

УДК 629.7.002:621.787.001.572

М.В.Нечипорук¹, Ю.А.Воробйов¹, В.В.Воронько¹, М.М.Скалига², М.В.Рудинець²¹ Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»² Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОРНУВАННЯ ОТВОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ «LS-DYNA»

Робота орієнтована на підвищення ресурсу конструкцій з отворами, скорочення витрат на експериментальні дослідження, зниження трудомісткості досліджень. В роботі розроблено математична модель технологічного процесу дорнування отворів в LS DYNA, яка враховує різні параметри цього технологічного процесу (швидкість деформування, натяг, змащення, властивості матеріалу деталей і дорна та інше) та має високу точність в порівнянні з експериментом.

Ключові слова: дорнування, отвір, моделювання, болтове з'єднання, корсетність, наплив, поверхнєве пластичне деформування, напружено-деформований стан.

Для підвищення експлуатаційної економічності сучасних транспортних засобів (літаків, вертольотів, автомобілів та ін.) потрібно постійно збільшити їхній ресурс. Цей ресурс значною мірою визначає витривалість механічних крапкових з'єднань, серед яких значну частину (до 400 тис. штук у конструкції планера сучасного пасажирського літака) становлять болтові з'єднання. Для цих з'єднань діючим засобом підвищення циклічної довговічності є зміцнена обробка отвору під болт різними способами поверхневого пластичного деформування (ППД), серед яких дорнування забезпечує максимальні натяг і ресурс.

Завдання визначення раціональних параметрів технологічного процесу дорнування, що забезпечують максимальну довговічність болтових з'єднань, не піддаються строгому аналітичному рішенню й вимагають проведення трудомісткого та дорогого багатofакторного експерименту.

У цей час єдиною можливістю експресного аналізу цієї інженерної проблеми є комп'ютерне математичне моделювання з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ).

Для підвищення ефективності технологічних процесів дорнування необхідно мати модель напружено-деформаційного стану (НДС), що формується в результаті обробки. Модель НДС повинна забезпечувати можливість прогнозування залишкових напруг і деформацій з врахуванням початкового НДС, що був у заготівці перед обробкою. При цьому стає актуальною розробка комплексного підходу для рішення завдань у пружно-пластичній області для мінімізації витрат часу при рішенні практичних завдань шляхом комп'ютерного моделювання.

Метою роботи є розробка математичної моделі (ММ) технологічного процесу дорнування, що дозволяє визначити НДС у зоні отвору, геометричні параметри отвору та пластини після дорнування, енергосилові параметри процесу. Завдання дослідження:

- 1) визначити оптимальну сітку розбивки пластин у ММ;
- 2) визначити вплив натягів на НДС пластини та геометричні параметри отвору;
- 3) визначити вплив коефіцієнтів тертя на НДС пластини та геометричні параметри отвору;
- 4) визначити вплив швидкості дорнування на НДС пластини та геометричні параметри отвору.

Методика досліджень заснована на основних положеннях теорії пружності й пластичності.

При створенні ММ процесу дорнування використали наступні вихідні дані: дорн виконано відповідно до ПИ-6843 „Выполнение дорнованных отверстий болтовых соединений”, діаметр дорна вибирається так, щоб забезпечити натяг 0,97%, 1,37% і 1,98%; матеріал дорна – сталь 30ХГСА; матеріал пластин – В95; діаметр отворів 8, 10 і 12 мм; товщина пластини 10 мм.

Розрахунки виконувалися при наступних допущеннях:

1. Нагрівання інструмента й оброблюваних деталей не враховувався.
2. Коефіцієнт тертя між інструментом і деталями розраховувався з формулою

$$\mu = f_D + (f_S - f_D) \cdot e^{-D_c \cdot v_{rel}},$$

де f_D – коефіцієнт динамічного тертя; f_S – коефіцієнт статичного тертя; D_c – коефіцієнт експо-

нентного загасання; v_{rel} – відносна швидкість руху двох контактуючих поверхонь.

3. У математичній моделі робочий інструмент (кулька, дорн) уважався абсолютно твердим тілом.

1. Створення математичної моделі

ММ створювалася у системі LS-DYNA. З метою зменшення часу машинного рахунку була обрана осьове симетрична модель процесу (елементи вважаються зваженими по площі поперечного перерізу).

2. Експериментальні дослідження процесу дорнування

З метою визначення адекватності ММ було проведено експеримент по імпульсному (пневматичним імпульсним клепальним молотком) та квазістатичному (на пресі ПНП-5,5) дорнуванню отворів. У ході експерименту замірялися діаметри отворів на різних рівнях до та після дорнування, профілі напливів на крайках отворів.

2.1. Визначення оптимальної сітки розбивки зразка на кінцеві елементи

Метою даного дослідження є визначення оптимальної сітки розбивки експериментального зразка на кінцеві елементи. Це дозволить надалі робити математичне моделювання з мінімальними витратами машинного часу без істотного впливу на результати чисельного експерименту. Критерієм оптимальності була мінімізація часу машинного рахунку з одного боку, та адекватність ММ результатам експерименту – з іншого боку.

На підставі даних, експерименту та чисельного моделювання можна зробити висновок про те, що час машинного ліку при сітці розбивки пластини 10×2 і 10×3 елементів практично дорівнює (46 і 49 хвилин відповідно), зате при подальшому збільшенні кількості елементів до 10×4 приводить майже до дворазового збільшення часу ліку (78 хвилин). Цілком очевидно, що точність буде значно вище при сітці розбивки 10×3 елементів в порівнянні з розбивкою 10×2 , яка рекомендована як оптимальна.

2.2. Дослідження впливу натягу та коефіцієнтів тертя при дорнуванні на геометричні параметри отвору після дорнування (корсетність і напливи)

Метою дослідження було порівняння результатів фізичного й чисельного експериментів по визначенню геометричних параметрів (корсетності та напливів) отвору після дорнування в зразках з алюмінієвого сплаву В95 при відносних натягах 0,84%, 1,37% і 1,98%, початкової швидкості дорнування 25 м/с, коефіцієнті тертя 0,07 (наявність мастила).

Виміри діаметрів отворів після дорнування проводилися індикаторним нутроміром на глибинах 2, 5 і 8 мм від опорної поверхні. Діаметри отворів на тих же рівнях при чисельному експерименті визначалися по переміщеннях цих же точок (мал. 1).

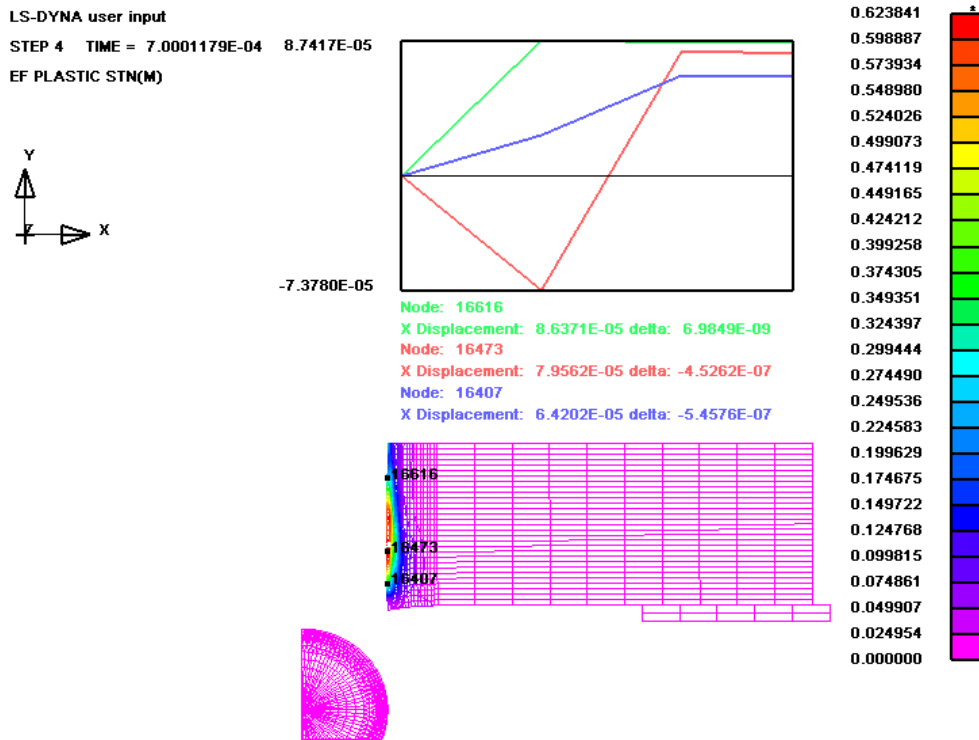


Рис. 1. Залишкові деформації та корсетність при дорнуванні кулькою

Порівняння результатів фізичного експерименту й розрахунку в LS-DYNA по визначенню корсетності та напливів на опорній поверхні пластини представлені відповідно на мал. 2 і 3.

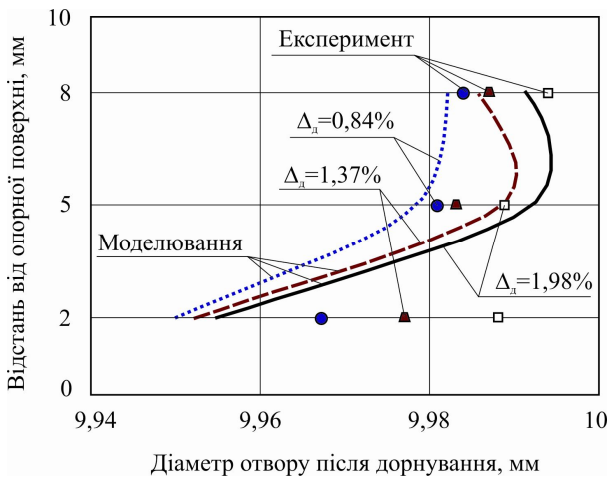


Рис. 2. Порівняльні результати фізичного й чисельного експериментів по визначенню корсетності

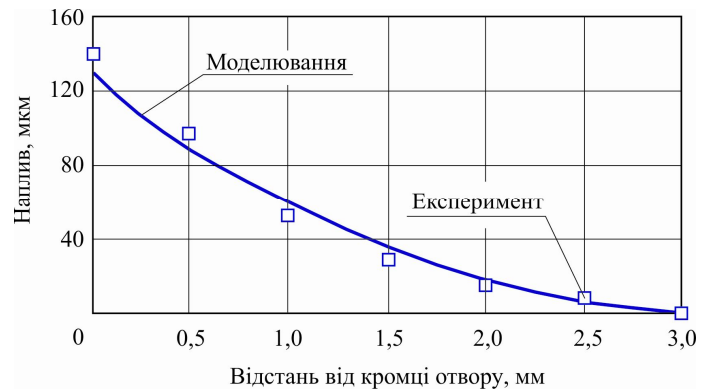


Рис. 3. Порівняльні результати фізичного й чисельного експериментів по визначенню напливів на опорній поверхні при натягу 1,37%

Із представлених графіків видно, що зі збільшенням відносного натягу збільшується й корсетність. Причому на виході кульки з отвору (з боку опорної поверхні) відмінність розрахункових і експериментальних значень істотно вище, ніж на вході. Також видно, що результати чисельного моделювання напливів при дорнуванні з високою точністю відповідають результатам фізичного експерименту. Поле напруг після дорнування кулькою представлено на мал. 4.

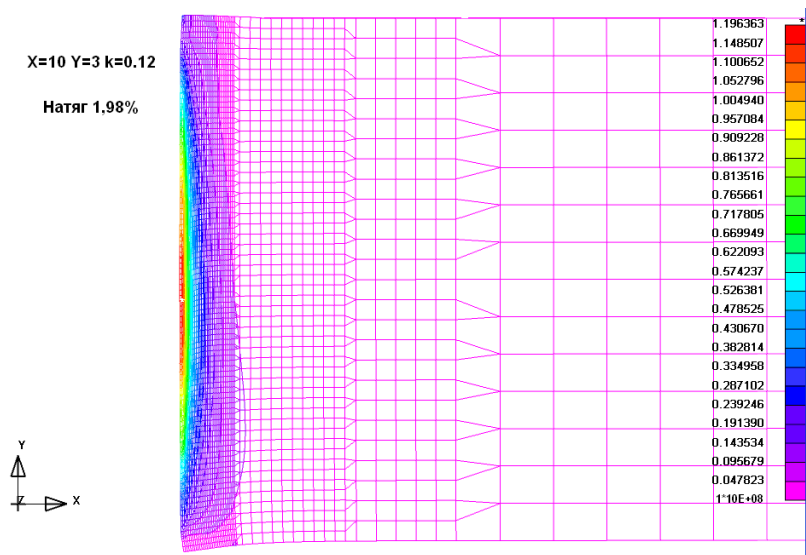


Рис. 4. НДС зразка після дорнування при натягу 1,98% і коефіцієнті тертя 0,12

Із представленою полем напруг зразка видно, наскільки пагубним для отвору буде його наступна доробка з використанням, наприклад, розгортання. Глибина зміцненого шару не перевищує 0,5 мм. І при вирівнюванні геометрії отвору шляхом зняття поверхневого зміцненого шару, ми втратимо весь той ефект, що був досягнутий при дорнуванні.

2.3. Вплив швидкості руху робочого інструмента на геометричні параметри отвору після дорнування (корсетність і напливи)

Одним з найбільш важливих параметрів при дорнуванні є швидкість дорнування. Можна забезпечити наступні варіанти завдання швидкості інструмента:

- 1) завдання постійної швидкості дорна (з використанням пресового обладнання);
- 2) завдання початкової швидкості дорна (з використанням імпульсного обладнання).

Пакет програм LS-DYNA дозволяє моделювати обидва варіанти завдання швидкості дорна. Крім того, LS-DYNA дозволяє чітко розділити статичне та динамічне дорнування. Завдяки тому, що LS-DYNA урахує хвильові коливання в матеріалі, ми можемо спостерігати відсутність хвильових процесів усередині зразків, що дорнують на швидкостях близько 3 м/с і наявність хвильових процесів усередині зразків – при швидкостях близько 25 м/с.

На мал. 5 представлено графік зміни максимальної величини напливів на опорній поверхні на краях отвору від початкової швидкості руху кульки (натяг 1,98%, коефіцієнт тертя 0,12).

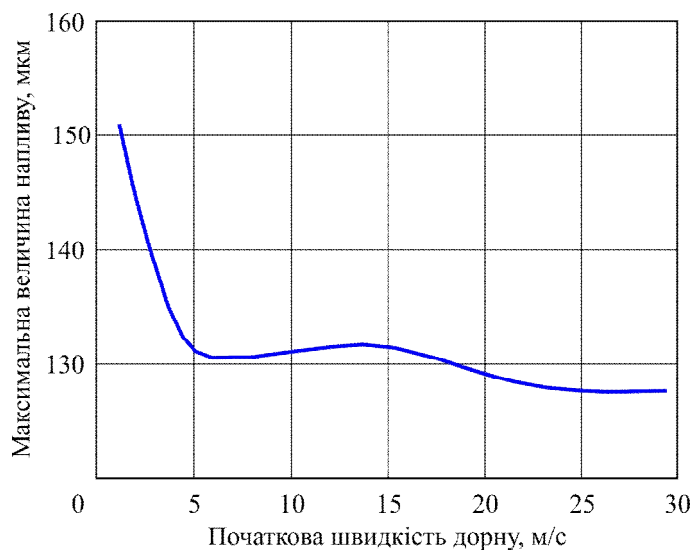


Рис. 5. Зміна максимальної величини напливів на опорній поверхні на краях отвору від початкової швидкості руху кульки

Встановивши зв'язок між градієнтом падіння швидкості по товщині пакета з величинами корсетності й напливів, наявністю або відсутністю змащення (через коефіцієнт тертя) можна вийти на енергетичні параметри імпульсного пристрою для дорнування, які потрібні при його проектуванні.

Продовженням виконаних робіт може бути дослідження впливу ходу інструмента, що вигладжує та калібрує стінку отвору, на геометричні параметри отвору; створення ММ і дослідження технологічного процесу постановки болтів із пружно-пластичним натягом в отвір, який попередньо був продорновано; прогнозування ресурсу такого з'єднання по локальному НДС.

Висновки

1. Розроблено ММ технологічного процесу дорнування, яка дозволяє визначати НДС у зоні отвору, геометричні параметри отвору та пластини після дорнування, енергосилові параметри процесу.
2. Установлено вплив на геометричні параметри отвору натягів, коефіцієнтів тертя, початкової швидкості дорнування.
3. Порівняння результатів фізичного й чисельного експериментів по визначенню геометричних параметрів отвору та пластини після дорнування дозволяє говорити про адекватність ММ, яка була розроблена.
4. Практичне значення результатів полягає у мінімізації витрат часу та коштів при рішенні практичних завдань дослідження технологічного процесу дорнування шляхом комп'ютерного моделювання у пакеті програм LS-DYNA.

1. Кривцов В.С., Воробьев Ю.А., Воронько В.В. Перспективные устройства для реализации процесса дорнования отверстий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – №12. – С.18-30.
2. Воробьев Ю.А., Чистяк В.Г., Воронько В.В. Особенности технологического процесса и инструмента импульсного дорнования отверстий // Авиационно-космическая техника и технология: Научно-технический журнал. – Х: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – Вып. 5 (13). – С. 37-41.
3. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / Пекарш А.И., Кривов Г.А., Воробьев Ю.А. и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
4. Воробьев Ю.А., Воронько В.В., Степаненко В.Н. Сравнительный анализ способов дорнования отверстий // Системи обробки інформації. – Х: Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, 2007. – Вып. 5 (63). – С.35-38.
5. Скоростное дорнование отверстий авиационных конструкций из алюминиевых сплавов пневмоимпульсными устройствами / В.С. Кривцов, Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько. – Монография. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 99 с.