

Д-р техн. наук В. С. Гудрамович, канд. техн. наук В. Н. Сиренко,
канд. техн. наук Д. В. Клименко, д-р техн. наук Э. Л. Гарт

ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ УЧЕТЕ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Широко применяемым в ракетно-космической технике оболочечным конструкциям наряду с оптимальным сочетанием массы и прочности присущи неоднородности различного характера: конструктивные (разнотолщинность, наличие подкреплений, вырезов-отверстий и др.) и технологические (наличие дефектов, возникающих в процессе изготовления или во время хранения, транспортировки и непредвиденных термомеханических воздействий). Указанные факторы являются концентраторами напряженно-деформированного состояния и могут привести к преждевременному разрушению элементов конструкций. Различные их части деформируются по своей программе и характеризуются разным уровнем напряженно-деформированного состояния. С учетом пластичности и ползучести материала для определения напряженно-деформированного состояния эффективен подход, когда расчет разбивают на этапы, на каждом из которых вводят параметры, характеризующие деформации пластичности и ползучести: дополнительные нагрузки в уравнениях равновесия или крайевых условиях, дополнительные деформации или переменные параметры упругости (модуль упругости и коэффициент Пуассона). Затем строят схемы последовательных приближений: на каждом этапе решают задачу теории упругости с введением указанных выше параметров. Отдельно следует отметить задачи определения ресурса космических ракет-носителей и стартовых комплексов, так как он связан с возникновением повреждений при знакопеременных термомеханических нагрузках высокой интенсивности. Основным при определении ресурса является подход на базе теории малоциклового и многоциклового усталости. Пластичность и ползучесть материала – основополагающие факторы при обосновании ресурса. Рассмотрены различные аспекты решения задач прочности и устойчивости объектов ракетно-космической техники с учетом влияния деформаций пластичности и ползучести.

Ключевые слова: оболочечные конструкции, напряженно-деформированное состояние, конструктивная и технологическая неоднородность, термомеханические нагрузки, малоцикловая и многоцикловая усталость, ресурс.

Оболонковим конструкціям, які широко застосовують у ракетно-космічній техніці, поряд з оптимальним поєднанням маси та міцності притаманні неоднорідності різного характеру: конструктивні (різна товщина, наявність підкріплень, вирізів-отворів тощо) і технологічні (наявність дефектів, що виникають у процесі виготовлення або під час зберігання, транспортування та непередбачених термомеханічних впливів). Зазначені фактори є концентраторами напружено-деформованого стану та можуть призвести до передчасного руйнування елементів конструкції. Різні їх частини деформуються за своєю програмою і характеризуються різним рівнем напружено-деформованого стану. Ураховуючи пластичність і повзучість матеріалу для визначення напружено-деформованого стану, ефективний підхід, коли розрахунок розбивають на етапи, на кожному з яких вводять параметри, що характеризують деформації пластичності та повзучості: додаткові навантаження в рівняннях рівноваги або крайових умовах, додаткові деформації або змінні параметри пружності (модуль пружності та коефіцієнт Пуассона). Потім будують схеми послідовних наближень: на кожному етапі розв'язують задачу теорії пружності з уведенням зазначених вище параметрів. Окремо слід відзначити задачі визначення ресурсу космічних ракет-носіїв і стартових комплексів, оскільки він пов'язаний з виникненням пошкоджень під час знакозмінних термомеханічних навантажень високої інтенсивності. Головним під час визначення ресурсу є підхід на базі теорії малоциклової та багатоциклової втоми. Пластичність і повзучість матеріалу – основні фактори під час обґрунтування ресурсу. Розглянуто різні аспекти розв'язання задач міцності та стійкості об'єктів ракетно-космічної техніки, враховуючи вплив деформацій пластичності та повзучості.

Ключові слова: оболонкові конструкції, напружено-деформований стан, конструктивна і технологічна неоднорідність, термомеханічні навантаження, малоциклова і багатоциклова втома, ресурс.

The shell structures widely used in space rocket hardware feature, along with decided advantage in the form of optimal combination of mass and strength, inhomogeneities of different nature: structural (different thicknesses, availability of reinforcements, cuts-holes et al.) and technological (presence of defects arising in manufacturing process or during storage, transportation and unforeseen thermomechanical effects). The above factors are concentrators of stress and strain state and can lead to early destruction of structural elements.

Their different parts are deformed according to their program and are characterized by different levels of stress and strain state. Taking into consideration plasticity and creeping of material, to determine stress and strain state, the approach is effective where the calculation is divided into phases; in each phase the parameters are entered that characterize the deformations of plasticity and creeping: additional loads in the equations of equilibrium or in boundary conditions, additional deformations or variable parameters of elasticity (elasticity modulus and Poisson ratio). Then the schemes of successive approximations are constructed: in each phase, the problem of elasticity theory is solved with entering of the above parameters. The problems of determining the lifetime of space launch vehicles and launching facilities should be noted separately, as it is connected with damages that arise at alternating-sign thermomechanical loads of high intensity. The main approach in lifetime determination is one that is based on the theory of low-cycle and high-cycle fatigue. Plasticity and creeping of material are the fundamental factors in lifetime substantiation. The article deals with various aspects of solving the problem of strength and stability of space rocket objects with consideration for the impact of plasticity and creeping deformations.

Key words: shell structures, stress and strain state, structural and technological inhomogeneity, thermo-mechanical loads, low-cycle and high-cycle fatigue, lifetime.

Введение

Исследование влияния пластических деформаций и деформаций ползучести является актуальным для задач прочности и устойчивости неоднородных конструкций ракетно-космической техники (РКТ). Широко применяемые в РКТ оболочечные конструкции имеют оптимальные прочность и массу, что определяет их приоритетное применение в РКТ, однако их особенностью является наличие конструктивных (подкрепления, разнотолщинность, вырезы-отверстия, композиционная структура и др.) и технологических (геометрические несовершенства, трещины и др., появляющиеся в процессе изготовления либо во время хранения, транспортировки и при непредвиденных термомеханических нагружениях) неоднородностей, а также неоднородностей свойств материала (наиболее существенное ее проявление – поля остаточных напряжений). При высоких уровнях нагружения и длительных сроках эксплуатации возникают пластические деформации и деформации ползучести (ползучесть может быть и кратковременной – при высоких температурах). Учет этих факторов, характеризующих физическую нелинейность, дает реальную оценку прочности и работоспособности конструкций РКТ и позволяет выявить дополнительные резервы массы.

Под пластичностью подразумевается способность тела испытывать деформации, не полностью исчезающие при устранении вызвавших их причин (обычно речь идет о возникновении остаточных деформаций). Основное применение механики пластиче-

ских деформаций – оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности конструктивных систем и технологические задачи теории пластичности (ТП) [1 – 6]. Такие деформации в первую очередь возникают при локальных нагрузках и контактных взаимодействиях [7, 8]. Отдельно следует отметить исследования с учетом пластических деформаций в задачах динамики для тонкостенных конструкций [9, 10]. Принципиальный вопрос – выбор ТП для описания процессов деформирования [1, 2]. Распространение получили деформационная теория и теория пластического течения, которые позволяют рассмотреть основные задачи ТП. Важные аспекты ТП связаны с использованием микронапряжений и микродеформаций, учитывающих структурные изменения материала. Такие понятия – основные в теориях трансляционно-кинематического типа [2, 11]. При линеаризации соотношений ТП эффективно использование методов упругих решений. Задачи ТП приводятся к построению шаговых процессов последовательных приближений, в каждом решается задача теории упругости с введением параметров, характеризующих особенности пластического деформирования (дополнительные нагрузки и деформации, переменные параметры упругости) [1, 4, 12].

Термин «ползучесть» характеризует влияние на процессы деформирования такого важнейшего фактора, как время [13, 14]. Необходимость учитывать время определяет отличие теории ползучести от теорий упругости и пластичности. Учет времени в расчетах конструкций – не какой-то новый акт, время всегда учитывалось, например, в

задачах динамики конструкций различных отраслей техники, в которых определена зависимость параметров задач от скоростей и ускорений (силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформаций, а силы инерции – ускорениям масс). Особенностью теории ползучести является то, что она учитывает время в медленных процессах, в которых силы инерции малы. В широком смысле ползучесть – это изменение во времени деформаций и напряжений, которые возникли при начальном нагружении. Изменение деформаций при постоянном напряжении (ползучесть) или изменение напряжений при постоянной деформации (релаксация) с течением времени может привести к нарушению работоспособности элементов конструкций. Пластичность и ползучесть протекают более интенсивно при повышенных температурах. Существенной особенностью этих явлений является зависимость НДС от истории нагружения (системы, в которых присутствуют эти явления, не консервативны).

Для различных видов неоднородных конструкций особенности этих явлений проявляются по-разному. Расчетные модели зависят от типа конструкции, материала, вида термомеханического нагружения, требований к точности расчета.

Отметим, что использование аналитических методов ограничено каноническими формами элементов конструкций, типом нагружения, классическими граничными условиями и т. д. Применение численных вариационно-сеточных методов (конечных элементов, конечных разностей, локальных вариаций) и метода граничных элементов целесообразно при сложном строении тонкостенных систем (переменность жесткости, нарушения сплошности различного вида). При этом даже при использовании этих методов актуальным является создание оперативных вычислительных схем на основе проекционно-итерационных схем численных методов, позволяющих существенно уменьшить компьютерное время расчета, что важно при проведении большого объема вычислений, когда в процессе отработки конструкций с применением экспериментальных данных необходимо многократно менять параметры и условия

нагружения конструкций [15 – 17]. Отметим, что применение указанных численных методов предполагает использование быстродействующих компьютерных систем [18, 19].

Ниже приведены результаты исследований по влиянию деформаций пластичности и ползучести на прочность и устойчивость оболочечных конструкций РКТ при типичных для них случаях нагружения. Ряд из них отражает результаты совместной многолетней работы ИТМ НАН Украины и ГКА Украины, ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» и ДНУ им. О. Гончара.

Типы конструкций РКТ, виды их нагружений и разрушений при эксплуатации, в том числе связанных с возникновением пластических деформаций и ползучести материала, рассмотрены в многочисленных публикациях, например в [20 – 23].

Моделирование упругопластического деформирования и критических состояний

Особенности упругопластического поведения указанных оболочечных систем определяют важность выбора методологических подходов к изучению их деформирования и критических состояний. Эффективным для решения нелинейных (геометрически и физически) задач для неоднородных оболочечных систем является метод продолжения по параметру и его разновидность – метод последовательных нагружений [24, 25], согласно которому анализируют изменение решений соответствующих нелинейных уравнений по мере изменения параметра, в частности нагрузки, и исследуют реакцию рассматриваемой системы на малые его приращения. Для упругопластических оболочек на каждом шаге нагружения необходимо осуществить также линеаризацию соотношений ТП с использованием методов упругих решений. Это дает возможность исследовать процесс нелинейного деформирования и достижения параметров критического состояния неоднородных оболочечных систем.

Различные аспекты устойчивости и предельных состояний неупругих оболочечных систем рассмотрены в [3, 4, 25 – 32].

На рис. 1 показана зависимость «нагрузка-прогиб», характеризующая процесс нелинейного деформирования оболочки с достижением критических состояний [3, 4, 21, 25].

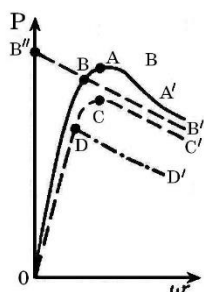


Рис. 1. Схема процесса нелинейного деформирования цилиндрической оболочки

Кривая OAA' характеризует деформирование оболочки идеальной формы, а кривая OCC' – оболочки с несовершенствами.

Точки A и C определяют предельную нагрузку, а B и D – бифуркационную. Ветви AA' и CC' характеризуют падение нагрузки для оболочек после достижения ее предельного значения, а BB' и DD' – посткритическое поведение системы. Точка B'' соответствует бифуркационной нагрузке потери устойчивости геометрически линейной системы. Схема показывает, что предельная нагрузка неидеальной системы может быть ниже, чем идеальной. Взаимное расположение точек, характеризующих предельные и бифуркационные нагрузки, может быть различным для разных типов несовершенств.

На рис. 2 показана иная схема достижения предельных нагрузок для оболочек. Она использует теорию предельного равновесия при модели идеально пластического материала [28, 33, 34].

Механизм разрушения определяется схемой расположения локальных и линейных зон пластичности – пластических шарниров. Такой анализ основан на варианте теории пластичности – теории предельного равновесия. Основные положения теории характеризуют две теоремы о нижней и верхней границах предельной нагрузки (статическое и кинематическое решения). Отметим, что близкой к идеально пластической

является диаграмма деформирования только ряда материалов (некоторые стали, титановые сплавы). Однако понятие о предельной нагрузке, имеющее точный смысл для идеально пластических материалов, сохраняет качественный смысл и для реальных материалов [33].

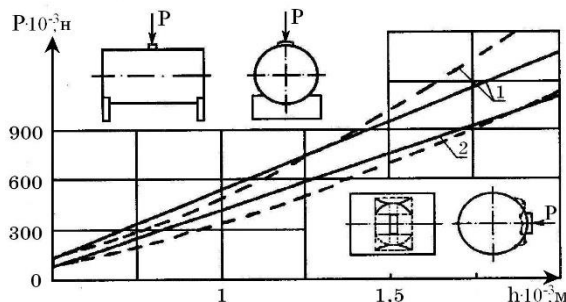


Рис. 2. Зависимость предельной силы оболочки от толщины

Рисунок отражает результаты решения задачи предельного анализа для цилиндрической оболочки, нагруженной жестким штампом. Приведены зависимости предельной силы P от ее толщины.

Радиус оболочки 10^{-2} м, материал – алюминивно-магниевого сплава 7005 (АМг6М). Верхняя часть рисунка показывает схему нагружения, правая – схему расположения линейных пластических шарниров, определяющих механизм разрушения.

Кривые 1, 2 построены для углов обхвата штампа 25 и 5°.

Пунктирные кривые характеризуют теоретическое решение задачи теории предельного равновесия. Размеры областей разрушения определены при решении вариационной задачи, минимизирующей функционал: $A - D = 0$ (A – скорость изменения работы силы P ; D – суммарная скорость диссипации энергии для всех линейных шарниров, определяющих механизм разрушения оболочки). Сплошные кривые показывают результаты эксперимента по исследованию несущей способности для 37 оболочек, выточенных из труб, при локальном нагружении штампом (картина разрушения, полученная в эксперименте, соответствует приведенной на рисунке схеме с шарнирами).

В [34] исследована важная практическая задача предельного анализа – определение разрушающей нагрузки для составной кони-

ческой оболочки реального элемента конструкции РКТ. Механизм разрушения при осевом сжатии связан с образованием кольцевых пластических шарниров. Сравнение теоретических исследований с результатами эксперимента показало хорошее совпадение. В [35] приведены результаты по определению предельных нагрузок шпангоутов, вырезанных из топливных баков ракет (материал АМг6М) при 4 и 6 сосредоточенных силах. Реализованная расчетная схема с введением локальных пластических шарниров дала хорошее совпадение с результатами эксперимента.

Укажем на качественную связь теории предельного равновесия с теорией хрупкого разрушения: большинство случаев разрушения, которые внешне выглядят и описываются как хрупкие, на самом деле представляют собой разрушение при предельных нагрузках или развитой пластичности. Этот факт определен как известный, но все еще часто забываемый [36].

На рис. 3 приведены результаты теоретического исследования влияния истории нагружения на предельные нагрузки цилиндрической оболочки при осевой силе T и внешнем давлении q (программы изменения T и q показаны в верхней левой части рисунка: пропорциональное изменение T и q (1), нагружение силой T с выходом в область упругих деформаций, а затем давлением q до достижения предельной нагрузки) [4, 29].

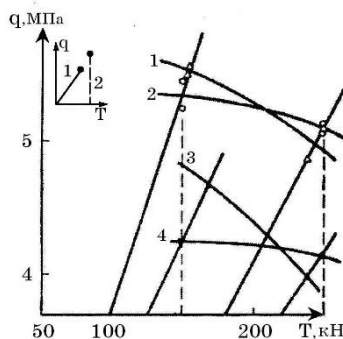


Рис. 3. Предельные нагрузки цилиндрической оболочки

Расчеты проведены для оболочки из сплава 7005. Параметры: $R/h=31,5$; $L/R=1,5$ (R, h, L – радиус, толщина, длина) с ис-

пользованием ТП, учитывающей микронапряжения [11]. Кривые 3, 4 определяют границы предельных областей. Их взаимное расположение различно (в одной части плоскости $T - q$ дает более низкий уровень предельных нагрузок программа 1, в другой – программа 2).

На рисунке приведены также результаты экспериментального исследования предельных нагрузок 8 цилиндрических оболочек, выточенных из труб (сплав 7005). Треугольником и кружком определены критические нагрузки для программ 1, 2. Кривые 1, 2 определяют предельные области, построенные по результатам эксперимента. Качественно они подтверждают результаты расчета (кривые 3, 4). Различие объясняется разбросом механических характеристик, неточным соблюдением граничных условий шарнирного опирания в эксперименте.

На рис. 4 показаны результаты исследования влияния вида геометрических несовершенств формы на предельное значение внешнего давления для цилиндрической оболочки. Сплошные линии характеризуют нерегулярные несовершенства (не совпадающие с формой разрушения оболочки без несовершенств).

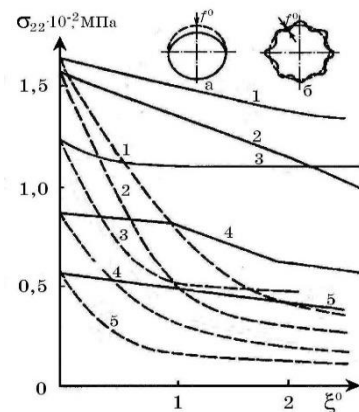


Рис. 4. Влияние нерегулярных (а) и регулярных (б) несовершенств на предельное внешнее давление

Штриховые линии соответствуют регулярным геометрическим несовершенствам формы вида $w^0 = \sin \lambda x \sin n y$ ($\lambda = \pi/L$, $n = n/R$). Кривые 1 – 5 построены для параметров R/h и L/R : 30 и 1; 30 и 1,5; 50 и 1; 50 и 1,5; 100 и 1; 100 и 1,5 соответственно

(для сплава 7005). Минимизирующие значения n для штриховых кривых 1 – 5 равны 6, 5, 7, 8, 7. По оси абсцисс отложено отношение $\xi^0 = f^0/h$ (f^0 – максимальное значение прогиба w^0). Видно, что регулярные несовершенства формы сильнее влияют на снижение предельной нагрузки.

Влияние особенностей пластического деформирования материала на критические нагрузки оболочечных систем

Различные типы геометрических несовершенств характеризуют разные механизмы деформирования и несущей способности оболочечных систем. Экспериментальные исследования позволяют исследовать параметры процессов нелинейного деформирования и значения критических нагрузок для разных типов несовершенств. Ранее было отмечено, что в эксперименте определяется предельная нагрузка. Бифуркационные нагрузки для неоднородных систем (к ним относятся оболочки с геометрическими несовершенствами) несколько меньше предельных. Это характеризует поведение оболочечных систем при пластических деформациях. Различные особенности экспериментальных исследований при анализе неупругого деформирования оболочек изучены в [4, 26, 27, 33 – 35, 37 – 40].

Приведем результаты исследования устойчивости цилиндрических оболочек из разного материала при осевом сжатии, которые позволяют сделать выводы о влиянии начальных несовершенств [37].

Обнаружено, что оболочки, изготовленные из материала с одним и тем же модулем упругости, но разными пределами текучести σ_s , имеют разные критические нагрузки, несмотря на то, что потеря устойчивости происходила в упругой области деформирования (критические напряжения $\sigma_{кр}$ для идеальной оболочки определяются здесь модулем упругости E и геометрическими параметрами оболочки: $\sigma_{кр} = KEh/R$). При этом оболочки из материала с более низкими σ_s (мягкая сталь X18H9) теряли устойчивость при более низких $\sigma_{кр}$. Рис. 5 показывает некоторые особенности исследований.

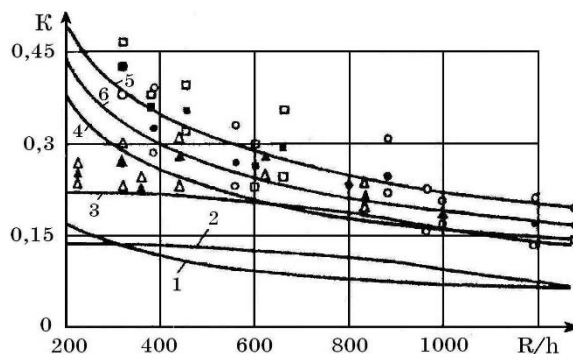


Рис. 5. Влияние пластических свойств материала на устойчивость оболочек при осевом сжатии

Испытано 170 оболочек с $L/R=3$, изготовленных с применением точечной сварки из листового материала (мягкая и нагартованная стали X18H9, алюминиевый сплав 7005). По оси ординат отложен коэффициент K в формуле для критического напряжения, по оси абсцисс отношение R/h . Кривая 1 дает нижнюю границу K по формуле $K = 2,35\sqrt{h/R}$. Кривые 2, 3 построены по известной формуле Доннела $K = [1 + 1,65 \cdot 10^{-7} (R/h)^2] [1 + 0,004 E/\sigma_s]^{-1}$ для материала X18H9 и 7005. Кривые 4 – 6, построенные по результатам эксперимента, определяют эмпирические значения коэффициента $K = \alpha (\sigma_s/E)^\beta \sqrt{h/R}$ для двух классов стали X18H9 и сплава 7005. Треугольники и квадраты соответствуют мягкой и нагартованной стали X18H9, кружки – сплаву 7005 (зачерненные значки – усредненные значения K , светлые – нижние и верхние значения). В результате статистической обработки экспериментальных данных получено: $\alpha = 2,62$, $\beta = 0,241$. Снижение критических напряжений для оболочек из материала с более низким σ_s объясняется влиянием неизбежных геометрических несовершенств и неоднородности напряженного состояния. Для оболочек с более низким σ_s быстрее образуются пластические зоны, ведущие к уменьшению жесткости и снижению критической нагрузки.

Рис. 6 показывает результаты расчета и экспериментальные данные для цилиндрических оболочек из алюминиевого сплава 7005 с нерегулярными геометрическими несовершенствами, полученными при предварительном импульсном нагружении внешним давлением [4].

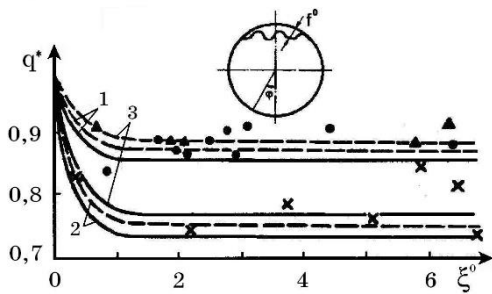


Рис. 6. Теоретический анализ и экспериментальные данные для оболочек после предварительного импульсного нагружения

В верхней части рисунка показан вид характерных начальных несовершенств. Сплошные линии 1 – 3 дают результаты расчета для $R/h=75; 100; 150$ и $L/R=1$. Штриховыми линиями отмечены кривые, аппроксимирующие экспериментальные данные, кружки, крестики и треугольники соответствуют оболочкам с $R/h=75; 100; 150$.

Для оболочек с $R/h=150$ пластические деформации не возникали.

При нагружении оболочки, разгрузке и последующем повторном нагружении изменяется предел текучести материала (происходит упрочнение).

Рис. 7 показывает результаты расчета предельной нагрузки цилиндрической оболочки из сплава 7005 с параметрами $R/h=90$, $L/R=0,4$ с учетом и без учета упрочнения материала. Сплошные и пунктирные линии характеризуют результаты расчета с учетом и без учета упрочнения.

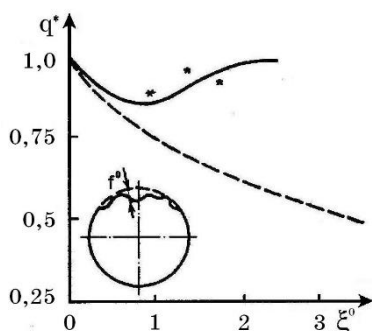


Рис. 7. Предельная нагрузка для оболочки с учетом и без учета упрочнения

Упрочнение качественно меняет зависимость q^* от ξ^0 , существенно увеличивая предельную нагрузку оболочки. Показан-

ные экспериментальные точки наглядно демонстрируют необходимость учета упрочнения материала.

Рис. 8 характеризует развитие прогибов цилиндрических оболочек, имеющих геометрические несовершенства формы, изображенные в верхней части рис. 8 а, б, при внешнем давлении.

Представлены результаты расчета для оболочек из сплава 7005 с параметрами R/h , L/R , равными $(90; 0,4)$, $(76; 0,65)$.

На рисунке показано изменение приращений прогибов в среднем сечении оболочки ($x=L/2$) при нагрузках, которые непосредственно предшествуют предельным.

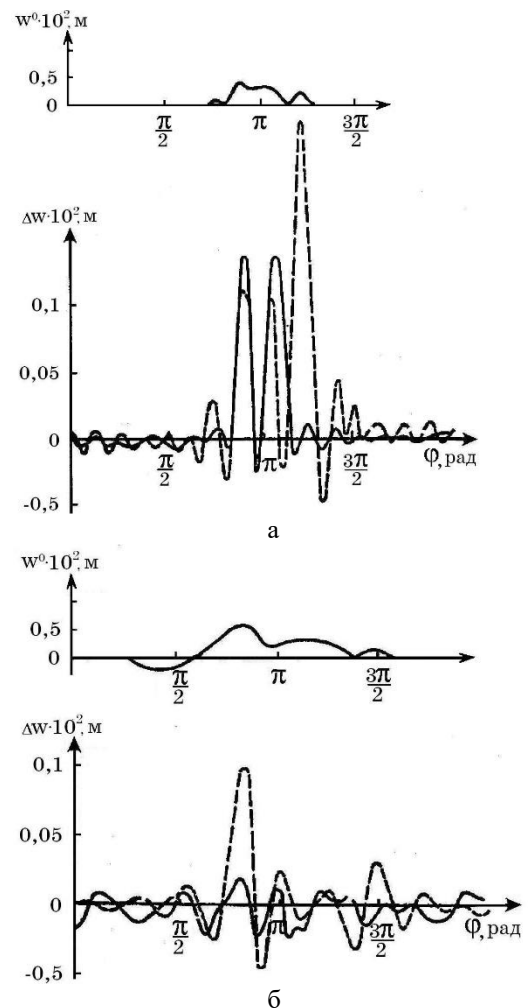


Рис. 8. Развитие прогибов оболочек с учетом (а) и без учета (б) упрочнения материала

Сплошные и пунктирные линии определяют результаты решения с учетом и без

учета упрочнения материала. В первом случае рост прогибов при нагружении является менее интенсивным [4, 26, 29].

Особое влияние на поведение оболочечных конструкций оказывают основные проявления неоднородности: отверстия-вырезы и дефекты в материале в виде нарушений сплошности (в частности, трещины), которые определяют процессы разрушения материала.

Отверстия-вырезы и указанные микродефекты в виде нарушений сплошности (трещины, поры) являются локальными концентраторами НДС [17, 25].

Отметим интересную особенность влияния концентрации напряжений в тонкостенных конструкциях. При их деформировании в окрестностях отверстий-вырезов возникают сжимающие напряжения, что приводит к локальной потере устойчивости.

Это явление теоретически и экспериментально исследовано в ряде работ [25, 41, 42].

При исследовании влияния проявлений конструктивной неоднородности в виде отверстий-вырезов и дефектов (нарушений сплошности) велика роль численных методов, которые зачастую являются единственным инструментом для анализа. Применение аналитических методов ограничено, в частности, каноническими формами отверстий-вырезов и микродефектов. В вводной части статьи говорилось об эффективности использования при этом вариационно-сеточных методов и проекционно-итерационных схем их реализации. Эти схемы для метода конечных элементов использованы в исследованиях влияния отверстий-вырезов и включений при учете пластического деформирования материала. В случае нескольких отверстий исследуется взаимное влияние отверстий-вырезов. Рассматривается процесс образования и трансформации пластических зон. Их возникновение и увеличение при росте нагрузки и последующее слияние приводит к уменьшению жесткости конструктивных элементов (в этом случае в выражения для жесткостей вместо модуля упругости E входит касательный или секущий модуль меньше E либо их комбинации) и, следовательно, к уменьшению их несущей способности [43, 44]. Проекционно-

итерационные схемы метода конечных элементов приводят к уменьшению компьютерного времени расчета в десятки раз (по сравнению с расчетом на основе традиционного метода конечных элементов – на одной сетке) [15, 16, 45].

Влияние ползучести при исследовании устойчивости оболочек

Для РКТ исследования в области теории ползучести важны, в первую очередь, когда температура высока и ползучесть может привести к преждевременному разрушению [13, 14]. Особый класс задач связан с явлениями так называемой холодной ползучести при обычных температурах, когда напряжения близки к пределу текучести материала. Накопление деформаций ползучести может привести к потере устойчивости оболочечных конструкций РКТ. Возможность такого сценария разрушения привлекла внимание к схеме эксплуатации жидкостных ракет, когда они находятся в заправленном состоянии много лет, вследствие чего в 80-е годы прошлого столетия всерьез занялись исследованиями теории устойчивости при ползучести тонкостенных конструкций НИИ, связанные с разработкой проблем РКТ (ЦНИИмаш, СибНИА, КБ «Южное», ИТМ НАНУ и др.) [14, 20, 46, 47].

Существуют так называемые условные критерии устойчивости при ползучести. Они, как правило, дают критическое время значительно ниже полученного в эксперименте [13, 14, 21]. Реальным является подход, связанный с критерием начальных несовершенств, когда рассматривается развитие начальных прогибов вплоть до потери устойчивости (выпучивания) оболочечных конструкций [13, 14, 48].

На рис. 9 приведены графики, определяющие зависимости безразмерного параметра времени $\xi = Ep_i/\sigma_i$ (E – модуль упругости; p_i , σ_i – интенсивности деформаций ползучести и напряжений) от суммарности прогиба для цилиндрической оболочки АМГБМ с начальным прогибом $w_0 = 0,4h$ и параметрами $R/h = 176$, $L/R = 4,83$ при осевой силе T и внутреннем давлении q .

Кривые 1-3 соответствуют значениям q , равным 0,136; 0,17; 0,23 МПа; $\rho = T/2\pi Rh = 60$ кН/м. При значениях ξ^* происходит резкое возрастание прогиба, что определяет выпучивание.

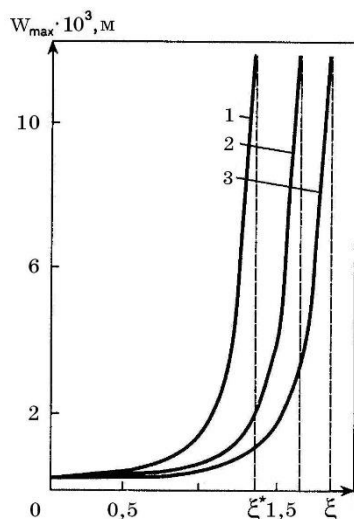


Рис. 9. Изменение максимального прогиба оболочек при ползучести с учетом мгновенных пластических деформаций, достигнутых при пропорциональном изменении осевой силы и внутреннего давления

На рис. 10 построена поверхность, определяющая состояние оболочки при выпучивании.

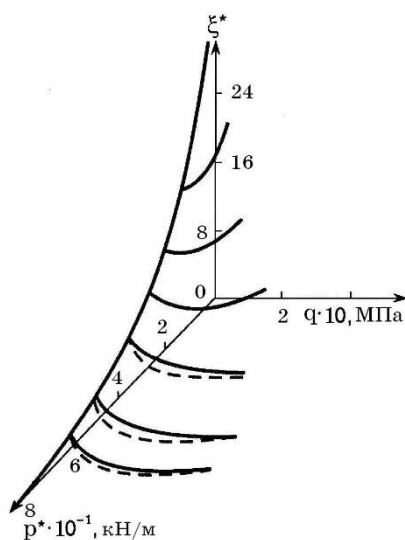


Рис. 10. Поверхность, определяющая предельное состояние оболочки при выпучивании в условиях ползучести

Численный анализ показывает, что любая сложная программа изменения нагрузок дает большие значения критического времени, чем их пропорциональное изменение

(на рис. 10 сплошные линии определяет пропорциональное изменение нагрузок, пунктир – сложное нагружение с возникновением мгновенных пластических деформаций).

Разработка методологии нормативных основ расчета ресурса конструкций стартовых комплексов космических ракет-носителей

Применение методов, учитывающих деформации пластичности и ползучести, является принципиальным при исследованиях по созданию нормативных основ расчета ресурса конструкций стартовых сооружений космических ракет-носителей и предназначенных для вывода на околоземную орбиту космических аппаратов различного назначения. Соответствующие стартовые комплексы созданы и успешно функционируют во многих странах мира [23, 49].

При проектировании стартовых комплексов основной задачей является разработка теоретических основ, моделей и методов обоснования тактико-технических требований с учетом обеспечения стойкости и живучести к поражающим факторам, разработка и реализация методов расчета НДС, моделирование газодинамических, массо-теплообменных процессов при функционировании пусковых установок.

Основные методологические этапы расчета ресурса включают в себя классификацию видов нагрузок, определение видов повреждений, выбор критериев наступления предельного состояния и гипотез суммирования повреждений, разработку подходов к определению числа пусков. Под критическим ресурсом подразумевается критическое (предельное) время работы или число пусков за это время, когда в опасных зонах несущих элементов достигаются предельные состояния: образование недопустимых деформаций пластичности и ползучести, критических трещин различной физической природы, развитие коррозионных повреждений и др. [21, 23, 50].

Классификация основных факторов, определяющих ресурс, осуществляется по различным признакам. Стартовые сооружения различного типа относятся к категории

крупных систем высокой степени сложности, особенностью которых является иерархическая структура их элементов. При использовании иерархического подхода выбираются порядок следования признаков, т. е. направление перехода от подмножества одного уровня деления на подмножество другого уровня [23].

Нагрузки и механические характеристики являются случайными величинами, что приводит к необходимости разработки вероятностных моделей факторов, характеризующих соответствующие процессы деформирования и разрушения [23, 28].

Среди действующих нагрузок следует выделить ударно-волновые, акустические, тепловые. Повреждения можно рассматривать как несовершенства формы или нарушения структуры материала, возникающие во время эксплуатации. Очагами их развития являются обычные дефекты изготовления и монтажа. Повреждения можно разделить на механические (разрывы, трещины, потеря устойчивости, искривления, абразивный износ), температурные (коробление, разрушение элементов при высоких температурах, повреждения защитных покрытий при нагреве), химические и электрохимические (коррозия металла и разрушение защитных покрытий). При выборе гипотезы суммирования повреждений и критерия наступления предельного состояния определяются схемы появления усталостных трещин в элементах конструкций. При этом, в частности, используются упомянутые выше понятия превращения элемента конструкции в механизм, общая или локальная потеря устойчивости, разрушение от усталости материала при многократном нагружении. Рассматриваются различные механизмы, связанные с деформированием и разрушением с учетом возникших пластических деформаций и деформаций ползучести [1, 4, 5, 11, 21, 23, 26, 34, 49, 51].

Ресурс стартовых сооружений определяется количеством пусков. При решении этой задачи следует учитывать подходы для экстремальных термоциклических воздействий на основе механизмов усталости, что также учитывает понятия деформирования с учетом пластичности и ползучести. Возможен подход к определению ресурса, связанный с

определением коэффициента запаса по ресурсу, учитывающего, в частности, разброс физико-механических характеристик материала конструкции, степень опасности возможного разрушения элемента силовой конструкции, наступление предельного состояния которого приводит к выходу ее из строя [23, 50, 52, 53].

Выводы

Рассмотрены различные аспекты влияния деформаций пластичности и ползучести, определяющих экстремальные процессы деформирования неоднородных оболочечных систем, моделирующих элементы конструкций РКТ.

Отражены современные методологические подходы к исследованию процессов деформирования и достижению критических состояний, характеризующих разрушение конструктивных элементов или появление недопустимых для их дальнейшей эксплуатации факторов (искажения формы, нарушения сплошности: трещины, поры, появление дефектов строения материала, остаточные деформации и др.). Описаны особенности расчетов НДС и критических нагрузок элементов конструкций РКТ, соответствующих экспериментальных исследований при учете указанных видов деформаций, приведены результаты исследований ряда актуальных задач прочности и устойчивости РКТ.

Список использованной литературы

1. Ильюшин А. А. Труды в 4-х т. М., 2004. Т. 2. Пластичность. 408 с.
2. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М., 2001. 700 с.
3. Hutchinson J. W. Plastic buckling. *Advances in Appl. Mech.* 1974. V. 14. P. 67 – 144.
4. Гудрамович В. С. Устойчивость упруго-пластических оболочек / отв. ред. П. И. Никитин. Киев, 1987. 216 с.
5. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения. М., 1985. 504 с.
6. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М., 1968. 504 с.

7. Моссаковский В. И., Гудрамович В. С., Makeev E. M. Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций / отв. ред. В. Л. Рвачев. Киев, 1988. 288 с.
8. Hudramovych V. S. Contact mechanics of shell structures under local loading. *Int. Appl. Mech.* 2009. V. 45, No 7. P. 708 – 729.
9. Ильюшин А. А. Труды в 4-х т. М., 2009. Т. 4. Моделирование динамических процессов в твердых телах и инженерные приложения. 526 с.
10. Гудрамович В. С. Пластическое выпучивание цилиндрической оболочки конечной длины при импульсном локальном нагружении. *Теория оболочек и пластин*: тр. 8-й Всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин (Ростов-на-Дону, 1971 г.). М., 1973. С. 125 – 130.
11. Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела. *Сб. науч. тр., посв. 70-летию со дня рожд. Ю. Н. Работнова* / отв. ред. К. В. Фролов. М., 1984. 210 с.
12. Бинкевич Е. В., Трошин В. Г. Об одном способе линеаризации уравнений теории оболочек среднего изгиба. *Прочность и долговечность элементов конструкций*: сб. науч. тр. / отв. ред. В. С. Гудрамович. Киев, 1983. С. 53 – 58.
13. Работнов Ю. Н. Проблемы механики деформируемого твердого тела. Избранные труды / отв. ред. К. В. Фролов. М., 1991. 196 с.
14. Гудрамович В. С. Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов тонкостенных конструкций. Киев, 2005. 224 с.
15. Hudramovych V. S., Hart E. L., Ryabokon' S. A. Plastic deformation of nonhomogeneous plates. *J. Math. Eng.* 2013. V. 78, Iss. 1. P. 181 – 197.
16. Hart E. L., Hudramovych V. S. Applications of the projective-iterative versions of FEM in damage problems for engineering structures. *Maintenance 2012. Proceedings of 2th Int. Conf. (Zenica, Bosnia and Herzegovina, 2012). Zenica, 2012. P. 157 – 164.*
17. Гудрамович В. С., Гарт Э. Л. Конечноэлементный анализ процесса рассеянного разрушения плоскодеформируемых упруго-пластических сред с локальными концентраторами напряжений. *Упругость и неупругость*: материалы Междунар. симп. по проблемам механики деформ. тел, посв. 105-летию со дня рождения А. А. Ильюшина (Москва, янв. 2016 г.). М., 2016. С. 158 – 161.
18. Лазарев Т. В., Сиренко В. Н., Дегтярев М. А. и др. Высокопроизводительная вычислительная система для расчетных задач ГП КБ «Южное». *Ракетная техника. Новые возможности*: науч.-техн. сб. / под ред. А. В. Дегтярева. Днепр, 2019. С. 407 – 419.
19. Сиренко В. Н. О возможности проведения виртуальных испытаний при разработке ракетно-космической техники с целью определения предельных несущих свойств. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій*: тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті акад. НАНУ В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження). (Дніпро, 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 43 – 44.
20. Дегтярев А. В. Шестьдесят лет в ракетостроении и космонавтике. Днепропетровск, 2014. 540 с.
21. Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений. М., 2010. 416 с.
22. Song Z. Test and launch control technology for launch vehicles. Singapore, 2018. 256 p.
23. Hudramovych V. S., Sirenko V. N., Klimenko D. V., Daniev Ju. F., Hart E. L. Development of the normative framework methodology for justifying the launcher structures resource of launch vehicles. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51, No 3. P. 333 – 340.
24. Григолюк Э. И., Шалашилин В. В. Проблемы нелинейного деформирования. Метод продолжения по параметру в нелинейных задачах механики деформируемого твердого тела. М., 1988. 232 с.
25. Hudramovych V. S. Features of nonlinear deformation of shell systems with geometrical imperfections. *Int. Appl. Mech.* 2006. Vol. 42, No 7. P. 3 – 37.
26. Гудрамович В. С. Критические состояния неупругих оболочек при сложном нагружении. *Устойчивость в МДТТ*: материалы Всесоюзн. симп. (Калинин, 1981 г.) / под ред. В. Г. Зубчанинова. Калинин, 1981. С. 61 – 87.
27. Гудрамович В. С. Устойчивость и несущая способность пластических оболочек. *Прочность и долговечность конструкций*: сб. науч. тр. / отв. ред. В. С. Будник. Киев, 1980. С. 15 – 32.

28. Гудрамович В. С., Переверзев Е. С. Несущая способность и долговечность элементов конструкций / отв. ред. В. И. Моссаковский. Киев, 1981. 284 с.
29. Гудрамович В. С., Коноваленков В. С. Деформирование и предельное состояние неупругих оболочек с учетом истории нагружения. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1987. №3. С. 157 – 163.
30. Hudramovich V. S. Plastic and creep instability of shells with initial imperfections. *Solid mechanics and its applications* / Ed. G. M. L. Gladwell V. 64. Dordrecht, Boston, London, 1997. P. 277–289.
31. Hudramovich V. S., Lebedev A. A., Mossakovsky V. I. Plastic deformation and limit states of metal shell structures with initial shape imperfections. *Light-weight steel and aluminium structures: proceedings Int. Conf. (Helsinki, Finland, 1999)* / Ed. P. Makelainen. Amsterdam, Lousanne, New York, Tokyo, 1999. P. 257–263.
32. Кушнір Р. М., Николишин М. М., Осадчук В. А. Пружний та пружнопластичний граничний стан оболонок з дефектами. Львів, 2003. 320 с.
33. Гудрамович В. С. Предельный анализ – эффективный способ оценки конструкционной прочности оболочечных систем. *III Міжнар. конф. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій»* (Львів, 2003 р.) / під ред. В.В. Панасюка. Львів, 2003. С.583–588.
34. Герасимов В. П., Гудрамович В. С., Ларионов И. Ф. и др. Пластическое разрушение составных оболочечных конструкций при осевом сжатии. *Пробл. прочности*. 1979. №11. С. 58 – 61.
35. Гудрамович В. С. Герасимов В. П., Деменков А. Ф. Предельный анализ элементов конструкции / отв. ред. В. С. Будник. Киев, 1990. 136 с.
36. Друкер Д. Макроскопические основы теории хрупкого разрушения. Разрушение. М., 1973. Т. 1. С. 505 – 569.
37. Галкин В. Ф., Гудрамович В. С., Моссаковский В. И., Спиридонов И. Н. О влиянии предела текучести на устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1973. №3. С. 180 – 182.
38. Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Селиванов Ю. М. Методы голографической интерферометрии в механике неоднородных тонкостенных конструкций. Днепр, 2017. 288 с.
39. Гудрамович В. С., Скальський В. Р., Селіванов Ю. М. Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів / відповід. ред. З. Т. Назарчук. Львів, 2017. 488 с.
40. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. Киев, 2018. 242 с.
41. Гузь А. Н., Дышель М. Ш., Кулиев Г. Г., Милованова О. Б. Разрушение и локальная потеря устойчивости тонкостенных тел с вырезами. *Прикл. механика*. 1981. Т. 17, №8. С. 3 – 24.
42. Гудрамович В. С., Дисковский И. А., Макеев Е. М. Тонкостенные элементы зеркальных антенн. Киев, 1986. 152 с.
43. Hudramovich V. S., Hart E. L., Klimenko D. V., Ryabokon' S. A. Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation. *Strength of Materials*. 2013. V. 45, Iss. 1. P. 1 – 9.
44. Гудрамович В. С., Клименко Д. В., Гарт Э. Л. Влияние вырезов на прочность цилиндрических отсеков ракет-носителей при неупругом деформировании материала. *Космічна наука і технологія*. 2017. Т. 23, № 6. С. 12 – 20.
45. Гарт Э. Л., Гудрамович В. С. Проекційно-ітераційні схеми реалізації варіаційно-сіткових методів у задачах пружно-пластичного деформування неоднорідних тонкостінних конструкцій. *Математичні методи і фізико-механічні поля*. 2019. Т. 51, № 3. С. 24 – 39.
46. Никитин П. И., Гудрамович В. С., Ларионов И. Ф. Устойчивость оболочек в условиях ползучести. *Ползучесть в конструкциях: тез. докл. Всесоюзн. симпозиума* (Днепропетровск, 1982 г.). Днепропетровск, 1982. С. 3 – 5.
47. Гудрамович В. С. Об исследованиях в области теории ползучести в Институте технической механике НАНУ и ГКАУ. *Техн. механика*. 2016. №4. С. 85 – 89.
48. Hoff N. J., Jahsman W. E., Nachbar W. A. A study of creep collapse of a long circular

shells under uniform external pressure. *J. Aerospace Sci.* 1959. Vol. 26, No 10. P. 663 – 669.

49. Бармин И. В. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. В 2-х кн. М., 2005. Кн. 1. 412 с. М., 2005. Кн. 2. 376 с.

50. Махутов Н. А., Матвиенко Д. Г., Романов А. Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. М., 2018. 720 с.

51. Гохфельд Д. А., Садаков О. С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М., 1984. 256 с.

52. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник в 2-х т. Киев, 1987. Т. 1. 510 с. Киев, 1987. Т. 2. 825 с.

53. Manson S. S. and Halford G. R. Fatigue and durability of structural materials. *ASM International Material Park*. Ohio, USA, 2006. 456 p.

Статья поступила 12.02.2020