УДК 539.4

Вплив пластичного деформування при дорнуванні отвору у плоских зразках зі сплаву Д16чТ на малоциклову утому

О. В. Тимошенко, В. В. Коваль, А. М. Бабак, Куан Фам Дик, Ю. М. Сидоренко[1]

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

[1] yura_michael@ukr.net

Розглянуто одну з найважливіших проблем машино- й авіабудівного комплексу, яка пов'язана з визначенням довговічності деталей і конструкцій, що працюють в умовах дії циклічного навантаження. Наявність місцевих конструкційних і технологічних концентраторів напружень суттєво ускладнює визначення прогнозованого ресурсу на стадії проектування деталей та конструкцій. Для зміцнення деталей з отворами використовують метод дорнування, а саме: метод пластичного деформування стінок отвору з метою досягнення на їх поверхні необхідної величини залишкової пластичної деформації. Наведено результати випробувань на малоциклову утому при віднульовому розтязі плоских лабораторних зразків із центральним технологічним отвором циліндричної форми, зміцненим методом дорнування, з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16чТ. Розраховано геометричні параметри дорна, що забезпечують необхідне значення рівня залишкової пластичної деформації на поверхні отвору (1, 2 і 3%). Циклічне навантаження розтягом зразків здійснювалося в інтервалі напружень 150...270 МПа для пульсуючого циклу навантаження з частотою 3 Гц на установці Ві-02-112. Відмічено вплив величини пластичного деформування дорнованого отвору зразка на його циклічну довговічність і руйнування в залежності від величини навантаження. Установлено, що внаслідок пластичного зміцнення поверхні технологічних отворів виникає локальна область стискальних залишкових напружень, у результаті чого зменшується концентрація напружень навколо технологічного отвору при пульсуючому циклі навантаження та підвищується рівень граничних навантажень. Показано, що зразок зі зміцненим (до 3% пластичної деформації) методом дорнування технологічним отвором та циклічно навантажений напруженням розтягу до 170 МПа зруйнувався не по отвору (концентратору напружень). Початок зародження і подальший рух макротріщини відбувається по суцільній зоні зразка. Це свідчить про те, що за певної величини залишкових напружень у дорнованому отворі руйнування зразка в умовах малоциклової утоми стає нечутливим до наявності такого концентратора.

Ключові слова: плоскі зразки, дорнування отвору, малоциклова утома, довговічність, циклічне навантаження.

У сучасному машинобудуванні, енергетичній й авіакосмічній промисловості більшість відповідальних елементів конструкцій та вузлів силових агрегатів працюють під дією циклічно змінних за часом і знаком зовнішніх силових факторів. Це призводить до утоми матеріалу і, як наслідок, до накопичення мікродефектів із подальшим руйнуванням конструкції або її елемента. Оскільки геометрія вузлів та агрегатів є досить складною, виникає потреба визначення їхнього ресурсу на стадії проектування. Наявність місцевих конструкційних та технологічних концентраторів напружень, нестаціонарність режимів навантаження, зміна механічних властивостей матеріалів під час циклічного деформування, історія навантаження, реологічні властивості матеріалів суттєво впливають на визначення прогнозованого ресурсу таких конструкцій. У більшості випадків при цьому застосовуються аналітичні залежності, в яких використовуються характеристики матеріалу, що можуть бути отримані з експериментів на розтяг [1]. На сьогодні малоциклова утома для одновісного навантаження розглядається з позицій деформаційної постановки. Вплив конструктивних

© О. В. ТИМОШЕНКО, В. В. КОВАЛЬ, А. М. БАБАК, Куан Фам ДИК, Ю. М. СИДОРЕНКО, 2018

особливостей на місцевий розподіл напружень та деформацій, особливо у високонавантажених зонах, докорінно не вивчений. Наявність функціональних отворів у конструкційних матеріалах, що відіграють роль концентраторів напружень, суттєво впливає на прогнозування довговічності конструкцій. Для зміцнення деталей з отворами використовують метод дорнування [2–5], згідно з яким діаметр технологічного отвору менший за діаметр дорну. При протягуванні дорна стінки отвору пластично деформуються, в результаті чого зміцнюється та зменшується шорсткість поверхневого шару технологічного отвору.

У даній роботі описано результати оцінки впливу процесу дорнування технологічних отворів плоских зразків товщиною 5 мм з алюмінієвого сплаву Д16чТ на їх довговічність (рис. 1).

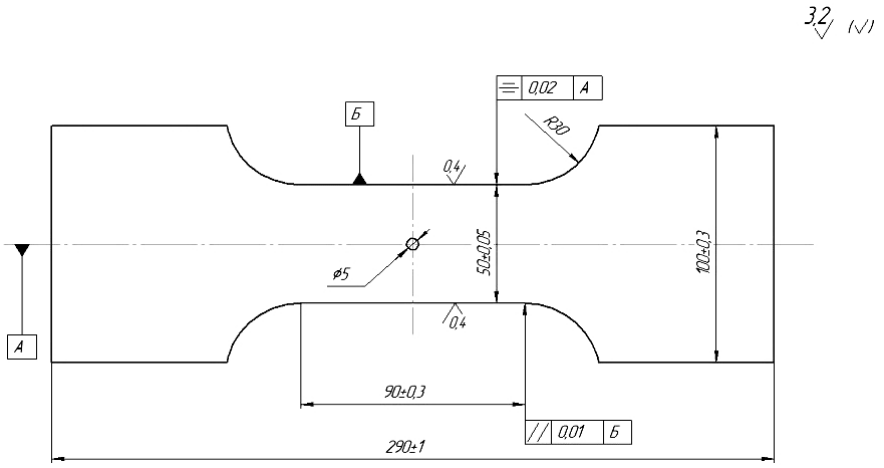


Рис. 1. Зразок для досліджень на малоциклову утому після дорнування технологічного отвору.

Випробування на малоциклову утому при віднульовому розтязі зразків із центральним отвором (рис. 1) проводилися за кімнатної температури ($T = 293$ К) на установці Bi-02-112 із частотою 3 Гц. Максимальні напруження розтягу для пульсуючого циклу навантаження $\sigma_{\max}$ змінювалися в інтервалі 150...270 МПа [6]. Отвори в зразках було зроблено згідно з вимогами [7]. Лінійні геометричні розміри зразків контролювалися за допомогою цифрового мікрометра Electronic Outside Micrometer (0...25 мм) та цифрового штангенциркуля Digimatic (0...300 мм). Точність виміру даних приладів становила 0,001 та 0,01 мм відповідно. Діаметр отвору після дорнування вимірювався на оптичному інструментальному мікроскопі БМІ-1.

Проектування технологічного процесу дорнування отворів проводилося згідно з методикою [6] за таких вихідних параметрів: d – діаметр технологічного отвору (ТО), рівний 5H9; *HB* і *BB* – граничні нижнє (0) і верхнє (0,03 мм) відхилення діаметра ТО; $\alpha_{\max}$ – величина залишкової пластичної деформації отворів (1, 2, 3%), що відповідає абсолютному натягу при дорнуванні (0,105, 0,16 і 0,215 мм); u – середньоарифметичне значення усадки отворів після проходження дорна; Δ_0 – поле розсіяння діаметрів отворів після проходження дорна.

За результатами експериментального відпрацювання процесу дорнування значення u та Δ_0 приймалися 0,055...0,065 мм і 0,02 мм відповідно.

Перед проведенням експериментальних досліджень визначалися параметри процесу дорнування. Діаметр попередніх отворів під дорнування розраховувався за формулою $d_{\text{п}} = d + (BB - HB)/2 + u - \alpha_{\text{ном}}$, а робочий діаметр деформівного елемента – за формулою $d_{\text{п}} = d + (BB - HB)/2 + u$. Чисельні значення отриманих величин наведено в табл. 1.

Т а б л и ц я 1

Значення діаметрів попередніх отворів ($d_{\text{п}}$, мм) під дорнування

Поверхня	$\alpha_{\max}$, %		
	1	2	3
Отвору	$\dfrac{4{,}965}{4{,}95H9^{+0{,}03}}$ (5,006)	$\dfrac{4{,}915}{4{,}9H9^{+0{,}03}}$ (5,001)	$\dfrac{4{,}865}{4{,}85H9^{+0{,}03}}$ (5,006)
Дорна	5,07	5,075	5,08

Примітка. Над рискою наведено розраховане значення, під рискою – прийняте при виготовленні, в дужках – після дорнування.

Оскільки розкид розрахованих значень діаметрів дорна знаходиться в межах допуску $k7$, дорнування в зразках отворів різного діаметра проводилося одним дорном, номінальний діаметр якого приймався рівним

$$d = 5{,}07k7^{+0,012}_{+0,001}.$$

Після проведення експериментальних досліджень на малоциклову утому згідно з методикою [7–9] було побудовано залежності для чотирьох типів зразків із різними значеннями залишкової пластичної деформації в отворах (0...3%) – рис. 2.

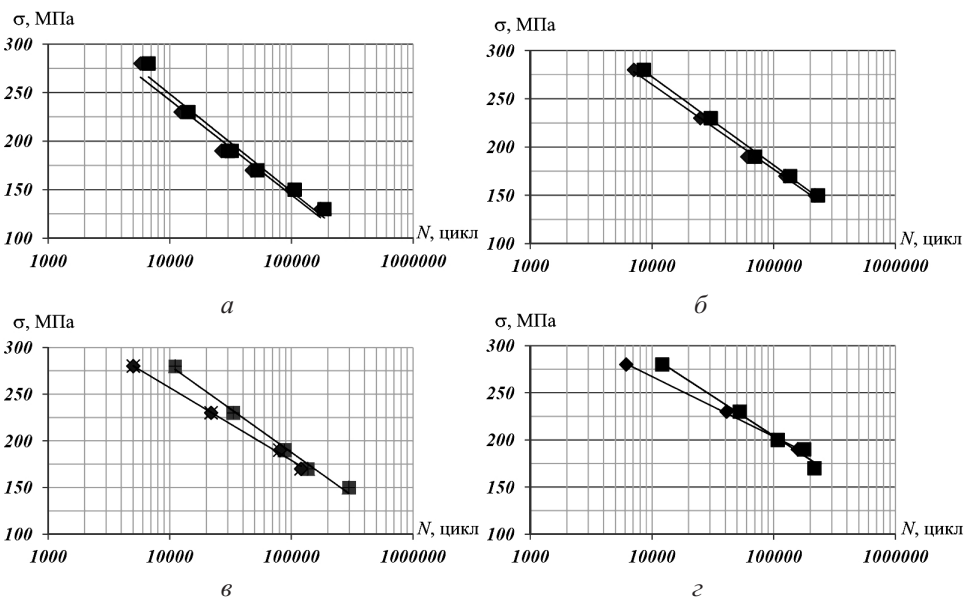


Рис. 2. Криві малоциклової утоми дорнованого зразка з отвором до величини початкової пластичної деформації 0 (*а*), 1 (*б*), 2 (*в*) і 3% (*г*): ◆ – число циклів до утворення в зразку першої тріщини ($N_{\text{т}}$); ■ – число циклів до руйнування зразка (N_R).

За момент виникнення в зразках макротріщини приймалося число циклів навантаження, коли її розмір збільшувався до 0,25 мм.

Аналіз отриманих результатів експериментальних випробувань показує, що вони добре узгоджуються з величиною експлуатаційного ресурсу конструкції з недорно-

ваними технологічними отворами [10]. Розбіжність між відповідними значеннями числа циклів N_R не перевищує 5%.

За допомогою методу найменших квадратів було отримано функціональні залежності, що описують зв'язок між значеннями максимальних напружень розтягу зразка $\sigma_{\max}$ і числом циклів до утворення в ньому як першої тріщини ($N_т$), так і до руйнування (N_R) – табл. 2.

Т а б л и ц я 2

Функціональні залежності, що описують зв'язок між $\sigma_{\max}$ та $N_т$ і N_R

$\alpha_{\max}$, %	$N_т$	N_R
0	$\sigma_{\max} = -43\ln(N_т) + 633$	$\sigma_{\max} = -44\ln(N_R) + 651$
1	$\sigma_{\max} = -38\ln(N_т) + 616$	$\sigma_{\max} = -40\ln(N_R) + 639$
2	$\sigma_{\max} = -34\ln(N_т) + 568$	$\sigma_{\max} = -40\ln(N_R) + 652$
3	$\sigma_{\max} = -28\ln(N_т) + 522$	$\sigma_{\max} = -37\ln(N_R) + 624$

Аналіз рис. 2,*а* та даних табл. 2 показує, що лінії залежностей N_R та $N_т$ практично паралельні. Незалежно від початкового значення максимального напруження $\sigma_{\max}$ різниця у числі циклів між N_R та $N_т$ однакова (3000...4000 циклів).

По мірі збільшення величини залишкової пластичної деформації отвору після дорнування (рис. 2,*б–г*) різниця між N_R та $N_т$ є більшою за великих значень σ та меншою за малих. Так, при 280 МПа таке зростання становить від 14% для недорнованого отвору і майже 50% при залишковій пластичній деформації 3%. У результаті це призводить до того, що за такої величини залишкової пластичної деформації дорнованого отвору (рис. 2,*г*) при $\sigma_{\max} \approx 200$ МПа момент утворення в зразку першої тріщини практично збігається з моментом його руйнування. Іншими словами, маємо $N_R = N_т = 197741$ цикл.

Із рис. 2 та табл. 2 також випливає, що незалежно від рівня пластичного деформування отвору після дорнування зі збільшенням величини максимальних напружень $\sigma_{\max}$ суттєво знижується довговічність зразка і, як наслідок, експлуатаційний ресурс майбутньої конструкції.

Пластичне зміцнення поверхні технологічних отворів створює локальну зону стискальних залишкових напружень, що призводить до зменшення впливу концентрації напружень навколо технологічного отвору при пульсуючому циклі навантаження та підвищення рівня граничних навантажень, які може витримати конструкція (табл. 3, 4).

Із даних табл. 3 видно, що при фіксованому значенні $\sigma_{\max}$, наприклад 190 МПа, число циклів N_R при залишковій пластичній деформації 1% порівняно з недорнованим отвором зростає більш ніж у 2,2 раза, при 2% – у 2,7 раза. Дорнування отворів до 3% призводить до підвищення циклічної довговічності зразків більш ніж у 5,4 раза. При максимальних напруженнях $\sigma_{\max} = 150$ МПа збільшення ресурсу становить 2,18 раза при залишковій пластичній деформації 1% і 2,8 раза при 2%.

Рис. 3 ілюструє зразки після випробувань на малоциклову утому.

Із рис. 3,*а* видно, що руйнування зразків відбувається шляхом формування тріщини, яка починає зростати від отвору у поперечному напрямку зразка. Однак експеримент також показав, що зразок після дорнування, що відповідає залишковій пластичній деформації 3%, навантажений напруженням $\sigma_{\max} = 170$ МПа, зруйнувався не по отвору (рис. 3,*б*). Макротріщина зароджується по суцільній зоні зразка. Це свідчить про те, що за певної величини залишкових напружень у отворі

Таблиця 3

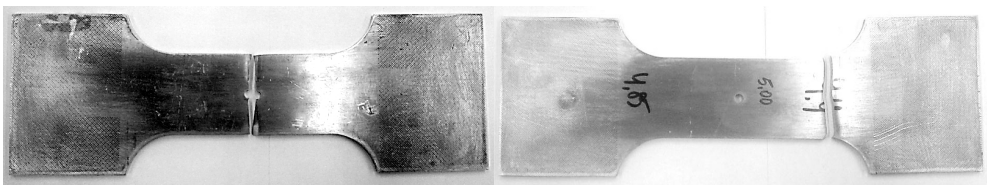
Число циклів до руйнування зразка N_R за різних значень σ_{max} та α_{max} отвору після дорнування

σ_{max}, МПа	α_{max}, %			
	0	1	2	3
150	105831	231080	297618	
190	32235	69998	88020	177058

Таблиця 4

Число циклів до утворення першої тріщини $N_т$ за різних значень σ_{max} та α_{max} отвору після дорнування

σ_{max}, МПа	α_{max}, %			
	0	1	2	3
150	99017	217673		
190	26500	60578	80511	157430
280	5739	7093	5015	6130



а *б*

Рис. 3. Зразки з концентратором після випробувань на малоциклову утому при пульсуючому розтязі: *а* – руйнування по концентратору: *б* – руйнування по суцільній зоні.

після дорнування руйнування зразка в умовах малоциклової утоми стає нечутливим до наявності цього концентратора. Тому визначити число циклів до руйнування N_R в таких умовах можна за результатами випробувань суцільних зразків. Така поведінка зразків після дорнування має місце при $\alpha_{max} = 2$ ($\sigma_{max} \le 150$ МПа) і 3% ($\sigma_{max} \le 170$ МПа).

Висновки

1. Процес дорнування технологічних отворів у плоских зразках в умовах малоциклової утоми позитивно впливає на їхню циклічну довговічність. Величина залишкової пластичної деформації 3% в отворі призводить до збільшення числа циклів до руйнування до шести разів порівняно з недорнованим зразком.

2. Час росту тріщини утоми до критичної величини (різниця між N_R та $N_т$) для дорнованих отворів збільшується при великих значеннях максимальних напружень σ_{max} віднульового розтягу та зменшується при малих.

3. Руйнування зразка з алюмінієвого сплаву Д16чТ з дорнованим отвором до величини початкової пластичної деформації 2 і 3% та навантаженого циклічним напруженням розтягу до $\sigma_{max} = 150$ і 170 МПа відбувається по суцільній зоні зразка,

що свідчить про відсутність впливу концентрації напружень від отвору на його циклічну довговічність.

Р е з ю м е

Рассмотрена одна из важнейших проблем машино- и авиастроительного комплекса, связанная с определением долговечности деталей и конструкций, работающих в условиях действия циклической нагрузки. Наличие местных конструкционных и технологических концентраторов напряжений существенно затрудняет определение прогнозируемого ресурса на стадии проектирования деталей и конструкций. Для упрочнения деталей с отверстиями используют метод дорнования, а именно: метод пластического деформирования стенок отверстия с целью создания на их поверхности необходимой величины остаточной пластической деформации. Представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость при нулевом растяжении плоских лабораторных образцов с центральным технологическим отверстием цилиндрической формы, упрочненным методом дорнования, из авиационного алюминиевого сплава Д16чТ. Рассчитаны геометрические параметры дорна, обеспечивающие требуемое значение уровня остаточной пластической деформации на поверхности отверстия (1, 2 и 3%). Циклическое нагружение растяжением образцов осуществлялось в пределах напряжений 150...270 МПа для пульсирующего цикла нагрузки с частотой 3 Гц на установке Ви-02-112. Отмечено влияние пластического деформирования дорнованного отверстия образца на его циклическую долговечность и разрушение в зависимости от величины нагрузки. Установлено, что вследствие пластического упрочнения поверхности технологических отверстий возникает локальная область сжимающих остаточных напряжений, в результате чего уменьшается концентрация напряжений вокруг технологического отверстия при пульсирующем цикле нагрузки и повышается уровень предельных нагрузок. Показано, что образец с упрочненным (до 3% пластической деформации) методом дорнования технологическим отверстием и циклически нагруженный напряжением растяжения до 170 МПа разрушился не по отверстию (концентратору напряжений). Начало зарождения и дальнейшее движение макротрещины происходит по сплошной зоне образца. Это свидетельствует о том, что при определенной величине остаточных напряжений в дорнованном отверстии разрушение образца в условиях малоцикловой усталости нечувствительно к наличию такого концентратора.

1. Коваль В. В. Вплив пошкоджуваності на НДС пластинки з отвором при статичному навантаженні. *Вісн. НТУУ "КПІ"*. Сер. *Машинобудування*. 2007. № 50. С. 162–168.
2. Калюжний В. Л., Куліков І. П., Ніколаєнко М. С. Визначення параметрів зміцнення металу навколо отворів у листових заготовках з алюмінію. *Вісн. НТУУ "КПІ"*. Сер. *Машинобудування*. 2012. № 66. С. 165–172.
3. Воробьев Ю. А., Воронько В. В., Степаненко В. Н. Сравнительный анализ способов дорнования отверстий. *Системи обробки інформації*. 2007. Вип. 5 (63). С. 35–38.
4. Pooladia E. and Farhangdoosta Kh. Residual strains around cold worked holes from statistical view. *Eng. Sol. Mech.* 2014. **2**. P. 131–138.
5. Заруцкий А. В. Экспериментальное исследование долговечности образцов с упрочненными отверстиями. Сообщ. 1. Регулярное нагружение. *Вопр. проектирования и производства конструкций летательных аппаратов.* 2014. Вып. 1 (77). С. 29–34.

6. Кива Д. С., Кривов Г. А., Семенцов В. Ф. и др. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий. Киев: КВИЦ, 2015. 188 с.
7. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введ. 01.01.81.
8. Пиманов В. В., Тимошенко О. В., Бабак А. М. Исследование процесса дорнования технологических отверстий в авиационном сплаве Д16чТ. *Вісн. НТУУ "КПІ"*. Сер. *Машинобудування*. 2015. № 1 (75). С. 144–150.
9. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. Введ. 06.03.83.
10. Александров В. Г. Справочник по авиационным материалам. М.: Транспорт, 1972. 328 с.

Поступила 25. 09. 2017