

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ імені А.М. Підгорного

Сичов Андрій Іванович

УДК 539.3

**РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧ ПОВЗУЧОСТІ ТОНКИХ ОБОЛОНОК
З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНОСТІ, ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ТА
ЗСУВУ**

01.02.04. – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор
Морачковський Олег Костянтинович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри теоретичної механіки.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Ясній Петро Володимирович,
Тернопільський державний технічний
університет імені Івана Пулюя,
проректор з наукової роботи,
завідувач кафедри матеріалознавства;
– кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Матюхін Юрій Іванович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
старший науковий співробітник.

Провідна установа: – Інститут технічної механіки НАН і
НКА України, м. Дніпропетровськ, відділ
надійності та довговічності конструкцій.

Захист відбудеться "26" червня 2003 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.180.01 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Д. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Д. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий "24" травня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук

Б.П. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У сучасній техніці широке розповсюдження отримали тонкостінні конструкції. Серед них є багато таких, що експлуатуються при підвищених температурах і інтенсивних навантаженнях та виготовляються з нових матеріалів. Ці конструкційні матеріали на відміну від традиційних відзначаються при повзучості властивостями анізотропії та асиметрії до виду напруженого стану. Для проектування авіаційної, реакторної, енергетичної і багатьох видів іншої відповідальної техніки актуальним є рішення задач повзучості і довготривалої міцності оболонкових елементів конструкцій, які засновані на уточнених моделях матеріалів і оболонок.

Актуальність теми. Ускладнення фізико-механічних моделей повзучості матеріалів і необхідність у підвищенні точності розрахунків вимагають удосконалювання методів розрахунку на повзучість. У цьому зв'язку найбільшу актуальність здобувають проблеми вибору теорії оболонок, погодженою зі складністю прийнятих у розрахунках моделей повзучості, зокрема, моделей, що враховують пошкоджуваність унаслідок повзучості, анізотропію й асиметрію властивостей матеріалів. Не менш актуальними є проблеми відшукування рішень задач повзучості оболонок з урахуванням геометрично нелінійного деформування і поперечного зсуву. У цьому зв'язку тему дисертації можна віднести до актуального напрямку в науковому і практичному відношенні, насамперед, для механіки деформівного твердого тіла і для практики проектування сучасної відповідальної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" у рамках координованих Міністерством освіти і науки України держбюджетних тем: "Розв'язок проблеми деформування та руйнування тіл внаслідок статичної і динамічної повзучості з метою розрахунків довготривалої міцності та технологій теплового складання конструкцій" на 1993-96 р. (№ Д.Р. 0195U009046) і "Побудова теоретичних основ розрахунків нелінійної повзучості та руйнування деформівних тіл за умови дії зовнішніх швидко осцилюючих полів навантаження" на 1997-99 р. (№ Д.Р. 0197U001933).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розв'язання задач повзучості і довготривалої міцності тонких оболонок на основі науково обґрунтованого варіанта теорії повзучості оболонок, що враховує різні складні властивості явища повзучості і пошкоджуваності матеріалів, геометричну нелінійність і поперечний зсув при деформуванні тонких оболонок. Для реалізації поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі:

– запропоновано варіант теорії повзучості тонких оболонок, що враховує поперечний зсув і геометричну нелінійність деформування та базується на загальних положеннях про деформування тривимірних тіл у криволінійній неортогональній системі координат і часткових припущеннях, які погоджено із моделями повзучості і пошкоджуваності матеріалів;

– надано математичну постановку початково-крайових задач повзучості з руйнуванням для осесиметричних оболонок обертання на основі запропонованого варіанту теорії повзучості тонких оболонок;

– розроблено методику розв’язання фізично і геометрично нелінійних задач повзучості з руйнуванням осесиметричних оболонок, за рахунок сумісного використання чисельних методів продовження розв’язку за параметром часу і ортогональної прогонки С.К. Годунова для розв’язання крайових задач;

– проведені дослідження щодо вірогідності створених у роботі методів, алгоритмів і програм шляхом рішення тестових прикладів і порівнянням результатів розрахунків з відомими в літературі аналітичними і чисельними даними;

– вирішені задачі повзучості і тривалої міцності осесиметричних тонких оболонок з урахуванням поперечного зсуву і геометричної нелінійності, за рахунок чого встановлені нові закономірності повзучості і пошкоджуваності тонких оболонок у залежності від асиметрії властивостей повзучості і пошкоджуваності матеріалів;

– вирішені технологічні задачі з формоутворення оболонок із листових матеріалів при повзучості та усадці покриття, що дозволило визначити параметри технологічних процесів і оцінити якість виробів за ступінню забезпечення заданої за функціональним призначенням форми оболонок та пошкоженості за час формоутворення. Розрахунки деформування параболічної оболонки при усадці покриття, нанесеного на тонкостінний параболічний елемент антени, використані у філії НІФХІ ім Л.Я. Карпова (м. Обнінськ).

Об’єктом дослідження у роботі є тонкостінні оболонкові елементи конструкцій, що пошкоджуються в умовах повзучості. **Предмет дослідження** дисертації є теорії повзучості оболонок, моделі повзучості і пошкоджуваності матеріалів, розв’язки задач повзучості і пошкоджуваності осесиметричних оболонок. **Методи дослідження** містять чисельні методи продовження за параметром, ортогональної прогонки С.К. Годунова і обчислювальні методи, що дозволили за допомогою ПЕОМ розв’язувати початково-крайові задачі повзучості тонких оболонок.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– надано розвиток теорії повзучості оболонок за рахунок запропонованого нового варіанту технічної теорії повзучості оболонок, який створено на базі загальних положень про деформування тривимірних тіл і часткових припущень щодо виду навантаження, поперечного зсуву і геометричної нелінійності, погоджених із моделями повзучості і пошкоджуваності матеріалів;

– сформульовані нові постановки нелінійних початково-крайових задач повзучості осесиметричних оболонок обертання, що впливають із запропонованого в роботі нового варіанта теорії повзучості і пошкоджуваності тонких оболонок;

– отримані рішення нових задач повзучості осесиметрично навантажених оболонок обер-

тання при спільному урахуванні геометричної нелінійності, поперечного зсуву, пошкоджуваності та асиметрії властивостей матеріалу при повзучості;

– встановлені нові закономірності впливу геометрично нелінійного деформування і поперечного зсуву на повзучість і довготривалу міцність тонких оболонок і пластин з різноопірних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці алгоритмів та програмного забезпечення для розв'язання задач повзучості і тривалої міцності оболонок обертання при осесиметричному навантаженні. Результати роботи дозволяють на етапі проектування відповідальної нової техніки виконувати прикладні розрахунки на повзучість і руйнування оболонкових елементів конструкцій, проводити аналіз їхнього нелінійного деформування. Основні результати роботи використані в НТУ "ХПІ" при виконанні держбюджетних тем, а комплекс програм прийнятий у Республіканський фонд алгоритмів і програм України. Рекомендації і висновки, що отримано при вирішенні технологічної задачі про формоутворення сферичних оболонок з листових матеріалів в умовах повзучості, дозволяють використати результати роботи для визначення параметрів технологічних процесів, що забезпечують необхідну форму виробу, надають можливість оцінити його якість за ступінню пошкодження при формоутворенні. Розрахунки деформування параболічної оболонки внаслідок усадки покриття, нанесеного на тонкостінний параболічний елемент антени, використані у філії НІФХІ ім Л.Я. Карпова (м. Обнінськ).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані особисто здобувачем. В опублікованих зі співавторами роботах здобувачу належить: у [1] – дослідження повзучості ортотропних матеріалів, визначення компонентів матеріальних тензорів при переході до нової системи координат; у [2] – опис задачі, складені програми та супровідна документація по їхньому використанню; у [5] – постановка задачі, методика для пошуку розв'язків і результати розрахунків; у [6] – загальна постановка початково-крайової задачі та методика для пошуку розв'язків і результати розрахунків для осесиметрично навантажених оболонок обертання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я" (Харків, 1993 р.), I Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 1993 р.), Annual Scientific Conference GAMM 97 (Регенсбург, 1997 р.), Workshop "Grosse plastische Formaenderungen" (Бад Хоннеф, 1997 р.), на наукових семінарах НТУ "ХПІ" (керівник проф. Морачковський О.К.), щорічно, з 1997 р. по 2002 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з яких 4 статті – у наукових фахових виданнях за переліком ВАК України.

Структура і обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (177 найменувань), 63 рисунків, 19 таблиць. Загальний обсяг роботи стано-

вить 167 сторінки, з яких основний текст містить 133 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** на основі огляду літературних джерел за темою дисертації зроблені висновки про стан проблем нелінійного деформування оболонкових елементів конструкцій і повзучості в механіці деформівного твердого тіла, сформульовані нові задачі, для яких у роботі запропоновані математичні постановки й отримані рішення. У вирішення проблем механіки, таких як повзучість та нелінійне деформування оболонок при повзучості, суттєвий внесок здійснили такі вчені, як Альтенбах Х, Біргер І.А., Беттен Дж., Бойл Дж., Бурлаков А.В., Гонтаровський П.П., Золочевський О.О., Кантор Б.Я., Ляметра Дж, Локощенко О.М., Львов Г.І., Малінін М.М., Матюхин Ю.І., Мерзляков В.А., Морачковський О.К., Мураками С., Немировський Ю.В., Науменко К.В., Писаренко Г.С., Підгорний А.М., Пошивалов В.П., Прохоренко І.В., Работнов Ю.М., Романов К.В., Савченко В.Г., Стрижало В.О., Соснін О.В., Тайра С., Хейхерст Д., Чебоше Дж., Шевченко Ю.М., Шестериков С.О., Ясній П.В. і багато інших.

У розділі надано порівняльний аналіз різних теорій оболонок, що містить теорію оболонок Кірхгофа-Лява, теорії оболонок із поперечним зсувом та інші уточнені теорії оболонок. Наведені дані із моделювання процесів повзучості і руйнування ізотропних матеріалів, моделі повзучості матеріалів із властивостями анізотропії та асиметрії до виду напруженого стану. Зроблено висновок про необхідність узгодження теорії оболонок із вибором моделей повзучості та пошкодження, за рахунок чого можна отримати адекватні результати розрахунків. Відзначено, що кількість публікацій та комплексних досліджень повзучості і довготривалої міцності оболонок із анізотропних та асиметричних матеріалів при повзучості є незначною. Проведено огляд публікацій по методам розв'язання нелінійних крайових і початково-крайових задач механіки. Сформульовані нові задачі, які розв'язані в роботі.

У **другому розділі** сформульовані теоретичні положення, за якими розглянуто один із можливих варіантів геометрично нелінійної теорії повзучості оболонок з урахуванням деформацій поперечного зсуву. Для опису геометрії оболонки використані тензорні співвідношення для базисних векторів і квадратичних форм серединної поверхні, а також базисних векторів довільної точки оболонки. Рівняння теорії оболонок отримані із загальних рівнянь деформування тривимірного тіла із використанням формул переходу від базису довільної точки оболонки до базису точки серединної поверхні. Остаточо, вихідні рівняння теорії повзучості оболонок представлені в тензорному вигляді відносно криволінійної неортогональної системи координат, пов'язаної із серединною поверхнею оболонки.

Вектор переміщення точки оболонки \mathbf{u}^* , відповідно до прийнятих гіпотез, представляється через вектор переміщення точки серединної поверхні \mathbf{u} , вектор зміщення \mathbf{w} і координату по товщині оболонки \mathfrak{H} :

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u} + \mathfrak{H}\mathbf{w}. \quad (1)$$

Компоненти тензора повної деформації визначені через зміну метрики оболонки при деформуванні, так що a_{ij}^* – метрика до деформування та \hat{a}_{ij}^* – після деформування:

$$\eta_{\mathfrak{F}} = \frac{1}{2} \hat{a}_{ij}^* - a_{ij}^* = \begin{bmatrix} \mathfrak{a}_{\alpha\beta} + \mathfrak{H}\mathfrak{r}_{\alpha\beta} & \frac{1}{2}\eta_{\mathfrak{C}} \\ \frac{1}{2}\eta_{\mathfrak{C}} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $\mathfrak{a}_{\alpha\beta}$ – тензор зміни метрики поверхні або тензор деформації серединної поверхні, $\mathfrak{r}_{\alpha\beta}$ – тензор зміни кривин поверхні, $\eta_{\mathfrak{C}}$ – вектор кутів зсуву, що характеризують кут нахилу нормалі до деформованої поверхні:

$$\begin{aligned} \mathfrak{a}_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} (\mathbf{u}_{\alpha|\beta} + \mathbf{u}_{\beta|\alpha} - b_{\alpha\beta}^3 + \frac{1}{2} \underline{\underline{e_{\alpha\beta}^{\mathfrak{C}}}}), & \eta_{\mathfrak{C}} &= w_{\mathfrak{C}} - \mathbf{e}_{\mathfrak{C}} \\ \mathfrak{r}_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} (v_{\alpha|\beta} + w_{\beta|\alpha} - b_{\mathfrak{C}}^{\bullet\alpha} b_{\beta|\mathfrak{C}} - b_{\beta|\mathfrak{C}}^{\bullet\alpha} b_{\alpha|\mathfrak{C}}), & \mathbf{e}_{\mathfrak{C}} &= -\mathbf{e}_{3,\mathfrak{C}} + b_{\mathfrak{C}}^{\mathfrak{r}} \mathbf{e}_{\mathfrak{r}}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $b_{\alpha\beta}^3$, $b_{\mathfrak{C}}^{\mathfrak{r}}$ – компоненти тензора кривин поверхні.

Геометричні співвідношення (2)-(3) описують нелінійне деформування оболонок при малих деформаціях і кінцевих (середніх) поворотах. Підкреслені в (3) доданки відповідають геометрично нелінійним складовим тензора деформацій. Разом з вектором зміщення \mathbf{w} розглядається вектор повороту в околі точки серединної поверхні \mathfrak{C} ($\mathfrak{C}_{\alpha} = c^{\mathfrak{C}} w_{\mathfrak{C}} \mathfrak{e}_{\alpha}$, $\mathfrak{C}_3 = \mathfrak{C}_n$). Кінематичні граничні умови формулюються для довільного контуру C , у кожній точці якого визначено базис: (\mathbf{t}, \mathbf{n}) . Вектор переміщення \mathbf{u} і вектор повороту \mathfrak{C} розкладені по базису граничного контуру: $\mathbf{u}_{\mathfrak{C}} = \mathbf{n} u_{\mathfrak{C}}$, $\mathfrak{C}_{\mathfrak{t}} = t^{\mathfrak{C}} \mathfrak{C}_{\mathfrak{C}}$, $\mathfrak{C}_n = \mathfrak{C}_3$, $\mathfrak{C}_{\mathfrak{n}} = -w_{\mathfrak{t}}$, $\mathfrak{C}_{\mathfrak{t}} = w_{\mathfrak{n}}$. Компонента \mathfrak{C}_n не є незалежною. У такий спосіб для граничного контуру визначені п'ять незалежних граничних умов:

$$\mathbf{u}_{\mathfrak{n}} = \mathbf{u}_{\mathfrak{n}}^*, \quad \mathfrak{C}_{\mathfrak{t}} = \mathfrak{C}_{\mathfrak{t}}^*, \quad \mathfrak{C}_n = \mathfrak{C}_n^*, \quad \mathfrak{C}_{\mathfrak{n}} = \mathfrak{C}_{\mathfrak{n}}^*, \quad \mathfrak{C}_{\mathfrak{t}} = \mathfrak{C}_{\mathfrak{t}}^*. \quad (4)$$

У запропонованому варіанті теорії повзучості оболонок прийняті гіпотези, що поширюють зазвичай використовувані в теорії повзучості тонких оболонок гіпотези Кірхгофа-Лява, де $\eta_{\mathfrak{C}} = 0$ і компоненти $w_{\mathfrak{C}}$ не є незалежними змінними, а визначаються компонентами $\mathbf{u}_{\mathfrak{C}}$, \mathfrak{C}_3 .

Рівняння рівноваги оболонок і статичні граничні умови виведені з варіаційного принципу типу Лагранжа для тривимірного тіла і остаточно мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} n^{\alpha\beta} - b_{\alpha\gamma}^{\beta} q^{\gamma} + p^{\alpha} &= 0, & q^{\alpha} + b_{\alpha\beta} n^{\beta\gamma} + p^{\beta} &= 0, \\ m^{\alpha\beta} - q^{\alpha} - \underline{\underline{n^{\alpha\beta} e_{\beta}^{\gamma}}} + c^{\alpha} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де $n^{\alpha\beta}$ – тензор тангенціальних (мембранних) сил, q^{α} – вектор поперечних сил, $m^{\alpha\beta}$ – тензор моментів, p^{α}, p^{β} – компоненти вектора поверхневих сил оболонки, c^{α} – компоненти вектора поверхневих моментів оболонки.

Підкреслені в (5) доданки відповідають геометричній нелінійності.

У розглянутому випадку статичні граничні умови відносно силових факторів на граничному контурі набувають наступного вигляду:

$$(6)$$

де

Рівняння стану для тривимірного тіла, у припущенні, що при малих деформаціях повні деформації γ_{β}^{α} складаються з пружних деформацій γ_{β}^{el} та незворотних деформацій повзучості:

γ_{β}^{cr} : $\gamma_{\beta}^{\alpha} = \gamma_{\beta}^{el} + \gamma_{\beta}^{cr}$, є наступними:

$$\sigma^{\alpha\beta} = E^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} - \gamma_{\beta}^{cr}, \quad \sigma^{\alpha\beta} = E^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} - \gamma_{\beta}^{cr}, \quad (7)$$

де $E^{\alpha\beta\gamma\delta}, E^{\alpha\beta\gamma\delta}$ – компоненти тензора пружності матеріалу.

Для випадку ізотропного тіла з модулем зсуву G і коефіцієнтом Пуассона ν :

$$(8)$$

Відповідно прийнятим припущенням щодо повзучості оболонок, рівняння стану оболонок при повзучості перетворюються до наступних:

$$n^{\alpha\beta} = {}^{(0)}A^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} + {}^{(1)}A^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} - n_{cr}^{\alpha\beta}, \quad (9)$$

$$m^{\alpha\beta} = {}^{(1)}A^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} + {}^{(2)}A^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\gamma\delta} - m_{cr}^{\alpha\beta}, \quad q^{\alpha} = {}^{(0)}A^{\alpha\beta\gamma\delta} \gamma_{\beta\gamma} - q_{cr}^{\alpha},$$

де

$$(10)$$

– компоненти тензорів пружності та відповідні деформаціям повзучості “додаткові” силові фактори оболонкового елементу.

Рівняння (10) мають бути конкретизовані за визначенням певного закону повзучості матеріалу оболонки та тензору $\mathcal{Q}_{\alpha\beta}^{\gamma\delta}$ ($\mathcal{Q}_{\alpha\beta}^{\gamma\delta} = \frac{\mathcal{Q}_{\alpha\beta}^{\gamma\delta}}{\mathcal{Q}_{\alpha\beta}^{\gamma\delta}} - \mathcal{K}_{\alpha\beta}^{\gamma\delta}$), $\mathcal{O} = \sqrt{\det(a_{\alpha\beta}^*) / \det(a_{\alpha\beta})}$. Значення коефіцієнту \mathcal{K} ($\mathcal{K} \approx 5/6$) приймають відповідним до прийнятої нерівномірності розподілення деформацій зсуву вздовж товщини оболонкового елементу.

Рівняння (1)-(10) надані в системі координат загального виду та записані у векторно-тензорній формі. У цьому ж розділі розглянуто випадок, коли координатні осі систем відліку збігаються з лініями головних кривин координатної поверхні оболонки. Відповідні цьому випадку рівняння і граничні умови отримано з системи рівнянь (1)-(10) за рахунок використання виразів компонентів метричних тензорів $a_{\alpha\beta} a^{\alpha\beta}$, тензорів кривин $b_{\alpha\beta} b^{\alpha\beta}$ через головні кривини k_1, k_2 і параметри Ляме A_1, A_2 .

У **третьому розділі** обговорені фізичні механізми повзучості і феноменологічний підхід щодо опису явища повзучості. Розглянуто підхід, у якому для створення моделей повзучості матеріалів застосовані припущення про існування потенціалу швидкостей деформацій повзучості, який залежить від еквівалентного напруження, ряду структурних параметрів і температури. Обґрунтовано переваги шляху щодо вдосконалення поширених моделей повзучості із пошкоджуваністю, що відповідають теорії повзучості з одним структурним параметром та відомі як моделі Работнова-Качанова, за рахунок збільшення кількості структурних параметрів. Наведено модель із трьома структурними параметрами, яка запропонована Хейхерстом і враховує пошкоджуваність та старіння мікроструктури матеріалів при високих температурах. Здійснено порівняльний аналіз розрахункових кривих повзучості і довготривалої міцності матеріалів, що впливають з розглянутих моделей, та зіставлення з експериментальними даними. Потім, в цьому ж розділі, розглянуті моделі анізотропної повзучості, що враховують залежність властивостей повзучості від виду напруженого стану (асиметрія властивостей). Основну увагу приділено моделям повзучості, що запропоновані О.К. Морачковським для початково-ортотропних матеріалів і О.О. Золочевським для ізотропних і анізотропних матеріалів із асиметрією властивостей. Наведено методику щодо визначення параметрів цих моделей за даними базових дослідів. Усі моделі повзучості матеріалів, що розглянуті у цьому розділі, використані у дослідженнях повзучості оболонок за темою даної роботи.

У **четвертому розділі** надано математичну постановку початково-крайових задач повзучості з руйнуванням для осесиметричних оболонок обертання на основі запропонованого варіанту теорії повзучості тонких оболонок. Повна система рівнянь початково-крайових задач містить:

– кінематичні рівняння:

$$\mathbf{G} \mathcal{Y}_{\mathcal{E}} = L \dot{\mathbf{E}}, \quad \mathbf{G} \dot{\mathbf{E}}_1 = \partial_1 \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_1^*(\mathbf{u}) \dot{\mathbf{u}}, \quad \dot{\mathbf{E}}_2 = \mathbf{G}_2 \dot{\mathbf{u}}, \quad (11)$$

де $\star_1(\dots) = \frac{1}{A_1} \frac{\star(\dots)}{\star \mathcal{X}}$ – оператор диференціювання по узагальненій координаті системи відліку

на поверхні оболонки;

– квазістатичні рівняння:

$$\partial_1 \dot{\mathbf{T}}_1 + \mathbf{C}_1 + L_1^*(\mathbf{u}) \dot{\mathbf{T}}_1 + L_1^{**}(T_1) \dot{\mathbf{u}} + L_2 \dot{\mathbf{T}}_2 + \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{0}, \quad (12)$$

– рівняння стану:

$$\mathbf{G} \dot{\mathbf{T}}_1 = C_{11} \mathbf{G} \dot{\mathbf{E}}_1 + \mathbf{C}_{12} \dot{\mathbf{E}}_2 - \mathbf{G} \dot{\mathbf{T}}_1^{cr}, \quad \mathbf{G} \dot{\mathbf{d}} = C^* \mathbf{G} \mathcal{Y}_{\mathcal{E}} + \mathbf{G} \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}^{cr}, \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{T}}_2 = \mathbf{C}_{21} \mathbf{G} \dot{\mathbf{E}}_1 + C_{22} \dot{\mathbf{E}}_2 - \dot{\mathbf{T}}_2^{cr},$$

Рівняння (11)-(13) відповідають постановці геометрично нелінійних задач теорії повзучості оболонок. Зазначимо, що звідси легко отримати рівняння геометрично лінійних задач повзучості оболонок з урахуванням деформацій поперечного зсуву, якщо прийняти: $\mathbf{G} \equiv \mathbf{E}$ – одиничною матрицею, а $\mathbf{G}_1^* \equiv \mathbf{0}$, $L_1^* \equiv \mathbf{0}$, $L_1^{**} \equiv \mathbf{0}$.

Відносно швидкостей основних змінних: $\dot{n}_{11}, \dot{m}_{11}, \dot{q}_1, \dot{\diamond}_1, \dot{w}_1, \dot{\diamond}_3, \dot{\diamond}_{11}, \dot{\diamond}_{22}, \dot{\diamond}_{13}, \dot{\diamond}$, з (11)-(13) отримано наступну визначальну систему рівнянь:

$$\partial_1 \dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{A}(\mathbf{Y}) \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}(\diamond, \diamond), \quad \mathbf{G} \dot{\mathbf{d}} = \mathbf{A}^* \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}^*(\diamond, \diamond), \quad \dot{\mathbf{d}} = \mathbf{f}_1(\diamond, \diamond), \quad (14)$$

де $\dot{\mathbf{Y}}^T = [\dot{\mathbf{T}}_1^T, \dot{\mathbf{u}}^T]$ – вектор основних невідомих крайових задач.

До крайової задачі відносно швидкостей основних невідомих, що містить система (14), додані граничні умови:

$$\mathcal{E}_0 \dot{\mathbf{Y}}(\mathcal{X}) = \mathcal{Y}_0^*, \quad \mathcal{E}_L \dot{\mathbf{Y}}(\mathcal{X}) = \mathcal{Y}_L^*, \quad (15)$$

де $\mathcal{E}_0, \mathcal{E}_L, \mathcal{Y}_0^*, \mathcal{Y}_L^*$ – матриці та вектори, якими задані граничні умови на лівому ($\mathcal{X} = \mathcal{X}_0$) і правому краї ($\mathcal{X} = \mathcal{X}_L$) оболонки, відповідно.

Визначальна система рівнянь (14) є початково-крайовою задачею. У роботі цю систему записано в узагальненій формі:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \star(\mathbf{Z}), \quad (16)$$

де $\mathbf{Z}^T = [\mathbf{Y}^T, \diamond^T, \diamond]$ – вектор, що складається з основних невідомих задачі, $\star(\mathbf{Z})$ – вектор-функція, що конкретизується тільки після розв’язання крайової задачі.

Система рівнянь (16) доповнюється початковими умовами:

$$\mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}^{el}, \quad (17)$$

де $\mathbf{Z}^{el T} = [\mathbf{Y}^{el T}, \diamond^{el T}, 0]$ – вектор основних невідомих, який визначено розв’язком задачі про вихідне пружне деформування оболонок.

У розділі розглянуто методи і алгоритми чисельного розв’язання початково-крайової задачі (14), що реалізовані у програмних розробках для ПЕОМ. За рахунок сумісного використання чисельних методів продовження розв’язку за параметром і дискретної прогонки з ортогоналізацією розв’язків на кроці по координаті для інтегрування крайової задачі, відомого як метод прогонки С.К. Годунова, запропоновано єдину методику чисельного розв’язання фізично і геометрично нелінійних задач теорії осесиметричних оболонок. При застосуванні цієї методики у розрахунках на повзучість, початкова задача (16), (17) інтегрувалась за схемою вкладеного методу Рунге-Кутта-Мерсона четвертого порядку з автоматизованим вибором кроку у часі. Відповідно, на кожному кроці часу методом прогонки С.К. Годунова розв’язувались крайові задачі (14), (15).

Наприкінці розділу наведені дані за дослідженнями вірогідності створених у роботі методів, алгоритмів і програм. Одержані рішення тестових прикладів, які порівняні з відомими в літературі окремими аналітичними і чисельними даними. Розглянуті шарнірно-оперті тонкостінні циліндричні оболонки під внутрішнім тиском та осьової стискаючою силою, циліндричні оболонки середньої товщини із жорстко закріпленими краями під внутрішнім тиском при геометрично нелінійному та лінійному пружному деформуванні, для яких в літературі містяться аналітичні та чисельні результати. Встановлено, що за рахунок варіювання у методі прогонки параметром дискретизації твірної оболонок – N , чисельні дані, що отримані в роботі, добре збігаються із відомими. У розглянутих прикладах чисельні розв’язки геометрично лінійних задач практично збігались з аналітичними вже при $N = 10$, а для геометрично нелінійних задач – при $N \geq 30$.

Далі наведені розрахунки щодо повзучості під внутрішнім тиском тонких конічних оболонок з титанового сплаву. Ці результати порівняно з відомими в літературі даними, що отримані на базі теорії оболонок Кірхгофа-Лява та теорії повзучості з пошкодженням Работнова-Качанова із застосуванням МСЕ для розв’язання крайових задач та методу прогнозу-корекції при інтегруванні у часі. Наведені дані свідчать про достатню ступінь достовірності розрахунків на базі запропонованих в роботі методів, алгоритмів і програм для розрахунків оболонок на повзучість.

У **п'ятому розділі** надані результати чисельних досліджень повзучості осесиметричних

тонких оболонок, які отримано на базі запропонованого варіанту теорії повзучості оболонок та створених програм для ПЕОМ. За цими дослідженнями вивчені закономірності як ізотропної повзучості оболонок, так і повзучості оболонок із різноопірних матеріалів та вивчено вплив геометричної нелінійності деформування оболонок при повзучості на процеси зміни у часі напружено-деформованого стану оболонок обертання з різною вихідною формою твірної. На Рис.1 ілюстровані окремі результати цих досліджень на прикладі повзучості під внутрішнім тиском шарнірно-опертих конічних оболонок із АК4-1Т ($T = 473$ К).

У залежності від властивостей повзучості матеріалу оболонки по різному відбуваються зміни у часі напружено-деформованого стану оболонок. За даними на Рис. 1, де вихідному пружному деформуванню оболонки відповідають криві – 1, можна встановити, що через $t = 400$ годин повзучості розподіли згинальних моментів – Рис.1 а) та прогинів – Рис. 1 б) уздовж твірної конічної оболонки здобувають якісні та кількісні відмінності, якщо у розрахунках оболонки врахувати асиметрію властивостей повзучості матеріалу оболонки та знехтувати останньою. При геометрично лінійному деформуванні отримуємо відповідні криві – 2 і 3, а у разі геометрично нелінійного деформування отримуємо криві – 4 і 5. При врахуванні асиметрії властивостей повзучості матеріалу оболонок згинальні моменти набувають більшого рівня, ніж у вихідному стані та при її відсутності (знехтуванні). Між тим, прогини внаслідок повзучості є меншими для оболонок із матеріалів, які мають асиметрію властивостей при повзучості, ніж для матеріалів, для яких вона відсутня (знехтувана). Вклад у ці відмінності вносить і теорія оболонок. За однаковий термін витримки в умовах повзучості оболонок, прогини яких у часі досягають або перевищують значення їхньої товщини, максимум прогину виявляється більшим, якщо врахувати геометричне нелінійне деформування оболонок, а для згинальних моментів ще й виявляється якісна зміна, – положення їхнього максимуму зміщується до краю з меншим радіусом колового перерізу конічної оболонки. Ступінь впливу геометричної нелінійності залежить від вихідної форми твірної оболонок обертання і є більшим для конічних оболонок, ніж для циліндричних. Асиметрія властивостей повзучості матеріалу оболонок впливає незалежно від форми твірної оболонки і є суттєвою як для циліндричних, так і для конічних оболонок. Окрім цього, при ізотропній повзучості і геометрично лінійному деформуванні оболонок тривалість переходу до “усталення” напруженого стану оболонок є коротшою, ніж для оболонок із матеріалів з асиметрією властивостей повзучості, та практично не може бути зафіксованою при геометрично нелінійному деформуванні оболонок.

При застосуванні теорії повзучості Работнова-Качанова, досліджено вплив вихідної форми оболонки на час до руйнування. Дані свідчать про те, що для сферичної оболонки час до завершення прихованого руйнування є суттєво більшим, ніж для пластини. У разі врахування геометрично нелінійного деформування, розрахунками встановлено, що у сферичній оболонці помітно повільніше, ніж у пластині відбуваються процеси формоутворення, релаксації максимальних на-

пружень та нагромадження пошкоджуваності. Вплив геометричної нелінійності на повзучість пластини стає помітним при набуванні нею у часі прогину, порівняного із товщиною. Це пояснено в роботі роллю мембранних сил, які наявні для сферичної оболонки у вихідному стані та з'являються у часі для пластин, і які, зростаючи у часі, протидіють згину пластини і оболонки. У геометрично лінійному випадку мембранні сили в пластинах відсутні. Встановлено, що додавання пластині у вихідному стані навіть малої кривини, істотно зменшує прирощення параметру пошкодження і прогину.

У цьому розділі на прикладі повзучості під внутрішнім тиском циліндричних оболонок середньої товщини, встановлено роль поперечного зсуву у визначенні параметрів напружено-деформованого стану та часу до руйнування оболонок на підставі використання двох різних теорій повзучості: теорії Работнова-Качанова з одним структурним параметром та теорії Хейхерста з трьома структурними параметрами. Окремі результати цих досліджень ілюстровані на Рис. 2.

У роботі для кожної з цих теорій повзучості порівняно результати, що отримані у розрахунках із врахуванням поперечного зсуву та у припущенні теорії Кірхгофа-Лява (К-Л), де ним нехтується. Так, для теорії повзучості Работнова-Качанова, за порівняннями на Рис. 2 а) розрахунковими даними, можна встановити різницю між змінами у часі еквівалентних напружень Мізесу в точці оболонки, де приховане руйнування завершується. З різницею між максимальним рівнем напруження Мізесу у 7,5%, час до руйнування при врахуванні поперечного зсуву є більшим на 25%, ніж при його нехтуванні (К-Л). Це пояснюється тим, що у вихідному стані і при повзучості рівень максимальних напружень є нижчим при врахуванні поперечного зсуву оболонки, ніж при його знехтуванні. Між тим, для теорії повзучості Хейхерста, за порівняннями на Рис. 2 б) даними, можна встановити, що різниця між визначеним часом до руйнування оболонки складає усього 1% незважаючи на різницю у напруженнях Мізесу у вихідному стані, та цей час є коротшим в порівнянні з результатами, які отримані по теорії повзучості Работнова-Качанова. Це пояснюється тим, що для неоднорідного напруженого стану, у межах теорії повзучості Хейхерста, де для опису механізмів пошкодження та старіння використані три структурних параметри, перерозподіл напружень спостерігається в об'ємі оболонці, та процес нагромадження пошкоджень не здобуває тієї локалізації, що властива для теорії повзучості Работнова-Качанова. У останньому випадку, перерозподіл напружень внаслідок повзучості спостерігається, переважно, у локалізованих об'ємах оболонки із суттєвим рівнем напруження Мізесу, і процес нагромадження пошкоджень є локалізованим та тим інтенсивнішим, чим вище рівень напружень Мізесу. Властивість теорії повзучості Хейхерста свідчить про те, що вплив поперечного зсуву на значення напружень Мізесу у вихідному стані нівелюється із часом. Спираючись на те, що модель Хейхерста з трьома структурними параметрами є фізично виправданою, результати розрахунків є більш адекватними дійсності.

Якісні відмінності мають місце і у розподілах пошкодження, що пояснено істотно різним напруженим станом в оболонці: плоске – для теорії Кірхгофа-Лява, тривісне – для теорії поперечного зсуву. У розрахунках оболонок з припущеннями теорії Кірхгофа-Лява, максимальне головне напруження дорівнює нулю в тих областях оболонки, де є від’ємними інші головні напруження, а при застосуванні теорії поперечного зсуву максимальне головне напруження є тут додатним. Цей ефект впливу зсувних напружень, як досліджено в роботі, є суттєвим при моделюванні асиметрії процесу пошкодження при повзучості, коли при "стисканні" ($\sigma_1 \leq 0$) пошкодження не відбувається.

Наприкінці цього розділу розглянуті розв’язки прикладних задач, що отримано на основі програмних розробок, які створені в роботі. Надані рекомендації і висновки, що одержані при вирішенні технологічної задачі про гаряче формоутворення сферичних оболонок шляхом витяжки в умовах повзучості круглих мембран за технологією пневматичної формовки. Головною привабливістю гарячого формоутворення за розглянутою схемою є невисокі рівні тиску, що необхідні для формоутворення виробів точної форми за один технологічний цикл. Визначенню підлягали форма і ступінь пошкодження виробу при формоутворенні, необхідний час витримки. Знайдено рішення сформульованої задачі для листової заготівлі з алюмінієвого сплаву АМг6, що в умовах повзучості при температурі 420 °С перетворюється в оболонку, яка, із цілком прийнятною для практики точністю, є близькою до сферичної. Ці висновки добре погоджуються з наявними експериментальними даними по вільній формовці круглих тонколистових заготівель.

Далі розглянуто формоутворення параболоїдного елементу антени із сплаву Д16АТ, що при усадці покриття із термореактивного компаунда приводить оболонку до заданої за функціональним призначенням форми. Ціль розрахунку полягала у визначенні форми оболонки і напружень у виробі після затвердіння компаунда (полімеризації), який підбирався за умов здатності зберегти твердість і форму оболонки при експлуатації у низькотемпературному середовищі та одержати виріб за термін одного технологічного циклу. Розрахунки щодо формоутворення параболоїдної оболонки антени внаслідок усадки нанесеного на його поверхню покриття були використані у фільмі НІФХІ ім Л.Я. Карпова (м. Обнінськ).

ВИСНОВКИ

За проведеними в роботі дослідженнями розв’язано задачі повзучості та довготривалої міцності тонких оболонок із урахуванням пошкодження, асиметрії властивостей матеріалів та геометричної нелінійності і поперечного зсуву оболонок при повзучості.

Основні наукові і практичні результати, отримані в роботі полягають у наступному:

1. Надано розвиток теорії повзучості оболонок за рахунок запропонованого в роботі нового варіанту технічної теорії повзучості оболонок, який створено на базі загальних положень про де-

формування тривимірних тіл та узгоджених із моделями повзучості і пошкоджуваності матеріалів часткових припущень щодо виду навантаження, поперечного зсуву і геометричної нелінійності.

2. Сформульовані нові математичні постановки нелінійних початково-крайових задач повзучості осесиметричних оболонок обертання, що виведені в роботі із запропонованого нового варіанту теорії повзучості і пошкоджуваності тонких оболонок.

3. Розроблено методику розв'язання фізично і геометрично нелінійних задач повзучості з руйнуванням осесиметричних оболонок, за рахунок сумісного використання чисельних методів продовження розв'язку за параметром часу і ортогональної прогонки С.К. Годунова для розв'язання крайових задач. Проведені дослідження з вірогідності створених у роботі методів, алгоритмів і програм шляхом рішення тестових прикладів і порівнянням результатів розрахунків з відомими в літературі окремими аналітичними і чисельними даними.

4. Отримані розв'язки задач повзучості осесиметричних оболонок обертання із матеріалів з асиметричними властивостями, що дозволило визначити закономірності впливу асиметрії матеріалів на процеси повзучості тонких оболонок.

5. Одержані розв'язки задач повзучості осесиметричних оболонок із використанням теорій повзучості з одним та трьома структурними параметрами, спільному урахуванні геометричної нелінійності, поперечного зсуву і пошкоджуваності оболонок, що дозволило встановити якісні та кількісні закономірності щодо впливу припущень теорії оболонок, геометричної нелінійності і поперечного зсуву на процеси повзучості і довготривалу міцність тонких оболонок і пластин.

6. Вирішені технологічні задачі з формоутворення оболонок із листових матеріалів при повзучості та при усадці компаундного покриття, що дозволило визначити параметри технологічних процесів і оцінити якість виробів по ступеню забезпечення заданої за функціональним призначенням форми оболонок та пошкоджуваності за час формоутворення. Розрахунки деформування параболоїдного елемента антени при усадці покриття, нанесеного на його поверхню, використані у філії НІФХІ ім Л.Я. Карпова (м. Обнінськ).

НАУКОВІ ПРАЦІ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Данкерт М., Золочевский А.А., Сычев А.И. К теории анизотропной ползучести на основе трех смешанных инвариантов // Динамика и прочность машин. - Харьков: ХПИ. - 1991. - Вып. 52. - С. 74-79.
2. Золочевский А.А., Сычев А.И. Программный комплекс для решения задач нелинейного деформирования тонкостенных конструкций из материалов, разносопротивляющихся растяжению-сжатию: ПС РФАП Украины. - № гос. рег. 50890001413. - 1989. - 80 с.

3. Сычев А.И. Исследования влияния асимметрии свойств материала и геометрической нелинейности на ползучесть тонких оболочек // Динамика и прочность машин. - Харьков: ХГПУ. - 1997. - Вып. 55. - С. 33-46.
4. Сычев А.И. Численные модели повреждаемости оболочек при ползучести для оценки их длительной прочности // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып. 27. - С. 171-177.
5. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sichov A. Zum Kriechen duenner Rotationsschalen unter Einbeziehung geometrischer Nichtlinearitaet sowie der Asymmetrie der Werkstoffeigenschaften // Forschung im Ingenieurwesen. - 1996. - Bd. 62, Nr. 3. - S. 47-57.
6. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sychov A. Geometrically nonlinear bending of thin-walled shells and plates under creep-damage conditions // Archive of Applied Mechanics. - 1997. - N 67. - P. 339-352.
7. Sichov A. Eine verbesserte Schalentheorie und ihre Anwendung auf Probleme der Kriechmechanik // Mitteilungen aus dem Institut fuer Mechanik. Ruhr-Universitaet Bochum. - 1998. - Nr. 114 - S. 63-66.
8. Sichov A. Eine verbesserte Schalentheorie unter Einbeziehung geometrischer Nichtlinearitaet sowie der Schubverzerrungen in Problemen der Kriechmechanik // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Новые решения в современных технологиях. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып. 17. - С. 68-72.

АНОТАЦІЯ

Сичов А.І. Розв'язок задач повзучості оболонок з урахуванням пошкоджуваності, геометричної нелінійності та зсуву. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04. - механіка деформівного твердого тіла. - Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2003.

У дисертації запропоновано новий варіант технічної теорії повзучості оболонок, який створено на базі загальних положень про деформування тривимірних тіл та узгоджених із моделями повзучості і пошкоджуваності матеріалів часткових припущень щодо виду навантаження, поперечного зсуву і геометричної нелінійності. Сформульовані нові математичні постановки нелінійних початково-крайових задач повзучості осесиметричних оболонок обертання, відповідні запропонованому в роботі варіанту теорії повзучості і пошкоджуваності тонких оболонок. Методика розв'язання фізично і геометрично нелінійних задач повзучості з руйнуванням оболонок базується на чисельних методах продовження розв'язку за параметром часу і ортогональної прогонки С.К. Годунова для розв'язання крайових задач. Проведені дослідження вірогідності методів, алгоритмів і програм шляхом рішення тестових прикладів і порівнянням результатів розрахунків з ві-

домими в літературі окремими аналітичними і чисельними даними. Отримані розв'язки задач повзучості осесиметричних оболонок обертання із матеріалів з асиметричними властивостями, визначено закономірності впливу асиметрії матеріалів на процеси повзучості тонких оболонок. Досліджено повзучість з застосуванням рівнянь з одним та трьома структурними параметрами, спільному обліку геометричної нелінійності, поперечного зсуву і пошкоджуваності оболонок. Програмні розробки впроваджено в Республіканський фонд алгоритмів і програм, розрахунки деформування параболоїдного елемента антени при усадці покриття, нанесеного на його поверхню, використані у філії НІФХІ ім Л.Я. Карпова (м. Обнінськ).

Ключові слова: повзучість, руйнування, пошкоджуваність, анізотропія, асиметрія, оболонки, геометрична нелінійність, поперечний зсув.

ABSTRACT

Sichov A.I. Solution of the creep problems for thin shells considering damage, geometrical nonlinearity and shear. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 01.02.04. - mechanics of the deformable solids. - A.N. Podgorny's Institute for Problems in Machinery NAS Ukraine, Kharkiv, 2003.

The new variant of technical creep-damage theory for shells basing on general assumptions of three-dimensional deformation is given. The assumptions take into consideration the kind of loading, transversal shear and geometrical nonlinear effects. The new statements of the nonlinear boundary-initial value creep problems for axisymmetrically loaded thin shells of revolution basing on the proposed variant of shell theory are formulated. The method for solving of physically and geometrically nonlinear creep-damage problems use the numerical procedures such integration by parameter and S.K.Godunov's method. The methods, algorithms and programs developed in work were verified. The creep-damage axisymmetrical thin shell problem's solutions taking in consideration the asymmetrical material properties were obtained. The laws of material asymmetry influence on creep-damage processes in shells were established. The creep-damage theory using one and three structural parameters and joint consideration of geometrical nonlinearity, shear and damage of shell material were investigated. The designed software were transferred to the Ukrainian Foundation of Algorithms and Programs. The calculations of the paraboloid antenna element under deformation of coverage are used in L.J. Karpov's NIPCI (Obninsk).

Keywords: creep, fracture, damage, anisotropy, asymmetry, shells, geometrical nonlinearity, transversal shear.

АННОТАЦИЯ

Сычев А.И. Решение задач ползучести тонких оболочек с учетом повреждаемости, геометрической нелинейности и сдвига. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. - механика деформируемого твердого тела. - Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2003.

В диссертации предложен новый вариант технической теории ползучести оболочек, который создан на базе общих положений о деформировании трехмерных тел и частных допущений, согласованных с моделями ползучести и повреждаемости материалов, относительно вида нагружения, поперечного сдвига и геометрической нелинейности. Сформулированы новые математические постановки нелинейных начально-краевых задач ползучести осесимметричных оболочек вращения, которые отвечают предложенному в работе варианту теории ползучести тонких оболочек. Разработана методика решения физически и геометрически нелинейных задач ползучести с повреждаемостью осесимметричных оболочек, основанная на совместном использовании численных методов продолжения решения по параметру времени и ортогональной прогонки С.К. Годунова для решения краевых задач. Проведены исследования достоверности созданных в работе методов, алгоритмов и программ.

Получены решения задач ползучести осесимметричных оболочек вращения из материалов с асимметричными свойствами ползучести, установлено влияние асимметрии материалов, геометрической нелинейности, формы оболочки на процессы ползучести. В примерах расчетов изгиба круглых пластин и сферических оболочек с малой начальной кривизной в условиях ползучести с повреждаемостью, установлено, что учет геометрической нелинейности при деформировании приводит к замедлению процессов формообразования и повреждаемости пластин во времени, сопровождается релаксацией максимальных изгибных напряжений, что отражается на увеличении времени до завершения скрытого разрушения по сравнению с тем, что определяется в рамках геометрически линейного деформирования. Для сферических оболочек изучено влияние величины начальной кривизны оболочки и установлено, что с ростом кривизны оболочки возрастает роль мембранных сил, которые, в свою очередь, существенно замедляют процесс повреждаемости оболочек.

Получены решения задач ползучести осесимметричных оболочек с использованием теорий ползучести Работнова-Качанова с одним структурным параметром и Хейхерста с тремя структурными параметрами, при совместном учете геометрической нелинейности, поперечного сдвига и повреждаемости оболочек, что позволило установить качественные и количественные закономерности влияния допущений теории оболочек, геометрической нелинейности и поперечного сдвига на процессы ползучести и длительной прочности тонких оболочек и пластин.

В работе представлены решения прикладных задач, которые получены на основе созданных в работе программных разработок. Даны рекомендации и выводы, применительно к технологии горячего формообразования сферических оболочек путем их вытяжки в условиях ползучести из

круглых мембран по технологии пневматической формовки. Главной привлекательностью горячего формообразования по рассмотренной схеме является невысокий уровень давлений, необходимых для формообразования изделий точной формы за один технологический цикл. Определены форма и степень повреждения изделия при формообразовании, необходимое время выдержки. Найдены решения сформулированной задачи для листовой заготовки из алюминиевого сплава АМгб, которая с вполне приемлемой для практики точностью в условиях ползучести при температуре 420°C принимает форму сферической оболочки. Выводы в работе хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными по свободной формовке круглых тонколистовых заготовок.

Рассмотрено формообразование параболоидного элемента антенны из сплава Д16АТ за счет усадки покрытия из терморезистивного компаунда. Цель расчета состояла в определении формы оболочки и напряжений в изделии после затвердения компаунда (полимеризация), который подбирался по условиям его способности сохранить твердость и форму оболочки при эксплуатации в низкотемпературной среде и возможности получить изделие за время одного технологического цикла.

Программные разработки внедрены в Республиканский фонд алгоритмов и программ, расчеты деформирования параболоидного элемента антенны при усадке покрытия, нанесенного на его поверхность, использованы в филиала НИФХИ им Л.Я. Карпова (г. Обнинск).

Ключевые слова: ползучесть, разрушение, повреждаемость, анизотропия, асимметрия, оболочки, геометрическая нелинейность, поперечный сдвиг.