

Рис. 1. Пружний елемент випромінювача енергії

Робота присвячена моделюванню нелінійної динаміки пружного елемента випромінювача з метою визначення характеру поведінки, рівня коливань та обґрунтування вибору параметрів конструкції.

В якості математичної моделі прийнята система розрахункових рівнянь геометрично нелінійної теорії згинання пологих оболонок в полярній системі координат. Серединна поверхня прийнята сферичною, а задача осесиметричною.

$$\frac{D}{h} \frac{d}{dr} \left[ r \frac{d}{dr} (\Delta W) \right] = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (W' \Phi') + \frac{1}{Rr} \frac{d}{dr} (r \Phi') - \rho \ddot{W} - \frac{\mu}{h} \dot{W} + \frac{q}{h}, \quad (1)$$

$$r \frac{d}{dr} (\Delta \Phi) = -\frac{E}{2} W'^2 - \frac{E}{R} r W'. \quad (2)$$

Граничні умови відповідають шарнірному закріпленню для згинальних коливань і жорсткому – в серединній площині.

Рішення приймається у вигляді ряду з використанням необхідних базисних функцій. Функція напружень визначається з (2).

Задача в першому наближенні вирішується з використанням підходу Бубнова-Гальоркіна.

У випадку обмеження рішення одним доданком розрахункове рівняння вільних коливань геометрично нелінійної пологої сферичної оболонки з врахуванням сил в серединній поверхні без врахування сил опору представляє собою консервативну систему з 1-им ступенем вільності і допускає детальний аналітичний аналіз.

Характер поведінки пружного елемента випромінювача з врахуванням факторів реальної роботи досліджується чисельними методами.

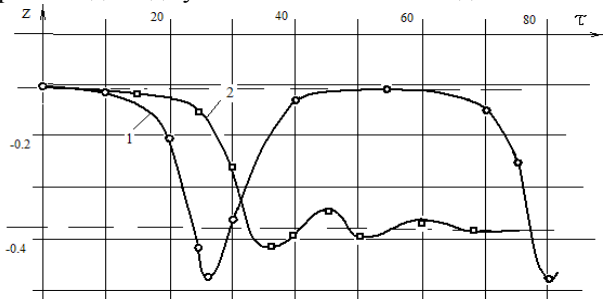


Рис. 2. Характер поведінки пружного елемента без врахування (1) та з врахуванням (2) сил опору.

Визначені положення рівноваги оболонки, характер стійкості, досліджено вплив конструктивних параметрів та експлуатаційних

факторів на динаміку поведінки пристрою, одержані оцінки енергетичного стану роботи.

Проведені розрахунки відповідають очікуваній поведінці оболонки, дозволяють обґрунтувати вибір параметрів пристроїв.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
2. Огибалов П.М., Колтунов М.Л. Оболочки и пластины. – М.: Изд.МГУ, 1969. – 764 с

### АВТОФРЕТИРОВАНИЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

Львов Г.И., \*Огороков В.А.

Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Украина

Процесс автофретирования используется для повышения прочностных характеристик и ресурса при малоцикловой усталости для элементов конструкций, работающих при высоких давлениях. Идея автофретирования состоит в том, что элемент конструкции предварительно нагружают давлением выше рабочего для того, чтобы он деформировался пластически, и затем, после разгрузки в нем появляются остаточные сжимающие напряжения, которые суммируются с растягивающими напряжениями от рабочего давления и как результат снижается уровень суммарных напряжений.

Автофретирование широко применяется для цилиндрических сосудов, которые используются во многих сферах промышленности. Толстостенные сосуды сферической формы также нашли свое применение и активно используются как резервуары для топлива для многих видов транспорта, баллоны для содержания сжиженного газа, емкости для хранения химических веществ под давлением [1].

Одной из важных проблем автофретирования является эффект Баушингера, который проявляется в появлении вторичных пластических деформаций при разгрузке, и как следствие ведет к уменьшению благоприятных остаточных напряжений. Поэтому при расчете процессов автофретирования необходимо использовать теории пластичности, позволяющие учесть эффект Баушингера. В работе рассматривается модель пластичности с комбинированным упрочнением, при использовании которой поверхность пластичности может равномерно расширяться и смещаться, что позволяет учесть эффект Баушингера.

Положительный эффект от автофретирования основан на появлении в толстостенном цилиндре остаточных сжимающих напряжений, и чем больше эти напряжения тем больше повышается несущая способность цилиндра после процесса автофретирования. Для получения больших значений остаточных сжимающих напряжений необходимо увеличивать зону пластических деформаций,

которые занимают толщину цилиндра. Но с другой стороны это может привести к разупрочнению материала вследствие появления в нем повреждаемости, которая проявляется как снижение модуля упругости при разгрузке на диаграммах деформирования. Также как и эффект Баушингера разупрочнение материала направлено на уменьшение остаточных напряжений. В настоящей работе повреждаемость материала моделируется согласно концепции эффективных напряжений и принципа эквивалентных деформаций [2, 3].

Для толстостенной сферы с внутренним и внешним радиусами 40 мм и 80 мм соответственно были проведены расчеты для определения оптимального давления автофретирования, при котором максимальные эквивалентные напряжения в автофретированной сфере будут наименьшими. Вычисления производились также для разных проявлений эффекта Баушингера. Для нахождения оптимального давления автофретирования были проделаны серии расчетов для определения остаточных напряжений при различных давлениях автофретирования, которые затем суммировались с напряжениями, возникающими от рабочего давления 450 МПа. Таким образом, были получены напряжения, возникающие в рабочих условиях при разных уровнях автофретирования. С повышением давления автофретирования зона максимальных эквивалентных напряжений уменьшается и смещается в сторону внешнего радиуса. При этом эквивалентные напряжения на внутреннем радиусе для случая без учета эффекта Баушингера и повреждаемости уменьшаются до тех пор, пока пластические деформации не занимают более 80% от толщины сферы. Далее по мере проявления эффекта Баушингера и повреждаемости материала меняется оптимальное давление автофретирования, при котором эквивалентные напряжения на внутреннем радиусе минимальные. На рисунке 1 показано распределение эквивалентных напряжений для разных давлений автофретирования с учетом эффекта Баушингера и повреждаемости материала. Кроме того, что в процессе автофретирования уменьшается максимальное эквивалентное напряжение, сфера нагружается более равномерно, так как разница между максимальными и минимальными эквивалентными напряжениями в рабочих условиях уменьшилась почти в два раза.

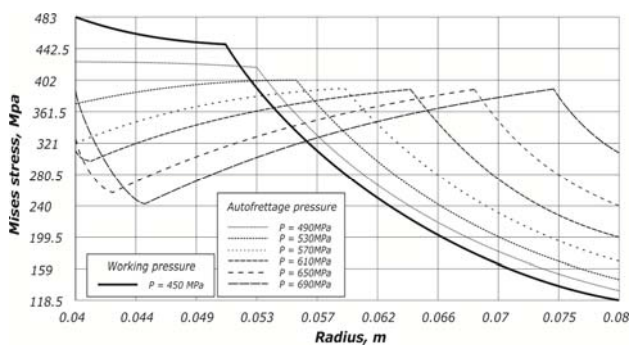


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений в рабочих условиях

## ЛИТЕРАТУРА

1. Perl M., Perry J. The Beneficial Contribution of Realistic Autofrettage to the Load-Carrying Capacity of Thick-Walled Spherical Pressure Vessels // J. Pressure Vessel Technol. – 2010. – v.132.
2. Lemaître J. A. A Course on Damage Mechanics, Springer, Berlin, 1996. – 247 p.
3. Murakami S. Continuum Damage Mechanics, Springer, 2012. – 402 p.

## МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛОСКОЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ОРТОТРОПНОЙ СРЕДЫ

\*Миняйло Т.А., Шамровский А.Д.

Запорожская государственная инженерная академия,  
Запорожье, Украина

Классические модели механики деформируемого твердого тела, применяя аппарат дифференциальных уравнений, изначально базируются на сплошной и непрерывной среде. Уже при создании этих моделей в 19 веке было известно, что классические материалы, такие как дерево и железо на самом деле имеют дискретную структуру. Однако дискретность достаточно мала, что позволяло выполнять операцию сглаживания и описывать с помощью континуальной модели действительно дискретную среду.

На сегодняшний день появляются все новые виды конструкционных материалов с ярко выраженной дискретностью, так что процедура сглаживания дает слишком большую погрешность. Возникает проблема изначально дискретной модели.

Рассматривая механику деформируемого твердого тела для случая сплошной среды и изучая физические свойства определенных материалов, остро стоит вопрос о построении общей математической модели, которая учитывала бы особенности каждой из представленных сред, а также разработка универсального метода расчета для нее.

Традиционно считается, что наиболее сложные задачи теории упругости возникают в том случае, когда исследуемый материал характеризуется анизотропными свойствами.

Первые исследования в этом направлении связаны с именами С.Г.Лехницкого, Г.Н.Савина и др. С.Г.Лехницкий получил общие решения уравнений плоской задачи теории упругости анизотропной среды и изгиба тонких анизотропных пластин, изобразив их через комплексные потенциалы обобщенных комплексных переменных. В ряде последующих работ С.Г.Лехницкого [1], Г.Н.Савина [2] и других исследователей рассматривались конкретные задачи определения напряженного состояния в ортотропной пластине.

Популярным также является метод конечных элементов, на основе которого создано достаточно много программных продуктов, которые сейчас пользуются спросом и позволяют расширить область исследований на задачи геометрической