

УДК 539.4

Яхно Б.О. к.т.н., доц.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПІСЛЯ ДОРНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОТВОРІВ В АВІАЦІЙНОМУ СПЛАВІ Д16СТ

Yakhno B.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (bogdany@i.com.ua)

FEM ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND DAMAGE OF EXPANDED HOLE IN AIRCRAFT ALLOY D16ChT

Розглянуто процес пластичного деформування технологічного отвору в авіаційному алюмінієвому сплаві Д16СТ для різних рівнів пластичного деформування, а саме 1%, 2% та 3%. Створено скінченно-елементу вісесиметричну модель дорна та технологічного отвору та проведено розрахунок контактної задачі за явною схемою інтегрування. Використані реальні фізико-механічні властивості сплаву Д16СТ. Отримано поля розподілу залишкових напружень та залишкової пластичної деформації. Визначено вплив залишкової пластичної деформації на початковий рівень пошкоджуваності матеріалу. Проаналізовано перерозподіл залишкових напружень під час подальшого навантаження технологічного отвору розтягуючим напруженням.

Ключові слова: залишкові напруження, пошкоджуваність, дорнування, зміцнення, пластична деформація, метод скінченних елементів, авіаційний сплав.

Вступ

На сучасних літаках майже весь запас палива розміщується в крилах. Для зменшення залишку палива у вертикальних полицях стрингерів баків-кесонів виконують отвори для його перетікання та дренажу, які є концентраторами напружень і можуть призводити до зниження циклічної міцності стрингерів. Наближеність та недостатня обґрунтованість сучасних розрахунків несучої здатності таких авіаційних конструкцій вимагає суттєвого завищення коефіцієнту запасу по ресурсу.

Використання поверхневого зміцнення технологічного отвору за допомогою пластичної деформації дозволяє підвищити границю текучості в зоні отвору, що збільшує статичний запас міцності та вантажопідйомність. Типовим видом такого зміцнення є дорнування – протягування конічного твердого тіла через отвір меншого діаметру. Під час такого типу технологічного процесу можна очікувати на неоднорідність розподілу пластичної деформації по товщині стінки. При збільшенні рівня пластичної деформації за рахунок неоднорідності деформованого стану можна отримати початкові стадії руйнування матеріалу вже на початку його експлуатації. Утворені, після дорнування, залишкові стискаючі напруження будуть додаватись до розтягуючих напружень, що виникають від дії зовнішніх навантажень на стрингери крила під час польоту, ти самим розвантажуючи поверхню технологічного отвору в пружну зону.

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 змогу провести розрахунок на циклічну міцність та оцінити поточний стан пошкоджуваності конструкції і коефіцієнт запасу по ресурсу.

Використання явної схеми інтегрування методу скінченних елементів, яка реалізована в таких сучасних програмних кодах, як Abaqus Explicit, LS Dina, Dytan, дозволяє реалізувати процес деформування в динамічній постановці. Однак рішення задачі динаміки пов'язано із малими часовими кроками, які обумовлені мінімальним розміром скінченного елемента в моделі, що значно збільшує час, необхідний для розрахунку.

Вісесиметрична постановка задачі дозволяє суттєво зменшити кількість елементів забезпечуючи необхідний рівень точності.

Ціль

Визначити розподіл залишкових напружень, деформацій та рівень початкової пошкоджуваності дорнованого технологічного отвору та їх вплив на експлуатаційний ресурс.

Дослідження

Для дослідження процесу дорнування була розроблена скінченно-елементна модель, представлена на рис.1. Дорн моделювався як абсолютно жорстке тіло конічної форми, зовнішній діаметр якого дорівнює 5,06мм. Передня частина конуса має нахил до осі 3° , а задня $1,5^\circ$. Різний рівень пластичного зміцнення досягався за рахунок зміни початкового діаметру технологічного отвору, а саме рівень зміцнення 1 % відповідає діаметру отвору 4,95 мм., рівень зміцнення 2 % відповідає діаметру отвору 4,9 мм., рівень зміцнення 3 % відповідає діаметру отвору 4,85 мм. Пластинка з отвором має товщину 5 мм., виготовлена із алюмінієвого сплаву Д16чТ, механічні властивості якого взяті згідно експериментальних досліджень [1], технологічний отвір має фаску 0,5 мм. під кутом 45° в зоні входу і виходу дорна із технологічного отвору (верхня і нижня поверхня пластини).

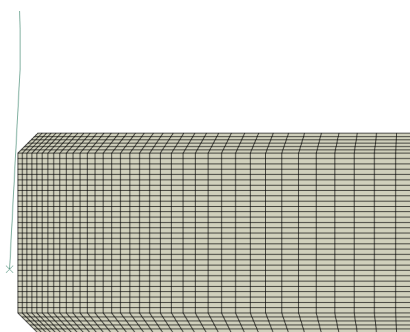


Рис. 1. Розрахункова скінченно-елементна модель

Модель матеріалу (сплаву Д16чТ) має ізотропне нелінійне зміцнення, яке задавалось згідно експериментальної діаграми [1] в табличному вигляді.

Переміщення нижньої поверхні пластини були обмежені в вертикальному напрямку. Між поверхнею дорна і поверхнею технологічного отвору застосовувались умови контакту. Чисельне дослідження проводилось в два етапи: визначення залишкових напружень і деформацій під час дорнування та подальше навантаження розрахункової моделі розтягуючим напруженням різних рівнів (25 МПа, 50МПа, 75 МПа, 100 МПа). Так як рівень пластичного деформування дорівнює 1%, 2%, 3% було створено три розрахункових моделі із відповідно різними діаметрами отворів.

Пошкоджуваність матеріалу визначалась через зміну макро-механічного параметра жорсткості матеріалу, а саме через зміну модуля пружності згідно [2]:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{E_i}{E_0}}$$

де, - D параметр пошкоджуваності, E_0 - початковий модуль пружності, E_i - поточний модуль пружності (під час пластичного деформування).

Розподіл полів залишкових напружень (згідно четвертої теорії міцності) після дорнування та подальшого навантаження розтягуючим напруженням приведено на рис. 2. Залишкові напруження розподіляються нерівномірно по товщині стінки, утворюючи розподіл крапле видної форми ближче до зони виходу дорна із отвору. Фактично зона максимального пластичного деформування розташовується в зоні контакту фаски і циліндричної частини отвору з нижньої сторони пластинки (рис.2, а зона А). Після прикладання розтягуючого напруження відбувається перерозподіл залишкових напружень і при значному збільшенні навантаження виникає зона підвищених напружень на верхній поверхні пластинки (рис.2,б зона В). При цьому рівень напружень в цій зоні буде прямо пропорційний величині зовнішнього навантаження.

На рис.3 наведено графіки зміни напружень, пластичної деформації та параметра пошкоджуваності в залежності від віддалення від циліндричної частини отвору. З рис.3а та 3б можна бачити, що для рівня пластичного деформування 2 та 3 % залишкові напруження близькі до границі міцності сплаву Д16чТ, яка дорівнює 466 МПа. На рис.3в показано різке зростання рівня початкової пошкоджуваності для цих рівнів пластичного деформування, що може обумовлювати можливе руйнування поверхні отвору вже на початку періоду експлуатації, одразу після дорнування.

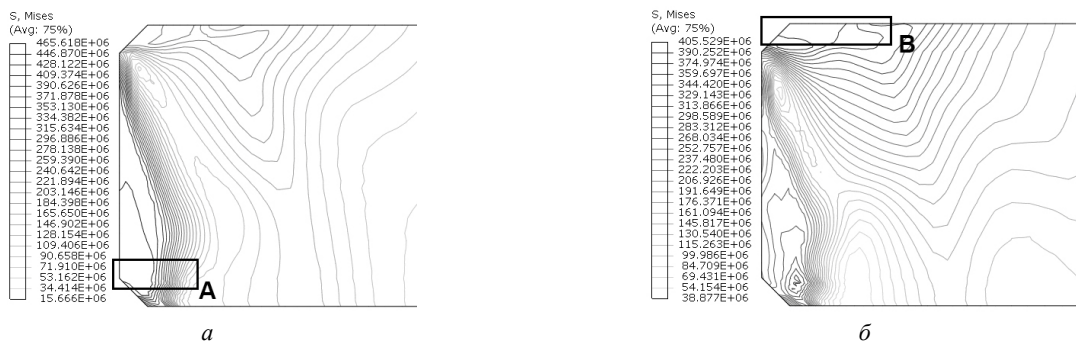


Рис. 2. Розподіл напружень для зразка із діаметром отвору 4,85мм і рівнем деформування 3%: *a* – розподіл залишкових напружень після дорнування, *б* – розподіл напружень після дорнування із наступним розтягуванням напруженням 100МПа

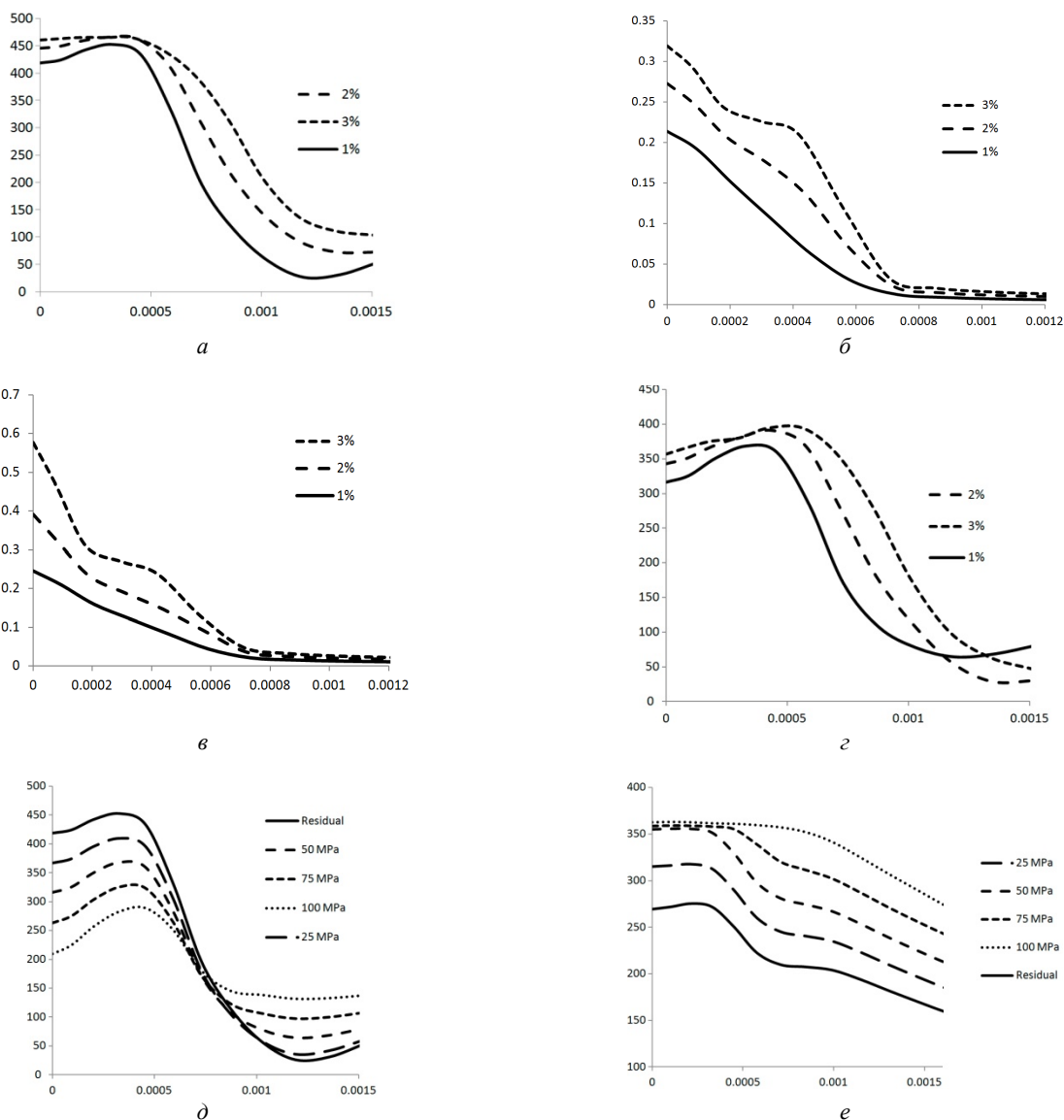


Рис. 3. Результати розрахунку при різних рівнях пластичного деформування в залежності від відстані до поверхні отвору: *a* – залишкові напруження після дорнування в зоні А (МПа), *б* – залишкова пластична деформація після дорнування в зоні А, *в* – початкова пошкодженість після дорнування в зоні А, *г* – рівень напружень після прикладання розтягуючого напруження 50 МПа в зоні А, *д* – кінетика розвантаження отвору від різних рівнів розтягуючого напруження для зразка із 1% пластичного деформування в зоні А, *е* – кінетика росту напружень на верхній поверхні отвору при різних рівнях розтягуючого напруження в зоні В

Подальше розвантаження (рис.3 г) зменшує рівень напружень, не усуваючи можливих дефектів після дорнування. Таким чином можна говорити о суттєвому зменшенні експлуатаційного ресурсу при рівні пластичного деформування 2% та 3%.

Рівень пластичного деформування в 1% має значно менший рівень початкової пошкоджуваності, що в комбінації із розвантаження від дії циклічних загрузок (рис.3 д) може значно збільшити експлуатаційний ресурс отвору. Однак при збільшенні розтягуючого навантаження до критичних величин (для випадку 1% пластичного деформування це 50-60МПа, максимальні напруження поблизу отвору складають 377 МПа) рівень напружень в зоні А та В вирівнюється із подальшим збільшенням в зоні В (рис.2 а,б; рис.3 е).

Висновки

Було проведено чисельне моделювання процесу дорнування для рівнів пластичного деформування 1%, 2%, 3%. Показано, що рівні пластичного деформування 2% та 3% можуть значно зменшити експлуатаційний ресурс завдяки вірогідності утворення поверхневих дефектів в циліндричній частині отвору вже відразу після дорнування та на початкових стадіях експлуатації. Суттєвий приріс експлуатаційного ресурсу можна прогнозувати для рівня пластичної деформації 1% внаслідок розвантаження поверхні отвору розтягуючи ми напруженнями до 50-60 МПа. При збільшенні напружень вище цього рівня можуть утворюватись дефекти на верхній поверхні отвору (в зоні входу дорна в отвір), що може також спричинити зменшення експлуатаційного ресурсу.

***Аннотация.** Рассмотрен процесс пластического деформирования технологического отверстия в алюминиевом сплаве Д16чТ для разных уровней пластического деформирования, а именно 1%, 2% и 3%. Создана конечно-элементная осесимметричная модель дорна и технологического отверстия. Проведен расчет контактной задачи по явной схеме интегрирования. Используются реальные физико-механические свойства сплава Д16чТ. Получены поля распределения остаточных напряжений и остаточной пластической деформации. Определено влияние остаточной пластической деформации и начальный уровень поврежденной материала. Проанализировано перераспределение остаточных напряжений во время дальнейшего нагружения технологического отверстия растягивающими напряжениями.*

***Ключевые слова:** остаточные напряжения; повреждаемость, дормирование, упрочнение, пластическая деформация, метод конечных элементов, авиационный сплав.*

***Abstract. Purpose.** Determination of residual stress, strain and initial damage distribution for expanding hole. Influence of this parameters on life time safety factor.*

***Design/methodology/approach.** In article was realised finite element simulation of expanding hole process using explicit dynamic method for three different levels of total plastic deformation 1%, 2%, 3%. It was taken in account damage parameter, which was described during D16chT alloy macro mechanical property degradation through elastic modulus change .*

***Findings.** It is found that expanding hole plastic deformation 2% and 3% can damage hole surface even during expanding process and on starting point of life cycle.*

***Originality/value.** These discourses, that only 1% total plastic deformation can increase life cycle safety factor on the external tension stress level behind 50-60 MPa.*

***Keywords:** residual stress, damage, expanding hole, hardening, plastic strain, finite element method, aviation alloy .*

Бібліографічний список використаної літератури

1. Цибенко А.Г., Тимошенко О.В., Коваль В.В. Метод оцінки пошкоджуваності елементів конструкцій при простому навантаженні. Загальноуніверситетська науково-технічна конференція, присвячена дню Науки. Секція Машинобудування. Підсекція Динаміка і міцність машин. – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – с.23-24
2. Lemaître J., Chaboche J.L. Mécanique des matériaux solides. Dunod, Mechanics of Solid Materials, Springer-Verlag, 1985,(English translation) 1987.
3. Яхно Б.О. Abaqus у задачах механіки. Навчальний посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2011 – 128с.
4. Rusinski E. Zaawansowana metoda elementow skonczonej w konstrukcjach nosnych / Eugeniusz Rusinski, Jerzy Szmochowski, Tadeusz Smolnicki. – Poland. Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 2000. – 444 с.

References

1. Stybenko A.G., Timoshenko A.V., Koval V.V. Valuation damage of structural elements with a simple load. University scientific conference devoted to the Day of Science. Section Engineer. Subsection dynamics and strength machines. Kyiv: NTU "KPI", 2014 p.23-24
2. Lemaître J., Chaboche J.L. Mécanique des matériaux solides. Dunod, Mechanics of Solid Materials, Springer-Verlag, 1985,(English translation) 1987.
3. Yakhno B.O. Abaqus in mechanics problems. Textbook. Kyiv: NTU "KPI", 2011, 128p.
4. Rusinski E. Zaawansowana metoda elementow skonczonej w konstrukcjach nosnych. Eugeniusz Rusinski, Jerzy Szmochowski, Tadeusz Smolnicki. Poland. Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 2000. 444 p.