

УДК 629.19

DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0020

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР КОРПУСОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

©2021

Вольников Михаил Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление»
Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, e-mail: vmi1972@yandex.ru)

Аннотация. Возрастающие нагрузки на космическую технику, связанные с увеличением сроков эксплуатации и увеличением выводимой на орбиту полезной нагрузки, обуславливают повышение требований к надежности летательных аппаратов, большинство элементов корпусов которых представляют многослойные гетероструктуры. Эти гетероструктуры подвергаются хаотичным воздействиям, способным привести к возникновению дефектов в корпусах аппаратов, особенно на участках с повышенными напряжениями в материале, на которых могут возникать разрушения материала с образованием трещин. Разработка методов повышения надежности аэрокосмических аппаратов непосредственно связана с исследованием поведения гетероструктур при различных типах нагрузок. Решению этой задачи способствует моделирование процессов, протекающих в напряженных конструкциях, позволяющее выявить причины возникновения дефектов и выявить средства устранения или нейтрализации дефектов без проведения затратных натурных испытаний. В работе рассматриваются методы математического описания напряжений в многослойных гетерогенных оболочках и пластинах, имитирующих корпус летательного аппарата, а также связанных с корпусом элементов, позволяющие определять максимальные импульсные нагрузки, приводящие к дефектам гетероструктур. Рассматриваются условия и методы предотвращения или остановки распространения трещин в оболочках, с учетом изменений свойств материала в зависимости от скорости деформирования.

Ключевые слова: многослойная оболочка, гетероструктура, остановка трещин, скорость деформирования, напряжение.

SIMULATION OF DYNAMICS OF SPACECRAFT HULL HETEROSTRUCTURES UNDER IMPACT LOADS

©2021

Vol'nikov Mikhail Ivanovich, candidate of technical sciences,
associate professor, sub-department of automation and control
Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukova lane / Gagarina Street, 1a/11, e-mail: vmi1972@yandex.ru)

Abstract. The increasing loads on space technology associated with longer life and increased payloads in orbit have increased the reliability requirements of aircraft, most of whose hull elements are multilayer heterostructures. These heterostructures are subjected to chaotic effects that can lead to defects in the hulls of the apparatus, especially in areas with increased stresses in the material, on which fractures of the material can occur with the formation of cracks. The development of methods for improving the reliability of aerospace vehicles is directly related to the study of the behavior of heterostructures under various types of loads. The solution of this problem is facilitated by modeling of processes taking place in stressed structures, which makes it possible to find out the causes of defects and identify means of eliminating or neutralizing defects without carrying out costly full-scale tests. The article discusses methods of mathematical description of stresses in multilayer heterogeneous shells and plates that simulate the aircraft hull, as well as elements associated with the hull, which allow determining maximum impulse loads leading to defects in heterostructures. Conditions and methods of preventing or stopping crack propagation in shells are considered, taking into account changes in material properties depending on deformation rate.

Keywords: multilayer shell, heterostructure, crack stop, strain rate, stress.

Введение. В последнее время на космических аппаратах, составляющих основу МКС, возникают проблемы утечки воздуха из-за появления трещин в корпусе корабля. Среди основных причин возникновения трещин можно выделить следующие:

- брак в обшивке корабля при изготовлении;
- напряжения, связанные с разностью внешнего и внутреннего давления в аппарате;
- случайные импульсные нагрузки, вызванные ударами космического мусора, метеоритных тел, потенциально возможными спецвоздействиями противника.

Причинами возникновения микротрещин могут также явиться большие нагрузки на корпус при включении двигателей, пристыкованных кораблей, воздействия на корпус космической станции многочисленных наводок от работающих электроприборов и магнитного поля Земли. В связи с этим растут требования к надежности и безопасности аэрокосмической техники, особенно к надежности корпусов конструкций и прилегающих к ним элементов.

При изготовлении корпусов космических аппаратов, в большинстве случаев применяются многослойные гетерогенные материалы, обладающие

улучшенными защитными свойствами и отвечающие экстремальным условиям эксплуатации. К таким гетерогенным материалам относятся различные композиты, керамики, разнородные многослойные оболочки. Основные элементы конструкций космической техники являются материалы, в большинстве случаев, представляющие собой пластины и оболочки, имеющие многослойные гетерогенные структуры, выполненные из металлических и неметаллических материалов [1-3]. Эти элементы подвергаются в процессе эксплуатации действию внешних и внутренних возмущений, основными из которых являются:

- интенсивные динамические нагрузки;
- работа в широком диапазоне температур;
- контакт с агрессивными средами;
- интенсивное облучение и т.д.

Многослойность элементов конструкций дает существенное преимущество перед однослойными материалами, заключающееся в возможности варьирования в широком диапазоне жесткостными, прочностными и весовыми характеристиками, что позволяет уменьшить вес конструкции, увеличить полезную массу, а также повысить трещиностойкость конструкций, устойчивость к разрушениям за счет диссипации энергии в слоях [4]. Корпуса космических аппаратов принято представлять в виде многослойной оболочечной структуры из металлических и неметаллических материалов с отличающимися физико-механическими свойствами. При интенсивных импульсных или ударных нагрузках, при изменяющихся температурных воздействиях в гетерогенных слоях могут возникать пластические деформации и разрушения [5].

Задача проектировщика состоит в создании гетерогенных материалов высокой прочности, противостоящих появлению усталостных деформаций в процессе эксплуатации техники. Проблема решается за счет подбора структуры, состава и размеров специальных материалов, обеспечивающих заданную прочность конструкции при наличии трещин. Другой путь заключается в применении элементов надежности (специальных дорожек переменных нагрузок и пробок, препятствующих развитию трещин), а также в использовании материалов, обладающих низкой скоростью развития трещин при усталости материала [6, 7].

Разработка методов повышения качества и надежности гетерогенных элементов корпусов конструкций и прилегающих к ним элементов космической техники делает данное направление перспективным и актуальным.

Целью работы является исследование факторов, влияющие на снижение надежности сложных гетероструктур на основе математических моделей, проходящих в них процессов.

Материалы и результаты исследования. Для решения поставленной задачи требуется выяснить прямые и косвенные причины снижения надежности и возникновения дефектов в гетероструктурах космической техники.

В качестве основных причин можно выделить следующие:

- наружное давление, действующее на корпус корабля, изменяется в широком диапазоне: от атмосферного (на уровне Земли), до практически нулевого при выходе на орбиту, а давление внутри остается атмосферным, что может привести к образованию трещин, в случае недостаточной надежности корпуса;
- наличие космического мусора, остатки астероидов, попадающих в обшивку корабля, способны вызывать разгерметизацию корпуса с образованием трещин;
- резкие перепады температур вызывают деформации и появление напряжений в конструкциях из разнородных материалов с различными температурными коэффициентами расширения;
- резонансные колебания многослойных гетерогенных конструкций на основной частоте, приводящие к образованию трещин и разрушению материала конструкции [8];
- наличие жесткого космического излучения приводит к изменению свойств гетерогенных материалов, из которых изготовлен корпус. Под влиянием космической радиации меняются физико-механические свойства нагруженных элементов конструкций, что может привести к разрушению и сокращению срока эксплуатации техники [9, 10].

Изучение влияния вышеперечисленных факторов возможно с применением комплексных исследований с использованием математического моделирования гетерогенных оболочечных и пластинчатых конструкций. Математическое моделирование позволит значительно удешевить исследования физических процессов, протекающих в гетерогенных конструкциях и в материалах, за счет отказа от использования натурных испытаний и экспериментов.

Исследования в области гетерогенных оболочечных и пластинчатых конструкций, можно разделить на два направления. Первое направление направлено на исследование общих математических моделей гетероструктур, которые описывают нелинейные процессы, происходящие при деформации и разрушении и вызывающие деформации нестационарные процессы. Второе направление предполагает поиск и выбор оптимальных методов решения задачи на основе известных фундаментальных моделей и проведение соответствующего анализа полученных результатов.

1. Учет скорости деформирования. Для получения и анализа количественной картины останки трещин при использовании гетерогенных материалов в конструкциях современной космической и авиатехники необходимы тщательные теоретические и экспериментальные исследования, в том числе на адекватных математических моделях. При использовании моделей для исследования деформирования конструкций должны быть учтены как нелинейные эффекты в материалах, так и новые эффекты: анизотропия жесткости и прочности в конструкциях; неоднородность упругих и прочностных свойств в различных направлениях

конструкции, определяющих несущую способность конструкции; вязкоупругие свойства материалов, определяющих рассеяние энергии в конструкциях [4].

Экспериментально установлено что у большинства материалов динамические свойства сильно различаются при статических и динамических нагрузках. Главная причина этого заключается в чувствительности материалов к скорости деформации, которая может быть большой, например, при столкновении оболочек или пластин с твёрдыми телами, обладающими значительной скоростью, особенно при спецвоздействиях. Следовательно, при решении динамических задач необходимо учитывать зависимость свойств материала от скорости деформации. Поведение материала при больших скоростях деформирования, возникающих, например, при испытаниях на падение или удар, может существенно отличаться от деформаций, полученных телом в статике, когда измеряются интенсивности напряжений до и после возникновения трещины.

Чувствительность к скорости деформирования для динамических расчетов в металлах учтена в известных моделях Купера-Саймонда и Джонсона-Кука, а для полимеров обычно используется вязкоупругая или вязкопластичная модели. Эти модели с достаточной степенью адекватности описывают зависимость предела текучести материала от скорости деформации с учетом кинематических упрочнений за счет введения в модель масштабирующего коэффициента [11, 12] и представляются формулой

$$\sigma_T^{дин} = \sigma_T \beta; \beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/P}, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}$ скорость деформации; σ_T – предел текучести, $\sigma_T^{дин}$ – динамический предел текучести; C, P – константы материала.

При достижении эффективной пластической деформацией предельного значения в материале конструкции наступают разрушения

$$\epsilon_{eff}^p > \epsilon_B; \quad \epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ – компоненты тензора скоростей пластической деформации.

Для учета кроме эффективной пластической деформации и скорости деформации еще и температурной зависимости при описания предела текучести модель усложняют, вводя дополнительные параметры, характеризующие температурное разупрочнение [12, 13].

$$\sigma_T(\epsilon_{eff}^p, \dot{\epsilon}_{eff}^p, T) = [\sigma_{T_0} + A(\epsilon_{eff}^p)^n] \times \left[1 + C_1 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0^p} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right], \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}$ и T_0 – референтные скорость деформации и температура; T_{melt} – температура плавления металла; σ_{T_0} – предел текучести материала при комнатной температуре; A – чувствительность к деформации, C_1 – чувствительность к скорости деформации, n – параметр, отвечающий за влияние деформационного упрочнения, m – параметр, описывающий температурное разупрочнение.

Критерием разрушения является сопряженная модель на базе кумулятивного закона накопления поврежденности d

$$d = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\epsilon_f^p}, \quad \epsilon_f^p = [d_1 + d_2 \exp(d_2 \frac{p}{q})] \times \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0^p} \right) \right] \left(1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right), \quad (4)$$

где ϵ_f^p – характеристика текущего состояния элементарного объема материала, показывающая критическую интенсивность пластических деформаций, d_i ($i = 1-5$) – константы материала, p и q – первый и второй инварианты тензора напряжений [12].

2. Учет физических и химических свойств гетерогенных материалов. Для повышения надежности оболочек необходим тщательный подбор материала с особыми свойствами. Важное значение имеют материалы, обладающие низкой чувствительностью к скорости деформации или с обратным эффектом скорости, когда увеличение скорости распространения трещины приводит к увеличению сопротивления хрупкому разрушению [6].

Эффект влияния скорости на длину остановки трещины описывается уравнением

$$\frac{v}{c_0} = \frac{35}{3FEY^2} \left[\frac{3EIY^2}{2} \left(\frac{1}{l_0^3} - \frac{1}{l^3} \right) - \int_{l_0}^l (G_{lc} - K) dl \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где v и C_0 – скорость распространения трещины и продольной волны соответственно; Y – стрела прогиба; F – площадь сечения материала; l и l_0 – текущая и начальная длина трещины соответственно; E – модуль Юнга; I – момент инерции поперечного сечения; G_{lc} – сопротивление хрупкому разрушению при плоской деформации; $K = -(dy/dvc)dv$; γ – текущая скорость поглощения энергии, связанная с необратимыми процессами диссипации энергии во время распространения трещины [4].

Принципиально возможен контроль образования трещин в оболочках и пластинах. Задачей в этом случае является нахождение необходимой зависимости $K(l)$. Существует значение K , ниже которого рост трещины будет уже невозможен [14]

$$\frac{3EIY^2}{2} \left(\frac{1}{l_0^3} - \frac{1}{l^3} \right) \leq \int_{l_0}^l [G_{lc} - K(l)] dl. \quad (6)$$

Другим вариантом конструкции, позволяющим предотвращать появления трещин, является применение трехслойных неоднородных по толщине оболочек с тонкостенными жесткими внешними слоями и относительно мягким межслойным наполнителем. Можно также назвать многослойный полимер, обладающий способностью к «самозаживлению». Если в оболочке появляется трещина, например, от микрометеорита, материал автоматически заливает ее и застывает, сохраняя герметичность. В долгосрочной перспективе этот материал может быть использован для защиты космических станций от микрометеоритов и небольшого орбитального космического мусора. Между двумя полимерными пластинами находится слой, содержащий анаэробный герметик специального состава (на основе тиола). Без контакта с воздухом герметик длительное время остается жидким. При попадании,

например, метеорита в полимерные оболочки, герметик начинает выходить и контактирует с воздухом, вызывая химическую реакцию. Полученная масса затвердевает и быстро устраняет трещину [15].

Исходя из вышесказанного, можно выделить несколько путей устранения трещин. Один из них – подбор материалов с определенными свойствами и применение конструктивных решений. Способы, которые совмещают особенности обоих путей предусматривают применение многослойных гетерогенных оболочек или пластин [6].

3. Методика расчета параметров деформирования многослойных оболочек под действием импульсных нагрузок, имитирующих удар метеорита. Для исследования процессов, происходящих в многослойных пластинах и оболочках неоднородной толщины, используются модели ударопрочных многослойных покрытий при взаимодействии с твердыми телами, в том числе и с метеорными телами, которые позволяют гасить ударные нагрузки, действующие на конструкцию.

Практическим приложением методики численного моделирования деформирования многослойных, неоднородных по толщине оболочек под действием ударного взаимодействия с жесткими телами, например метеоритами или космическим мусором, является проектирование многослойных конструкций с ударостойкими покрытиями, демпфирующие ударные нагрузки на оболочку [16, 17].

Кинематическая модель деформирования слоя многослойных оболочек может быть определена гипотезами линейности изменения по толщине нормальных и касательных перемещений

$$S_i^k(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, t) = \tilde{s}_i^k(\alpha_1, \alpha_2, t) + \alpha_3^k \varphi_i^k(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, t) \quad (7)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – координаты точки в криволинейной системе координат;

$$\tilde{s}_i^k = (s_i^{k+1} + s_i^k)/2; \varphi_i^k = (s_i^{k+1} - s_i^k)/h_k;$$

s_i^{k+1} и s_i^k – тангенциальные и нормальные составляющие перемещений на внешней и внутренней поверхностях k -го слоя; h_k – толщина слоя [4].

В однородных слоях оболочек физические зависимости устанавливаются на основе дифференциальной теории пластичности, а в композитных слоях – на основе закона Гука и теории вязкоупругости [18, 19].

Совместное движение оболочки и жесткого тела описывается на основе вариационного уравнение принципа возможных перемещений:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N \int_0^L \left[\frac{T_{11}^{0k}}{A_1^k} \frac{\partial(\delta s_1^{k+1})}{\partial \alpha_1} + \right. \\ & + \left(\frac{T_{22}^{0k}}{A_1^k A_2^k} \frac{\partial A_2^k}{\partial \alpha_1} - k_1^k T_{13}^{0k} + T_{13}^{1k} \right) \delta s_1^{k+1} + \\ & + \frac{T_{13}^{0k}}{A_1^k} \frac{\partial(\delta s_3^{k+1})}{\partial \alpha_1} + \\ & + (T_{11}^{0k} k_1^k + T_{22}^{0k} k_2^k + T_{33}^{0k}) \delta s_3^{k+1} + \frac{T_{11}^{1k}}{A_1^k} \frac{\partial(\delta s_1^k)}{\partial \alpha_1} + \\ & + \left(\frac{T_{22}^{1k}}{A_1^k A_2^k} \frac{\partial A_2^k}{\partial \alpha_1} - k_1^k T_{13}^{0k} - T_{13}^{1k} \right) \delta s_1^k + \frac{T_{13}^{0k}}{A_1^k} \frac{\partial(\delta s_3^k)}{\partial \alpha_1} + \end{aligned}$$

$$+ (T_{11}^{1k} k_1^k + T_{22}^{1k} k_2^k - T_{33}^{1k}) \delta s_3^k \Big] A_1^k A_2^k d\alpha_1 + \quad (8)$$

$$+ \sum_{k=1}^N \int_0^L \sum_{i=1,3} I^k [(2\tilde{s}_i^{k+1} + \tilde{s}_i^k) \delta s_i^{k+1} +$$

$$+ (\tilde{s}_i^{k+1} + 2\tilde{s}_i^k) \delta s_i^k] A_1^k A_2^k d\alpha_1 -$$

$$- \int_0^L \sum_{i=1,3} (F_i^1 \delta s_i^1 + F_i^{N+1} \delta s_i^{N+1}) d\alpha_1 -$$

$$- \sum_{i=1}^N [(\tilde{T}_{11}^{0k} \delta \tilde{s}_1^{k+1} + \tilde{T}_{13}^{0k} \delta \tilde{s}_3^{k+1} +$$

$$+ \tilde{T}_{11}^{1k} \delta \tilde{s}_1^k + \tilde{T}_{13}^{1k} \delta \tilde{s}_3^k) A_1^k A_2^k] \Big|_{\alpha_1=0,L} +$$

$$+ \sum_{i=1,N+1} \int_0^L \lambda (\delta s_3^i - \delta x) A_1^i A_2^i d\alpha_1 +$$

$$+ \frac{m}{2\pi} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \delta x = 0,$$

$$s_2^1(\alpha_1, -h/2, t) = x(t), s_2^{N+1}(\alpha_1, -h_N/2, t) = x(t), \quad (9)$$

$$\alpha_1 \in L_1$$

где L – длина образующей оболочки; L_1 – длина линии контакта, определяемая в процессе решения; λ – неопределенный множитель Лагранжа; $x(t)$ – перемещение жесткого тела; $A_1^k, A_2^k, A_1^1, A_2^1$ – параметры Ламе; k_1^k, k_2^k – главные кривизны поверхностей оболочек;

$T_{11}^{0k}, T_{13}^{0k}, T_{22}^{0k}, T_{33}^{0k}, T_{11}^{1k}, T_{13}^{1k}, T_{22}^{1k}, T_{33}^{1k}, \tilde{T}_{11}^{0k}, \tilde{T}_{13}^{0k}, \tilde{T}_{11}^{1k}, \tilde{T}_{13}^{1k}$ – компоненты усилий, приложенных к соответствующим граничным линиям [4].

Из выражения (8) получим:

– уравнения движения оболочки:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(A_2^1 T_{11}^1)}{\partial \alpha_1} - T_{22}^1 \frac{\partial A_2^1}{\partial \alpha_1} + (T_{13}^{*1} k_1^1 + T_{13}^1) A_1^1 A_2^1 + F_1^1 = \\ & = A_1^1 A_2^1 (2I^1 \tilde{s}_1^1 + I^1 \tilde{s}_1^2), \\ & \frac{\partial(A_2^k T_{11}^k)}{\partial \alpha_1} - T_{22}^k \frac{\partial A_2^k}{\partial \alpha_1} + (T_{13}^{*k} k_1^k - T_{13}^k) A_1^k A_2^k = \\ & = A_1^k A_2^k (I^k \tilde{s}_1^{k-1} + 2(I^k + I^{k-1}) \tilde{s}_1^k + I^k \tilde{s}_1^{k+1}), \\ & \frac{\partial(A_2^{N+1} T_{11}^{N+1})}{\partial \alpha_1} - T_{22}^{N+1} \frac{\partial A_2^{N+1}}{\partial \alpha_1} + \\ & + (T_{13}^{*N+1} k_1^{N+1} - T_{13}^{N+1}) A_1^{N+1} A_2^{N+1} + F_1^{N+1} = \\ & = A_1^{N+1} A_2^{N+1} (I^N \tilde{s}_1^N + 2I^N \tilde{s}_1^{N+1}), \\ & \frac{\partial(A_2^1 T_{13}^1)}{\partial \alpha_1} - A_1^1 A_2^1 (T_{11}^1 k_1^1 + T_{22}^1 k_2^1 + T_{33}^1) + \\ & + F_3^1 = A_1^1 A_2^1 (2I^1 \tilde{s}_3^1 + I^1 \tilde{s}_3^2), \\ & \frac{\partial(A_2^k T_{13}^k)}{\partial \alpha_1} - A_1^k A_2^k (T_{11}^k k_1^k + T_{22}^k k_2^k + T_{33}^k) = \\ & = A_1^k A_2^k (I^k \tilde{s}_3^{k-1} + 2(I^k + I^{k-1}) \tilde{s}_3^k + I^k \tilde{s}_3^{k+1}), \quad (10) \\ & \frac{\partial(A_2^{N+1} T_{13}^{N+1})}{\partial \alpha_1} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - A_1^{N+1} A_2^{N+1} (T_{11}^{N+1} k_1^{N+1} + T_{22}^{N+1} k_2^{N+1} + T_{33}^{N+1}) + \\ & + F_3^{N+1} = A_1^{N+1} A_2^{N+1} (I^N \tilde{s}_3^N + 2I^N \tilde{s}_3^{N+1}); \end{aligned}$$

$$I^n = \rho_n h_n / 6,$$

где ρ_n – определяет плотность n -го слоя, $n=k, N, N+1$

– уравнение для описания движения ударника:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 2\pi \int_0^{L_1} (F_*^1 A_1^1 A_2^1 + F_*^{N+1} A_1^{N+1} A_2^{N+1}) d\alpha_1; \quad (11)$$

где $F_1^1, F_1^3, F_1^{N+1}, F_1^*, F_1^{N+1,*}$ – узловые контактные силы оболочки и ударника (с индексом «*») соответственно.

– граничные условия при $\alpha_l = 0, L$:

$$\begin{aligned} T_{11}^1 &= \bar{T}_{11}^{11}, T_{11}^k = \bar{T}_{11}^{0k-1} + \bar{T}_{11}^{1k}, \\ T_{11}^{N+1} &= \bar{T}_{11}^{0N}, T_{13}^{*1} = \bar{T}_{13}^{11}, \\ T_{13}^{*k} &= \bar{T}_{13}^{0k-1} + \bar{T}_{13}^{1k}, T_{13}^{*N+1} = \bar{T}_{13}^{0N}. \end{aligned} \quad (12)$$

Дополнив уравнения (10) – (12) начальными условиями

$$\begin{aligned} s_i^k(\alpha_1, 0) &= s_i^{0k}(\alpha_1), \dot{s}_i^k(\alpha_1, 0) = \dot{s}_i^{0k}(\alpha_1), \\ x(0) &= x_0, \dot{x}(0) = V_0, \end{aligned} \quad (13)$$

получим систему уравнений, позволяющих проводить анализ нелинейного деформирования многослойных оболочек и пластин при осенаправленном нагружении в виде импульсов силы или соударении с жестким телом.

Для интегрирования системы уравнений (8...13) применяется метод конечных разностей [20, 21], в основе которого лежит и вариационно-разностная схема

$$\begin{aligned} \dot{s}_i^k(t^{n+1/2}) &= \dot{s}_i^k(t^{n-1/2}) + \Delta t \ddot{s}_i^k \\ (i = \overline{1,3}, \quad k = \overline{1, K+1}), \end{aligned} \quad (14)$$

Методика расчета, позволяющая моделировать многослойные ударостойкие оболочки при различных взаимодействиях типа удара, взрыва, поверхностного нагружения или распределенного давления заключается в нахождении на каждом $n+1$ шаге нового положения центра масс тела при контакте с жестким телом и вычислении по формулам (14) перемещений узлов разностной сетки оболочки [4]. Расчет производится с применением метода конечных разностей и прикладных программ для ЭВМ.

Использование математических моделей корпусов кораблей позволит смоделировать условия и динамику поведения оболочек еще до вывода их на орбиту, тем самым определить наиболее уязвимые места. Это даст возможность в значительной мере повысить надежность корпусов кораблей, снизить затраты на ремонт на орбите, повысить долговечность.

Заключение. Описаны факторы, влияющие на надежность сложных гетероструктур, представлено математическое описание процессов деформации конструкций на их основе. Выявлены основные причины снижения надежности и возникновения дефектов в гетероструктурах космической техники. Для предотвращения возникновения разрушений в гетерогенных материалах рекомендованы подбор материалов с пониженной чувствительностью к скорости деформации; использование эффекта влияния скорости распространения на длину остановки трещины; применение многослойных конструкций с ударостойкими покрытиями и самотвердеющими материалами. Предложены аналитические методики исследования скорости деформации и разрушения корпусов космических аппаратов, пригодные для компьютерного моделирования процессов в гетероструктурах под действием импульсных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тестоедов, Н.А. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах / Н.А. Толстоедов, В.Н. Наговицин, М.Ю. Пермяков // Вестник СибГАУ. – 2016. – Т.17. – №1. – С.200-211.
2. Несущая панель корпуса космического аппарата (варианты): заявка 2004119696/11 Рос. Федерация: В 64 G 1/100 / Болотин В.А., Дядькин А.А., Лебедев В.И.; заявитель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»; заявл. 28.06.2004; опубл. 10.12.2005. – Бюл. №34
3. Динамика гетерогенных структур в 3 т. Эволюция ракетно-космических гетерогенных структур / В.В. Смогунов, М.И. Степанов, В.Н. Решилов и др. Под ред. В.В. Смогунова, М.И. Степанова – Т.1. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 311 с.
4. Абросимов, Н.А. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций / Н.А. Абросимов, В.Г. Баженов – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 400 с.
5. Коган, Е.А. О деформировании трехслойной сферической оболочки с сжимаемым наполнителем под действием акустической волны давления / Е.А. Коган, А.А. Юрченко // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т.3. – №1(15). – С.61-68.
6. Разрушение. Пер. с англ. В 7 томах. Том 5: Расчет конструкций на хрупкую прочность / Под ред. Г. Либовица – М.: «Машиностроение», 1977.
7. Инженерный справочник по космической технике. Под ред. Солдатова А.В. Воениздат, М. – 1977. – 430 с.
8. Деев, П.О. Определение основной частоты колебаний трехслойной панели корпуса космического аппарата / П.О. Деев, Ф.К. Синьковский // Вестник СибГАУ. – 2017. – Т.18. – №1. – С.40-49.
9. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, М.Ю. Богина [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – №4.
10. Острик, А.В. Математическая модель разрушения композитных оболочек высокого давления под действием лучистых потоков энергии / А.В. Острик, С.С. Слободчиков // Математическое моделирование – 1995. – Т. 7. – № 10. – С. 33-46.
11. Важность учета скорости деформирования материала в задачах динамики, решаемых в явной постановке / Сайт компании «Софт Инжиниринг Групп» [сайт], 2017. – URL: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/222-vazhnost-ucheta-skorosti-deformirovaniya-materiala-v-zadachakh-dinamiki-reshaemykh-v-yavnoj-postanovke.html> (дата обращения: 25.07.2021)
12. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6 / М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, О.Л. Любчик, И.Л. Гладкий // Известия Самарского НЦ РАН. – 2011. – Т.13. – №4(4). – С. 991-997.
13. Кузькин, В.А. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия / В.А. Кузькин, Д.С. Михалюк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т.3. – №1. – С.32-43.
14. Сазанов, В. П. Исследование закономерностей останковки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом / Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С.160-169.
15. Материал для космических кораблей, восстанавливающийся после пробоя / Сайт «Хабр» [сайт], 2015. – URL: <https://habr.com/ru/post/383429/> (дата обращения: 29.07.2021)
16. Динамика гетерогенных структур. Виброударозащита гетерогенных структур. Том 3. / В.В. Смогунов, И.П. Климинов, О.А. Вдовикина, М.И. Вольников // Под ред. В.В. Смогунова. – Пенза: Из-во Пенз.гос ун-та, 2005. – 497 с.
17. Ванько, В.И. Цилиндрическая оболочка конечной длины под внешним гидростатическим давлением / В.И. Ванько // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: математика. Физика. – 2016. – №13(234). – С.156-168.
18. Манабаев, К.К. Модификации приближенных методов расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из вязкоупругих и композиционных материалов: диссертация канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Манабаев Кайрат

Камитович. – Томск, 2016. – 152 с.

19. Вольников, М.И. Математические модели динамики гетероструктур с трением / М. И. Вольников, В. В. Смогунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 98–108. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-10.

20. Шеин, А.И. Метод конечных элементов в современных иностранных книгах / О.Г. Земцова, А.И. Шеин, О.В. Волкова // Современные научные исследования и инновации. Ч.1. – М: Междунар. научно-иннов.центр, 2015.– № 3 – С. 129-132.

21. Volnikov, M.I. Application of the finite difference method for modeling cantilever bar vibrations / M.I. Volnikov // E3S Web of Conferences, 224 (2020), TPACEE-2020 – P.02002

Статья поступила в редакцию 10.08.2021

Статья принята к публикации 15.09.2021