

# ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗАРОДЖЕННЯ І РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН В АЛЮМІНІЄВИХ ПЛАСТИНАХ ІЗ ЗМІЦНЕНИМИ ОТВОРАМИ

П. Ясній, С. Гладьо

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**Summary.** The method of modeling stress-strain state for holes burnishing using FEM has been analyzed. A series of fatigue tests were carried out using plates containing plain holes and cold expanded holes in aluminium. For various diameters of holes and cold expansion degree there exists a certain correlation between the stress range or maximum stress on the edge of hole on the entrance face of plate and lifetime of fatigue crack initiation.

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 аналізу технологічних процесів дорнування, а також зародження та поширення втомних тріщин в елементах конструкцій застосовують розрахунок методом скінченних елементів [5–8]. Мета роботи – дослідити основні закономірності зародження і росту втомних тріщин в алюмінієвих пластинах із отворами після дорнування та проаналізувати вплив параметрів процесу на формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами.

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

Для оцінювання впливу деформування на напружений стан в околі отвору побудована скінченно-елементна модель чверті алюмінієвої пластини і дорна з центральним отвором. Напружений стан аналізували за розподілом залишкових нормальних напружень  $\sigma_{yy}^{res}$  після дорнування.

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

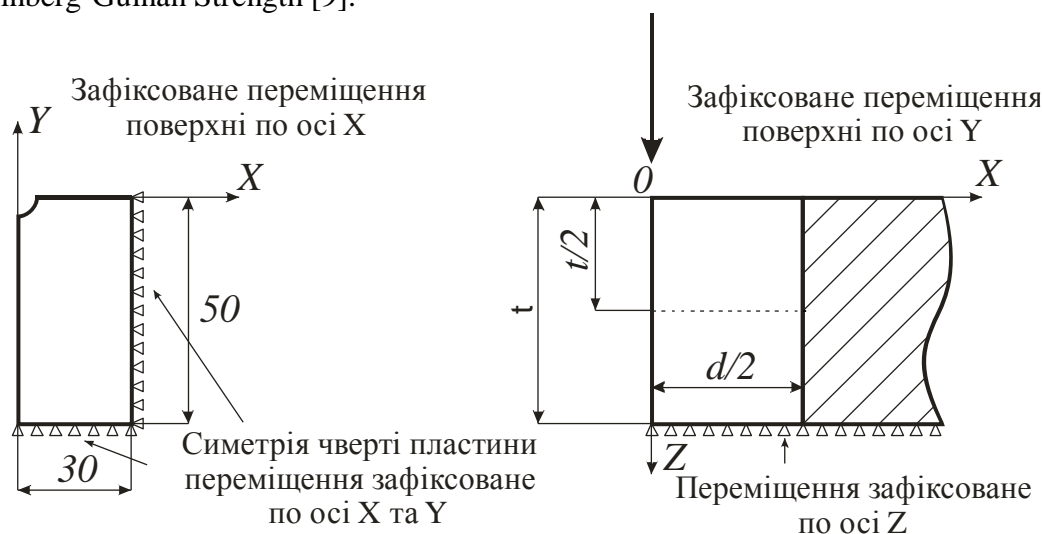


Рисунок 1. Схема чверті робочої ділянки зразка. Стрілка вказує напрям руху дорна.

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  $\sigma_{yy}^{max}$ , мінімальними напруженнями  $\sigma_{yy}^{min}$ , 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  $\sigma_{max} = 147$  МПа. Характеристики механічних властивостей  $\sigma_{0,2} = 300$  МПа та  $\sigma_B = 430$  МПа [3].

Періодом зародження втомної макротріщини вважали таку кількість циклів, коли на поверхні зразка буде видно тріщину довжиною 0,25 мм.

Результати експериментів та їх обговорення. Для експериментальних досліджень втомного руйнування зразків із дорнованими отворами характерна півеліптична форма втомної тріщини. Початкова втомна макротріщина у зміцнених зразках майже завжди зароджувалася з боку входу дорна.

На основі експериментальних даних отримано основні залежності періоду зародження видимої на кромці отвору втомної макротріщини довжиною  $\approx 0,25$  мм та кількості циклів до зруйнування зразка в залежності від величини відносного натягу дорнування для різних діаметрів отвору.

На рисунку 7а та таблиці 1 показано залежності періоду зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм та 0,5 мм в залежності від натягу дорнування. На рисунку 7б та таблиці 1 показано відношення періоду зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм та 0,5 мм до кількості циклів до руйнування пластини.

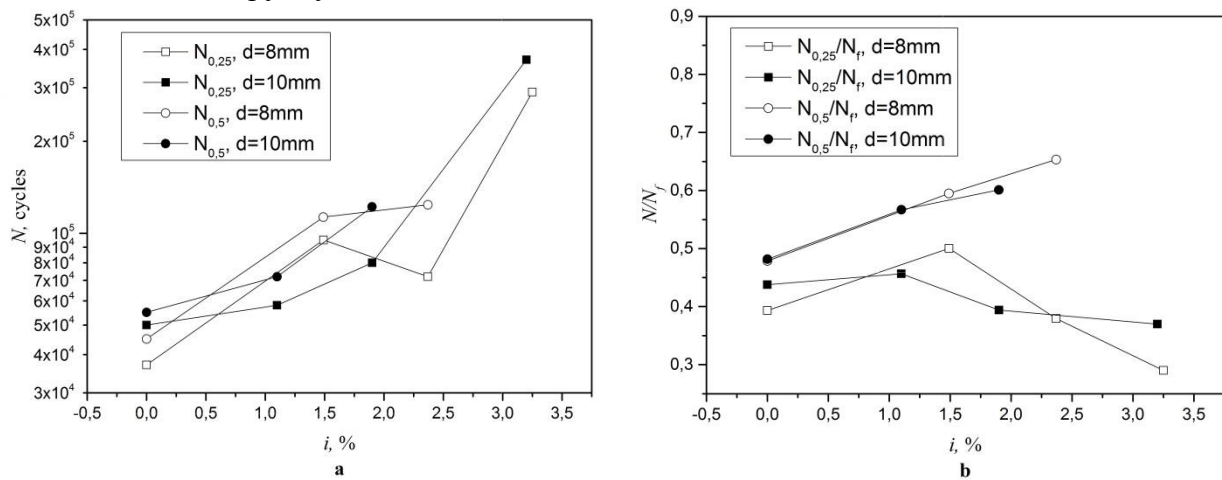


Fig. 7. Довговічність періоду зародження втомної тріщини від отворів діаметром 8 мм та 10 мм за циклічного навантажування  $\Delta\sigma = 147$  МПа в залежності від натягу дорнування: а – період зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм та 0,5 мм; б – відношення періоду зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм та 0,5 мм до кількості циклів до руйнування пластини.

На рисунку 2 зображено графіки розподілу локальних залишкових стискаючих напружень в околі функціональних отворів діаметром 8 мм та 10 мм після дорнування з відносними натягами 1%, 2%, 3%.

Таблиця 1. Довговічність зародження втомної тріщини та руйнування пластини із зміцненими та не зміцненими отворами за навантаження  $\Delta\sigma = 147$  МПа

№	$d_{final}$ , мм	$i$ , %	$N_{0,25}$ , циклів	$N_{0,5}$ , циклів	$N_f$ , циклів	$N_{0,25}/N_f$	$N_{0,5}/N_f$
1	8.03	0	37000	45000	94047	0.393	0.478
2	8.03	1.49	95000	113000	189907	0.500	0.595
3	8.02	2.37	72000	124000	189791	0.363	0.653
4	8.01	3.25	290000	–	$>10^6$		
5	10.04	0	50000	55000	114223	0.437	0.481
6	10.02	1.1	58000	72000	126997	0.519	0.567
7	10.01	1.9	80000	122000	202925	0.394	0.601
8	10	3.2	370000	–	$>10^6$		

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

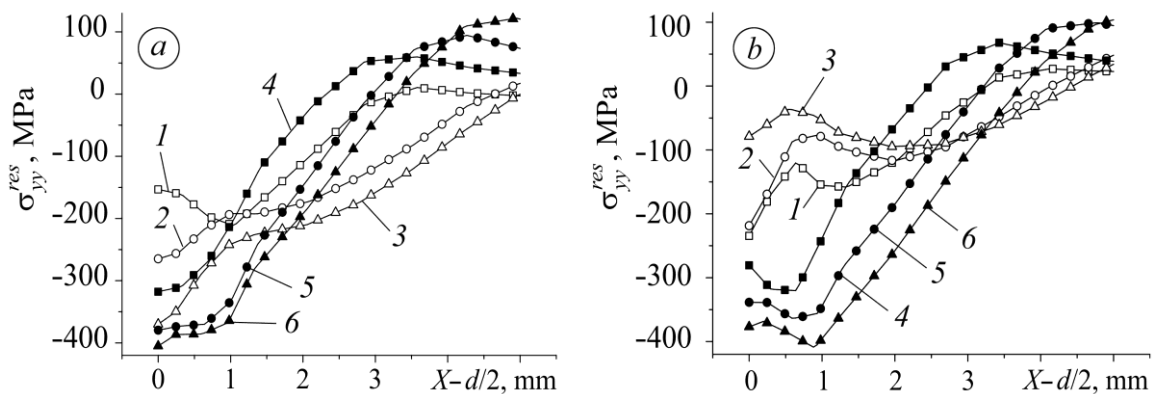


Рисунок 2. Розподіл локальних залишкових напружень в околі отвору діаметром 8 мм (а); 10 мм (б) після дорнування з натягом 1% (криві 1, 4); 2 (2, 5) і 3% (3, 6) при  $Z=0(1-3)$  та  $Z=t/2$  (4-6).

Найбільші значення залишкових напружень зафіксовано в середньому за товщиною перерізу зразка, найменші – на кромці отвору від входу дорна ( $Z = 0$ ). Найбільше (вдвічі) відношення 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.

Період до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах від отворів діаметром 8 мм із натягом дорнування 3,2% збільшується до 10 разів порівняно із зразками з недорнованими отворами. Аналіз результатів показує що частка періоду зародження втомної тріщини до кількості циклів до руйнування пластини за напружень  $\Delta\sigma = 147$  МПа суттєво залежить від величини натягу дорнування. Якщо прийняти критерієм зародження тріщини довжину її на поверхні 0,25 мм, то тривалість зародження тріщини по відношенню до руйнування пластини  $N_{0,25}/N_f$  з отворами діаметром 8 мм та 10 мм зменшується у 1,3 рази із підвищенням натягу дорнування до 3,2 % порівняно із недорнованим отвором. Є протилежна залежність відношення періоду зародження тріщини довжиною 0,5 мм до руйнування пластини  $N_{0,5}/N_f$  для діаметрів отвору 8 мм та 10 мм. Із збільшенням натягу дорнування від 0 % до 3,2 % відношення періоду зародження тріщини довжиною 0,5 мм до руйнування пластини підвищується від 0,48 для незміцненого отвору до 0,65 для зміцненого. У всіх випадках збільшення діаметру отвору від 8 мм до 10 мм збільшує період до зародження

втомних тріщин довжиною 0,25 мм та 0,5 мм.

### **Висновки**

1. Незалежно від натягу дорнування та діаметру отвору тріщини зароджуються на кромці отвору з боку входу дорна. Це пов'язано з тим що залишкові напруження після дорнування з боку входу дорна найменші і відповідно напруження за циклічного навантаження найбільші. Тріщини від отворів у недорнованих пластинах зароджувалися в середній по товщині ділянці зразка.

2. Кількість циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм та 0,5 мм зростає із збільшенням діаметру отвору від 8 мм до 10 мм.

3. Різниця залишкових напружень стиску, обчислених методом скінчених елементів, вздовж товщини пластини зменшується із підвищенням натягу дорнування.

4. Для різних діаметрів отвору та натягів дорнування спостерігається певна кореляція між максимальними напруженнями на кромці отвору з боку входу дорна та періодом до зародження втомної тріщини. Значний розкид даних можна пояснити тим, що обидва параметри не враховують впливу амплітуди локальних напружень на кількість циклів до зародження втомної тріщини.

### **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. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськ. 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. // *An experimental 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. Дашченко 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.