

На правах рукописи

Чермных Степан Валерьевич



**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ
И УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь - 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент, **Гультяев Вадим Иванович**

Официальные оппоненты: **Головешкин Василий Адамович**, доктор технических наук, профессор, МИРЭА - Российский технологический университет, профессор кафедры «Высшая математика»

Зингерман Константин Моисеевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», заведующий кафедрой «Математического моделирования и вычислительной математики»

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», г. Москва

Защита диссертации состоится «30» сентября 2020 г. в 12:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.191.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», по адресу: 300012, Тула, пр. Ленина, 92 (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», по адресу: 300012, Тула, пр. Ленина, 92, и на сайте http://tsu.tula.ru/files/67/Cheremnykh_dissertation.pdf.

Автореферат разослан «30» июля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Глаголев Вадим
Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности работы материалов и, прежде всего, таких традиционных и широко используемых, как металлы, является одной из наиболее важных проблем, непосредственно связанных с задачей снижения материалоемкости конструкций при одновременном повышении их прочности и долговечности. Требование рационального применения материалов подразумевает снижение коэффициентов запаса прочности и устойчивости, что может быть достигнуто как совершенствованием методов расчета (при традиционном ограничении работы материалов в упругой стадии), так и максимально возможным использованием ресурса материалов, что предполагает учет упругопластической стадии деформирования.

Применение оболочечных конструкций в авиации, космонавтике, строительных сооружениях и машиностроении, а так же учет их работы в экстремальных условиях связанных с возникновением пластических деформаций, поставили исследования закономерностей упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении и деформировании в ряд наиболее важных и актуальных задач механики деформируемого твердого тела.

В настоящее время имеется несколько вариантов теории устойчивости элементов конструкций, учитывающих сложное нагружение. Все они могут быть применимы на разного рода траекториях сложного нагружения материалов, проверены на достоверность при произвольном нагружении (сжатии, кручении, внутреннем давлении) и определении параметров используемых аппроксимаций функций пластичности, что предопределяет необходимость развития и совершенствования экспериментальной базы и методов экспериментальных исследований.

В связи с этим, данная проблема решения задачи устойчивости в развитии современной механики деформируемого твердого тела стала одной из наиболее важных и актуальных проблем теоретической и экспериментальной механики.

Решить данную проблему можно с помощью теоретико-экспериментального моделирования процессов сложного нагружения исследуемых материалов, при этом, для достоверности решения необходимо применять комплексный подход как к выбору варианта теории устойчивости, так и в разработке экспериментальных методов исследования.

Цель представленной диссертационной работы заключается в оценке влияния сложного нагружения на величины деформации и напряжения цилиндрических тонкостенных оболочек постоянной толщины при процессах

докритического растяжения, сжатия, кручения и внутреннего давления на материал в момент потери устойчивости.

Задачи исследования:

– изучение устойчивости цилиндрических оболочек по траекториям пропорционального докритического нагружения в девиаторном пространстве деформаций А.А.Ильюшина $\mathcal{E}^{(3)}$ с помощью экспериментальных исследований;

– выбор методов, разработка основных алгоритмов, а так же математических моделей и программ для решения прикладных задач бифуркации цилиндрической оболочки, используя определяющие соотношения гипотезы компланарности А.А.Ильюшина, а так же аппроксимации определяющих функций пластичности В.Г.Зубчанинова.

– верификация физической достоверности применяемого варианта теории пластичности по отношению к решению задачи бифуркации, и сравнение с параметрами, полученными другими исследователями при проведении экспериментальных и расчетных исследований;

– определение интервалов применения одного из видов теории пластичности в решении задачи устойчивости круговых тонкостенных цилиндрических оболочек при процессах докритического нагружения.

Научная новизна определяется в следующем:

– в соответствии с теорией устойчивости неупругих систем В.Г. Зубчанинова при сложном нагружении, представлено нигде ранее не опубликованное решение задачи устойчивости круговой тонкостенной цилиндрической оболочки, решенное в бифуркационной постановке;

– разработана методика решения задачи бифуркации оболочки постоянного кругового сечения согласно определяющих соотношений гипотезы компланарности А.А.Ильюшина, а так же теории устойчивости упругопластических систем и аппроксимаций определяющих функций пластичности В.Г.Зубчанинова в момент потери устойчивости при действии усилий докритического сжатия, кручения, а также внутреннего давления на материал;

– определены интервалы применения одного из видов определяющих соотношений теории пластичности в момент бифуркации при простом и сложном нагружении;

– с помощью проведенных на автоматизированном комплексе СМ-ЭВМ экспериментов были исследованы ранее неизвестные экспериментальные данные о процессах потери устойчивости стальных тонкостенных

цилиндрических оболочек постоянной толщины в девиаторном пространстве деформаций А.А.Ильюшина $\mathcal{E}^{(3)}$ при докритическом нагружении.

Достоверность полученных результатов определяется с помощью:

- построения и применения детерминированных и дескриптивных моделей соответствующих исходной задаче;
- сверкой численных решений с экспериментальными исследованиями, реализованными на расчетно-экспериментальном комплексе СЧ-ЭВМ в лаборатории кафедры СМТУиП ФГБОУ ВО «ТвГТУ»;
- сравнения полученных результатов с исследованиями других авторов.

Практическая значимость научного исследования определяется:

- разработкой алгоритмов и программ для решения прикладных задач бифуркации круговой тонкостенной оболочки малой гибкости для процессов нагружения в момент потери устойчивости;
- разработанные в диссертации методы расчета на прочность и устойчивость конструкционных материалов и изделий, а так же методы экспериментальных исследований этих материалов по установлению достоверности полученных результатов внедрены в производственную практику АО «АТГС» и позволяют совершенствовать процесс проектирования элементов конструкций, выполняемых из материалов со сложными механическими свойствами. Полученные в работе экспериментальные результаты о процессах потери устойчивости стальных цилиндрических оболочек при процессах докритического сжатия, кручения и внутреннего давления на материал представляют практический интерес АО «АТГС» при моделировании технологических процессов транспорта газа в газопроводах.
- результаты диссертационной работы использованы при подготовке магистров техники и технологии по направлению 08.04.01 «Строительство» и подготовке аспирантов по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Апробация результатов диссертационной работы приведена в публикациях, докладах и выступлениях на конференциях: VII Международный научный симпозиум «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела» (Тверь, 2010), XIII, XIV, XV и XVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тула, 2012 - 2015), XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2013), Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения профессора Л.А.Толоконникова «Современные проблемы математики, механики, информатики» (Тула, 2013), VIII Международный научный симпозиум «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике

деформируемого твердого тела» (Тверь, 2015), Международный научный симпозиум по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 105-летию со дня рождения А.А. Ильюшина (Москва, 2016), XXII International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction the formation of living environment (Ташкент, 2019), Conference «Modelling and Methods of Structural Analysis» (Москва, 2019); полностью диссертация заслушана на Научном семинаре под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора Зубчанинова В.Г. (Тверь, 2019).

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 24 статьи в научных журналах и в сборниках конференций, из них 6 входят в список научных рецензируемых журналов включённых в Перечень ВАК., опубликовано 2 статьи в зарубежном журнале, индексируемом в базе данных Scopus. Зарегистрировано свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены при личном участии автора: разработка экспериментальных методов исследования и их осуществлении (совместно с научным руководителем), обработка и разъяснения значений экспериментальных данных, численные расчеты и анализ полученных результатов выполнены автором лично, написаны и подготовлены к публикации научные статьи.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 164 страницы печатного текста, включая 4 таблицы, а также 98 рисунков и схем. Список использованных источников и литературы имеет 196 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении предоставляется обоснование актуальности темы научной работы, ее новизна, практическая и научная значимость.

Глава 1. В первой главе диссертации представлена историческая справка развития МДГТ по вопросам устойчивости тонкостенных элементов за пределом упругости при простом и сложном нагружении.

В п.1.1 диссертации проведен анализ трудов Л. Эйлера, Ж. Л. Лагранжа, Брайна, Ф.С. Ясинского, С.П. Тимошенко, Ф. Энгессера, Т. Кармана, П. Бийлларда, Ф. Шенли. Представлены основы современной теории устойчивости упругопластических систем согласно работ А.Н. Божинского, В.И. Королёва, Ю.Г. Коротких, Н.Н. Столярова, А.А. Ильюшина, Стоуэллума, Э.И. Григолоука, Л. А. Толоконникова, Ю.Р. Лепик. Приведена концепция устойчивости Зубчанинова В.Г. для материалов при сложном нагружении, на основании которой, был решен ряд задач в диссертации.

В п.1.2 рассмотрено современное состояние теорий пластичности, применяемых в решении задач устойчивости. Описаны введенные А.А. Ильюшиным понятия простого и сложного нагружения, образа процесса нагружения в пространствах напряжений и деформаций, сформулирован принцип запаздывания векторных свойств материала, постулат изотропии и гипотеза компланарности. Отмечено, что А.А.Ильюшин первым указал, что для решения задач устойчивости, необходимо использовать законы деформирования при сложном нагружении. В своей теории упругопластических процессов он рассматривает вопрос о соотношениях связи между напряжениями и деформациями и дает общую формулировку задачи.

Особое внимание в разделе отведено теории устойчивости пластин и оболочек за пределом упругости В.Г.Зубчанинова, которая становится обобщением теории устойчивости А.А.Ильюшина. Так как теория пластичности может быть представлена как частный случай общей математической теории упругопластических процессов, можно получить несколько вариантов решения задачи устойчивости на основе единых уравнений.

В п.1.3 представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости пластин и оболочек при простом и сложном докритическом нагружении. Опыты показали, что устойчивость оболочек при докритических процессах исследована не в полной мере.

Глава 2. В п.2.1 - п.2.4 главы приводятся основные уравнения и алгоритмы решения, при использовании которых решалась задача бифуркации цилиндрической оболочки. Представленные в данном параграфе уравнения получены Зубчаниновым В.Г. для функций пластичности и используются в рамках определяющих соотношений гипотез малого кручения и компланарности.

Уравнения связи напряжений и деформаций в скоростях:

$$\dot{S}_{ij} = N\dot{\mathcal{E}}_{ij} + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \dot{S} \frac{S_{ij}}{\sigma}, (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

где S_{ij} , \mathcal{E}_{ij} - компоненты тензора-девиатора напряжений и деформаций; $d\sigma/dS$, N - определяющие функции пластичности. Символ с точкой наверху означает дифференцирование по обобщенному параметру времени $d/dt = d/dS \cdot dS/dt$.

Уравнения совместности деформаций и дифференциальные уравнения равновесия оболочки, потерявшей устойчивость:

$$\frac{\partial \dot{N}_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \dot{N}_{12}}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial \dot{N}_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \dot{N}_{12}}{\partial x_1} = 0; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \dot{M}_{11}}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 \dot{M}_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 \dot{M}_{22}}{\partial x_2^2} + N_{11} \dot{\chi}_{11} + N_{22} \dot{\chi}_{22} + \\ & + 2N_{12} \dot{\chi}_{12} + \dot{N}_{11} \chi_{11} + 2N_{12} \dot{\chi}_{12} + \dot{N}_{22} \chi_{22} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{12}}{\partial x_1^2} - 2 \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} = -\nabla_k^2 \dot{w}.$$

Уравнение (2) и первое уравнение системы (3) будут удовлетворены, если положить:

$$\dot{N}_{11} = Eh \frac{\partial^2 \phi}{\partial X_2^2}; \quad \dot{N}_{22} = Eh \frac{\partial^2 \phi}{\partial X_1^2}; \quad \dot{N}_{12} = -Eh \frac{\partial^2 \phi}{\partial X_1 \partial X_2}; \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - скорости деформирования срединной поверхности, $\dot{\chi}_{ij}$ - скорости изменения кривизны и кручения срединной поверхности, ϕ - функция скоростей усилий, w - функция прогибов оболочки.

Для длинных оболочек нет необходимости точно удовлетворять граничным условиям на концах. Решение основных уравнений задачи (2) и (3) представляем в виде рядов Фурье:

$$\begin{cases} \dot{w} = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin \frac{1}{R} (\lambda_m x_1 - n x_2) \quad (\lambda_m = m\pi R / l); \\ \phi = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin \frac{1}{R} (\lambda_m x_1 - n x_2), \end{cases} \quad (5)$$

где m, n - целые числа, определяющие число полуволн в направлениях x_1, x_2 соответственно (x_1 - в образующей, x_2 - в окружном).

Система дифференциальных уравнений при подстановке уравнений (5) в уравнения (2) и (3) приводит к системе уравнений задачи о собственных числах:

$$\begin{aligned} & i^2 \frac{\sigma}{E g_1} \left[-K_* - \frac{E N_1^*}{2 \sigma \theta} \lambda_m^4 \right] + i \frac{3 N_1^* \Phi^*}{2 g_1 \theta} \lambda_m^2 K_* S_* = \\ & \left(\lambda_m^2 + n^2 \right)^2 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g_2}{g_1} \right) K_*^2 + \frac{9 N_1^* \Phi^{*2}}{8 g_1 \theta} K_*^2 S_*^2; \\ & C \theta = \frac{N_1^*}{2} \lambda_m^2 - \frac{3 N_1^* \Phi^*}{4 i} K_* S_*; \end{aligned} \quad (6)$$

$i = 3R/h$ - гибкость оболочки, g_1 - безразмерная жесткость.

Принимая аппроксимации В.Г.Зубчанинова для функций пластичности на плоских многозвенных ломаных и криволинейных траекториях:

$$N = 2G_p + [2G - 2G_p] \left(\frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^p; \quad (7)$$

$$\frac{d\sigma}{dS} = 2G_k - [2G + 2G_k] \left(\frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^q;$$

где G, G_k, G_p – модуль сдвига, касательный и секущий модули сдвига материала соответственно; p, q – материальные параметры аппроксимации, определяемые из экспериментов по плоскому вееру двухзвенных траекторий, вместо уравнений (5) получим:

$$-\sigma K_* i^2 / (q_1 E) + i \Omega_1^{**} / (2q_1 S_*) = \lambda_m^2 \left[\theta + 3K_* (\Omega_2^{**} - \Omega_1^{**} N_2^* / N_1^*) / (4q_1) \right]; \quad (8)$$

$$e = -2i / (S_* \lambda_m^2) - (\theta_1 \Omega_1^{**} + N_2^* K_*) / N_1^*;$$

Согласно решению, предложенному в модифицированной теории устойчивости оболочек за пределом упругости В.Г. Зубчанинова, связанное с бифуркацией, бесконечно малое продолжение процесса является простым или локально простым:

$$i^2 = \frac{E g_2}{i} (\lambda_m^2 + n^2)^2 \left[-K_* - \frac{E P_1^* \lambda_m^4}{2\sigma\theta} \right]^{-1}; \quad C\theta = \frac{P_1^*}{2} \lambda_m^2, \quad \theta = (\lambda_m^2 + n^2)^2. \quad (9)$$

Глава 3. В главе представлены экспериментальные исследования устойчивости цилиндрических оболочек из Стали 40Х (две партии материалов) и Стали 45 при простых и сложных процессах нагружения.

В п.3.1 описывается испытательная техника, аппаратура и образцы для испытаний, а так же методика проведения экспериментов на автоматизированном расчетно-вычислительном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории кафедры «СМТУиП» при ФГБОУ ВО «ТвГТУ».

В п.3.2, п.3.3 представлены результаты испытания оболочек на устойчивость при простом и сложном нагружении.

Для подтверждения начальной изотропии материала из стали 40Х партии 1 автором было выполнено 3 эксперимента, представленных на рис.1. Цифрами обозначены: 1 – кручение, 2 – сжатие, 3 – пропорциональный процесс сжатия с кручением при $\alpha_1 = 45^0$, $\alpha_2 = 0^0$.

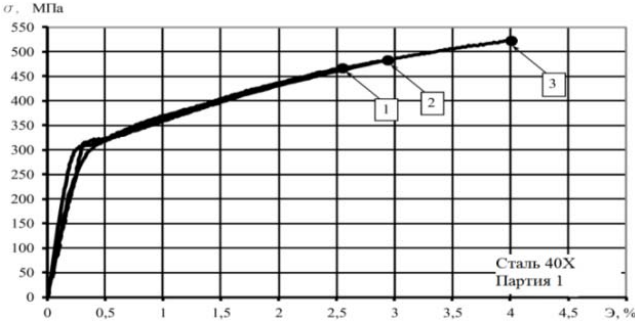


Рис. 1.
Наложенная
диаграмма
деформирования
оболочек из стали
40X (парттия 1)

Для второй партии оболочек из стали 40X, исходные диаграммы деформирования (рис. 2) были использованы из работы С.А. Соколова.

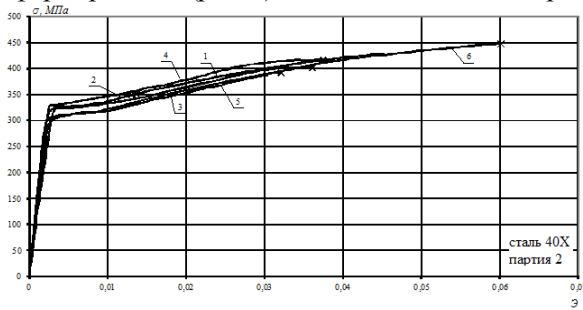


Рис. 2.
Наложенная
диаграмма
деформирования
оболочек из стали
40X (парттия 2)

Для расчетов и обработки экспериментов из Стали 45 использованы результаты 14 испытаний цилиндрических оболочек Ч. Джона по траекториям нагружения рис. 3 и 4.

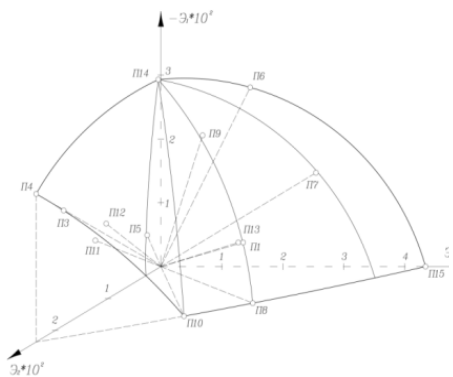
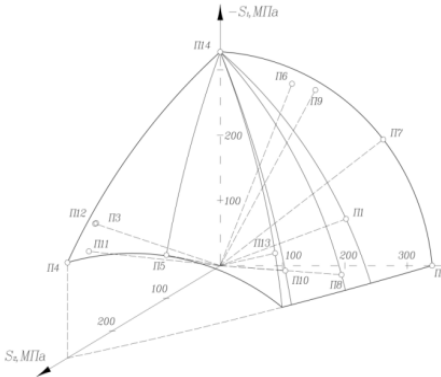


Рис. 3 Поверхность критических напряжений оболочек из Стали 45

Рис. 4 Поверхность критических деформаций оболочек из Стали 45

По результатам экспериментальных исследований на образцах из Стали 45 и 40X замечено, что минимальные значения критических

деформаций и напряжений обнаруживаются при кручении оболочки, а максимальные проявляются при пропорциональном нагружении в плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ с параметрами траектории $\alpha_1 = 60^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$ (сталь 45).

Глава 4. Рассматривается теоретическое изучение воздействия сложного нагружения в момент бифуркации на устойчивость оболочек. Решена комплексная расчетно-экспериментальная задача обоснования теории устойчивости оболочек с учетом сложного нагружения. При этом, проведена верификация всех теоретических и расчетных решений путем сравнения с экспериментальными данными. Получены новые решения задачи устойчивости по теории оболочек при сложном нагружении в момент бифуркации В.Г. Зубчанинова, позволяющие оценить достоверность известных решений по другим теориям.

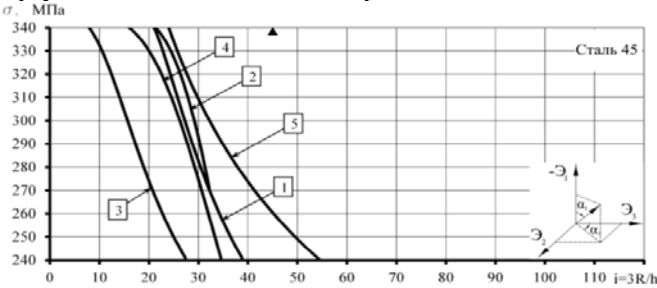
В п.4.1 диссертации представлено решение задачи бифуркации при простых плоских докритических процессах для двух партий оболочек, изготовленных из низколегированной стали 40Х с различными химическими свойствами. Построено 28 диаграмм критических напряжений и деформаций для разных комбинаций полуволн m , n при сжатии, кручении пропорциональных процессах нагружения согласно расчетов критических напряжений и деформаций по теории устойчивости А.А.Ильюшина, модифицированной теории устойчивости В.Г.Зубчанинова и с учетом сложного характера деформирования. Сделан вывод о том, что при нагружении в плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ для оболочек малой гибкости наименьшее значение критических напряжений и деформаций принимается на нижних переборах параметров волнообразования m , n .

Также для двух партий цилиндрических оболочек из стали 40Х приведены расчеты координат границ раздела зон на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина и на основе модифицированной теории устойчивости В.Г. Зубчанинова.

В п.4.2 решена задача бифуркации при простых пространственных плоских докритических процессах для тонкостенной цилиндрической оболочки малой гибкости из стали 45.

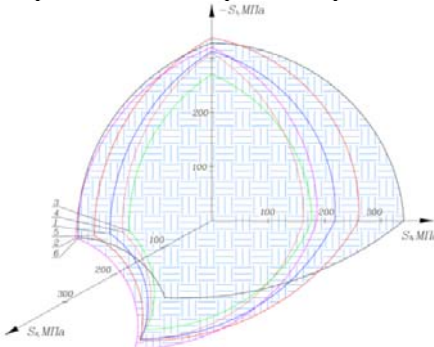
Построено 28 диаграмм критических напряжений и деформаций при сжатии, кручении и внутреннем давлении на оболочку, в каждом из которых решена задача устойчивости согласно 5 расчетов: 1, 2 – теория А.А. Ильюшина; 3, 4 – решения по модифицированной теории устойчивости В.Г. Зубчанинова без разгрузки и с учетом разгрузки; 5 – решения с учетом сложного нагружения при использовании аппроксимаций определяющих функций пластичности N и $d\sigma/dS$ В.Г.Зубчанинова. На рис. 5 в качестве примера показаны

предельные кривые критических напряжений при чистом кручении оболочки. Треугольником отмечены экспериментальные точки.



*Рис. 5.
График
предельных
кривых
критических
параметров
напряжений*

Согласно расчетам, для оболочек из ст. 45 построены поверхности устойчивых состояний в плоскостях $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3$. На рис. 6 в качестве примера показана поверхность критических напряжений.



*Рис. 6.
Поверхность
критических
напряжений*

Расчетные поверхности наложены на экспериментальную поверхность, построенную при реализации 14 процессов. В соответствии с расчетами доказано, что предельные поверхности устойчивых состояний цилиндрических оболочек при простых процессах имеют выпуклый характер. Зона вокруг оси координат S_2 остается открытой, что говорит о наличии уровня интенсивности внутреннего давления, при превышении которого потеря устойчивости оболочек невозможна при любом пропорциональном нагружении.

На основании вычислений автором сделаны выводы о том, что для траекторий деформирования, в плоскостях деформации $S_3 - S_2$ учет разгрузки материала в момент бифуркации при расчетах по теории устойчивости А.А. Ильюшина, модифицированной теории В.Г. Зубчанинова и при сложном нагружении ведет к завышению критических параметров устойчивости по сравнению с экспериментом. Этот результат не совместим с плоскостью

$S_1 - S_2$, где имеет место обратная ситуация. В плоскости $S_1 - S_2$, $S_1 - S_3$ расчеты по теории устойчивости А.А.Ильюшина и модифицированной теории В.Г. Зубчанинова дают результаты соответствующие опытным данным, а учет разгрузки материала приводит к уточнению расчета.

В п. 4.3 решена задача бифуркации оболочки с учетом сложного характера деформирования при сложном нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом в плоскости деформаций А.А.Ильюшина $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$. Решение включает построение образа процесса нагружения материала и последующее решение задачи бифуркации.

На рис.7 рассмотрена трехзвенная траектория, где: на первом звене – растяжение до уровня R ; на втором окружность 1.25 витка – траектории постоянной кривизны; на третьем звене сжатие до потери устойчивости.

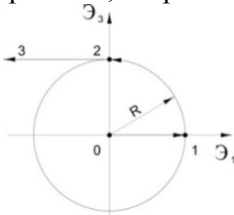


Рис. 7.
Траектории деформирования образцов из стали 45
 R – радиус дуги окружности

Расчеты сделаны для процессов при $R = 0.5, 1$ и 1.5% . В соответствии с расчетами построены графики критических параметров напряжений и деформаций. На рис.8 в девиаторной плоскости деформаций показаны зоны устойчивых состояний оболочки при расчетах: 1 – выполненные с учетом сложного характера нагружения при показателях степеней $p=0.6, q=1.35$; 2 – при $p=1, q=1$; 3 – при $p=0.55, q=1.35$; 4 – при $p=0.7, q=1.35$; 5 – теория устойчивости А.А.Ильюшина. Треугольниками показаны экспериментальные результаты.

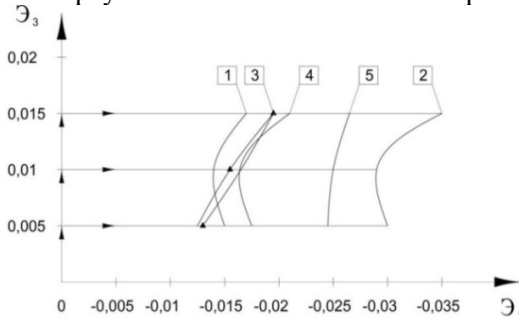


Рис. 8.
Зоны устойчивых состояний плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$

Оценка результатов по рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что учет сложного характера нагружения оболочки способен уточнить решение, в сопоставлении с результатами, по теории устойчивости А.А.Ильюшина, а

влияние параметра p на значения критических напряжений и деформаций значительно больше, чем q .

Эксперимент выполнен для двузвенных траекторий, где происходит растяжение до уровня R и переход на траекторию деформирования постоянной кривизны при $R = 1.5\%$ (рис 9).

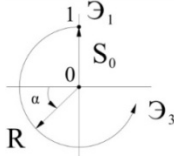


Рис. 9.
Траектории
деформирования
образцов из стали 45

Как показывают эксперимент и расчеты, при данных параметрах процесса потеря устойчивости оболочки реализуется на криволинейной части траектории, что не выполнялось ранее на оболочках, изготовленных так же из стали 45, но другой партии, имеющей существенно меньшее упрочнение.

На рисунке 10 приведены кривые критических параметров напряжений и деформаций для траектории 9, рассчитанные: 1, 2 – по теории устойчивости А.А.Ильюшина без и с учетом разгрузки материала; 3 – с учетом сложного нагружения при использовании аппроксимации В.Г.Зубчанинова для $d\sigma/dS$, а для N соотношения $N = 2G(1 - \omega)$; 4 – с учетом сложного нагружения при использовании для определяющих функций пластичности аппроксимаций В.Г.Зубчанинова со значениями материальных параметров $p=1, q=1$; 5 – при $p=0,5, q=0,5$. Треугольником показаны экспериментальные результаты.

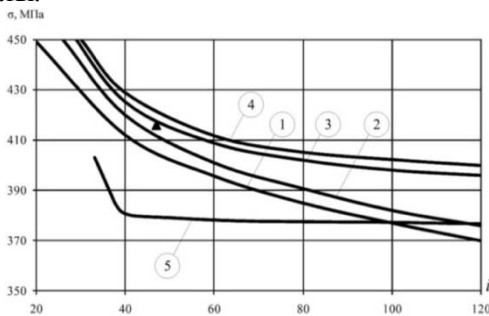


Рис. 10.
Графики
наименьшей
гибкости
оболочки

Полученные результаты рис. 10 в целом согласуются с выполненными расчетами для траекторий сложного докритического деформирования рис.8. Различие между значениями, полученными по итогам экспериментов и теоретических данных по критическим параметрам деформаций не более 10%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что для оболочек из стали 40Х, исследуемых при различных процессах нагружения в плоскости «сжатие-кручение», минимальные значения критических напряжений и деформаций возникают при процессах чистого кручения.

2. Разработан программный алгоритм решения бифуркационной задачи цилиндрической оболочки при сложных и пропорциональных процессах с учетом сложного характера нагружения на основе теории устойчивости неупругих систем В.Г. Зубчанинова и гипотезы компланарности А.А. Ильюшина.

3. Доказано, что для решения задачи бифуркации при сложном докритическом нагружении для каждого материала необходимо использовать различные значения материальных параметров p и q аппроксимаций определяющих функций пластичности.

4. При сравнении экспериментальных и теоретических результатов оболочек из Сталь 45 установлено, что при процессах пропорционального комбинированного нагружения в плоскости «сжатие-кручение» расчет необходимо производить с учетом сложного нагружения, применяя аппроксимации определяющих функций пластичности В.Г. Зубчанинова, а для процессов в плоскостях «сжатие-давление» и «давление-кручение» решение задачи следует выполнять по теории устойчивости А.А. Ильюшина.

5. Установлено, что при решении задачи бифуркации при сложном докритическом нагружении для классов траекторий в виде окружностей с учетом влияния сложного характера деформирования материала, расчет по теории устойчивости А.А. Ильюшина показывает наиболее близкий к эксперименту результат.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Охлопков Н.Л. О предельных поверхностях критических напряжений и деформаций материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых процессах / Охлопков Н.Л., С.В. Черемных // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» № 5(295). – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2012. – С.30-36. **(ВАК)**

2. Охлопков Н.Л. О границах раздела зон упругой разгрузки и пластической догрузки материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых докритических процессах / Н.Л. Охлопков, С.А. Соколов, С.В. Черемных // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» № 6-2(296). – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2012. – С.8-13. **(ВАК)**

3. Охлопков Н.Л. Решение задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении / Н.Л. Охлопков, С.А. Соколов, С.В. Черемных // Известия МГТУ «МАМИ», № 1 (15), 2013. – Т.3. – С.96-100. **(ВАК)**

4. Охлопков, Н.Л. Бифуркация цилиндрической оболочки при сложном докритическом деформировании по криволинейной траектории / Н.Л.Охлопков, С.А. Соколов, С.В.Черемных, М.Ю. Александров // Известия МГТУ «МАМИ»: Научно-рецензируемый журнал. Серия 3. Естественные науки.-М., МГТУ «МАМИ», №3(17), 2013, т.1, С. 114-117. **(ВАК)**

5. Охлопков, Н.Л. Об устойчивости упругопластических оболочек при пропорциональных докритических процессах комбинированного нагружения / Н.Л.Охлопков, Ф.В. Нигматулин, С.А. Соколов, С.В.Черемных // Известия МГТУ «МАМИ»: Научно-рецензируемый журнал. Серия 3. Естественные науки.-М., МГТУ «МАМИ», №1(23), 2015, т.1, С. 64-70. **(ВАК)**

6. Охлопков Н.Л. Устойчивость тонкостенных упругопластических конструкций при реализации процессов сложного комбинированного деформирования / Охлопков Н.Л., Черемных С.В. // Известия МГТУ «МАМИ», № 2(24), 2015. – Т.4. – С.109-114. **(ВАК)**

7. Cherenmykh S, Zubchaninov V and Gulyaev V 2019 Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading XXII Int. Scientific Conf. «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019) vol 97 pp 1–8. **(Scopus)**

8. Cherenmykh S, Kuzhin M. Solution of the Problem of Stability of 40X Steel Shell: Modelling and Methods of Structural Analysis // Journal of Physics: Conf. Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1425. – С. 012191. **(Scopus)**

Другие публикации:

9. Охлопков Н.Л. Устойчивость тонкостенных упругопластических оболочек при реализации процессов простого и сложного нагружения / Охлопков Н.Л., Черемных С.В. // Упругость и неупругость. Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 105-летию со дня рождения А.А. Ильюшина (Москва, 20-21 января 2016 г). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. – С.237-241.

10. Черемных С.В. [и др.] Устойчивость цилиндрических тонкостенных упругопластических оболочек из стали 45 при реализации процессов простого и сложного нагружения // «Образование и наука в России и за рубежом». – 2018. – №13 (Vol.48). – С.423-428.

11. Черемных С.В. Установка СН-ЭВМ для экспериментальных исследований устойчивости круговых цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении / Черемных С.В., Скудалов П.О. // Техника и технология транспорта. 2019. № S13. С. 45. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-45PIR.19.pdf>

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020616544 Российская Федерация. Программа для решения задачи бифуркации цилиндрической оболочки из стали с учетом разгрузки для пропорциональных процессов докритического нагружения / С. А. Соколов, С. В. Черемных; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)». – № 2020615252; заявл. 25.05.2020 ; опубл. 18.06.2020. – 1 с.