{\nu}$:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\tilde{G}} \left(\sigma_{ij} - \frac{3\tilde{\nu}}{1+\tilde{\nu}} \sigma_0 \delta_{ij} \right), \quad (1)$$

где $\tilde{G} = \tilde{E} / [2(1 + \tilde{\nu})] = 1/(2\psi)$; $\tilde{E} = 3E/(2E\psi + 1 - 2\nu)$; $\tilde{\nu} = (E\psi - 1 + 2\nu)/(2E\psi + 1 - 2\nu)$; $\psi = 3\varepsilon_i/2\sigma_i$; σ_{ij} и ε_{ij} , σ_i и ε_i – напряжения, деформации их интенсивности; E – модуль упругости; σ_0 – среднее напряжение.

При расчете на основе МППУ используются последовательные приближения, в каждом из которых решается задача теории упругости с пе-

ременными \tilde{G} и $\tilde{\nu}$. Причем для первого приближения принимается $\psi = 1/(2G)$, $\tilde{G} = G$, $\tilde{\nu} = \nu$. В случае решения в напряжениях отыскание параметров НДС для каждого k -го приближения таково: находятся σ_{ij} , σ_i , ε_i упругого тела, из диаграммы деформирования $\sigma_i \sim \varepsilon_i$ находится σ_{ik} для упругопластического тела и вычисляются \tilde{G} , $\tilde{\nu}$ и ψ_k , используемые в следующем $(k+1)$ -м приближении. В случае решения в перемещениях осуществляется такая последовательность действий: $\varepsilon_{ijk} \rightarrow \varepsilon_{ijk} \rightarrow \sigma_{ik} \rightarrow \psi_k$. Напряжение σ_{ik} определяется из диаграммы $\sigma_i \sim \varepsilon_i$. Расчет проводится до достижения заданной точности между двумя соседними приближениями при $\tilde{E}_k \approx \tilde{E}_{(k-1)}$. Могут быть построены также схемы расчета на основе теории пластического течения.

Задача нахождения минимума рассматривается как задача условной минимизации [2, 5–8]

$$I[z] \rightarrow \inf, z \in Z, \quad (2)$$

где $I[z]$ – функционал, ограниченный на множестве перемещений Z ; z – вектор-функция перемещений.

Решение задачи НДС для k -го шага последовательных приближений проводится на основе следующего алгоритма:

- применяется ПИ схема МКЭ при решении задачи условной минимизации (2);
- определяется интенсивность деформаций $\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{(1 - \tilde{\nu} + \tilde{\nu}^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y)^2 / (1 - \tilde{\nu})^2 - 3\varepsilon_x \varepsilon_y + 3\gamma_{xy}^2} / 4$.

При $\varepsilon_i \leq \varepsilon_s$, \tilde{G} и $\tilde{\nu}$ остаются теми же; при $\varepsilon_i > \varepsilon_s$ переходим к следующему шагу:

- на диаграмме $\sigma_i > \varepsilon_i$ определяется σ_p , соответствующая ε_i и определяются \tilde{G} и $\tilde{\nu}$ по (1);
- алгоритм реализуется для $k = k + 1$. При $k > 1$ осуществляется проверка следующего условия: вычисление заканчивается, когда для каждого конечного элемента имеем $|\varepsilon_{i,k} - \varepsilon_{i,(k-1)}| < \varepsilon$ (ε – заданная точность вычислений).

Алгоритм решения с использованием ПИ схем МКЭ на последовательности сеток следующий:

- строится сетка для заданных параметров конструкций, параметра релаксации, начального шага h_n сетки и задается начальное приближение для $n = N$;
- на основании построенных шаблонных формул для минимума функций многих переменных и метода последовательной верхней релаксации в каждом узле текущей сетки находится ε_{ij} ;
- выбирается k_n итераций на n -м шаге ПИ процесса как наименьшее число k , которое определяется неравенством $(z_n^{(k)} - z_n^{(k-1)})$ – приближенное решение n -й конечномерной задачи):

$$\|z_n^{(k)} - z_n^{(k-1)}\| \leq \varepsilon; \quad (3)$$

– проводится интерполирование решения для n -й сетки на более мелкую $(n + 1)$ -ю сетку. Это решение используется в качестве начального приближения к точке минимума для соответствующей функции многих переменных (переход на 2-й шаг).

Методы решения ряда задач оценки прочности и ресурса конструкций РКТ при учете взаимовлияния концентраторов напряжений в виде отверстий. Применим разработанную общую методику к решению конкретных задач оценки прочности и ресурса конструкций РН с КН в виде прямоугольных отверстий как наиболее часто встречающихся.

Расчетные формулы определяются при решении задачи минимизации функционала потенциальной энергии. Такие функционалы имеют следующий вид. Для пластинчатых элементов конструкции (прямоугольная пластина)

$$V_1 = \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[u_{,x}^2 + v_{,y}^2 + 2\tilde{\nu} u_{,x} v_{,y} \right] / (1 - \tilde{\nu}) + \tilde{G} \left(u_{,y} + v_{,x} \right)^2 / 2 \right\} dx dy - \int_{\Gamma} (p_x u + p_y v) d\Gamma, \quad (4)$$

где p_x, p_y – проекции вектора нагрузки на оси Ox, Oy ; u, v – перемещения; Ω, Γ – поверхность и контур пластины; запятые определяют производные по координатам.

Геометрия отсеков РН в виде цилиндрических оболочек с прямоугольными отверстиями такова, что возможно использование теории пологих оболочек, дающей более простые решения, чем общая теория оболочек. Так, для типичной конструкции РН диаметр равен 2,4...3,2 м, а сторона прямоугольного отверстия составляет 0,2...0,4 м. НДС, вызванное концентрацией напряжений, быстро затухает при удалении от краев отверстий. Здесь вполне могут быть использованы соотношения теории пологих оболочек, для которых

$$V_2 = h \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[u_{,\alpha}^2 + 2\tilde{\nu} u_{,\alpha} \left(v_{,\beta} + w/R \right) + \left(v_{,\beta} + w/R \right)^2 \right] / (1 - \tilde{\nu}) + \tilde{G} \left(u_{,\beta} + v_{,\alpha} \right)^2 / 2 \right\} d\alpha d\beta + h^3 \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[w_{,\alpha\alpha}^2 + 2\tilde{\nu} w_{,\alpha\alpha} w_{,\beta\beta} + v_{,\beta\beta}^2 \right] / (1 - \tilde{\nu}) + 2\tilde{G} w_{,\alpha\beta}^2 \right\} d\alpha d\beta / 12 - \int_{\Gamma_p} (T_1 u + S_1 v + Q_1 w + M_1 \varphi_1) d\beta, \quad (5)$$

где u, v, w – перемещения оболочки; R, h – радиус и толщина; Ω, Γ_p – поверхность оболочки и граница, на которой действуют краевые усилия и изгибающий момент T_1, S_1, Q_1, M_1 .

Выражения для деформаций, кривизн (для осей α, β) и напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha} &= u_{,\alpha}, \quad \varepsilon_{\beta} = v_{,\beta} + w/R, \quad \omega = u_{,\beta} + v_{,\alpha}, \quad \chi_{\alpha} = -w_{,\alpha\alpha}, \\ \chi_{\beta} &= -w_{,\beta\beta}; \quad \tau_{\alpha\beta} = -w_{,\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_{\alpha} = 2\tilde{G}(\varepsilon_{\alpha} + \tilde{\nu}\varepsilon_{\beta}) / (1 - \tilde{\nu}),$$

$$\sigma_{\beta} = 2\tilde{G}(\varepsilon_{\beta} + \tilde{\nu}\varepsilon_{\alpha}) / (1 - \tilde{\nu}), \quad \sigma_{\alpha\beta} = \tau_{\alpha\beta}.$$

Когда проводится дискретизация задачи на основе МКЭ, область разбивается на прямоугольные конечные элементы, внутри которых искомые функции u, v и w заменяются эрмитовыми функциями, зависящими от узловых значений $u, v, w, w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\alpha\beta}$, в каждой из четырех вершин конечного элемента:

$$\begin{aligned} u(\alpha, \beta) &= a_0 + a_1\alpha + a_2\beta + a_3\alpha\beta; \quad v(\alpha, \beta) = b_0 + b_1\alpha + b_2\beta + b_3\alpha\beta; \quad \omega(\alpha, \beta) = c_0 + c_1\alpha + c_2\beta + c_3\alpha\beta + c_4\alpha^2 + c_5\alpha\beta^2 + c_6\alpha^3 + c_7\alpha^2\beta + c_8\alpha\beta^2 + c_9\beta^3 + c_{10}\alpha^2\beta^2 + c_{11}\beta^3 + c_{12}\alpha^3\beta + c_{13}\alpha^3\beta^2 + c_{14}\alpha^2\beta^3 + c_{15}\alpha^3\beta^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения для входящих в (7) параметров имеют громоздкий вид и здесь не приводятся.

В текущем узле (i, j) перемещения определяются через узловые значения перемещений $(u_1, v_1, w_1, w_{\alpha 1}, u_{\beta 1}, w_{\alpha\beta 1}, \dots, w_8, w_{\alpha 8}, w_{\beta 8}, u_8, v_8)$ четырех прилегающих к данному узлу конечных элементов.

При проведении расчетов разработаны соответствующие шаблонные формулы для перемещений $u, v, w, w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\alpha\beta}$ в текущем узле конечного элемента через узловые значения перемещений указанных четырех конечных элементов.

Численный анализ НДС оболочечных элементов отсеков РН с прямоугольными отверстиями при учете их взаимовлияния. Рассмотрим НДС цилиндрической оболочки с параметрами: длина $L = 1,6$ м, $R = 1$ м, $h = 0,004$ м, из материала Д16Т с прямоугольным отверстием $(0,4 \times 0,4$ м). Величина сжимающей нагрузки p изменялась от 10 до 70 МПа. При таких размерах происходит ПД. Для подкрепленных отсеков вместо h используется приведенная толщина, определяемая через параметры подкреплений и толщину оболочки h .

Разработанный на основе ПИ схем вариант МКЭ реализован на шести вложенных вдвое КЭ сетках из прямоугольных эрмитовых элементов. На рис. 5 показано развитие зон ПД при возрастании p ($p = 25,45, 65$ МПа) (приведены проекции на плоскость развертки оболочки).

Исследуем НДС оболочки из Д16Т с двумя прямоугольными отверстиями разного размера при ПД. Размеры оболочки: $L = 16$ м, $R = 1$ м, $h = 0,004$ м; отверстий $0,2 \times 0,2$ м, $0,4 \times 0,4$ м; $p = 80$ и 90 МПа. На рис. 6 показано развитие зон ПД при увеличении p для расстояния между центрами отверстий $l = 1,2$ м.

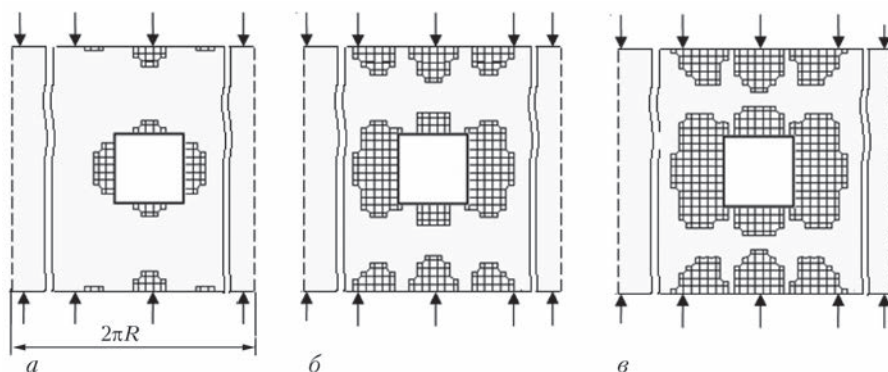


Рис. 5. Развитие зон ПД при возрастании p , МПа: 25 (а); 45 (б); 65 (в)

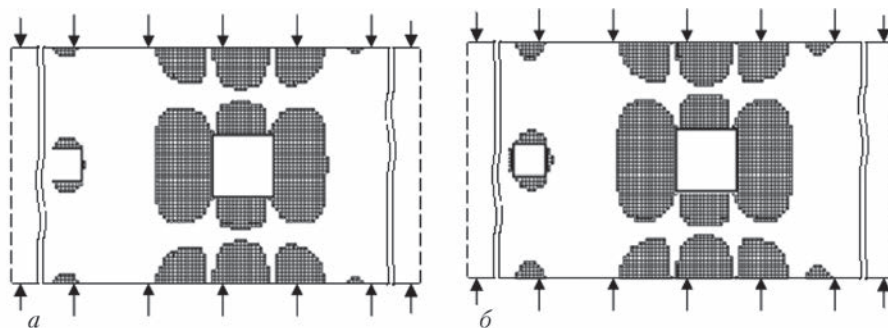


Рис. 6. Развитие зон ПД при $p = 80$ (а) и 90 (б) МПа для расстояния между центрами вырезов $l = 1,2$ м (ПД для данной оболочки начинают появляться при $p = 37$ МПа)

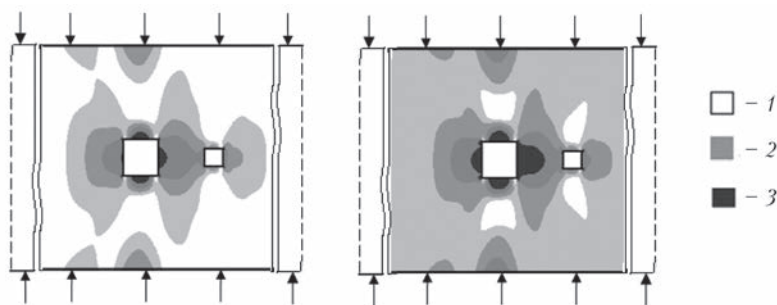


Рис. 7. Величины интенсивности напряжений σ_i для расстояния между прямоугольными вырезами $l = 1$ м; $p = 150$ и 176 МПа: 1 – 159; 2 – 200...250; 3 – 304...355 МПа

На рис. 7 показаны величины интенсивности напряжений σ_i для другого варианта расположения прямоугольных отверстий.

На рис. 8 показаны зоны ПД для трех прямоугольных отверстий.

На рис. 9 показаны интенсивности напряжений для изображенной на этом рисунке схемы расположения трех прямоугольных отверстий.

Проекционно-итерационный вариант МКЭ реализован на пяти вложенных вдвое конеч-

но-элементных сетках (25×97 , 51×193 , 101×385 , 201×769 , 401×1537) из прямоугольных эрмитовых элементов.

Применение ПИ схем МКЭ привело к экономии компьютерного времени расчета в 36...45 раз (в зависимости от рассмотренных задач) по сравнению со временем расчета на основе традиционного МКЭ (на одной сетке).

Варьирование l позволяет исследовать взаимное влияние отверстий, которое зависит от раз-

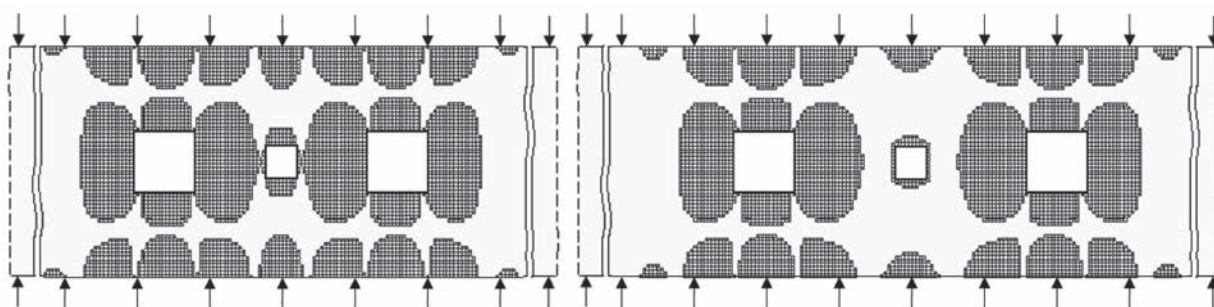


Рис. 8. Зоны ПД для трех прямоугольных отверстий: $p = 90$ МПа; расстояние между вырезами $l = 0,6$ и $0,8$ м

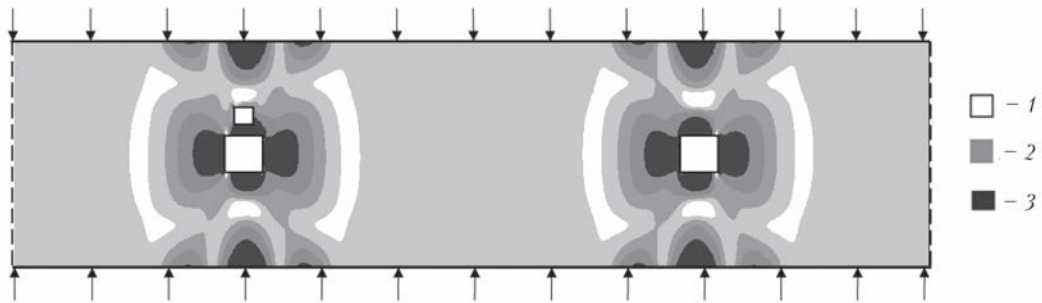


Рис. 9. Интенсивности напряжений σ_i для оболочки с тремя прямоугольными отверстиями при $p = 176$ МПа (1 – 3 – то же, что и на рис. 7)

меров и формы вырезов, механических свойств материала и определяется трансформацией в процессе нагружения областей ПД.

Возникновение ПД приводит к падению жесткостей конструкций, в выражениях, для которых (при сжатии: $2\pi R h E$; при изгибе: $E h^3 / 12(1-\nu^2)$) вместо E появляется приведенный $E_c = \sigma_i / \epsilon_i$ или касательный $E_k = d\sigma_i / d\epsilon_i$ модули, которые меньше E .

Величины нагрузок, при которых зоны ПД смыкаются, определяют значительное уменьшение жесткости конструкции. Схемы ПД с учетом взаимовлияния прямоугольных вырезов вследствие наличия общих зон ПД могут использоваться для прогнозирования НДС отсеков РН с отверстиями.

Численный анализ влияния подкрепления отверстий. Основным средством уменьшения концентрации НДС является подкрепление краев отверстий. Оно может быть осуществлено накладками из того же, что и основной отсек, или другого материала.

Как указано, НДС конструкций типичных РН вполне описывается соотношениями теории пологих оболочек. Полученные на основе других методов решения показывают, что НДС плоского пластинчатого элемента вполне моделирует НДС пологих оболочек, выявляя основные качественные и количественные особенности влияния подкреплений.

Для исследования влияния подкреплений использованы разработанные ПИ схемы МКЭ. Приведем результаты ЧА по изучению влияния соотношения модулей упругости материала элемента конструкции и подкреплений, которые моделируются опоясывающими прямоугольный вырез угловыми подкреплениями (рис. 10). Наиболее важным при исследовании концентрации НДС является изучение того, как меняется интенсивность ϵ_i в зависимости от формы подкреплений и соотношений E . Дело в том, что для многих материалов (типа используемых в основном для отсеков РН алюминиево-магниевых сплавов) при

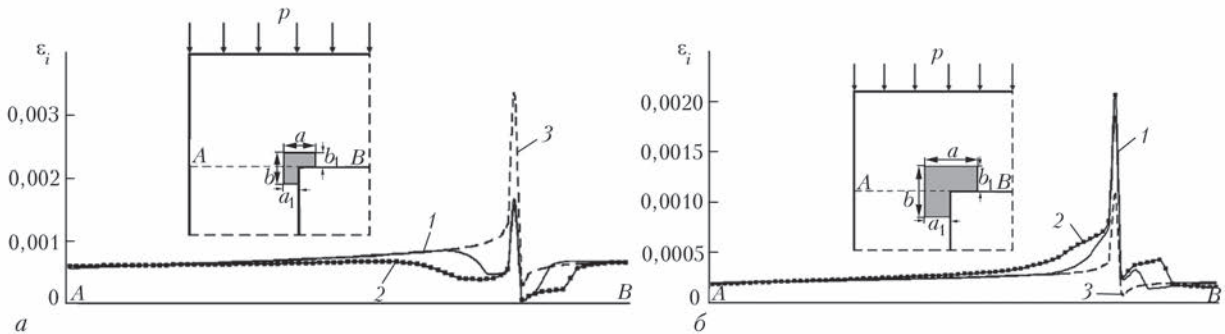


Рис. 10. Распределение интенсивностей деформаций ϵ_i в сечении А–В элемента конструкции: 1 – для $A/a = A/b = 4$; 2 – для $A/a = A/b = 2$ (позицию 3, а также a, b см. в тексте для рис. 10–12)

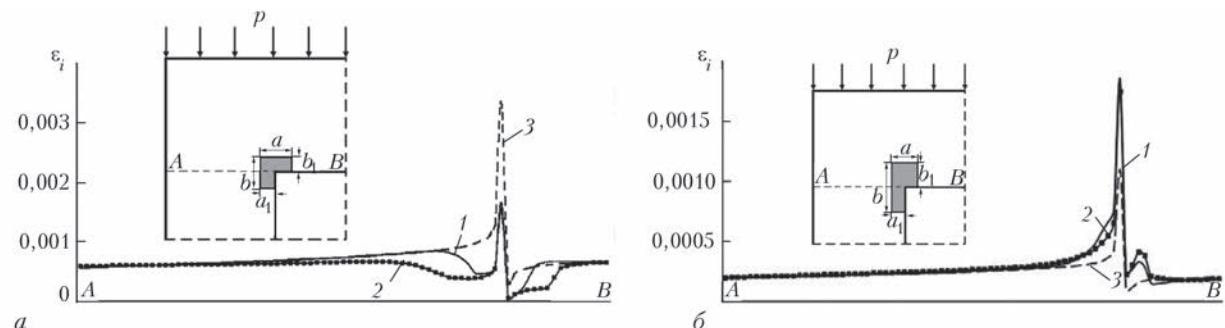


Рис. 11. Распределение ϵ_i в сечении А–В: 1 – $A/a = A/b = 4$; 2 – $A/a = 4, A/b = 2$

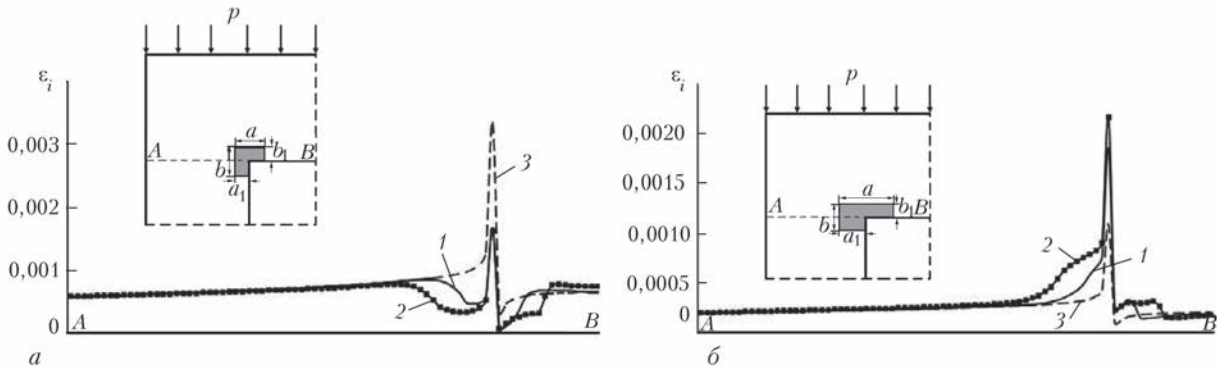


Рис. 12. Распределение ϵ_i в сечении А-В: 1 – $A/a = A/b = 4$; 2 – $A/a = 2$; $A/b = 4$

ПД разница между σ_s и σ_b незначительна ($\sigma_b/\sigma_s \approx 1,2 \dots 1,3$). В то же время разница между ϵ_1 , определяющей разрушение, и ϵ_s велика (в 6 и более раз) и исследование ϵ_1 является более важным для изучения концентрации НДС.

Рассмотрен пластинчатый элемент $0,4 \times 0,4$ м с отверстием $A \times A = 0,08 \times 0,08$ м. На рис. 10–12 показаны результаты ЧА для различных видов опоясывающих углы прямоугольных вырезов подкреплений и различных соотношений E , а также распределения интенсивностей деформаций ϵ_i в сечении А-В для разных соотношений модуля упругости материала элемента конструкции и подкрепления ($E_1/E_2 = 1/3$ – рис. 10, а–12, а; $E_1/E_2 = 3$ – рис. 10, б–12, б; E_1, E_2 – модули упругости пластинчатого элемента и подкрепления) при сжимающей нагрузке $p = 50$ МПа: 3 – для элемента без подкрепления (для всех рисунков); 1 – для элемента с подкреплением (рис. 10, а–12, а); 2 – для пластинчатого элемента с подкреплением (рис. 10, б–12, б). На рис. 10–12 показана четверть пластинчатого элемента (ввиду симметрии НДС); вид подкреплений схематично показан для каждого из рис. 10–12 в верхней части рисунков. Размеры подкреплений характеризуются отношениями: $a_1 = 1/2 a, b_1 = 1/2 b$.

При разработке ПИ расчетных схем взяты эрмитовы конечные элементы. Схемы реализованы на шести вложенных дважды конечно-элементных схемах. Количество приближений на n -м шаге ($n = 1, 2, \dots, 6, 0$) определялось как наименьшее целое, которое удовлетворяет условию (3), где $z_h^{(k,n)}$ – приближенное решение дискретной задачи, точность вычислений на n -й сетке.

На рис. 13 показана характерная схема, определяющая процесс изменения несущей способности при ПД. Точки А, В, С соответствуют началу ПД ($\epsilon_i = \epsilon_y$), слиянию зон ПД, началу деформирования при общих зонах ПД для прямоугольных вырезов.

Соответствующие этим точкам значения несущей способности определяются цифрами 3; 2; 1.

Проведен также численный анализ влияния треугольных подкреплений в углах прямоугольных вырезов и влияния изменения ориентаций

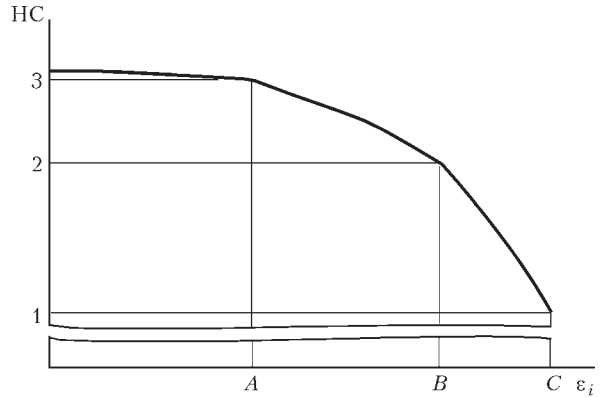


Рис. 13. Схема процесса изменения несущей способности при ПД

вырезов (поворот вырезов в плоскости xOy) при различных соотношениях E_1/E_2 .

Применение ПИ схем МКЭ дает существенное сокращение компьютерного времени расчета по сравнению с расчетом для МКЭ на одной мелкой сетке, который проведен на основе лицензионных пакетов программ ANSYS, NASTRAN. Расчеты проведены для отсеков космической РН «Антарес». Сравнение полученных результатов с расчетами на основе применяемых в ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля методик дает приемлемое совпадение. Результаты этих расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными в ГП «КБ «Южное». Имеется акт внедрения результатов работ по рассмотренному в статье направлению, утвержденный руководством ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля.

Выводы

Проанализированы возможные схемы разрушения оболочечных конструкций РН и конструктивные схемы типичных РН («Циклон-3», «Зенит», «Антарес») с отверстиями-вырезами различной формы, которые являются концентраторами напряжений.

Приведены данные о разработанных проекционно-итерационных схемах МКЭ.

Проведен численный анализ НДС пластинчато-оболочечных элементов конструкций РКТ с отверстиями наиболее распространенной пря-

моугольной формы с учетом пластического деформирования материала и взаимного влияния вырезов.

Проведен анализ влияния опоясывающих углы прямоугольных отверстий подкреплений и угловых треугольных подкреплений, вызывающих снижение концентрации НДС, на прочность пластинчато-оболочечных элементов конструкций РКТ.

Предложена схема прогнозирования несущей способности с учетом возникновения и трансформации зон пластических деформаций в окрестности отверстий-вырезов.

Приведены данные по внедрению полученных результатов для расчета в ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля конкретной РН.

Проанализированы схемы подкреплений отверстий-вырезов, существенно снижающих НДС. Такие подкрепления – основной способ борьбы с концентрацией напряжений и деформаций, что подтверждается результатами экспериментов и обработки конструкции различных РН.

Основные результаты проведенных исследований отражены в работах [3, 5–8, 11].

Разработанные расчетные схемы для определения НДС, основанные на проекционно-итерационных модификациях МКЭ, могут быть успешно использованы для других отраслей техники, в частности, для конструкций теплоэнергетики из железобетона [12].

1. Шестьдесят лет в ракетостроении и космонавтике; под общ. ред. А. В. Дегтярева. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2014. – 540 с.
2. Гудрамович В. С. Моделирование напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций ракетной техники и энергетики / В. С. Гудрамович // Техническая механика. – 2013. – № 4. – С. 97–104.
3. Гудрамович В. С. Влияние отверстий на предельные состояния элементов тонкостенных металлических оболочечно-пластинчатых конструкций / В. С. Гудрамович // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Механіка. – 2014. – Вип. 18, т. 22. – С. 47–60.

4. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method: Its Basic and Fundamentals / 6-th ed. / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Amsterdam / London / NY / Oxford / Paris / Tokyo: Elsevier, 2005. – 722 p.
5. Гудрамович В. С. Применение проекционно-итерационных схем МКЭ к решению задач упругопластического деформирования оболочек с отверстиями / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. Фіз.-мат. науки. – 2013. – Вип. 3. – С. 55–58.
6. Hudramovich V. S. Elastoplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, S. A. Ryabokon // J. Eng. Math. – 2013. – 78. – P. 181–197.
7. Hart E. L. Projection-iterative schemes for realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. of Math. Sci. – 2014. – 203, № 1. – P. 55–69.
8. Гарт Е. Л. Проекційно-ітераційні схеми реалізації методу скінченних елементів в задачах деформування пластин з отворами та включеннями / Е. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Математичні методи і фізико-механічні поля. – 2013. – 56, № 2. – С. 48–59.
9. Гудрамович В. С. Скінченно-елементні схеми аналізу процесу розсіяного руйнування пружно-пластичних тіл з локальними концентраторами напружень / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: 5-а Міжнарод. конф., червень 2014 р., Львів, Україна: зб. наук. праць / під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2014. – С. 39–42.
10. Гудрамович В. С. Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач локальной устойчивости сферических оболочек / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт // Доповіді НАН України. – 2015. – № 8. – С. 35–41.
11. Гарт Э. Л. Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач с квадратичным функционалом / Э. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Прикладная математика и механика. РАН. – 2016. – 80, Вып. 2. – С. 218–230.
12. Гудрамович В. С. Моделирование та дослідження впливу підкріплень прямокутних отворів на напружено-деформований стан пластини / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: IX Міжн. наук. конф., вересень 2014 р., Львів, Україна: матер. конф.; під заг. ред. І. О. Луковського, Г. С. Кіта, Р. М. Кушніра. – Львів: Ін-т прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2014. – С. 43–46.
13. Моделирование процесса деформирования пластинчатых элементов железобетонных конструкций объектов теплоэнергетики с использованием метода конечных элементов / В. С. Гудрамович, В. М. Левин, Э. Л. Гарт [и др.] // Техническая механика. – 2015. – № 2. – С. 59–70.

The investigation is dedicated to shell structures of rocket-space equipment with holes which are the main type of stress concentrators at material plastic deformation. Developed projection-iteration schemes of variation-mesh finite element method were used for investigation of stress-strain state. They significantly reduce computer calculation time in comparison with traditional finite element method (using one fine mesh). Developed software became a basis for investigation of the problems of stress-strain state at axial loading of shell-plate elements of the structures taking into account their mutual effect at plastic strain. Corresponding analysis provides for the possibility of selection of geometry of structure elements, holes, their shape and distance between them, loading strategy effecting their carrying capability. Numerical analysis of was carried out for investigation effect of holes supports. A scheme was proposed for prediction of carrying capacity of cells taking into account zones of plastic deformations at loading. Implementation of the results at calculation of specific launch vehicles was carried out. Ref. 12, Figures 13

Keywords: shell structures of rocket-space equipment, holes, plastic deformation, life evaluation procedure, carrying capacity

*Поступила в редакцию
05.04.2016*