

УДК 539.3

## ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПЛАСТИНАХ З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ОТВОРАМИ ПІСЛЯ ДОРНУВАННЯ

П. В. ЯСНІЙ, С. В. ГЛАДЬО, В. В. СКОЧИЛАС, О. І. СЕМЕНЕЦЬ

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

Опрацьовано методику моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану за дорнування отворів. Виявлено основні закономірності впливу відносного натягу дорнування та діаметра отвору на формування локальних залишкових напружень стиску в його околі. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням натягу дорнування від 1 до 3% вони на циліндричній поверхні отвору вони зростають у 1,5–2 рази.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, функціональний отвір, дорнування отвору, локальні залишкові напруження стиску.

У тонкостінних елементах конструкції, зокрема авіаконструкцій, втомні тріщини, як правило, 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 [4] вплив геометрії дорна 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 ефективно моделювання методом скінченних елементів [5–7]. Мета праці – так змоделювати перебіг дорнування отворів та проаналізувати вплив параметрів процесу на формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами.

**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 раніше [3].

Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) в околі отвору після дорнування з різним відносним натягом побудували скінченно-елементну модель чверті досліджуваного плоского зразка і дорна з центральним отвором. НДС аналізували за розподілом залишкових нормальних напружень  $\sigma_{yy}^{res}$  після дорнування.

Діаграму пружно-пластичного деформування матеріалу Д16чТ описували за моделлю Steinberg-Guinan Strength [8]

$$G = G_0 \left[ 1 + \left( \frac{G_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G_T}{G_0} \right) (T - 300) \right],$$

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \left( 1 + \frac{\sigma_{0,2p}}{\sigma_{0,2_0}} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G_T}{G_0} \right) (T - 300)$$

за умови, що  $\sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \leq \sigma_{0,2_{max}}$ . Тут  $G_0$  – модуль зсуву у початковому

стані ( $T = 20^\circ$ ;  $P = 0$ ;  $\varepsilon = 0$ );  $G_p = dG/dP$ ;  $G_T = dG/dT$ ;  $P$  – тиск;  $\eta$  – коефіцієнт стиснення;  $T$  – температура;  $\sigma_{0,2}$  – границя текучості;  $\sigma_{0,2_0}$  – її значення у початковому стані;  $\beta$  – коефіцієнт зміцнення;  $\varepsilon$  – пластична деформація;  $\varepsilon_i$  – початкова еквівалентна пластична деформація;  $n$  – експонента зміцнення. Щоб відтворити процеси деформування та НДС матеріалу, структурним складникам моделі надали фізико-механічні властивості сплаву Д16чТ:  $G_0 = 2,86 \cdot 10^4$  МПа, густина  $\rho = 2785 \text{ kg/m}^3$ ,  $\beta = 300$ ,  $n = 0,13$ . Щоб позбавитись впливу температури на кут нахилу та максимальне напруження розриву, прийняли, що для кімнатної температури  $G_T = 0$ ,  $G = G_0$  та  $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2_0} = 300$  МПа.

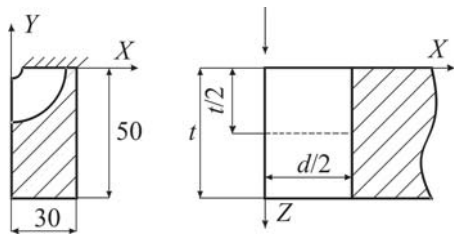


Рис. 1. Схема чверті робочої ділянки зразка. Стрілки вказують напрям руху дорна; заштрихована ділянка – підкладка.

Fig. 1. Schematic drawing of a quarter of the specimen working area. Arrows indicate the direction of mandrel motion; dashed area – support.

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

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

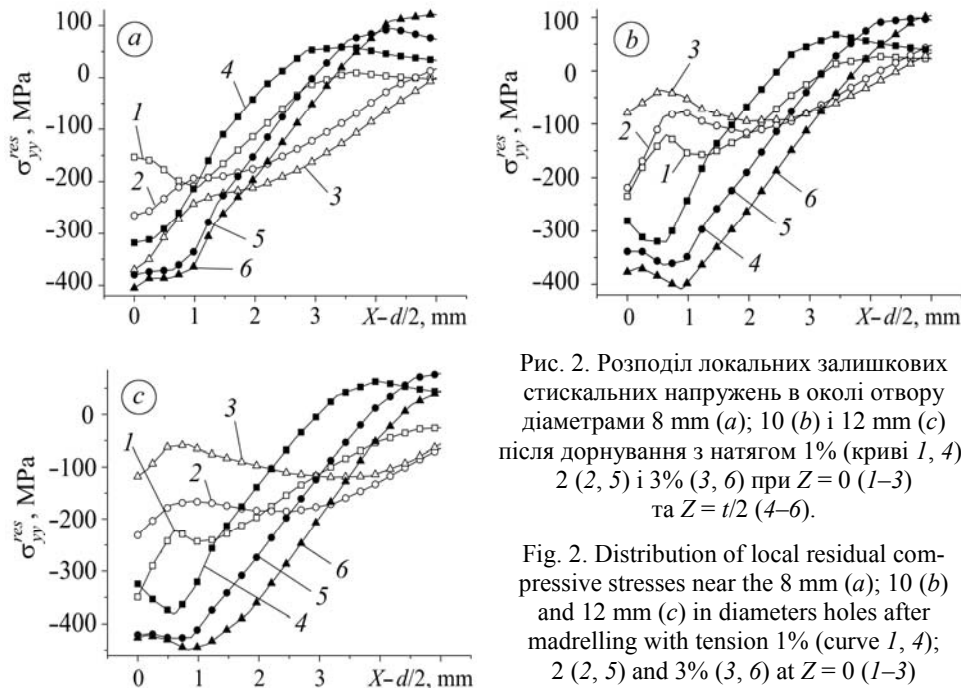


Рис. 2. Розподіл локальних залишкових стискальних напружень в околі отвору діаметрами 8 мм (а); 10 (b) і 12 мм (c) після дорнування з натягом 1% (криві 1, 4); 2 (2, 5) і 3% (3, 6) при  $Z = 0$  (1–3) та  $Z = t/2$  (4–6).

Fig. 2. Distribution of local residual compressive stresses near the 8 mm (a); 10 (b) and 12 mm (c) in diameters holes after mandrelling with tension 1% (curve 1, 4); 2 (2, 5) and 3% (3, 6) at  $Z = 0$  (1–3) and  $Z = t/2$  (4–6).

Найбільші їх значення зафіксовано в середньому за товщиною перерізу зразка, найменші – на кромці отвору від входу дорна ( $Z = 0$ ). Найбільше (двічі) від-

ношення значень напруження  $\sigma_{yy}^{res}$  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  $M_t$  та діаметрів отворів.

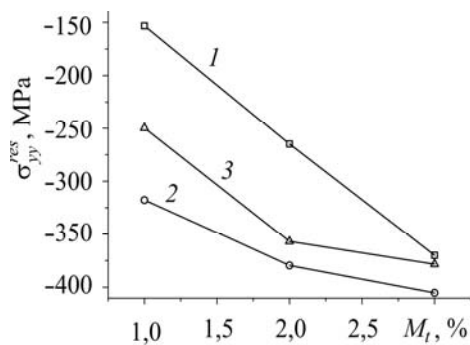


Рис. 3. Fig. 3.

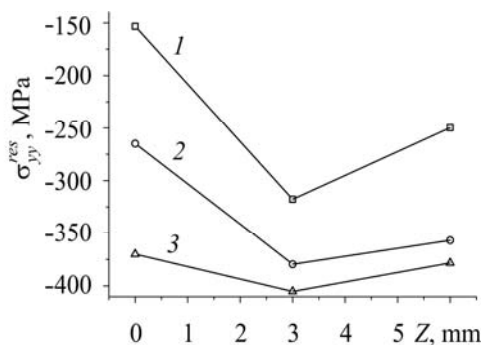


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 3. Залежність напружень  $\sigma_{yy}^{res}$  від натягу дорнування  $M_t$  на поверхні отвору  $Z = t/2$  діаметром 8 mm на глибині  $Z = 0$  (1);  $t/2$  (2) та  $t$  (3).

Fig. 3. Dependence of stresses  $\sigma_{yy}^{res}$  on mandrelling tension  $M_t$  on the hole surface  $Z = t/2$  in diameter of 8 mm at the depth  $Z = 0$  (1);  $t/2$  (2) and  $t$  (3).

Рис. 4. Розподіл напружень  $\sigma_{yy}^{res}$  на поверхні отвору діаметром 8 mm по товщині зразка після натягу 1% (1); 2 (2) і 3% (3).

Fig. 4. Distribution of stresses  $\sigma_{yy}^{res}$  on the surface of a hole of 8 mm in diameter over the specimen thickness after tension 1% (1); 2 (2) and 3% (3).

Для діаметрів 8 та 10 mm ширина зони стискальних напружень  $\sigma_{yy}^{res}$  на вході дорна  $\sim 2,5 \dots 3,5$  mm 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  $M_t$ . Відмінності у розподілі залишкових стискальних напружень зумовлені тим, що абсолютний натяг дорнування відрізняється для різних діаметрів отвору за однакового  $M_t$ . Зокрема, для  $M_t = 3\%$  і діаметра отвору 8 mm абсолютний натяг становить 0,24 mm, тоді як для діаметра 12 mm – вже 0,36 mm, тобто отвір більшого розміру 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  $\sigma_{yy}^{res}$  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 тут для всіх  $M_t$ , а найбільші – у середній ділянці отвору. Це зумовлено волочінням шару матеріалу в напрямку проходження дорна крізь отвір.

### ВИСНОВКИ

Методом скінченних елементів змодельовано пружно-пластичне деформування пластини з центральним отвором під час дорнування з натягом 1; 2 та 3% для отворів діаметрами 8; 10 і 12 mm. Побудовано залежності розподілу локальних залишкових напружень стиску в околі отвору від відносного натягу дорнування: з його збільшенням вони зростають, а також збільшується ширина ділянки їх дії. Найменші їх значення зафіксовано з боку входу дорна для всіх досліджених натягів дорнування, а найбільші – у середній ділянці отвору, ближче до виходу дорна. З ростом відносного натягу дорнування різниця у значеннях напружень стиску по довжині отвору зменшується.

*РЕЗЮМЕ.* Разработана методика моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния после дорнирования отверстий. Выявлены основные закономерности влияния относительного натяжения дорнирования и диаметра отверстия на формирование локальных остаточных напряжений сжатия в их окрестности. В частности, установлено, что с увеличением напряжения дорнирования от 1 до 3% на цилиндрической поверхности отверстия они возрастают в 1,5–2 раза.

*SUMMARY.* The method of modeling the stress-strain state for holes mandrelling using Final Element Method has been analyzed. The basic regularities of relative mandrelling tension and the hole diameter on the formation of local compressive residual stresses in the vicinity of functional holes have been found. With the increase of mandrelling tension from 1 to 3% these stresses increase on the cylindrical surface of the hole in 1.5–2 times.

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., Гладько 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, 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. *Даценко 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.

Одержано 04.07.2014