

О.В. Тимошенко, к.т.н., доц.**Б.О. Яхно, к.т.н., доц.****А.М. Бабак, асист.****Фам Дик Куан, аспір.***Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Чисельне моделювання полів пошкоджуваності та залишкових напружень після дорнування отворів

Розглянуто процес зміцнення технологічного отвору в алюмінієвому авіаційному сплаві Д16ЧТ для різних рівнів пластичного деформування, що відповідають рівню пластичної деформації 1 %, 2 % та 3 % шляхом дорнування. У скінченно-елементному пакеті Abaqus Student Edition вирішена динамічна задача моделювання процесу дорнування шляхом створення відповідної скінченно-елементної моделі та проведено розрахунок контактної задачі за явною схемою інтегрування. Для підвищення якості розрахунку використовувався поділ моделі на зони з різними параметрами геометрії скінченних елементів. За результатами чисельного моделювання отримано розподіл пошкоджуваності у зоні технологічного отвору для різних рівнів пластичного деформування, що були розглянуті у представленій роботі. При цьому параметр пошкоджуваності, який залежить від рівня пластичної деформації, розглядався у вигляді скалярної величини, що оцінювалась за допомогою зміни модуля пружності першого роду. Визначені поля розподілу залишкових напружень та еквівалентної пластичної деформації. Отримано закономірності зміни головних залишкових напружень по внутрішній поверхні отвору в залежності від глибини отвору. На основі проведених чисельних розрахунків визначено вплив залишкової пластичної деформації на початковий рівень пошкоджуваності матеріалу, в зоні технологічного отвору. Проаналізовано перерозподіл еквівалентної пластичної деформації та залишкових напружень під час подальшого навантаження технологічного отвору розтягуючим навантаженням.

Ключові слова: залишкові напруження; технологічний отвір; пошкоджуваність; дорнування; зміцнення; пластична деформація; метод скінченних елементів; напружено деформацийний стан.

Постановка проблеми. Зміцнення металічних матеріалів шляхом дорнування знайшло широке застосування серед елементів авіабудівних конструкцій. Проте питання впливу залишкових напружень і деформацій на міцність, надійність і довговічність конструкції, у зв'язку зі складністю поставленої задачі, залишається до кінця не вивченим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки та чисельного моделювання фізичних процесів механіки деформівного твердого тіла за допомогою методу скінченних елементів, який реалізує основні положення теорії пружності та пластичності, дозволяє проводити чисельні експериментальні дослідження із реальними фізико-механічними властивостями матеріалу для різних типів технологічних задач. При цьому стає можливим отримати поля розподілу шуканих величин, а саме напружень і деформацій, під час пружно-пластичного деформування, залишкових напружень після процесу дорнування та перерозподіл напружень при реальному експлуатаційному навантаженні. Отримані дані можуть бути використані для визначення параметрів циклу навантаження, що дає можливість провести розрахунок на циклічну міцність та оцінити поточний стан пошкоджуваності конструкції і коефіцієнт запасу по ресурсу.

Авторами [1, 2] було викладено основні закономірності втоми елементів авіаконструкцій у зв'язку з умовами навантаження, типовими для роботи літальних апаратів. Дано аналіз впливу конструктивно-технологічних факторів на характеристики втоми елементів, у джерелах [3, 4] розроблено метод інтегрованого проектування і параметричного моделювання крила пасажирського літака за допомогою систем CAD / CAM / CAE / PLM та є дані про вплив так званих технологічних дефектів на втому. У публікації [5] було запропоновано розрахунковий метод, що дозволяє визначати довговічність елементів конструкцій з зміцненими отворами при регулярному навантаженні для зразків з алюмінієвих сплавів Д16АТ і В95пчТ2 з отворами, зміцненими бар'єрним обтисненням. Група науковців [6] розглядала обчислення одновісного пружно-пластичного деформування пластини з центральним деформаційно зміцненим отвором, та в результаті були побудовані залежності розподілу розмаху локальних, максимальних та мінімальних напружень від кількості циклів навантаження та натягу дорнування. Також у роботах [7, 8] було розроблено метод аналізу впливу спільного локального і бар'єрного обтиснення на

параметри локального НДС розтягнутої смуги з циліндроконічним отвором. Потім авторами [9, 10] було розглянуто спосіб обробки отворів для відповідальних деталей з алюмінієвого сплаву Д16чТ шляхом дорнування з різними величинами натягу. Представлені результати розрахунків методом кінцевих елементів в програмному комплексі DEFORM та Abaqus.

Використання явної схеми інтегрування методу скінченних елементів, яка реалізована в таких сучасних програмних кодах, як Abaqus Explicit, дозволяє реалізувати процес деформування в динамічній постановці.

Мета дослідження. Визначення, за допомогою методу скінченних елементів, розподілу залишкових напружень, пластичних деформацій та побудова полів пошкоджуваності під час та після процесу дорнування, та показати розподіл полів пошкоджуваності та залишкових напружень від рівня пластичного деформування при дорнуванні отвору.

Викладення основного матеріалу. Дослідження проводились на вісесиметричній скінченно-елементній моделі дорнованого отвору в програмному комплексі Abaqus Student Edition, використовувались чотирих вузлові вісесиметричні елементи з лінійною функцією форми. Під час розрахунку використовувалась умова пластичності Хуберта-Мізеса-Генкі, матеріал конструкції – алюмінієвий сплав Д16чТ має ізотропне зміцнення. Діаграму деформування було отримано експериментальним шляхом при одноісному розтязі плоского зразка. Параметр пошкоджуваності визначався через зміну макро-механічних властивостей матеріалу під час пружно-пластичного деформування, а саме через модуль пружності.

Рух дорна вздовж отвору моделювався за допомогою кінематичних граничних умов. Сам дорн моделювався як абсолютно жорстке тіло.

На рисунку 1–2 показано розподіл залишкових напружень і деформацій після процесу дорнування. Як видно із рисунків розподіл має нелінійний характер по товщині конструктивного елемента, максимальне накопичення відбувається ближче до місця виходу дорна із отвору (нижня поверхня). На рисунку 3 наведено розподіл полів пошкоджуваності, поблизу отвору, розподіл пошкоджень є також нелінійний, але більш рівномірний по товщині пластини в порівнянні із рівнем пластичного деформування.

Концентрація напружень є одним з факторів, що знижують втомну довговічність конструкції. Як би добре не була спроектована конструкція, в ній завжди є концентратори напружень у вигляді отворів, вирізів, галтельних переходів тощо.

Найбільш поширеним типом концентраторів є поодинокі і групові отвори. Питання аналізу напружено-деформованого стану елементів конструкції з отворами і визначення коефіцієнтів концентрації напружень в ній не досить добре вивчений. Варто зазначити, що всі розрахунки і аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів концентрації напружень справедливі в області пружних деформацій. Однак локальні напруження в конструкціях в зоні концентрації напружень досягають рівня, що перевищує межу текучості матеріалу.

Ефективним технологічним методом підвищення втомної довговічності зон конструкції, що містять отвори, є обробка методами поверхневого пластичного деформування (ППД) [1–5].

При використанні цих методів у результаті тиску інструменту на метал, мікронерівності і хвилястість вихідної поверхні згладжуються, поліпшується чистота і збільшується точність обробки. Крім того, при пластичній деформації стінок отворів в зоні поблизу отвору, виникають залишкові напруження, що змінюють амплітуду локальних напружень і деформацій при циклічному навантаженні деталі, що забезпечує зміна довговічності зміцненої зони. У даній роботі розглянуто застосування дорнування технологічних отворів.

Провести розрахунок та показати розподіл полів пошкоджуваності та залишкових напружень від рівня пластичного деформування при дорнуванні отвору.

Оскільки задача представлена у вісесиметричній постановці, то для дослідження процесу дорнування отвору була розроблена геометрична модель $\frac{1}{4}$ частини робочої зони зразка і дорна (рис. 1), що дозволило зменшити кількість елементів. Дорн моделювався як абсолютно жорстке тіло. Між дорном і зразком були введені умови контакту без урахування тертя. Параметри дорна наведені у роботі [10] де максимальний діаметр дорна становив 5,07 мм, розрахунок якого проведено згідно методики [11], а геометрична модель чверті зразка листового алюмінієвого сплаву приймаємо квадратної форми 25x25 мм із моделлю отвору. Товщина моделі зразка з отвором становить 5 мм. У отворі було знято фаску 0,5 мм під кутом 45° з обох сторін зразка.

Рівень пластичного залишкової деформації досягався за рахунок зміни початкового діаметру отвору, при 1 % відповідає діаметру отвору $d = 4.95 \text{ мм}$, при 2 % відповідає діаметру отвору $d = 4.90 \text{ мм}$, при 3 % відповідає діаметру отвору $d = 4.85 \text{ мм}$. Матеріал зразка – алюмінієвий сплав Д16чТ, механічні властивості якого взяті згідно експериментальних досліджень [10] та представлені у таблиці 1.

Механічні властивості алюмінієвого сплаву Д16чТ

Матеріал	Термообробка	Механічні властивості				
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	ϵ , %	$\sigma_B / \sigma_{0,2}$	E , 10^5 МПа
Д16чТ	У стані постачання	350	460	17,26	1,31	0,83

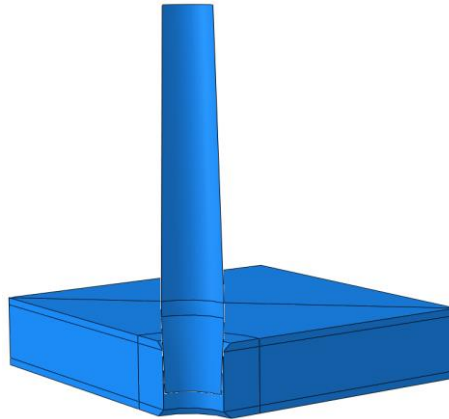


Рис. 1. Дорн та зразок (Геометрична модель)

Оскільки зразок моделюється $\frac{1}{4}$ частиною, то по площинах симетрії зразка були введені граничні умови симетрії, а саме переміщення вздовж нормалі до площин симетрії дорівнюють нулю (рис. 2). Процес дорнування моделювався кінематично, а саме задавалось вертикальне переміщення дорна, по нормалі до зовнішньої поверхні зразка на величину 12 мм. Нижня поверхня зразка, під час дорнування, нерухома в вертикальному напрямку. Між поверхнею дорна і поверхнею технологічного отвору застосовувались умови контакту.

Оскільки рівень залишкового пластичного деформування отвору у зразку різний, то було створено три розрахункові моделі із діаметрами отворів в пластині – 4,95 мм, 4,90 мм, 4,85 мм.

Пошкоджуваність алюмінієвого сплаву визначалась через зміну модуля пружності згідно [12], а крива кінетики накопичення пошкоджуваності представлена [13].

Для отримання рівномірної та якісної сітки скінченних елементів поблизу технологічного отвору геометричну модель зразка було розбито на 9 зон. Під час побудови сітки використовувались гексагональні твердотільні тривимірні скінченні елементи. Сітку скінченних елементів наведено на рисунку 3.

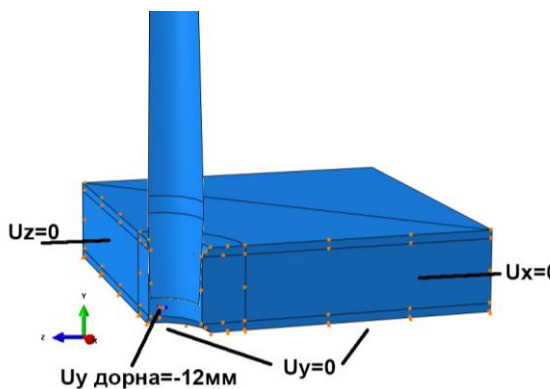


Рис. 2. Граничні умови та навантаження при дорнуванні

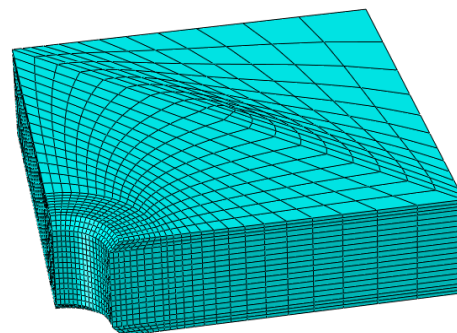


Рис. 3. Сітка скінченних елементів в зоні технологічного отвору

У результаті скінченно-елементного розрахунку було отримано розподіл еквівалентної пластичної деформації в зоні технологічного отвору, від рівня пластичного деформування, та які представлені на рисунку 4 для різних видів пластичного деформування, а на рисунку 5 рівень початкової пошкоджуваності.

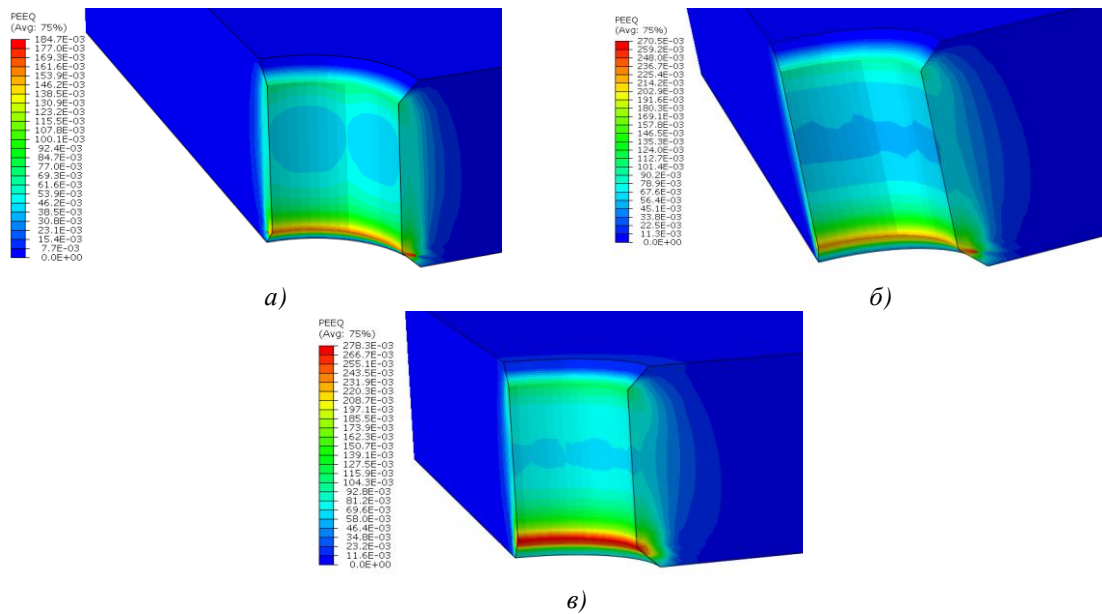


Рис. 4. Поля розподілу еквівалентної пластичної деформації в зоні технологічного отвору:
а) початковий $d = 4.95\text{ мм}$, б) початковий $d = 4.95\text{ мм}$, в) початковий $d = 4.85\text{ мм}$

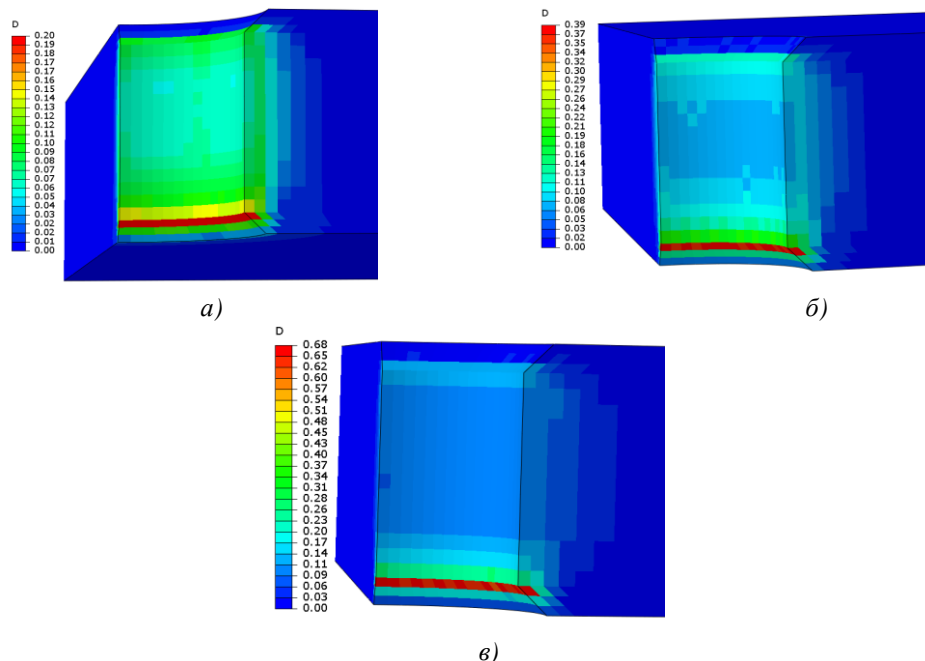


Рис. 5. Рівень початкової пошкоджуваності (поля пошкоджуваності)
в зоні технологічного отвору:
а) $d = 4.95\text{ мм}$; б) початковий $d = 4.9\text{ мм}$; в) початковий $d = 4.85\text{ мм}$

З наведених вище рисунків видно, що пластичне деформування відбувається нерівномірно по товщині пластини. Найбільша зона пластичної деформації і початкової пошкоджуваності знаходиться в районі фаски, на виході дорна із отвору.

На рисунках 6 та 7 наведено графік – порівняння рівня початкової пошкоджуваності технологічного отвору, залежно від вертикальної координати. На графіку можна чітко виділити зони фасок і зони циліндричної частини отвору. Пік початкової пошкоджуваності отвору припадає на зону виходу дорна із отвору. При діаметрі технологічного отвору $d = 4.85\text{ мм}$ (залишкова деформація 3 %) максимальний перепад між піковим значенням пошкоджуваності і пошкоджуваністю в циліндричній частині отвору складає 5,23 рази; при діаметрі технологічного отвору $d = 4.9\text{ мм}$ (залишкова деформація 2 %) максимальний перепад між піковим значенням пошкоджуваності та пошкоджуваністю в циліндричній частині отвору складає 3,45 рази; при діаметрі технологічного отвору $d = 4.95\text{ мм}$ (залишкова деформація 1 %) максимальний перепад між піковим значенням пошкоджуваності і пошкоджуваністю в циліндричній частині отвору складає 2,62 рази.

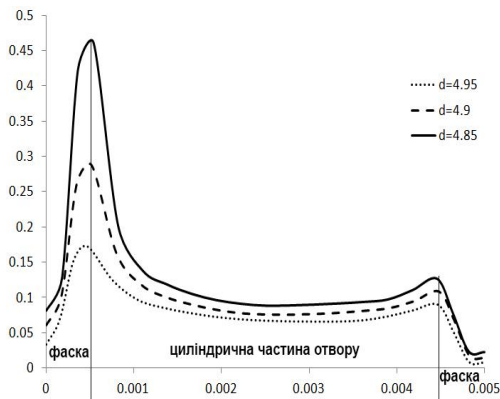


Рис. 6. Зміна початкової пошкодженості на внутрішній поверхні технологічного отвору, залежно від вертикальної координати

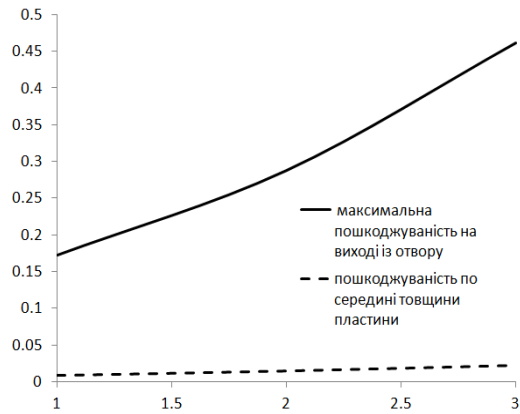


Рис. 7. Зміна пошкодженості на внутрішній поверхні технологічного отвору, залежно від рівня пластичного зміцнення (1 %, 2 %, 3 %)

З зазначеного вище можна бачити, що рівень початкової пошкодженості на виході із технологічного отвору нелінійно залежить від рівня пластичного деформування, однак у циліндричній частині отвору рівень початкової пошкодженості росте дуже повільно, залежно від залишкової пластичної деформації (рис. 7).

У результаті великих рівнів початкової пошкодженості в зоні виходу дорна із технологічного отвору можливо утворення макродефектів, однак, якщо зробити припущення, ці макродефекти будуть знаходитись у зоні стискаючих залишкових напружень, які не будуть давати можливості їх подальшого росту. Треба зазначити, що підвищення пластичного деформування в центрі циліндричної частині отвору буде призводити до досить повільного збільшення початкової пошкодженості (збільшення початкової пошкодженості на 30 % при збільшенні пластичного деформування з 1 % до 3 %). Що не буде вносити суттєвий внесок у зменшення довговічності в цій зоні отвору.

Також у результаті чисельного розрахунку процесу дорнування були отримані поля залишкових напружень, які показані на рисунку 8. Ці поля виведені в еквівалентних напруженнях, згідно з 4 теорією міцності (напруження за Мізесом) для діаметрів отворів $d = 4.85\text{мм}$, $d = 4.9\text{мм}$, $d = 4.95\text{мм}$. З зазначених вище рисунків видно, що при зменшенні діаметра отвору зона максимальних напружень зростає. При цьому найбільші напруження знаходяться в зоні виходу дорна із отвору. Крім того не складно помітити, що рівень максимальних залишкових напружень на поверхні наближений до границі міцності сплаву Д16ЧТ, що становить 470 МПа (при розтязі).

Однак при аналізі розподілу головних напружень (рис. 9–11) можна побачити, що нижня половина отвору знаходиться в зоні стискаючих напружень, при цьому в цій зоні всі три головні напруження мають від'ємний знак. Особливо чітко це можна спостерігати на рисунку 9 г; 10 г; 11 г. Тому високий рівень еквівалентних напружень не буде призводити до руйнування.

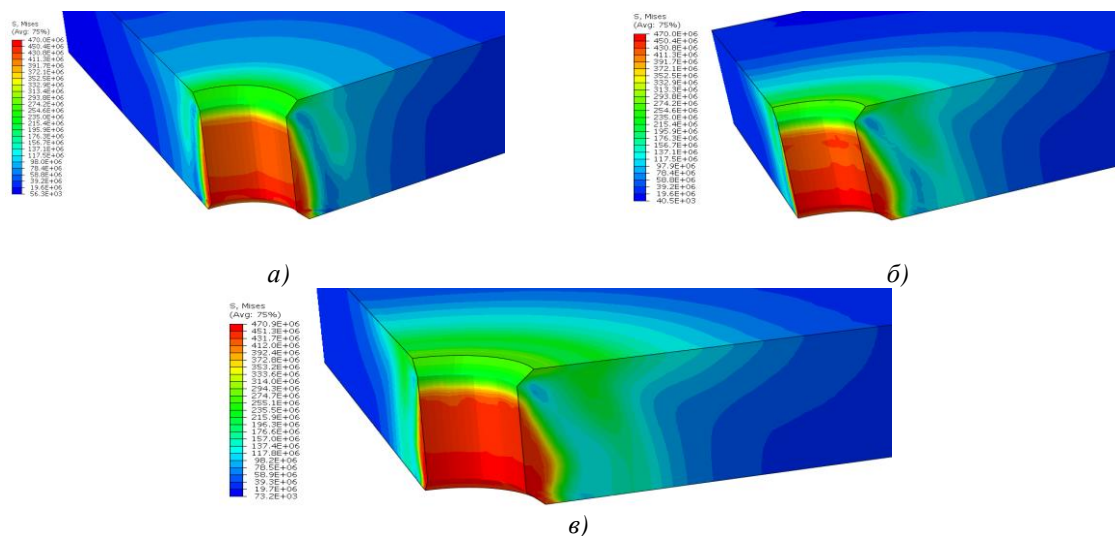


Рис. 8. Поля розподілу залишкових напружень по Мізесу в зоні технологічного отвору після дорнування: а) початковий $d = 4.95\text{мм}$; б) початковий $d = 4.9\text{мм}$; в) початковий $d = 4.85\text{мм}$

На рисунку 10 а, б, в, показано поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.95 \text{ мм}$, після дорнування, а на рисунку 10г наведено порівняння рівня головних залишкових напружень після дорнування. З рисунка видно що всі три головні напруження мають від'ємне значення у нижній третині отвору, σ_1 від'ємне до вертикальної координати 1,8 мм, а σ_2 та σ_3 від'ємні майже по всій товщині пластини.

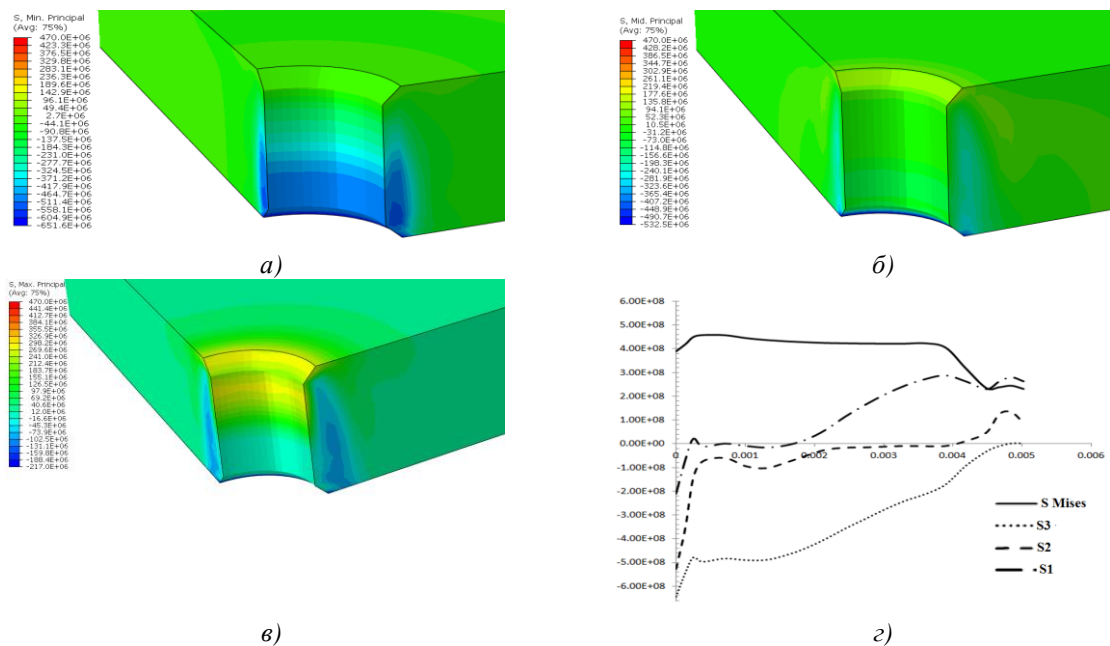


Рис. 9. Поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.95 \text{ мм}$, після дорнування: а) σ_3 ; б) σ_2 ; в) σ_1 г) по внутрішній поверхні отвору, залежно від вертикальної координати

На рисунку 10 а, б, в, показано поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.9 \text{ мм}$, а на рисунку 10г наведено порівняння рівня головних залишкових напружень після дорнування. З рисунка видно, що всі три головні напруження мають від'ємне значення в нижній третині отвору, σ_1 від'ємне до вертикальної координати 2,2 мм, а σ_2 та σ_3 від'ємні майже по всій товщині пластини.

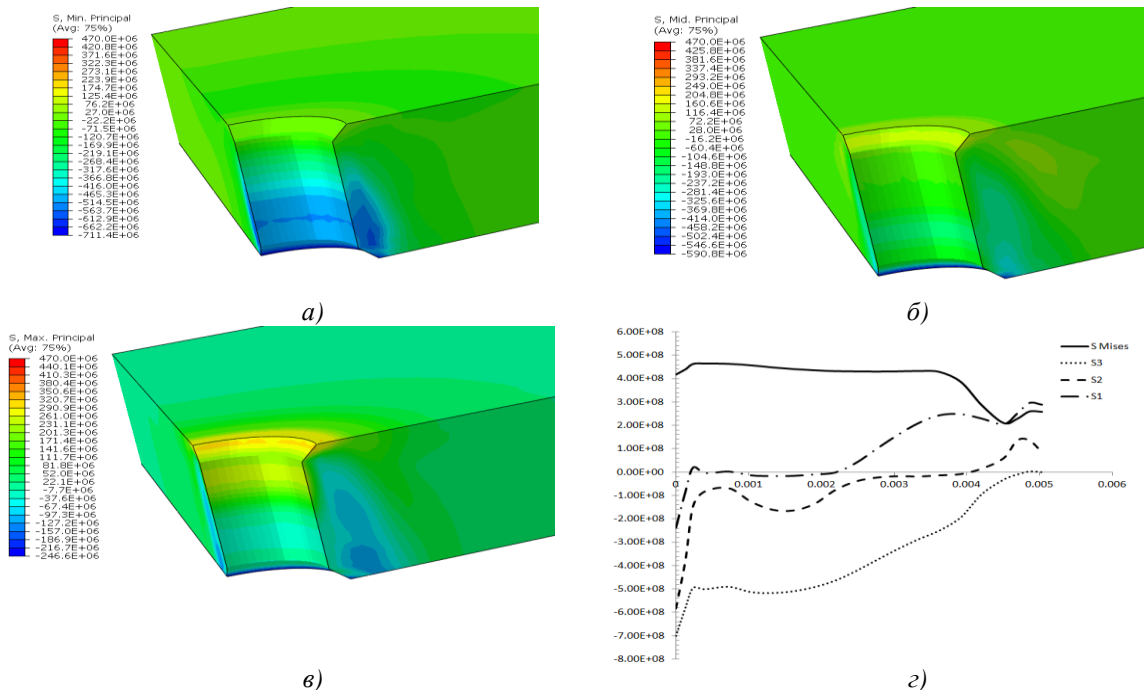


Рис. 10. Поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.9 \text{ мм}$, після дорнування: а) σ_3 ; б) σ_2 ; в) σ_1 г) по внутрішній поверхні отвору, залежно від вертикальної координати

На рисунку 12 а, б, в, представлені поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.85 \text{ мм}$. На рисунку 12 г наведено порівняння рівня головних залишкових напружень після дорнування. З рисунка видно, що всі три головні напруження мають від'ємне значення в нижній третині отвору, σ_1 від'ємне до вертикальної координати 2,5 мм, а σ_2 та σ_3 від'ємні майже по всій товщині пластини.

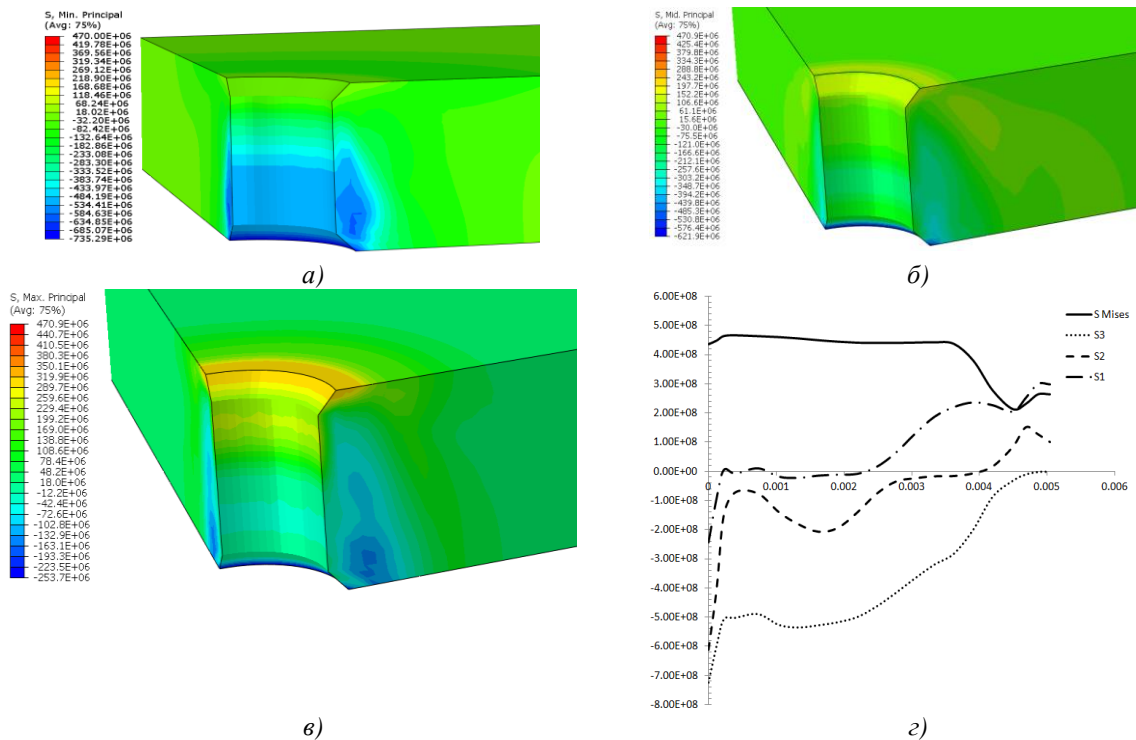


Рис. 11. Поля розподілу головних залишкових напружень в зоні технологічного отвору $d = 4.85 \text{ мм}$, після дорнування: а) σ_3 ; б) σ_2 ; в) σ_1 г) по внутрішній поверхні отвору, залежно від вертикальної координати

На рисунку 12 показано зміну σ_3 по товщині зразка, залежно від ступеня пластичного деформування (діаметру технологічного отвору). Можна бачити, що перехід від діаметру 4,95 мм до 4,9 мм дає найбільший приріст стискаючих напружень, подальше збільшення рівня пластичного деформування (зміна діаметра отвору до 4,85 мм) підвищує рівень стискаючих напружень, але менш суттєво.

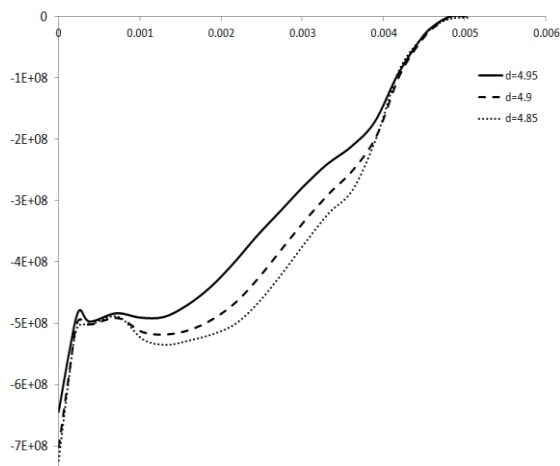


Рис. 12. Зміна σ_3 , залежно від діаметра технологічного отвору

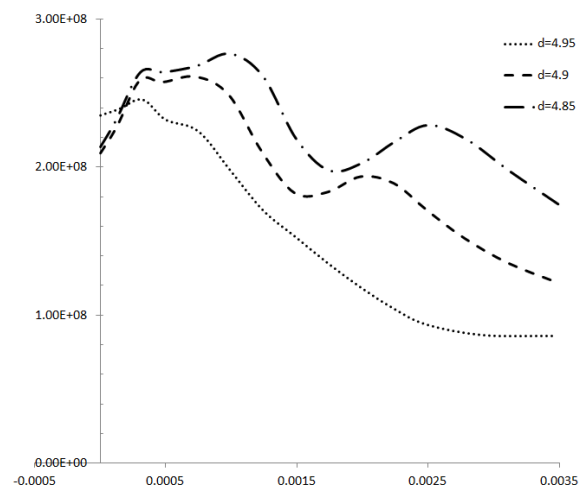


Рис. 13. Зміна еквівалентного напруження на поверхні пластини (залежно від відстані внутрішньої поверхні технологічного отвору)

Зміна еквівалентного напруження на верхній поверхні зразка в залежності від горизонтальної відстані до поверхні представлено на рисунку 13. Початкова «хвиля» на графіку відповідає зоні фаски, максимум залишкових поверхневих напружень припадає на зону 0,5–1,5 мм від циліндричної частини отвору, а вже на відстані 3,5 мм від краю відбувається падіння залишкових напружень на 100–150 МПа.

Висновки. Розроблено скінчено-елементну модель процесу дорнування технологічного отвору елементів авіаційних конструкцій та проведено скінчено-елементний аналіз, у результаті якого було визначено рівень залишкових напружень, деформацій та початкової пошкоджуваності при різних ступенях пластичного зміцнення (1 %, 2 %, 3 %). Побудовано поля початкової пошкоджуваності, яка виникає після дорнування в зоні технологічного отвору. Визначено, що рівень максимальної пошкоджуваності знаходиться в зоні виходу дорну з отвору, пошкоджуваність всередині отвору в 2–5 разів менша (залежно від рівня попереднього деформування), відповідно до максимальної. Зона початкової пошкоджуваності розповсюджується на глибину зразка до 1,2 мм при рівні пластичного зміцнення 3 %, до 1 мм при рівні пластичного зміцнення 1–2 %. Визначено, що в результаті дорнування в зоні технологічного отвору виникають суттєві стискаючі напруження при всіх рівнях пластичного зміцнення (1 %, 2 %, 3 %), які надалі перерозподіляються, залежно від зовнішнього навантаження (залишкові головні стискаючі напруження – σ_3 для рівнів пластичного зміцнення 1 % дорівнюють – 652 МПа, 2 % – 690 МПа, 3 % – 735 МПа).

Список використаної літератури:

1. Воробьев А.З. Сопrotivление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебеньев. – Москва : Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Пиширков В.Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пиширков. – М. : Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 с.
3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребеников. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
4. Бронз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л.Д. Бронз. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. Фомичев П.А. Прогнозирование долговечности элементов конструкций с упрочненными отверстиями при регулярном нагружении / П.А. Фомичев, А.В. Заруцкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 64. – С. 84–92.
6. Дослідження НДС силових конструктивних елементів з функціональними отворами за одновісного циклічного розтягу / П.Ясній, С.Гладьо, П.Сидор, О.Семенець // Вісник ТНТУ. – Тернопіль. – 2014. – Том 75 (№ 3). – С. 7–14.
7. Метод анализа характеристик локального НДС при растяжении пластин с отверстиями / Е.Т. Василевский, В.А. Гребеников, А.М. Гуменный, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Харьков. – 2007. – № 35. – С. 13–29.
8. Гребеников А.М. Исследование овализации отверстий и напряженно-деформированного состояния в пластине с усталостной трещиной в системе ANSYS 5.3 / А.М. Гребеников, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Харьков. – 1998. – № 2. – С. 79–95.
9. Яхно Б.О. Чисельне моделювання залишкових напружень і пошкоджуваність після дорнування технологічних отворів в авіаційному сплаві Д16чТ / Б.О. Яхно // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – 2015. – № 1 (73). – С. 96–99.
10. Исследование процесса дорнования отверстий в листовых заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ / А.В. Тимошенко, В.В. Пиманов, А.Н. Бабак, Е.Н. Коробко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – 2015. – № 1 (75). – С. 144–150.
11. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий / Д.С. Кива, Г.А. Кривов, В.Ф. Семенов и др. – Киев : КВИЦ, 2015. – 188 с.
12. Lemaitre J. Mécanique des matériaux solides / J.Lemaitre, J.L. Chaboche ; translation into English [Mechanics of Solid Materials]. – Paris : Dunod, 1987.
13. Цибенко А.Г. Метод оцінки пошкоджуваності елементів конструкцій при простому навантаженні / А.Г. Цибенко, О.В. Тимошенко, В.В. Коваль // Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – Київ. – 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://mmi-dmm.kpi.ua/nauka/2015/Tezi_stydy_2015.pdf.

References:

1. Vorob'ev, A.Z., Ol'kin, B.I. and Stebenev, V.N. (1990), *Soprotivlenie ustalosti jelementov konstrukcij*, Mashinostroenie, Moskva, 240 p.
2. Pshirkov, V.F. (1980), *Tehnologija vypolnenija vysokoresursnyh soedinenij*, Otrasleyvaja biblioteka «Tehnicheskij progress i povyshenie kvalifikacii», Moskva, 170 p.
3. Grebenikov, A.G. (2006), *Metodologija integrirovannogo proektirovanija i modelirovanija sbornyh samoletnyh konstrukcij*, Nac. azerokosm. un-t «HAI», Har'kov, 532 p.
4. Bronz, L.D. (1986), *Tehnologija i obespechenie resursa samoletov*, Mashinostroenie, Moskva, 184 p.
5. Fomichev, P.A. and Zaruckij, A.V. (2014), «Prognozirovanie dolgovechnosti jelementov konstrukcij s uprochnennymi otverstijami pri reguljarnom nagruzhenii», *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, No. 64, pp. 84–92.
6. Jasnij, P., Glad'o, S., Sydor, P. and Semenev', O. (2014), «Doslidzhennja NDS sylovyh konstruktyvnyh elementiv z funkcionaln'nyu otvoramy za odnovisnogo cyklichnogo roztjagu», *Visnyk TNTU*, Vol. 75, No. 3, Ternopil', pp. 7–14.

7. Vasilevskij, E.T., Grebenikov, V.A., Gumennyj, A.M. and Svetlichnyj, S.P. (2007), «Metod analiza karakteristik lokal'nogo NDS pri rastjazhenii plastin s otverstijami», *Otkrytye informacionnye i komp'juternye tehnologii*, No. 35, Har'kov, pp. 13–29.
8. Grebenikov, A.M. and Svetlichnyj, S.P. (1998), «Issledovanie ovalizacii otverstij i naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija v plastine s ustalostnoj treshhinoj v sisteme ANSYS 5.3», *Otkrytye informacionnye i komp'juternye tehnologii*, No. 2, Har'kov, pp. 79–95.
9. Jahno, B.O. (2015), «Chysel'ne modeljuvannja zalyshkovyh napruzhen' i poshkodzhuvanist' pislja dornuvannja tehnologichnyh otvoriv v aviacijnomu splavi D16chT», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Mashynobuduvannja*, No. 1 (73), pp. 96–99.
10. Timoshenko, A.V., Pimanov, V.V., Babak, A.N. and Korobko, E.N. (2015), «Issledovanie processa dornovanija otverstij v listovyh zagotovkah iz aljuminievogo splava D16chT», *Visnik NTUU «KPI»*, Serija *Mashynobuduvannja*, No. 1 (75), pp. 144–150.
11. Kiva, D.S., Krivov, G.A., Semencov, V.F. and others (2015), «Konstruktivno-tehnologicheskie metody povyshenija ustalostnoj dolgovechnosti jelementov konstrukcii planera samoleta v zone funkcional'nyh otverstij», KVIC, Kiev, 188 p.
12. Lemaitre, J. and Chaboche, J.L. (1987), *Mécanique des matériaux solides*, Translation into English, Dunod, Paris.
13. Cybenko, A.G., Tymoshenko, O.V. and Koval', V.V. (2014), «Metod ocinky poshkodzhuvanosti elementiv konstrukcij pry prostomu navantazhenii», *Tezy dopovidej zagal'no universytets'koi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' molodyh vchenyh ta studentiv NTUU «KPI»*, Serija *Mashynobuduvannja*, Kyi'v, available at: http://mmi-dmm.kpi.ua/nauka/2015/Tezi_stydy_2015.pdf

Тимошенко Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки та міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного Інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- механіка матеріалів;
- малоциклова втома.

E-mail: timosaha@ukr.net.

Яхно Богдан Олегович – кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки та міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного Інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- чисельне моделювання;
- малоциклова втома.

Бабак Антон Миколайович – асистент кафедри динаміки та міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного Інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- чисельне моделювання;
- довговічність;
- малоциклова втома.

E-mail: sopromat_dpm@ukr.net.

Фам Дик Куан – аспірант кафедри динаміки та міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного Інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- чисельне моделювання;
- пошкоджуваність;
- малоциклова втома.

E-mail: famquan1992@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2018.