

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПІСЛЯ ДОРНУВАННЯ ОТВОРУ НА НДС ПЛАСТИНИ ЗА ОДНОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО РОЗТЯГУ

П. Ясній, С. Гладьо; Ю. Пиндус

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Summary. *The basic regularities of cold expansion rate and the diameter of the hole on the formation of local compressive residual stresses in the threshold of functional holes have been found. Dependences of the local compressive residual stresses on the burnishing tension have been built. To calculate the stress strain state in the threshold of the functional hole after burnishing with different tension and cyclic loading finite-element models of a quarter of the sample with a central hole were built.*

У тонкостінних елементах авіаконструкцій втомні тріщини зароджуються та поширюються в місцях концентрації напружень. Для підвищення витривалості таких елементів використовують різні технологічні методи зміцнення та створення залишкових стискальних напружень в околі концентраторів, зокрема, методи пластичного деформування [1–3], до яких належить і дорнування функціональних отворів. Проаналізовано вплив геометрії дорна [4] та відносного натягу дорнування на втомну довговічність пластин із алюмінієвого сплаву 2024-T3.

Для вивчення перебігу технологічних процесів обробки тиском, а також зародження та поширення втомних тріщин в елементах конструкцій застосовують розрахунок методом скінченних елементів [5–8]. Мета роботи – дослідити перебіг дорнування отворів та проаналізувати вплив параметрів процесу на формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами та напруження за циклічного одновісного розтягу.

Методика випробувань. Досліджували алюмінієвий сплав Д16чТ товщиною $t = 6$ mm, шириною робочої ділянки 60 mm та діаметром отворів 8, 10 та 12 mm. Креслення зразків і дорна, а також методика дорнування подані в праці [3].

Для оцінювання впливу деформування на напружений стан в околі отвору побудована скінченно-елементну модель чверті досліджуваного плоского зразка і дорна з центральним отвором. Напружений стан аналізували за розподілом залишкових нормальних напружень σ_{yy}^{res} після дорнування.

Діаграму пружно-пластичного деформування матеріалу Д16чТ описували за моделлю Steinberg-Guinan Strength [9].

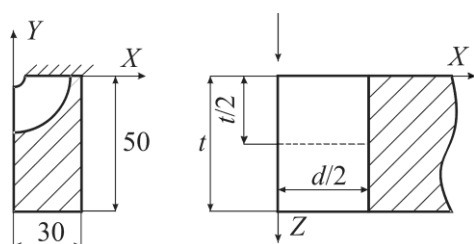


Рисунок 1. Схема чверті робочої ділянки зразка. Стрілка вказує напрям руху дорна; заштрихована ділянка (на рисунку зліва) – підкладка.

Зафіксовано (рис. 1) точки розподілу локальних залишкових напружень на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині його циліндричної поверхні ($Z = t/2$).

Зусилля прикладали до однієї поверхні краю моделі зразка, а протилежну площину фіксували і обмежували її вертикальне переміщення (вздовж напрямку прикладання сили).

Напружений стан за циклічного навантаження аналізували за локальними максимальними напруженнями σ_{yy}^{max} , мінімальними напруженнями σ_{yy}^{min} , а також за локальним розмахом максимальних та мінімальних напружень $\Delta\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{min} - \sigma_{yy}^{max}$.

Розглядали циклічне пружно-пластичне деформування пластини із алюмінієвого сплаву Д16чТ в умовах м'якого навантаження при $\sigma_{min} = 0$ та $\sigma_{max} = 147 \text{ МПа}$. Характеристики механічних властивостей $\sigma_{0,2} = 300 \text{ МПа}$ та $\sigma_B = 430 \text{ МПа}$ [3].

Результати експериментів та їх обговорення. Аналіз отриманих результатів (рис. 2–4) свідчить, що незалежно від діаметра отвору зі збільшенням відносного натягу дорнування i від 1 до 3% зростають напруження σ_{yy}^{res} , а також ширина зони їх дії в околі отвору.

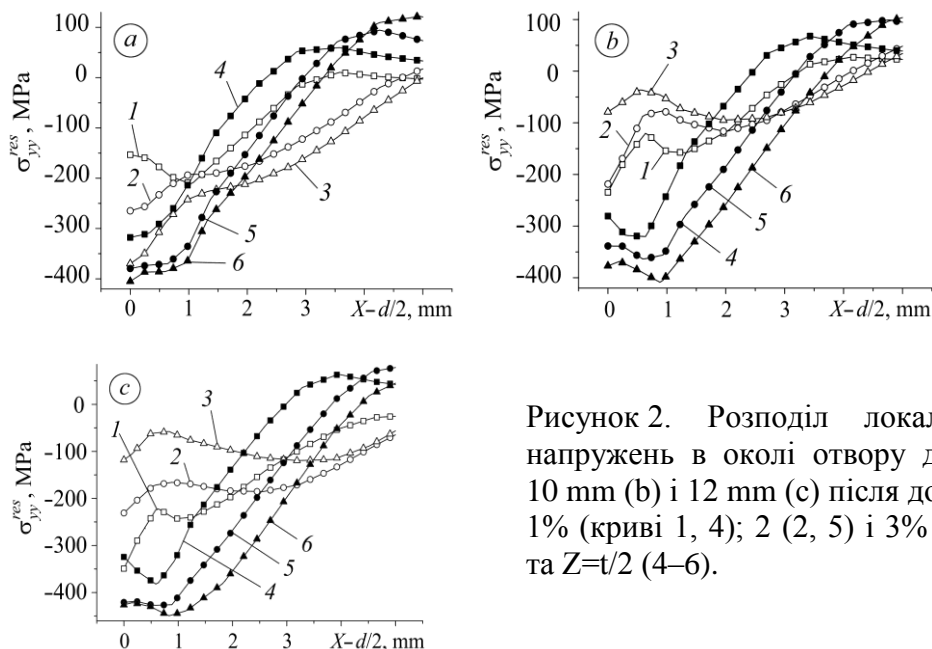


Рисунок 2. Розподіл локальних залишкових напружень в околі отвору діаметром 8 мм (а); 10 мм (b) і 12 мм (c) після дорнування з натягом 1% (криві 1, 4); 2 (2, 5) і 3% (3, 6) при $Z=0(1-3)$ та $Z=t/2(4-6)$.

Найбільші їх значення зафіксовано в середньому за товщиною перерізі зразка, найменші – на кромці отвору від входу дорна ($Z = 0$). Найбільше (вдвічі) відношення значень напруження σ_{yy}^{res} у середній частині по товщині зразка ($Z = t/2$) до таких самих на поверхні ($Z = 0$) виявлено за натягу дорнування 1%. Зі збільшенням натягу воно зменшується і за натягу 3% складає 1,1.

Локальні залишкові напруження стиску на вході дорна значно менші, ніж на середній ділянці отвору і ця тенденція спостерігається для всіх досліджених значень натягу i та діаметрів отворів.

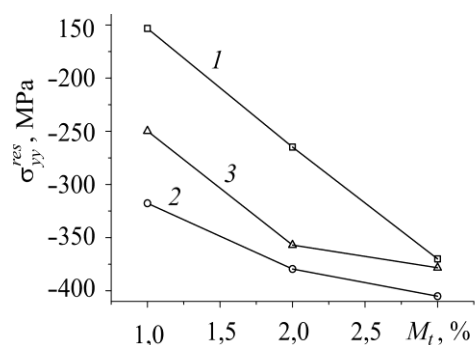


Рисунок 3. Figure 3.

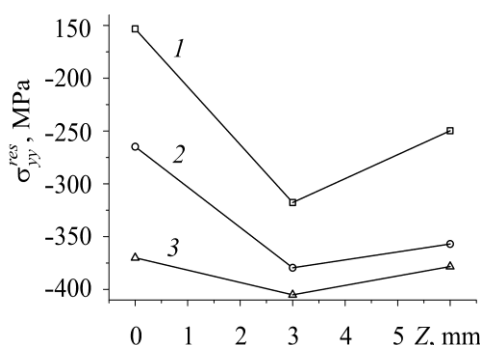


Рисунок 4. Figure 4.

Рисунок 3. Залежність напружень σ_{yy}^{res} від натягу дорнування для отвору діаметром 8 мм на глибині $Z = 0$ (1); $t/2$ (2) та t (3).

Рисунок 4. Розподіл напружень σ_{yy}^{res} на поверхні отвору діаметром 8 мм по товщині зразка після натягу 1 % (1); 2 % (2) та 3 % (3).

Для діаметрів 8 та 10 мм ширина зони стискальних напружень σ_{yy}^{res} на вході дорна $\sim 2,5 \dots 3,5$ мм від краю отвору, а далі вони дорівнюють нулю або частково переходять у

розтягувальні. Напруження стиску на вході дорна зберігаються до глибини більше 5 mm та не переходять у розтягувальні за діаметра отвору 12 mm та всіх значень i . Відмінності у розподілі залишкових стискальних напружень зумовлені тим, що абсолютний натяг дорнування відрізняється для різних діаметрів отвору за однакового відносного натягу i . Зокрема, для $i = 3\%$ і діаметра отвору 8 mm абсолютний натяг становить 0,24 mm, тоді як для діаметра 12 mm – вже 0,36 mm, тобто біля отвіру більшого діаметру більший об'єм металу піддається більшій пластичній деформації під час проходження дорна.

Для середньої ділянки зразка ($Z = t/2$) характерна залежність ширини зони стискальних напружень в околі отвору від натягу дорнування. Для натягу 1% напруження σ_{yy}^{res} діють до відстані 2,5...3 mm від отвору, а для натягу 2 та 3% переходять у розтягувальні відповідно на глибині 3,0...4 та 3,5...4 mm.

Локальні залишкові стискальні напруження на виході дорна (рис. 4) для натягів дорнування 1 та 2% більші, ніж на його вході, та менші, ніж у середній ділянці отвору, а для натягу 3% наближаються до напружень на вході дорна. Отримані дані узгоджуються з результатами натурних випробувань: втомна тріщина завжди зароджувалася у зразках із дорнованими отворами з боку входу дорна [9]. Зазначимо, що найменші залишкові напруження стиску виникають на вході дорна, а найбільші – у середній ділянці отвору для всіх досліджених натягів. Це зумовлено волочінням шару матеріалу зразка в напрямку руху дорна крізь отвір.

На рисунку 5 зображено розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 mm та 10 mm на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та у середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$) для другого півциклу навантаження.

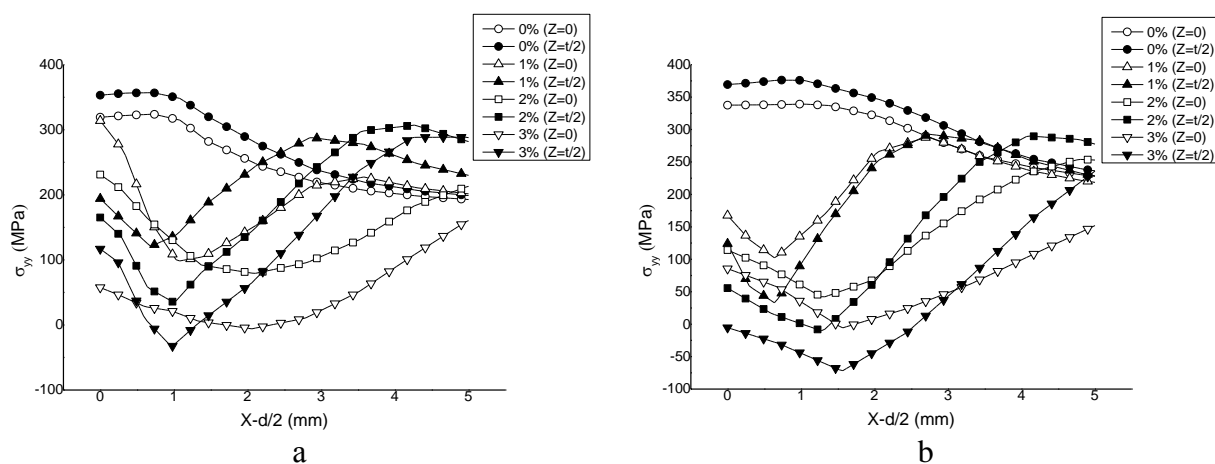


Рисунок 5. Розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі отвору діаметром 8 mm (а), 10 mm (б) на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та у середній частині зразка ($Z = t/2$)

Для дорнованих отворів характерним є зародження та поширення тріщини від кромки отвору з боку входу дорна. Це зумовлено тим, що залишкові напруження стиску спричинені дорнуванням, а також розмах локальних напружень для досліджених натягів дорнування ($i = 1\% \dots 3\%$) на кромці отвору значно менші ніж у середній частині.

Висновки

З використанням методу скінченних елементів змодельовано пружно-пластичне деформування пластини з центральним отвором (діаметром 8; 10 і 12 mm). Побудовано залежності розподілу локальних залишкових напружень в околі отвору від натягу дорнування ($i = 1\%, 2\%, 3\%$): з його збільшенням стискальні напруження зростають, а також збільшується ширина ділянки їх дії. Для досліджених натягів дорнування найменші стискальні напруження зафіксовано з боку входу дорна, а найбільші – у середній ділянці

отвору, ближче до виходу дорна. З ростом відносного натягу дорнування різниця у значеннях напружень стиску по товщині пластини зменшується. Побудовано розподіл розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$, максимальних та мінімальних напружень σ_{yy}^{max} та σ_{yy}^{min} в околі отвору в залежності від кількості циклів навантаження та відносного натягу дорнування.

Conclusion

Using the FE method, the elasto-plastic deformation of the plate with the central hole (8 mm, 10 mm, 12 mm diameter holes) has been modeled. Dependences of the local residual stresses on the burnishing tension ($i = 1\%$, 2% , 3%) have been built: with the increase of the burnishing tension the local residual compressive stress and compressive stress area width from the edge of the hole are increased. For the investigated burnishing tensions was found that the smallest local residual compressive stresses occur on the side of the mandrel entrance and the largest - in the middle section of the hole closer to the mandrel exit. With the increase of burnishing tension rate the difference between the smallest and largest local compressive residual stresses is decreasing. To calculate the stress strain state in the threshold of the functional hole after burnishing with different tension and cyclic loading finite-element models of a quarter of the sample with a central hole were built.

Список використаної літератури

1. Pasta S. Fatigue crack propagation from a cold-worked hole // Engng. Fract. Mech. – 2007. – № 74. – P. 1525–1538.
2. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: Уч. пос. – Иваново: Ивановск. гос. хим.-техн. ун-т, 2009. – 64 с.
3. Ясній П., Гладь С. Вплив дорнування отворів на зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 2014. – № 1. – С. 7–17.
4. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy / H. D. Gopalakrishna, H. N. NarasimhaMurthy, M. Krishna et al. // Anexperimental study. Engng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – P. 361–368.
5. Thomas-Peter Fries and Malak Baydoun. Crack propagation with the extended finite element method and a hybrid explicit–implicit crack description // Int. J. Numerical Methods in Engng. – 2012. – 89, № 12. – P. 1527–1558.
6. The benefit from an adequate finite element simulation of the cold hole expansion / J. T. Maximov, G. V. Duncheva, N. Ganev, and T. N. Bakalova // Engng. Failure Analysis. – 2009. – 16. – P. 503–511.
7. Mohanty J.R., Verma B.B., and Ray P.K. Prediction of fatigue crack growth and residual life using an exponential model: part II (mode-I overload induced retardation) // Int. J. Fatigue. – 2009. – 31. – P. 425–432.
8. Дашенко А. Ф., Лазарева Д. В., Сурьянинов Н. Г. ANSYS в задачах инженерной механики. – Одесса: Астропринт, 2007. – 484 с.
9. Steinberg D. J., Cochran S. G., and Guinan M. W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // J. Appl. Phys. – 1980. – 51, № 3. – P. 1498–1504.