

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

На правах рукопису

УДК 620.16: 539.42: 539.43

Гладьо Сергій Володимирович

**Оцінка впливу дорнування отворів на довговічність елементів крила
транспортного літака**

Спеціальність 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України
Ясній Петро Володимирович

Тернопіль, 2015

Зміст

Зміст	2
Вступ	4
Розділ 1. Втомна довговічність елементів конструкцій	11
1.1. Втомне руйнування матеріалів.....	11
1.2. Закономірності зародження коротких втомних тріщин після поверхневого зміцнення матеріалу	23
1.3. Дослідження НДС в околі отворів методом скінчених елементів	30
Висновки.....	31
Розділ 2. Методики дослідження зародження і поширення втомних тріщин	33
2.1. Зразки і формули для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень	33
2.2. Дослідження зародження та поширення втомних тріщин від функціональних отворів	45
2.3. Фрактографічні дослідження зародження та поширення втомних тріщин.....	50
2.4. Аналіз НДС у функціональних отворах методом скінчених елементів	51
Висновки.....	55
Розділ 3. Вплив експлуатаційних чинників на зародження та ріст тріщин від функціональних отворів	56
3.1. Зародження та поширення втомних тріщин за осьового навантаження.....	56
3.2. Зародження та поширення втомних тріщин за одновісного розтягу	61
3.3. Розрахунок залишкових полів напружень та деформації методом скінчених елементів	67

3.4. Зародження та ріст втомних тріщин від функціональних отворів з урахуванням залишкових напружень	81
Висновки	86
Розділ 4. Прогнозування зародження та росту втомних тріщин від функціональних отворів	89
4.1. Розрахунок локальних напружень в околі отвору методом скінчених елементів за регулярного навантаження	89
4.2. Розрахунок локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження в околі отвору методом скінчених елементів за регулярного навантаження	94
4.3. Прогнозування періоду до зародження втомної тріщини з урахуванням залишкових стискаючих напружень після поверхневого пластичного зміцнення	103
Висновки	109
Загальні висновки	111
Література	113

Вступ

Актуальність теми. Проблема втоми матеріалів і конструкцій набула особливого значення завдяки швидкому розвитку багатьох галузей промисловості, таких як авіабудування, автомобільне і машинобудування. Вимоги високої безпеки конструкцій і забезпечення їх безпечної експлуатації мають особливе значення в умовах циклічного навантаження і високих напружень.

Аналіз літературних джерел показав, що в ряді випадків існуючі технологічні методи обробки є ефективним засобом підвищення втомної довговічності конструктивних елементів з одиничними отворами. Більшість з них полягає в обробці елементів конструкції в зоні отворів шляхом пластичного деформування шару матеріалу.

Дослідженнями в даному напрямку займаються провідні науково-дослідні установи, інститути, а також науково-технічні комплекси виробників і користувачів авіаційної і аерокосмічної техніки, зокрема "Boeing", "Airbus", "NASA", "NAVAL". АНТК ім. К.О. Антонова, тощо. Довговічність силових конструктивних елементів з отворами досліджували Г.А. Кривов, С.А. Бичков, Е.Т. Василевський, В.А. Рєзник, А.М. Гуменний, С.П. Свєтличний. Зокрема, В.А. Матвієнко та В.А. Гребеніков дослідили вплив методів комбінованого поверхневого зміцнення (дорнування з наступним бар'єрним обтискуванням) на характеристики локального НДС стрингера з отворами для перетікання палива. В.Е. Панкратов, С.Н. Михеєнко, Р.Н. Шадуро проводили кількісне оцінювання первинних похибок у формуванні точності дорнування.

Позитивний вплив дорнування в елементах конструкції з отворами на довговічність, мікротвердість, шорсткість, залишкові напруження стиску підтверджено у працях В.В. Воронько, Ю.А. Воробйова, В.Н. Степаненко, В.Ф. Скворцова, А.Ю. Арляпова, Н.Д. Gopalakrishna, Н.Н. Narasimha

Murthy, M. Krishna, M.S. Vinod, A.V. Suresh, Т.Ю. Степанова.

Зокрема, в працях науковців із Бангалора (Індія) досліджено вплив технології холодного дорнування отворів в пластині із алюмінієвого сплаву 2024. Для дорнування використовували розрізну пружинну втулку, яку розміщали в отворі і через яку протискували шток з конічною ділянкою або шток з кульовим наконечником. Показано, що максимальні залишкові стискувальні напруження і втомна довговічність (у 5,3 рази більша ніж для отвору без зміцнення) досягаються при розширенні отвору до 5%.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації увійшли результати експериментальних і теоретичних досліджень, які отримані при роботі над держбюджетною темою: “Вплив конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами” (№ державної реєстрації роботи: 0113U000249), що виконується у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя з 2013 року, згідно тематичних планів НДР Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення міцності та втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами за рахунок створення залишкових напружень стиску в поверхневих шарах циліндричної поверхні отвору. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив натягу дорнування функціональних отворів на втомну міцність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження;

- дослідити вплив діаметра пластично-деформованих отворів на циклічну міцність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження;
- дослідити вплив натягу дорнування на кінетику та мікромеханізми росту тріщин в силових конструктивних елементах крила транспортного літака;
- змодельовати вплив натягу дорнування функціональних отворів на залишковий напружений стан силових конструктивних елементів крила транспортного літака;
- змодельовати пружно-пластичне циклічне деформування пластин з функціональними отворами після дорнування;
- обґрунтувати критерії втомної міцності силових конструктивних елементів крила літака із зміцненими функціональними отворами;
- розробити конструктивно-технологічні рекомендації для підвищення міцності, втомної довговічності та живучості силових конструктивних елементів крила транспортного літака.

Об'єктом дослідження є силові конструктивні елементи крила транспортного літака.

Предметом дослідження є вплив поверхневого пластичного деформування (ППД) на втомну міцність та довговічність силових конструктивних елементів з функціональними отворами крила транспортного літака.

Методи дослідження. В основу методики оцінки втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами з урахуванням ППД за сталоамплітудного навантаження були закладені результати власних та відомих аналітично-експериментальних досліджень:

- методики експериментальних досліджень циклічної

тріщиностійкості сплавів за регулярного навантаження;

– методики експериментальних досліджень впливу попереднього пластичного деформування на характеристики механічних властивостей матеріалу;

– методика визначення залишкових стискувальних напружень після ППД отворів;

– методики оцінки мікроструктури попередньо деформованого матеріалу, мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин з використанням електронної мікроскопії;

– методики моделювання МСЕ НДС в околі отвору до та після дорнування, а також за сталоамплітудного навантаження.

Використання модернізованої електрогідравлічної машини СТМ-100 керованої ПК, пристроїв спостереження за поширенням тріщини, растрового електронного мікроскопу дало змогу отримати необхідну точність і достовірність результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

– виявлено основні закономірності зародження та поширення втомних тріщин у зоні функціональних отворів крила транспортного літака після зміцнення циліндричної поверхні отворів дорнуванням;

– виявлено вплив натягу дорнування на залишковий НДС пластин з отворами з урахуванням діаметра отвору;

– досліджено кінетику напружено-деформованого стану пластин із зміцненими отворами за циклічного навантаження з урахуванням натягу дорнування і залишкових напружень;

– розроблено методику розрахунку МСЕ розмаху локальних напружень в околі функціонального отвору після дорнування та циклічного одновісного розтягу;

– обґрунтовано критерії втомного руйнування конструктивних елементів крила транспортного літака із зміцненими функціональними отворами.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропонована методика оцінки та розрахунку МСЕ комплексного впливу попереднього пластичного деформування функціональних отворів силових конструктивних елементів крила транспортного літака на зародження і поширення втомних тріщин з урахуванням діаметра.

Запропонована методика прогнозування періоду зародження втомної тріщини з урахуванням залишкових напружень стиску після поверхневого пластичного зміцнення за регулярного навантаження силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами.

Розроблено практичні рекомендації з вдосконалення технології зміцнення пластичним деформуванням функціональних отворів силових конструктивних елементів крила транспортного літака.

Результати дисертаційної роботи, в частині методики прогнозування періоду зародження втомної тріщини та повного руйнування з урахуванням залишкових стискаючих напружень після поверхневого пластичного зміцнення за сталоамплітудного навантаження, використовуються лабораторією випробувань на міцність АНТК ім. О.К. Антонова при розрахунках живучості силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами, а також при визначенні характеристик циклічної тріщиностійкості алюмінієвих сплавів.

Особистий внесок здобувача. Основу дисертаційної роботи складають результати, які отримані автором самостійно. В друкованих працях, написаних у співавторстві, автору належить:

- розроблення методики розрахунку методом скінчених елементів напружено-деформованого стану в околі отвору після дорнування, а також за циклічного навантаження;

- розроблення методики розрахунку методом скінчених елементів операції дорнування з використанням діаграми деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ та програмного модуля ANSYS Explicit Dynamics;

- виявлення закономірностей впливу відносного натягу дорнування на циклічну міцність та довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака;

- дослідження мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин у конструктивних елементах крила транспортного літака з функціональними отворами із дорнуванням та без нього;

- розроблення методики прогнозування періоду зародження втомної тріщини у конструктивних елементах крила транспортного літака з функціональними отворами з урахуванням впливу відносного натягу дорнування та діаметра отвору.

Науковий керівник роботи брав участь у формулюванні задач, обговоренні, аналізі, трактуванні одержаних результатів та можливостей їх практичного застосування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на V Міжнародній конференції з елементами наукової школи для молоді (Тамбов, 2010 р.), науково-технічної конференції МТФ ТНТУ ім. І. Пулюя - "Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті"

(Тернопіль, 2011 р.), 10-й Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів 2011 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (Тернопіль, 2011 р.), XVII науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 2013 р.), Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів " Актуальні задачі сучасних технологій " (Тернопіль, 2013 р.), IV науково-технічній конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль 2014 р.).

Публікації. Результати проведених досліджень за тематикою дисертаційної роботи опубліковані в 13 друкованих працях. З них - 6 статей у фахових виданнях з переліку МОН України, одна з яких входить в наукометричну базу Scopus.

Розділ 1. Втомна довговічність елементів конструкцій

1.1. Втомне руйнування матеріалів

Невід'ємною частиною умов експлуатації багатьох сучасних машин та механізмів є циклічні експлуатаційні навантаження, які призводять до пошкодження структури матеріалу та поступового накопичення дефектів як на мікро- так і на макрорівнях [1-3]. Втомне руйнування відбувається за напружень, значно нижчих межі текучості ($\sigma_{0,2}$) матеріалу. Найчастіше зустрічаються циклічні навантаження синусоїдальної форми.

Процес втомного руйнування матеріалів умовно можна розділити на чотири послідовних стадії [4-8] наступним чином:

1) інкубаційний період, характеристикою якого є зміна субструктури у всьому об'ємі навантаженого металу та концентрація пластичної деформації у смугах ковзання, що у приповерхневих шарах [9]. Під впливом циклічного навантаження відбувається процес втомного зміцнення або знеміцнення, яке залежить від стану матеріалу і амплітуди навантаження;

2) період зародження субмікротріщин в малій частині загального об'єму, а точніше в приповерхневому шарі, де в першу чергу відбувається розрихлення матеріалу і підвищується концентрація напружень. У подальшому субмікротріщини поширюються і зливаються, перетворюючись в мікротріщини. Їх розмір сумірний із розміром структури матеріалу (зерен, включень);

3) поширення сітки мікротріщин, коли одна з них стає домінуючою і переростає в макротріщину;

4) поширення магістральної макротріщини, що як правило завершується руйнуванням елемента конструкції.

Іноді виділяють п'яту стадію долому. При досягненні тріщиною

певного критичного розміру, за рахунок енергії деформації тіла подальший її ріст іде спонтанно з досить великою швидкістю, оскільки тривалість цієї стадії дуже мала, нею часто нехтують.

Інші дослідники пропонують відмінний від поданого вище поділ процесу втомного руйнування. Наприклад, Терент'єв В. Ф. виділяє два основні періоди з наступними стадіями [10]:

- 1) період зародження тріщини зі стадіями мікротечіння, зміцнення, зародження субмікротріщин;
- 2) період поширення втомної тріщини зі стадіями повільного, стабільного і прискореного поширення.

Наприклад, Міллер виділяє три основні періоди процесу втомного руйнування [11]:

- 1) зародження і поширення мікроструктурно коротких тріщин;
- 2) поширення фізично малих тріщин і утворення макротріщини;
- 3) поширення макротріщини до повного руйнування тіла.

Визначення періоду зародження втомної тріщини – це одна з найважливіших проблем механіки руйнування [12]. Особливо це стосується літакобудування, де втомну довговічність окремих елементів конструкції необхідно розраховувати на стадіє зародження втомної тріщини (N_i). Методологія досліджень по визначенню періоду (N_i) не стандартизована. Це спричинено рядом обставин:

- відсутність критерію, що характеризує початковий розмір макротріщини;
- вибір параметрів, які описують процес зародження втомної макротріщини біля конструктивних концентраторів напружень.

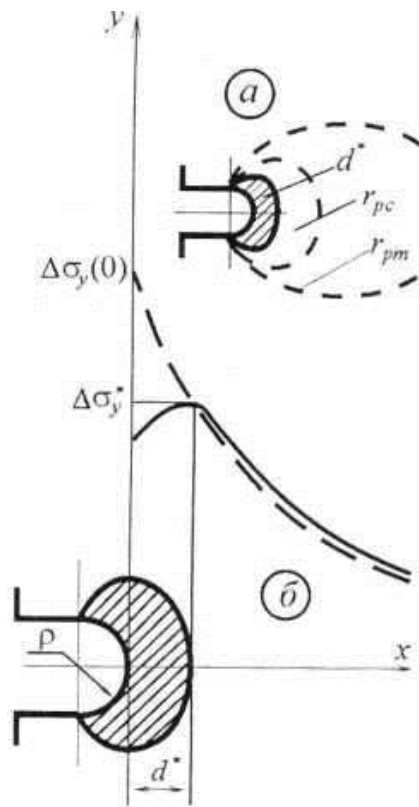


Рисунок 1.1 – Схема утворення пластичних зон і зони перед руйнування (а) і розподілу напружень (б) біля вершини вирізу

Під впливом циклічного навантаження експериментальних зразків в околі концентраторів напружень утворюється зона передруйнування. Це об'єм матеріалу де утворюються пластичні деформації і виникаються пошкодження його структури. Зона перед руйнування формується в межах статичної (r_{pm}) і циклічної (r_{pc}) пластичних зон біля вершини концентратора напружень (рис. 1.1). Її розміри d^* визначають властивості матеріалу (мікроструктура, падіння границі текучості і швидкість циклічного деформаційного зміцнення при поверхневих шарів) та умови випробувань (амплітуда навантаження, середовище) [12].

Зона передруйнування обумовлює релаксацію напружень і локалізацію деформацій біля вершини концентратора. Максимальні напруження знаходяться на віддалі d^* від вершини вирізу (рис. 1.1 б). В подальшому зона передруйнування визначає особливості зародження та росту мікротріщин. Протягом інкубаційного періоду формується приповерхнева макрозона завдовжки d^* (рис. 1.2). Виникають мікробласті, в яких напруження досягають критичних значень, що призводить до утворення

системи мікротріщин по контуру вирізу. Мікроструктурно короткі тріщини ростуть згідно II способу руйнування (рис. 1.2), а потім відбувається перехід до способу I [12].

Кінетика цих мікротріщин має дві особливості (рис. 1.3):

– швидкість росту малих тріщин вища, ніж довгих за однакової інтенсивності напружень;

– швидкість росту малих тріщин зменшується зі збільшенням їх довжини і тріщина стає непоширною або знову росте [12].



Рисунок 1.2 – Схема росту втомних тріщин у межах зони перед руйнування d^* біля вершини вирізу

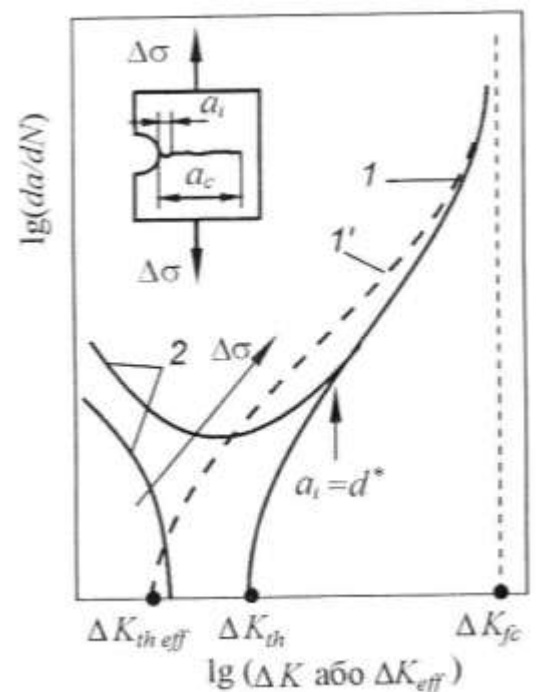


Рисунок 1.3 – Діаграми швидкостей росту втомних макро- (криві 1 та 1') та мікротріщин (криві 2)

Першу особливість треба пов'язувати з нижчою границею текучості приповерхневих шарів проти об'єму матеріалу і відсутністю ефекту

закриття малих тріщин. Друга особливість обумовлена характеристичною зоною d^* , яка є головним потенційним бар'єром для малих тріщин. Якщо інтенсивність напружень у вершині мікротріщини не забезпечує подолання макробар'єра, то вона стає непоширною, що спостерігається за напружень, близьких до границі витривалості. За вищих напружень система початкових мікротріщин розвивається шляхом росту найсприятливіше орієнтованих або злиттям зустрічних мікротріщин, поки одна з них стане домінантною і досягне межі зони d^* . Як тільки домінантна мікротріщина виходить з цієї зони, тоді все контролюється тільки ситуацією біля її вершини, де задовольняються умови автономності, тобто вона перетворюється в макротріщину з властивою їй пластичною зоною. Час, необхідний для цього, визначає період зародження макротріщини N_i . Далі настає період росту макротріщини, який вже описує стандартна діаграма $da/dN - \Delta K$. Отже, характеристична віддаль d^* визначає початковий розмір макротріщини, а ріст всіх інших тріщин гальмується і вони стають непоширними [12].

Хоча зона передруйнування формується у межах пластичної зони, закономірності її утворення відрізняються. Наприклад, для заданої гостроти вирізу ($\rho = const$) зі збільшенням амплітуди навантаження величини r_{pm} і r_{pc} (рис. 1.1) зростають, а розмір d^* зменшується або залишається сталим. Це наслідок того, що зона передруйнування зумовлена особливостями деформування приповерхневих шарів матеріалу, а розвиток пластичних зон – об'ємними властивостями матеріалу [12].

Внаслідок формування зони передруйнування напруження релаксують, тому теоретичний коефіцієнт концентрації напружень K_t зменшується до значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень [12]

$$K_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma_y^*}{\Delta\sigma_N} \quad (1.1)$$

де $\Delta\sigma_y^*$ – розмах локальних напружень. Оскільки розмах $\Delta\sigma_y^*$ визначає розмір зони d^* , яка утворюється під дією циклічного навантаження, то можна вважати, що $K_{\sigma} = K_f$, де K_f – це коефіцієнт концентрації циклічних напружень, який визначається за границею витривалості гладкого і надрізаного зразків [12].

Таким чином, значення K_f встановлюють еспериментально для кожного матеріалу, геометрії зразка та концентратора напружень.

Зону формування початкової макротріщини можна встановити, аналізуючи поверхню зламу за допомогою мікрофрактограм. Ця методика дає задовільні результати, коли під час переходу від мікро- до макротріщини різко змінюється мікромеханізм руйнування. Параметр d^* можна встановити безпосередньо, досліджуючи кінетику мікротріщини [12].

Серед непрямих експериментальних методів визначення параметра d^* універсальним є підхід, що базується на обробці залежностей $[\Delta\sigma_y(0), N_i]$, де N_i – кількість циклів до зародження початкової макротріщини. Він ґрунтується на таких трьох припущеннях [12].

– параметр d^* не залежить від радіуса вирізу ρ . Це узгоджується з даними рентгеноструктурного аналізу приповерхневих шарів зразків з різною гостротою вирізу;

– розмах локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$ можна розрахувати, знаючи розподіл напружень в околі концентратора з радіусом вирізу ρ , визначений у пружній поставі задачі;

– для двох вирізів із радіусами ρ_1 і ρ_2 розмах локальних напружень в

околі їх вершин однаковий, якщо однакова кількість циклів до зародження початкової макротріщини в обох випадках така сама.

Існує певна тенденція до зменшення d^* з ростом границь текучості $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B матеріалу, що чітко простежується для сталей у мало- і багатоцикловій областях, а для алюмінієвих сплавів - лише в малоцикловій (рис. 1.4). Переходячи від багато- до малоциклової області значення часто зменшується або залишається сталим. Водночас матеріали різного класу за однакових границь текучості або міцності мають помітно відмінні (у 2-3 рази) параметри d^* (рис. 1.4), внаслідок дії структурного фактора [12].

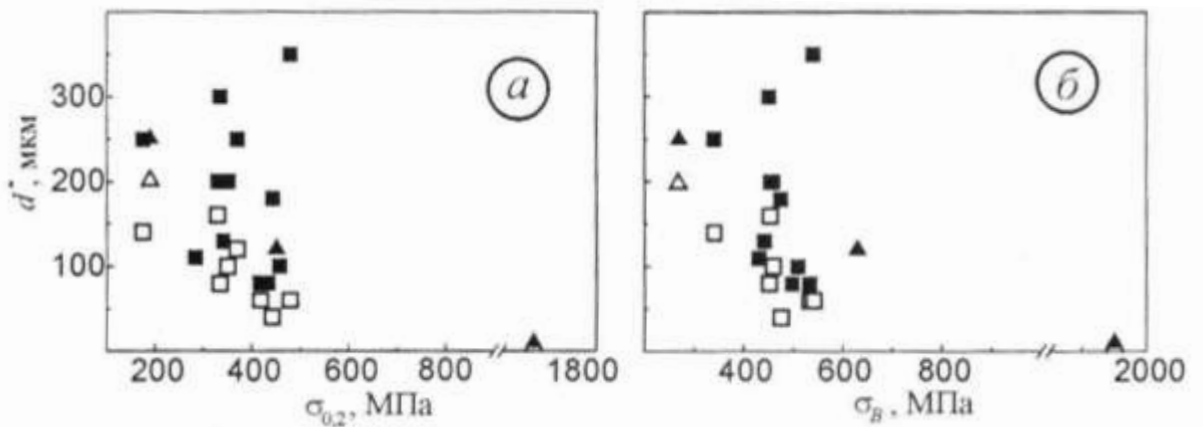


Рисунок 1.4 – Залежність величини зони передруйнування d^* від границі текучості $\sigma_{0,2}$ (а) та міцності σ_B (б) для алюмінієвих сплавів (\square , \blacksquare) і сталей (Δ , \blacktriangle) в малоцикловій (\square , Δ) та багатоцикловій областях (\blacksquare , \blacktriangle)

Параметр d^* можна визначити будуючи залежності (N_i, ρ) , коли на зразках з різними радіусами вирізу ρ встановлюють період зародження початкової макротріщини N_i , за сталих довжини h вирізу і розмаху $\Delta\sigma_N$ номінальних напружень. Зі зменшенням ρ вихід цієї залежності на горизонтальну ділянку (рис. 1.5 а) відповідає моменту, коли $\rho = d^*$. Встановлені таким чином значення d^* (рис. 5 б) добре узгоджуються з оцінкою за

залежністю $[\Delta\sigma_y(0), N_i]$ [12].

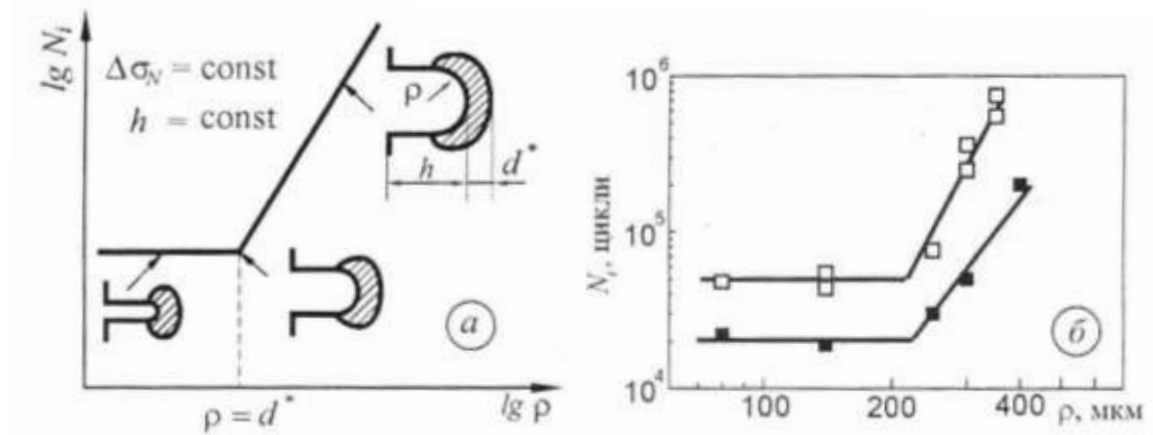


Рисунок 1.5 – Схематична (а) та експериментальна (б) залежності кількості циклів до зародження макротріщини N_i , від радіуса вирізу ρ для визначення розміру зони передруйнування d^* алюмінієвого сплаву Д1604Т на повітрі (\square) і в 3,5 %-му розчині NaCl (\blacksquare)

Між стадіями зародження і росту втомної макротріщини можна розв'язувати обернену задачу, а саме: встановити період зародження втомної макротріщини поблизу концентратора за допомогою діаграм $(da/dN, \Delta K_{eff})$ або $(da/dN, \Delta \varepsilon^*)$ росту макротріщини. Для даної геометрії зразка (рис. 1.6 а) і заданого розмаху навантаження ΔP обчислюють розмах номінальних напружень $\Delta\sigma_N = f(\Delta P, W, t)$ де W і t відповідно ширина і товщина зразка. Потім для заданого ρ знаходять розмах максимальних напружень у вершині концентратора $\Delta\sigma_y(0)$. Якщо відомий теоретичний коефіцієнт концентрації напружень K_t , то $\Delta\sigma_y(0) = K_t \Delta\sigma_N$. В інших випадках, наприклад для компактного зразка (рис. 1.6 а), розмах $\Delta\sigma_y(0)$ можна розрахувати через КІН ΔK еквівалентної тріщини. Після цього, знаючи параметр d^* і розподіл напружень $\Delta\sigma_y(x, 0)$, визначають розмах локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$.

Далі розраховують розмах ΔK_{eff} за формулою [12]

$$\Delta\sigma_y^* = 1,128 \Delta K_{eff} / \sqrt{d^*}, \Delta K_{eff} = 0,886 \Delta\sigma_y^* \sqrt{d^*} \quad (1.2)$$

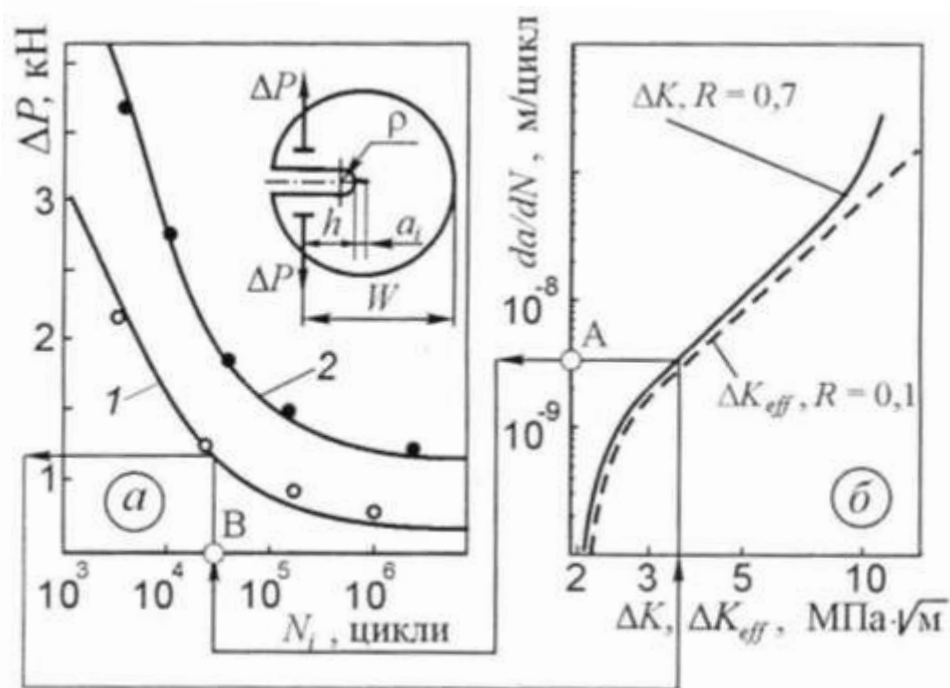


Рисунок 1.6 – Розрахунок-прогноз кількості циклів N_i (до зародження втомної макротріщини довжиною $a_i = d^*$, коли заданий розмах навантаження ΔP (лінії 1, 2), та відповідні експериментальні дані (символи) для дискового компактного зразка із алюмінієвого сплаву 1420T1 при $\rho = 0,75$ мм (лінія 1 і символ ○) та $\rho = 4,0$ мм (лінія 2 і символ ●)

Використовують діаграму $(da/dN, \Delta K_{eff})$, яку аналітично можна виразити рівнянням

$$da/dN = C(\Delta K_{eff} - \Delta K_{th\,eff})^n \quad (1.3)$$

(для сплаву 1420Т1 $\Delta K_{th\,eff} = 2\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$;
 $C = 2,8 \cdot 10^{-9} (\text{м/цикл}) / (\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}})^n$; $n = 1,4$), за розрахованим значенням
 ΔK_{eff} встановлюють відповідну швидкість da/dN (рис. 1.6 б, точка А) [12].
Тоді, використовуючи співвідношення

$$da/dN = \Delta d / \Delta N = d^* / N_i \quad (1.4)$$

за формулою

$$N_i = d^* / da/dN \quad (1.5)$$

знаходять величину N_i – кількість циклів до зародження початкової макротріщини довжиною $a_i = d^*$ (рис. 1.6 а, точка В) [12].

Простіше цю процедуру виконують за деформаційного підходу. Біля вершини концентратора вимірюють розмах розкриття $\Delta\delta_\rho = \Delta\delta^e + \Delta\delta^p$ і за формулою

$$\Delta\varepsilon^* = \ln \left[1 + \frac{\Delta\delta^e + \Delta\delta^p}{\pi(\rho + d^*)} \right] \quad (1.6)$$

визначають розмах локальних деформацій $\Delta\varepsilon^*$. Далі за експериментально побудованою на стадії росту макротріщини кривою $(da/dN, \Delta\varepsilon^*)$ встановлюють відповідну швидкість da/dN , а відтак за формулою 1.5 період N_i [12].

Період зародження втомної тріщини становить, за різними оцінками, від 30 до 90 % загальної довговічності [8, 13]. Однак такі оцінки досить умовні, оскільки немає загальноприйнятого критерію моменту зародження

макротріщини. На практиці необхідно знати період до зародження тріщини (N_i) і період, за який вона досягне своєї критичної довжини (N_p). Реально, для різних матеріалів співвідношення цих періодів відрізняється.

Дослідженням міцності та довговічності при циклічному навантаженні займались С.В. Серенсен [14-17], І.А. Одінг [18], В.С. Іванова [19, 20], В.П. Когаєв [15-17, 21, 22], В. Вейбулл [23], Е. Оrowan [24], Р.І. Forsyth [25, 26], J.R. Irwin [27-29], Р. Paris [29-32], F. Erdogan [31, 33], В.Т. Трощенко [34-36], В.В. Панасюк [37-39], S. Kocanda [7]. Багато праць С.Я. Яреми та співавторів, зокрема [40-44], присвячені проблемі циклічної тріщинозміцності металів на етапі поширення втомних тріщин.

Під час експлуатації елементи конструкції знаходяться під впливом циклічних навантажень, які мають різний характер: сталоамплітудний, змінно-амплітудний або випадковий. Кожний з цих видів навантажень приводить до втомного пошкодження конструкції.

У тонкостінних елементах конструкції зародження та поширення втомних тріщин відбувається в місцях концентрації напружень, де напружено-деформований стан суттєво відрізняється.

Багато праць, зокрема [45-49], присвячено дослідженню процесів зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвих сплавах. Розрізняють поняття коротких і довгих втомних тріщин. Проблему коротких втомних тріщин окреслено, зокрема в праці S. Pearson [50], який відмітив, що лінійна механіка руйнування не дозволяє описувати розвиток дуже коротких тріщин (0,006-0,5 мм) на відміну від довгої тріщини. Це в подальшому дало поштовх для розширення досліджень у цьому напрямку [45-53].

Попередня пластична деформація істотно впливає на механічні властивості конструкційних матеріалів, зокрема на швидкість поширення втомних тріщин у сталях [54- 60], алюмінієвих сплавах [61-64], міді [65],

титанових сплавах [66].

Значну увагу дослідники приділяють вивченню впливу поверхневого пластичного деформування, та мікроструктури матеріалу на зародження втомних тріщин саме в алюмінієвих сплавах.

Вплив кристалографічної орієнтації на темпи приросту втомної тріщини описано в працях Такака і співавторів [67]. Орієнтація окремих зерен до напрямку приросту тріщини, може збільшити, зменшити або призупиняти приріст втомної тріщини. Тому важливо розглядати роль мікроструктури у моделі поведінки коротких і довгих втомних тріщин.

Значна частина робіт присвячена фрактографічним дослідженням алюмінієвих сплавів [68-71]. Пластична деформація отворів збільшує втомну довговічність зразків з алюмінієвого сплаву. На основі аналізу фрактограм відтворено швидкість і траєкторію поширення втомної тріщини та вказано на домінуючий вплив залишкових стискувальних напружень на зменшення швидкості її поширення [68].

Одним із важливих методів дослідження мікромеханізмів перебігу втомного руйнування є вивчення поверхні руйнування (фрактографія втомного руйнування) [72]. В працях І.А. Одінга [73] і G. Jacoby [74] досліджено вплив параметрів навантаження (амплітуди, частоти, асиметрії циклу і концентрації напружень) на механізми руйнування. Основною характерністю мікрорельєфу поверхні втомного руйнування більшості металів і сплавів є втомні борозенки, перпендикулярні до напрямку її поширення. Вважається, що кожна наступна борозенка утворюється внаслідок затримки втомної тріщини після кожного циклу навантаження. Регулярне борозенкування характерне для алюмінію та його сплавів, інших кольорових металів і сплавів з невисокою міцністю.

Для дослідження перебігу зародження та поширення втомних тріщин успішно застосовується моделювання методом скінчених елементів [75-79]

з симуляцією умов навантаження при розв'язку різноманітних технічних задач, до яких можна віднести задачі опору матеріалів, механіки руйнування тощо. При розгляді скінчених елементів використовують різноманітні методи: метод переміщень, метод напружень, комбінований метод і т.д.

1.2. Закономірності зародження коротких втомних тріщин після поверхневого зміцнення матеріалу

Елементи конструкцій дуже чутливі до процесів втоми на ділянках, ослаблених конструктивними концентраторами напружень, наприклад отворами, виточками, зварними та заклепочними швами, які водночас знаходяться під впливом внутрішніх напружень, а також зовнішнього експлуатаційного навантаження. У зв'язку з цим, для оцінки фактичного стану конструкції, чи безпосередньо певного елемента потрібний комплексний аналіз процесів руйнування. Перспективні підходи для цих досліджень описані у працях В.В. Панасюка, О.П. Остаха [80].

Значна частина досліджень присвячена закриттю втомних тріщин. Наприклад, Джеймс і Morris [81] дослідили, що в механічно і фізично коротких тріщинах, більша пластичність біля вершини тріщини або менший ступінь закриття тріщини, очевидно, є головною причиною, чому короткі тріщини поширюються швидше, ніж довгі, які піддані тому ж номінальному значенню коефіцієнта інтенсивності напружень. Jono і Sugeta [82] дослідили вплив закриття на втомну тріщину довжиною більше 0,2 мм залежно від рівня навантаження. Однак, для тріщини, коротшої, ніж 0,1 мм, впливу закриття не виявили, що можливо є причиною початку прискорення приросту тріщини.

Існує багато видів класифікації коротких тріщин. Наприклад, Рітчі та

Лекфорд [83] поділяють короткі втомні тріщини на чотири типи: механічно малі (порівняно із протяжністю зони локальної пластичності), мікроструктурно малі (порівняно з елементами мікроструктури, звичайно менші розміру зерна), фізично малі (менше 1 мм), хімічно малі (менше 10 мм, їх ріст визначається, в основному, впливом середовища). МакКлунг [84] та МакДауел [85] розрізняють „малі” і „короткі” тріщини та розглядають спеціальний критерій стосовно розміру малої тріщини по відношенню до розміру структурного елемента матеріалу.

Втомні пошкодження та зародження тріщин зазвичай спостерігаються на зовнішній поверхні металу. Проте, інколи втомні мікротріщини зароджуються на певній глибині в області дії максимальних дотичних напружень. Така закономірність спостерігається після пластичного зміцнення поверхні металу. Тоді втомні тріщини ініціюються в області переходу від стискаючих до розтягуючих напружень.

На поверхні деталей завжди присутні мікропошкодження, які утворюються при виготовленні, транспортуванні та ін. [86-88]. Це призводить до підвищення напружень в поверхневому шарі металу на 10-20%, що у свою чергу служить причиною локалізованої пластичної деформації при циклічному навантаженні. Навіть в полі однорідних номінальних напружень поверхневі мікронадрізи, вириви та ін. створюють напруження, які на 7-12% більші, ніж при аналогічних дефектах всередині металу. Негативний вплив поверхневих мікрodefektів стає більш помітним по мірі підвищення міцності матеріалу.

У дослідженнях втомного руйнування матеріалів і елементів конструкцій основна увага приділялася докритичному росту втомних тріщин. При цьому швидкість їх росту визначалась залежно від коефіцієнта інтенсивності напружень. Проте для бездефектних матеріалів основна частка довговічності елементів конструкцій припадає на період зародження

втомних тріщин. Побудовано декілька розрахункових моделей для визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень [89-94]. Однак, відомо [95], що при циклічному навантаженні в околі концентратора напружень, особливо біля тріщини, виникають залишкові деформації і напруження, які слід враховувати при визначенні періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень.

Для підвищення втомної довговічності поверхні деталей машин та механізмів ефективно та доцільно використовувати різні методи поверхневого пластичного деформування. Ці методи нормуються згідно ГОСТу 18296-72 і поділяються на статичні та ударні. При статичних методах обробки робочий інструмент діє на поверхню із сталою силою P . При цьому сили інерції суттєво не впливають на поверхневе пластичне деформування. При ударних методах робочий інструмент багатократно діє на всю оброблювану поверхню чи її частини, при цьому діюча сила P у кожному циклі змінюється від нуля чи від певного значення P_1 до максимального значення. Інструментами для поверхневого пластичного деформування можуть бути ролик, куля, дорн та ін.

Статичні методи зазвичай забезпечують меншу шорсткість поверхні. За допомогою ударних методів можливо досягнути значного зміцнення оброблюваної поверхні, яке характеризується підвищенням мікротвердості, створенням залишкових стискаючих напружень та глибиною зміцненого шару. Однак обробка деякими ударними методами поступається за ступенем зміцнення обробці статичними методами, наприклад, при віброударній обробці ступінь зміцнення зазвичай менша ніж при накатуванні.

Обробка поверхні основана на пластичному деформуванні тонкого шару металу порівняно зі шліфуванням, поліруванням та доводкою має ряд

переваг [96-99]:

- зберігається цілісність волокон металу і утворюється дрібнозерниста структура в поверхневому шарі;
- відсутнє викришування оброблюваної поверхні частинками шліфувальних кругів, полірувальних паст та ін.;
- відсутні термічні дефекти;
- стабільні процеси обробки, які забезпечують сталу якість поверхні;
- можливо досягати мінімального параметру шорсткості поверхні ($R_a = 0,1 \dots 0,05$ мкм та менше) зберігаючи початкову форму заготовок;
- можливо зменшити шорсткість поверхні в декілька разів за один робочий хід інструменту;
- створюються позитивні залишкові стискаючі напруження у поверхневому шарі оброблюваного матеріалу;
- плавно і стабільно підвищується мікротвердість поверхні.

Поверхневий шар деталей при обробці методами поверхневого пластичного деформування формується у результаті взаємодії складних процесів, які проходять в зоні деформування та прилеглих зонах: багатократних пружних та пластичних деформацій, зміни міцності та пластичних властивостей металу, тертя та теплових процесів, зміни мікрота макроструктури, мікрогеометрії поверхні та ін.

Основні параметри поверхневого пластичного деформування це:

- пружна та пластична деформація в зоні деформування;
- площа контакту інструменту з оброблюваною поверхнею;
- сила дії на інструмент;
- напруження, що виникають під дією цієї сили;
- кратність прикладання сили.

Поверхневим пластичним деформуванням обробляють

високонавантажені деталі машин і механізмів, від тримкості яких залежить надійність та довговічність конструкції загалом. Ефективність поверхневого зміцнення залежить від матеріалу, структури, виду напружено-деформованого стану, геометрії елемента конструкції та ін. Важливу роль відіграє вибір методу та режиму зміцнення. Тому при впровадженні методів поверхневого пластичного деформування у виробництво попередньо проводяться аналітичні та експериментальні дослідження у цьому напрямку.

До методів поверхневого зміцнення, які доцільно застосовувати для отворів, належать: дорнування, бар'єрне обтискання, розкатування стінок отвору.

Дорнування поділяється на поверхневе та об'ємне. При поверхневому дорнуванні пластично деформується тільки поверхневий шар, а при об'ємному – пластично деформується поперечний переріз оброблюваної деталі.

Шляхом поверхневого пластичного деформування підвищують втомну довговічність за малоциклової і багатоциклової втоми, при низьких і високих (до $t = 800^{\circ}C$) температурах. Особливо ефективним є використання поверхневого зміцнення при наявності концентраторів напружень. Розрізняють концентратори двох видів: конструкторські (виточки, отвори, гантелі) і технологічні (пори, вириви металу, мікротріщини на поверхні, які виникають внаслідок механічної обробки деталі).

Довговічність деталей з концентраторами напружень після поверхневого зміцнення підвищується у 2 рази і більше. Обробка поверхневим пластичним деформуванням дозволяє частково або повністю нівелювати вплив концентраторів напружень та виробничих мікродефектів.

Зі збільшенням глибини залягання залишкових напружень та їх значення втомна довговічність зазвичай підвищується.

Позитивний вплив дорнування в елементах конструкції з отворами на довговічність, мікротвердість, шорсткість, залишкові стискаючі напруження підтверджено в працях В.В. Воронько [100], Ю.А. Воробйова, В.Н. Степаненко [101], В.Ф. Скворцова, А.Ю. Арляпова [102], Н.Д. Gopalakrishna, Н.Н. Narasimha Murthy, М. Krishna, М.С. Vinod, А.В. Suresh [103], Т.Ю. Степанова [104].

Автори [105] досліджували вплив геометрії дорна (куля або конус) на залишкові напруження стиску та довговічність експериментальних зразків. Було виявлено, що дорн конічної форми забезпечує підвищення втомної довговічності до 6 разів за натягу дорнування 5% (рис. 1.7).

Воронько В.В. [100] досліджував вплив геометрії дорна за допомогою методу скінчених елементів. Проведено порівняльний аналіз впливу переднього (α) та заднього (β) кутів дорна (рис. 1.8) на геометричні параметри вихідного отвору та мікротвердість поверхні на краю отвору.

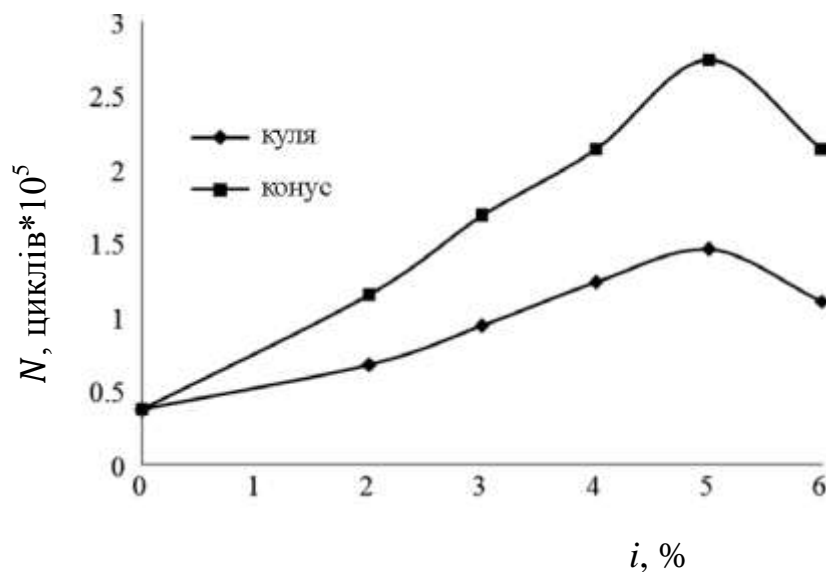


Рисунок 1.7 – Кількість циклів до руйнування експериментальних зразків після дорнування кулею та конусом з натягом дорнування 2-6%

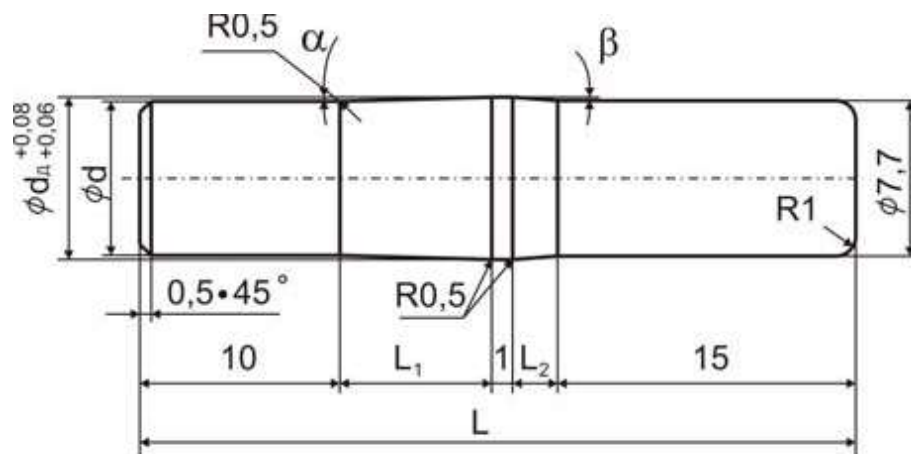


Рисунок 1.8 – Геометричні параметри дорна

У конструкції крила транспортного літака присутні функціональні отвори, наприклад для комунікацій, для кріплення стиків панелей лонжерона, які ще залишаються недостатньо дослідженими. Для забезпечення необхідного ресурсу використовується монолітне потовщення навколо отвору або підсилюючі накладки. Функціональних отворів у лонжероні крила літака є досить багато, тому це призводить до збільшення маси крила літака.

У літакобудуванні поверхневе пластичне деформування є ефективним способом підвищення циклічної довговічності вільних отворів, наприклад для болтових та заклепочних з'єднань та ін. Проте, дорнування поверхні цих отворів не використовується в авіації у повному обсязі. Це пов'язано з низькою продуктивністю, обмеженістю двостороннього доступу, високою вартістю та ін. Тому доцільно застосовувати дорнування для важливих одиничних отворів, наприклад функціональні отвори у лонжеронах та стрингерах крила транспортного літака (стики панелей лонжерона, отвори для комунікацій та перетікання палива та ін.).

1.3. Дослідження НДС в околі отворів методом скінчених елементів

Швидкий розвиток обчислювальної техніки та її широке застосування у всіх сферах життя призвело до того, що в будь якій області знань фахівець повинен добре орієнтуватися у використанні комп'ютера та володіти необхідними програмними засобами. Інженер не може обійтися без систем автоматизованого інженерного аналізу (CAE – Computer Aids Engineering), таких як ANSYS, ABAQUS, NASTRAN та інші. Вони дозволяють не просто якісно моделювати різні фізичні процеси, але і дозволяють дослідити відгук змодельованої системи на зовнішні впливи, такі як температура, напруження, магнітні поля та інше.

Одним з найпоширеніших комплексів, що використовує метод скінчених елементів є ANSYS [75-79]. При розрахунку методом скінчених елементів вважається, що тіло суцільне та має нескінченну кількість ступенів вільності. Тіло поділяється на елементи з обмеженими розмірами і описується поведінка системи в цілому, використовуючи характеристики окремих елементів.

Вибір типу, розміру та форми елемента залежить від форми модельованого тіла та параметрів напружено-деформованого стану. Для моделювання одновісного розтягу (стиску) використовується стержневий елемент, а для моделювання плоского напруженого стану використовується двовимірний скінчений елемент, наприклад трикутник або чотирикутник. Для моделювання об'ємного напруженого стану використовуються такі елементи як тетраедр, шестикутник та призма.

Скінченим елементам можна надати певні властивості, які задаються за допомогою констант та опцій. Для моделювання деформацій необхідно задати пружні властивості (коефіцієнт Пуасона), а також дійсні діаграми деформування.

Суцільне тіло характеризується скінченим числом незалежних параметрів (ступенів вільності), які визначаються у вузлах сітки скінчених елементів. Координати та переміщення вузлів та точок можуть визначатися в різних системах координат. У комплексі ANSYS використовуються глобальна та визначена користувачем системи координат. Перша прив'язана до всієї моделі, а друга – до певних елементів моделі.

Користувач ANSYS отримує набір інструментів, що дозволяють моделювати фізичні явища.

Унікальну функціональність ANSYS забезпечують засоби динамічного аналізу, які є складовою частиною єдиного комплексу. Для швидкого і точного розрахунку явним методом важливою умовою є використання розбивки (сітки) високої якості. Середовище ANSYS Workbench містить потужні автоматичні генератори сітки скінчених елементів.

Висновки

1. Попередня пластична деформація істотно впливає на механічні властивості конструкційних матеріалів. Дослідженнями в даному напрямку займаються провідні науково-дослідні установи, інститути, а також науково-технічні комплекси виробників і користувачів авіаційної і аерокосмічної техніки, зокрема "Boeing", "Airbus", "NASA", "NAVAL". АНТК ім. К.О. Антонова, тощо.

2. У дослідженнях втомного руйнування матеріалів і елементів конструкцій основна увага приділялася докритичному росту втомних тріщин. При цьому швидкість їх росту визначалась коефіцієнтами інтенсивності напружень. Проте для бездефектних матеріалів основна частка довговічності елементів конструкцій припадає на період зародження втомних тріщин. На сьогодні вже побудовано декілька розрахункових моделей для визначення періоду зародження втомних тріщин біля

концентраторів напружень. Однак при циклічному навантаженні в околі концентратора напружень, особливо біля тріщини, виникають залишкові деформації і, особливо, напруження, які слід враховувати при визначенні періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень.

3. Для дослідження процесу зародження та поширення втомних тріщин успішно застосовується моделювання методом скінчених елементів з симуляцією умов навантаження при розв'язку різноманітних технічних задач.

Розділ 2. Методики дослідження зародження і поширення втомних тріщин

2.1. Зразки і формули для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень

Для визначення механічних властивостей алюмінієвого сплаву Д16чТ було проведено відповідні випробування згідно ГОСТ 1497-84.

Необхідність цих досліджень обґрунтована двома обставинами:

– необхідність верифікації даних виробника на предмет відмінності механічних властивостей, які можуть відрізнятись до 10%;

– необхідність точного визначення необхідного навантаження зразків, а також діаграми деформування матеріалу для створення розрахункової моделі в середовищі програми ANSYS.

Для досліджень на втому використовувалися плоскі веслоподібні зразки товщиною 6 мм з алюмінієвого сплаву Д16чТ з центральним отвором виготовлені по ГОСТ 25.502-79. Робочу поверхню зразка шириною ≈ 20 мм, вздовж напрямку РВТ додатково полірували до рівня шорсткості $R_a=0,05$. На цій поверхні, перпендикулярно до напрямку РВТ наносили розмітку, дискретністю $1 \pm 0,01$ мм. Для цього використовували спеціальне тарувально-розміточне пристосування, виготовлене на основі механізму мікроподачі мікроскопа, уніфікованої мікрометричної головки МГ-0,01 і індикатора годинникового ИЧТ-0,001. Геометрія та фото досліджуваних зразків показана на рис. 2.1.

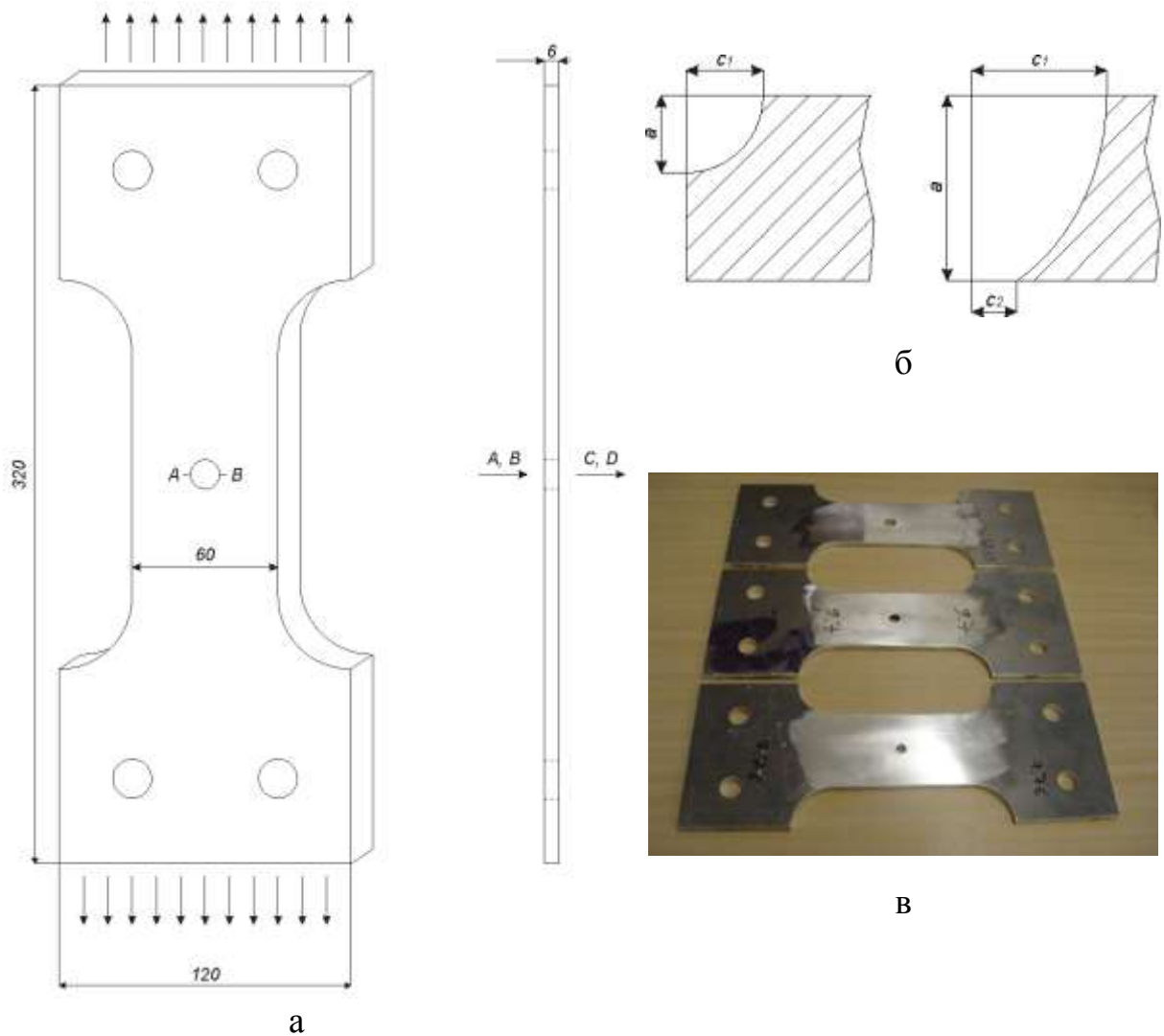


Рисунок 2.1 – Зразки для досліджень на втому: а – креслення зразків та напрямок дорнування (А і В – вхід дорна, С і D – вихід дорна); б – схематичне креслення поширення тріщини (а – довжина тріщини на циліндричній поверхні отвору; c_1 – довжина тріщини на вході дорна; c_2 – довжина тріщини на виході дорна); в – фото зразків для випробувань ВТОМОЮ

Розміри а (на циліндричній поверхні отвору), c_1 (на вході дорна) та c_2 (на виході дорна) використовувалися для характеристики швидкості поширення та форми фронту тріщини (рис. 2.1б). Для позначення місця зародження втомної макротріщини використовували символи А, В, С, D.

Відповідно А і В – це лицева сторона експериментального зразка (вхід дорна), С і D – тильна сторона експериментального зразка (вихід дорна).

Для поверхневого пластичного деформування циліндричної поверхні отворів використовувалося квазістатичне дорнування. Зразки виготовляли дванадцяти типів, відповідно з різним діаметром отвору та величиною відносного натягу дорнування.

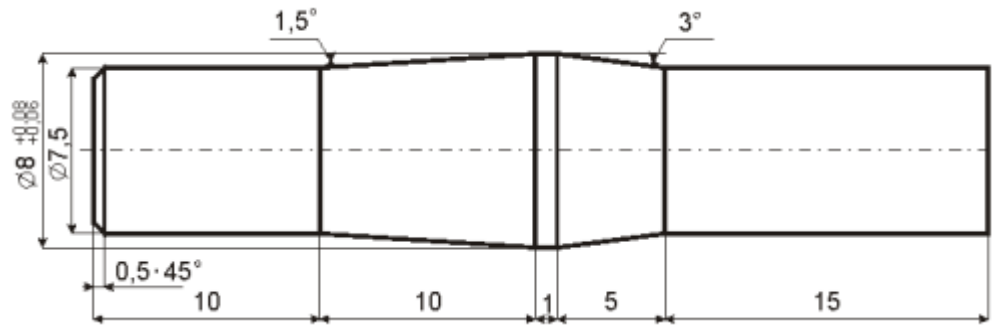
Геометричні параметри зразків для досліджень, асиметрія циклу навантаження та відношення максимального напруження σ_{\max} до границі міцності σ_B алюмінієвого сплаву Д16чТ подані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

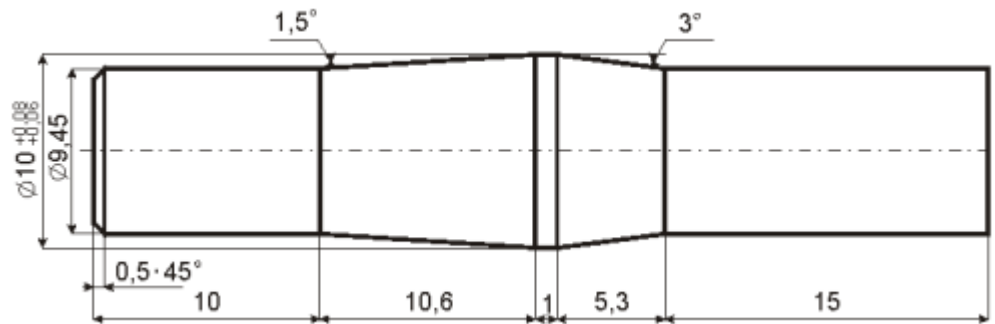
Розміри та параметри циклічного навантаження зразків

Пластини для випробувань втому			Пластини змодельовані МСЕ			Відхилення
$d_{\text{поч}}$ мм	$d_{\text{кінц}}$ мм	i , %	$d_{\text{поч}}$ мм	$d_{\text{кінц}}$ мм	i , %	$\frac{i_e - i_t}{(i_e + i_t)/2} \cdot 100\%$, %
8,03	8,03	0	8	8	0	0
7,91	8,03	0,0149	7,92	8	0,01	39,64
7,83	8,02	0,0237	7,84	8	0,02	16,89
7,75	8,01	0,0325	7,76	8	0,03	7,88
10,04	10,04	0	10	10	0	0
9,91	10,02	0,011	9,9	10	0,01	9,32
9,82	10,01	0,019	9,8	10	0,02	5,23
9,68	10	0,032	9,7	10	0,03	6,45
12,02	12,02	0	12	12	0	0
11,86	12,02	0,0133	11,88	12	0,01	28,41
11,73	12,01	0,0233	11,76	12	0,02	15,30
11,67	12	0,0275	11,64	12	0,03	8,69565

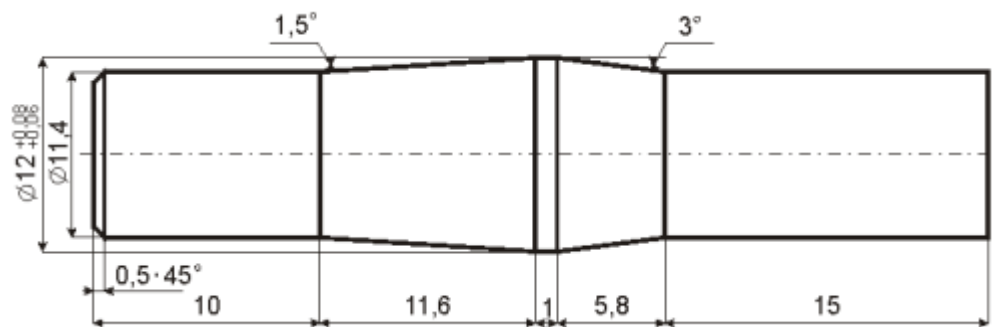
Дорни, для реалізації процесу поверхневого зміцнення, виготовляли із сталі та загартовували до твердості 47-48 HRC. На рис. 2.2 зображено креслення інструменту, який використовувався для дорнування отворів різного діаметра у досліджуваних разках.



а



б



в

Рисунок 2.2 – Креслення дорнів для квазістатичного дорнування отворів: а – дорн на 8 мм, б – дорн на 10 мм, в – дорн на 12 мм

Для квазістатичного дорнування зразків використовували прес РУЕ-100. Процес поверхневого пластичного деформування реалізовували за зусилля 30т., що забезпечувало плавне проходження зони зміцнення дорном. В табл. 2.2 наведено основні технічні характеристики пресу РУЕ-100.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики пресу РУЕ-100

Номінальне зусилля, т	100
Робоче зусилля, кг/см ²	180
Номінальна напруга, В	380
Потужність двигуна, кВт	17
Номінальний струм, А	35
Швидкість подачі, мм/с	вгору – 200 вниз – 200
Діапазон температур, °С	10-45
Відстань між столом та повзуном, мм	800
Хід повзуна, мм	500
Виліт, мм	300
Кріпильна площа, мм	530x400
Робоча площа, мм	750x560
Вага, кг	5040
Габарити, мм	2000x1010x2900

На рис. 2.3 показано фото процесу дорнування (рис. 2.3,а) та дорнів (рис. 2.3,б).



Рисунок 2.3 – Фото пресу PUE-100 з закріпленим дорном в процесі дорнування досліджуваного зразка (а), фото дорнів (б)

В зоні конструктивних концентраторів напружень, в авіаконструкціях виникають експлуатаційні втомні тріщини. Для визначення граничного стану таких елементів конструкцій використовують підходи механіки руйнування, а їх ресурс встановлюють за принципом допустимої пошкоджуваності, базуючись на характеристиках в'язкості руйнування, залишкової міцності, швидкостей росту тріщини тощо [12]. Проблема малих тріщин є однією з найактуальніших. Ці тріщини з'являються перш за все в околі отворів (кріпильних, оглядових тощо). Застосовуючи механіку руйнування до таких тріщин, необхідно знати НДС біля їх фронту, який визначається відповідними КІН.

Розв'язати двовимірні задачі про НДС в околі наскрізних (вздовж усього перерізу тіла) тріщин, які виходять з отворів практично довільної конфігурації, на сьогодні не важко завдяки достатньо ефективним чисельним методам. Однак у дійсності тріщини біля отворів часто кутові (тобто чвертьеліпсоподібні в перерізі), розташовані на перехресті поверхні вирізу і бокової поверхні деталі, а також всередині вирізів у вигляді півеліпсів, де велика піввісь тріщини зазвичай паралельна осі вирізу [12].

Такі тріщини поширюються від одного, двох або декількох осередків з одного або обох боків отвору. Вони поступово проростають по товщині пластини і пронизують її, далі фронт тріщини випрямляється, наближаючись до прямої, перпендикулярної боковим поверхням, тобто тріщина стає типово наскрізною. Задачі для визначення КІН поверхневих і кутових тріщин тривимірні і їх розв'язки значно складніші, ніж двовимірних. Важливою особливістю тут є те, що такі задачі потрібно розв'язувати в пружно-пластичній постановці, оскільки тріщини ростуть, як правило, в пластичних зонах конструктивних концентраторів напружень. Тому формули для КІН наближені і містять поправкові функції, побудовані на підставі певних аналогій і припущень [12].

Вперше задачу про розтяг безмежної пластини, послабленої круговим отвором, з однією чи двома колінеарними радіальними тріщинами розв'язав Бові. Цей розв'язок має вигляд

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}f(a/D) \quad (2.1)$$

де σ – номінальні напруження; a – довжина тріщини, яку вимірюють від краю отвору діаметром D . Значення функції $f(a/D)$, що враховує отвір, для однієї f_1 та двох f_2 симетричних радіальних тріщин наведені на рис. 2.4 [12]. Якщо тріщина не є занадто мала відносно отвору, то його можна розглядати як частину тріщини, за довжину якої приймають півсуму $L = (D + a)/2$ та $L = (D + 2a)/2$, відповідно для однієї та двох тріщин. Таким чином, функцію f у формулі (2.1) можна виразити наближено [12]:

$$f_1 = \sqrt{\frac{(D/a + 1)}{2}} \quad \text{та} \quad f_2 = (D/2a + 1) \quad (2.2)$$

Порівняння розрахунків за формулами (2.1) і (2.2) показує (рис. 2.4), що різниця між ними невелика.

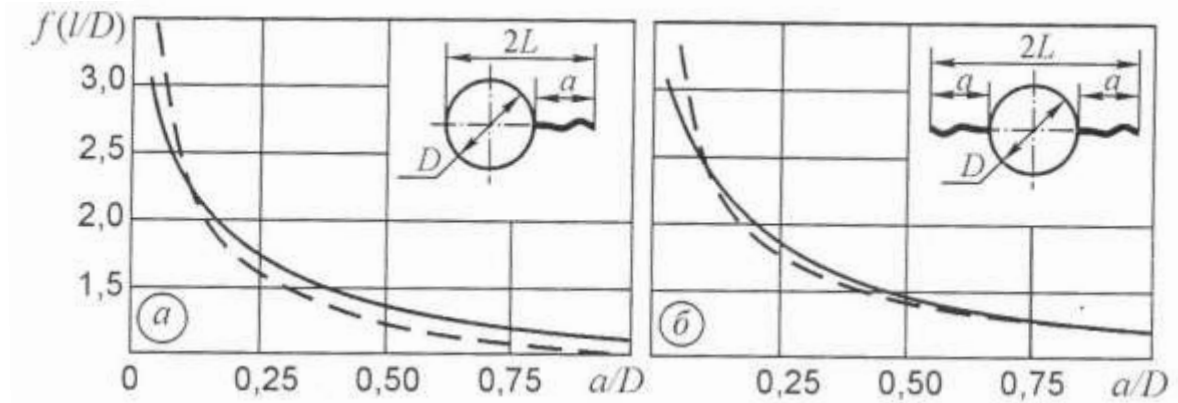


Рисунок 2.4 – Порівняння поправкової функції $f(a/D)$, розрахованої Бові (суцільна лінія) та за наближеною формулою (2.2) (штрихова) для однієї (а) та двох (б) тріщин.

Для експериментальних досліджень росту тріщин від кругових отворів та U-подібних вирізів, як правило, використовують прямокутні пластини і диски кінцевих розмірів. Зокрема, для встановлення КІН у вершині коротких симетричних тріщин завдовжки a_s (рис. 2.5), що виходять з центрального отвору радіуса R в прямокутній пластині шириною W і товщиною t під дією розтягувальної сили F , запропоновано апроксимаційну формулу [12]

$$K_{Is} = \frac{F\sqrt{\lambda_s}}{t\sqrt{W}} (b_0 + b_1\lambda_s + b_2\lambda_s^2 + b_3\lambda_s^3) \quad (2.3)$$

де $\lambda_s = a_s/W$, b_0, b_1, b_2, b_3 - певні коефіцієнти [12].

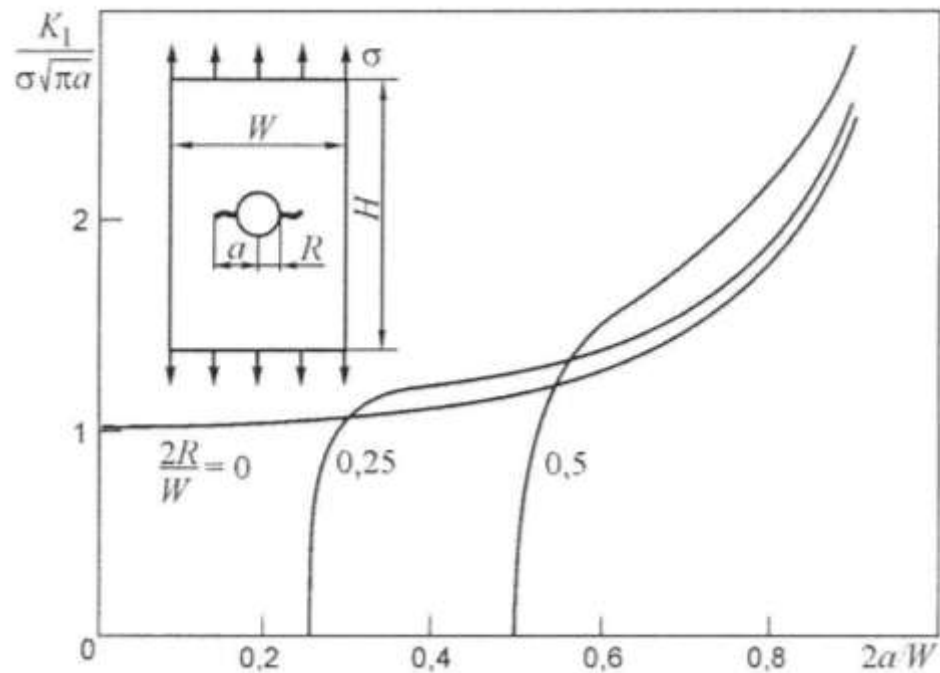


Рисунок 2.5 – КІН для симетричних тріщин, що виходять з кругового отвору в прямокутній пластині за одновісного розтягу.

Під час випробувань зразків з центральним отвором тріщина, як правило, зароджується неодноразомно з обох його боків. Тому важлива задача визначення КІН біля вершин двох тріщин різної довжини, що виходять з отвору. Для цього в праці запропонована наближена методика встановлення КІН за довільної асиметрії тріщин. Для прямокутної пластини (рис. 2.6) цю задачу розв’язано МСЕ [12]. Через обчислювальні труднощі значення КІН знайдено для довжин тріщин $a \geq 0,1R$ з відносною похибкою в межах декількох відсотків.

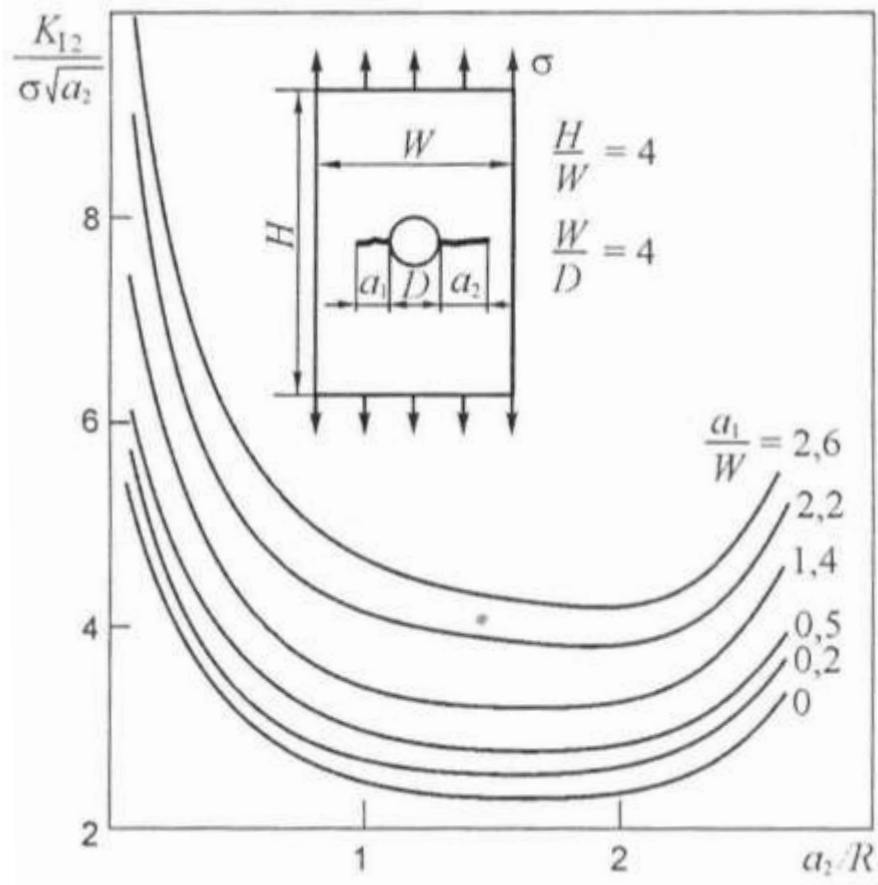


Рисунок 2.6 – КІН для двох тріщин різної довжини, що виходять з одного кругового отвору в прямокутній пластині за одновісного розтягу.

Усі формули, отримані для поверхневих тріщин, ґрунтуються на розв'язку задачі про НДС необмеженого тіла, послабленого еліптичною тріщиною [12]. Задачі про визначення КІН по контуру поверхневих півеліптичних тріщин у пластинах (рис. 2.7) розв'язували багато дослідників. Порівняння відомих формул для найпростішого випадку навантаження (розтяг пластини) показало, що для малих тріщин значення КІН, розраховані за різними формулами, узгоджуються в розумних межах [12]. Однак із ростом глибини тріщини різниця між ними різко зростає, досягаючи 80 % для тріщин, відношення b/t (глибини до товщини пластини) яких рівне 80 %.

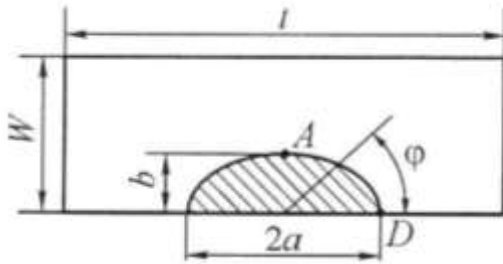


Рисунок 2.7 – Поверхнева півеліптична тріщина в смузі.

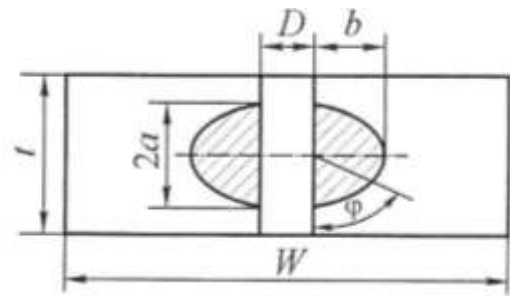


Рисунок 2.8 – Півеліптичні тріщини, що виходять на поверхню отвору.

Кращими виявилися результати розрахунку методом просторових скінченних елементів, які описують аналітичні залежності [12]:

$$K_I(\varphi) = K_{Ie} F\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{W}, \frac{b}{t}, \varphi\right) \quad (2.4)$$

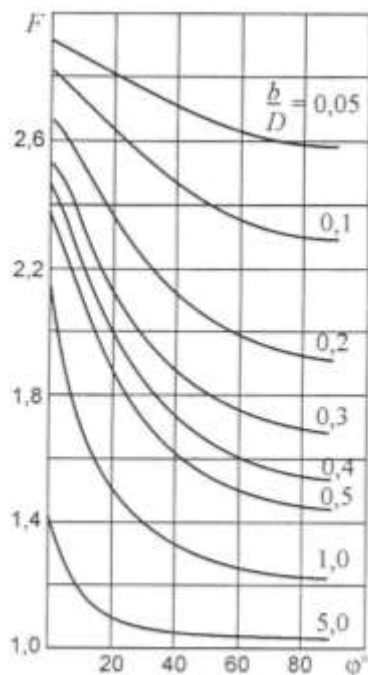


Рисунок 2.9 – Поправкова функція $F(b/D, \varphi)$ для обчислення КІН у разі двох симетричних півеліптичних тріщин біля отвору [12].

де K_{Ie} – КІН для еліптичної у плані тріщини в просторі; F – поправкова функція. Розрахунок ускладнюється тим, що тріщина розташована на поверхні отвору в зоні концентрації напружень. Для того, щоб врахувати вплив отвору, розглянули дві симетричні півеліптичні тріщини (рис. 2.8) і побудували графіки поправкової функції F (рис. 2.9) для рівняння (2.4). Виявилось, що функція F слабо залежить від відношення a/b і, в гіршому випадку,

відхиляється на 7 %.

Показано, що функція F з точністю до 4 % узгоджується із розв'язком Бові, якщо a/b необмежено зростає, тобто еліпс перетворюється у відрізки прямої, а тріщина – у наскрізну.

Розв'язок задач про КІН для кутових тріщин (рис. 2.10 а) вимагає складного тривимірного аналізу. Дослідниками зроблено лише наближені оцінки. Здебільш вони базуються на розв'язку для еліптичної тріщини у безмежному тілі і уточненні шляхом множення на поправкові функції, що враховують отвір та вільні бокові поверхні пластини.

Просту інженерну формулу для визначення КІН у точці A (рис. 2.10 а) запропонував Сміт:

$$K_I = \frac{\sigma}{E(k)} \sqrt{\frac{\pi a^2}{b}} f(b/D) \quad (2.5)$$

де σ – номінальні напруження; a і b – півосі, паралельні осі отвору та поверхні зразка, відповідно; $f(b/D)$ - поправкова функція Бові; $E(k)$ – повний еліптичний інтеграл другого роду [12].

Для чверті кола ($b = a$) рівняння (2.5) набуває виду [12]

$$K_I = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}} f(a/D) \quad (2.6)$$

Обидві формули застосовують, якщо $a < 0,5t$ (t - товщина пластини).

Наведені формули не враховують зміну K_I вздовж фронту тріщини і відносяться до деякої середньої її довжини.

Зовсім інший підхід ґрунтується на тому, що отвір та тріщину

об'єднують в одне ціле так само, як для наскрізної тріщини. Куту тріщину розглядають як частину еліптичної з півосями a і b , друга вершина якої знаходиться на протилежному боці отвору (рис. 2.10 б).

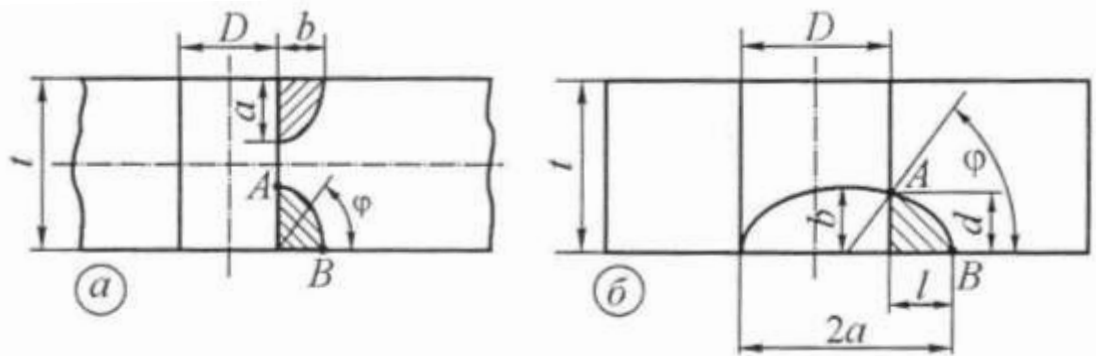


Рисунок 2.10 – Кутові тріщини (а) та схема визначення ефективної еліптичної тріщини (б) [12].

Зокрема, в точці A перетину фронту тріщини з отвором [12]

$$K_I = 1,2 \frac{\sigma \sqrt{\pi d}}{E(k)} \left\{ \frac{d^2(d+l)^2(D-l)^2 + 4d^2(D+l)^2 D l}{4D^2 l^2 [4d^2 - (D-l)^2]} \right\}^{1,4} \quad (2.7)$$

причому еліптичний інтеграл $E(k)$ обчислюють, коли $a/b = l/\sqrt{Dl}$.

2.2. Дослідження зародження та поширення втомних тріщин від функціональних отворів

Для забезпечення необхідної точності навантажування, можливості подальшої автоматизованої обробки великих масивів експериментальних даних в роботі використовувалась електрогідравлічна випробувальна машина СТМ-100, виробництва АНТК імені О.К. Антонова. Керування

електрогідравлічною машиною здійснюється за допомогою ПК який з'єднується з машиною через контролер моделі В1-07-005 виробництва TESTRESOURCES ASIA BiSS. Випробувальна машина забезпечує проведення випробувань на статичний або циклічний одновісний розтяг-стиск, за асиметрій циклу навантаження $-1 \leq R \leq 1$. Форма циклу навантаження: лінійна, прямокутна або синусоїдна. Керування машиною можна здійснювати контролюючи задане зусилля P (м'яке навантаження) чи деформацію ε (жорстке навантаження). Похибка задаючого сигналу і точність вимірювання контрольованих величин не перевищує 1% максимального значення встановленого масштабного діапазону. Основні технічні характеристики машини наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Технічні характеристики електрогідравлічної випробувальної машини STM-100

Межі зусилля статичного розтягу-стиску	0...100 кН
Межі зусилля циклічного навантаження	± 80 кН
Робоча частота циклічного навантаження	0,005...100 Гц
Максимальний тиск гідросистеми	27,5 МПа
Продуктивність гідростанції	12...22 л/хв
Споживана потужність електродвигуна	11 кВт
Хід робочого штока	0...100 мм
Діапазон давача переміщення плунжера	0...100 мм
Діапазон вимірювання зусиль динамометром	± 100 кН
Масштабування керуючого параметра	1:1; 2:1; 5:1

Реалізація статичного чи циклічного навантажування здійснюється в автоматизованому режимі. Керування машиною СТМ-100 виконується від персонального комп'ютера через програмне забезпечення (базовий модуль) MTL32 Base Module в якому задаються усі робочі параметри: аварійні межі каналів, коефіцієнти регулювання апаратні і програмні, встановлюються лічильники. Випробування проводяться в модулі TestBuilder.

MTL32 Base Module та TestBuilde забезпечують виконання наступних функцій:

- підготовку параметрів і конфігурацію одного з керуючих каналів (P, E, S);
- підготовку параметрів і конфігурацію за чотирма незалежними вимірювальними каналами ($P, E1, E2, S$);
- підготовка і реалізація програми керуючого і вимірювальних каналів;
- реєстрація вибраних керуючих і контрольованих параметрів випробувань, а також їх вивід на екран ПК або експорт у документ формату Microsoft Excel;
- контроль реалізації програми випробувань і установлених аварійних меж каналів;
- можливість зміни програми каналів в процесі випробувань або її зупинки з наступним продовженням з місця зупинки або виходом на заданий рівень статичного навантаження.

Для забезпечення можливості циклічного навантаження плоских зразків використовували затискачі конструкція яких розроблена Ю.І. Пиндусом (рис. 2.11).

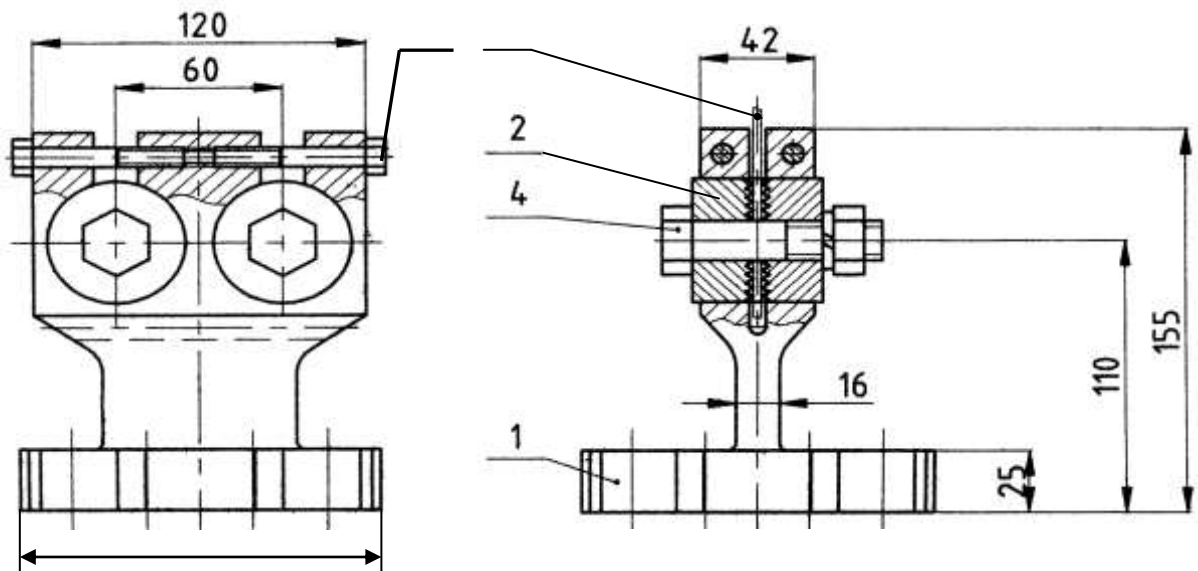


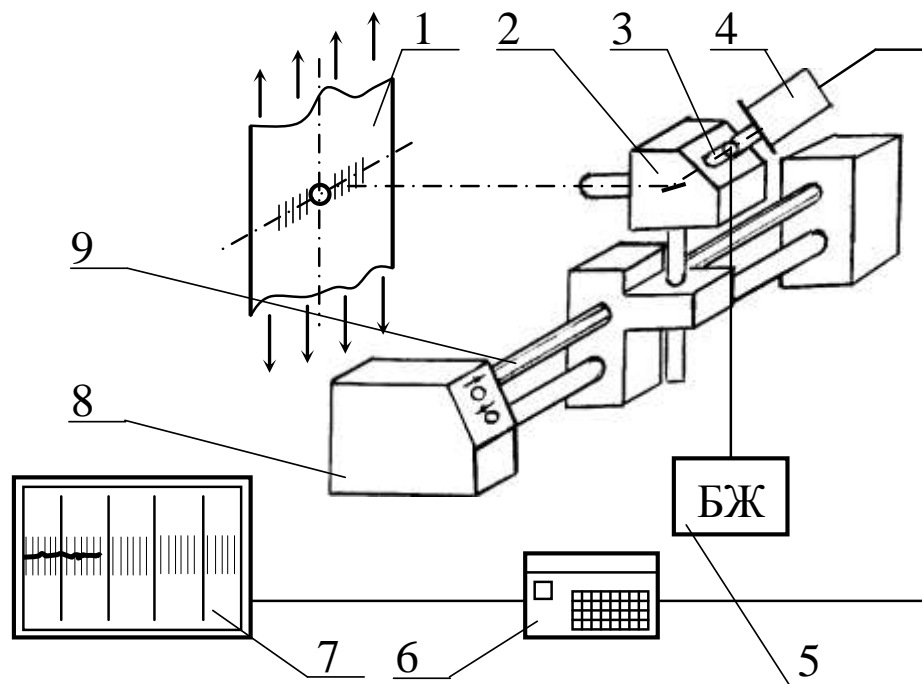
Рисунок 2.11 – Конструкція затискачів для передачі зусиль від випробувальної машини СТМ-100 до плоских зразків.

При розробці конструкції були виключені рухливі з'єднання з зазорами, що забезпечило підвищену жорсткість зв'язку машини із зразком і виключення можливості ударів при зміні напрямку навантажування (розтяг - стиск). Для жорсткого кріплення вилки опори 1 до тяги машини передбачено вісім отворів для болтових з'єднань. Зусилля від тяги до зразка передається за допомогою вісьмох шайб 2. Для поліпшення зчеплення із зразком на шайбах передбачені кільцеві рівці(зубці) з боку прилягання до зразка 5. Ці рівці також перешкоджають розширенню матеріалу в зоні контакту і виникненню стискувальних напружень поза цією зоною, тобто забезпечується підсилення зони отворів.

Шайби притискаються до зразка з допомогою болтових з'єднань 4 без контакту болта із зразком. Таке кріплення вважається міцнішим і спроможне передавати більші зусилля, ніж, наприклад, кріплення з використанням пальця [105].

Тягові зусилля від машини до шайб передаються через вилку 1. З допомогою болтів 3 шайби жорстко затискаються в отворах вилки. Всі деталі виготовлені з сталі 30ХГСА, загартовані до $\sigma_e = 1200 \pm 10 \text{ МПа}$.

Періодом зародження втомної макротріщини вважали таку кількість циклів, коли на поверхні зразка буде видно тріщину довжиною 0,25 мм. Довжину стартової втомної тріщини (c_1) вимірювали на поверхні зразка. За моментом появи і розвитком втомних тріщин спостерігали використовуючи дві системи змонтовані на базі промислової телевізійної установки ПТУ-44 (рис. 2.12). Якісне спостереження за вістрям тріщини і приростом її довжини з використанням системи забезпечується за рахунок значного діапазону дискретно регульованого збільшення досліджуваної зони при



високій роздільній здатності.

Рисунок 2.12 – Система для спостереження за зародженням та поширенням втомної тріщини.

До складу системи входять:

- досліджуваний зразок 1, що кріпиться в затискачах (рис. 2.);
- бінокулярний мікроскоп МБС-10;
- освітлювальне приспособлення 3, сила світлового потоку освітлювача регулюється блоком живлення 5;
- телевізійна камера 4 типу КТП-64;
- пульт керування 6 типу ПУ-80;
- монохромний відеоконтрольний пристрій 7 типу ВК 50;
- регульований електричний привід 8, що забезпечує переміщення мікроскопа вздовж напрямку росту тріщини з допомогою гвинтового вала 9.

Використання конструкції дає можливість швидко (з регульованою швидкістю) переміщати оптичну вісь мікроскопа вздовж напрямку росту тріщини з трьома ступенями вільності, регулювати яскравість і контрастність зображення, рівень освітлення робочої поверхні. Для вимірювання приросту довжини тріщини можливе використання накладної координатної сітки. Системою забезпечується збільшення на моніторі $\times 230$; 180 ; 90 ; 45 . Розміри зображення 308×394 мм. Роздільна здатність 500×600 ліній.

2.3. Фрактографічні дослідження зародження та поширення втомних тріщин

Мікрогеометрію поверхні руйнування було досліджено на растровому електронному мікроскопі РЭМ-106И (виробництво Сумського ВАТ “SELMI”, м. Суми). Особливість мікроскопу полягає в тому, що він призначений для вимірювання лінійних розмірів елементів топології і

параметрів мікрорельєфу поверхні різноманітних об'єктів в твердій фазі і вимірювання масової долі елементів в складі об'єктів методом рентгенівського мікроаналізу. У режимі низького регульованого вакууму мікроскоп за допомогою високоефективного детектора відбитих електронів забезпечує дослідження діелектричних зразків, зображення яких в високому вакуумі спотворюється накопиченням заряду електронів первинного пучка. У режимі низького вакууму зображення непровідних матеріалів можна отримати без попереднього напилення.

2.4. Аналіз НДС у функціональних отворах методом скінчених елементів

Для дослідження НДС в околі функціонального отвору під час і після дорнування з різним відносним натягом була створена скінчено-елементна модель чверті досліджуваного плоского зразка з центральним отвором.

НДС аналізували за наступними параметрами:

- максимальні локальні напруження σ_{\max} за одновісного циклічного розтягу;
- залишкові напруження після дорнування σ_{res} ;
- напруження після дорнування та одновісного циклічного розтягу $\sigma_{res+cycle}$.

Сітка скінчених елементів для моделей була створена за допомогою елемента Solid95 – це об'ємний елемент для задач механіки деформівного твердого тіла з двадцятьма вузлами. Це фактично квадратична версія елемента Solid45, що має 8 вузлів. Елемент Solid95 використовує нерегулярну форму сітки без втрати точності, має спільні форми переміщень і тому може адекватно описувати моделі зі скривленими

дійсних складових матеріалу.

Для дослідження перебігу дорнування отвору використовувався комплекс нелінійної динаміки ANSYS Explicit Dynamics. Алгоритми основані на вирішенні рівнянь механіки деформівного твердого тіла здатні достатньо точно прогнозувати складні фізичні явища, зокрема значні деформації, руйнування, взаємодію між твердими тілами. Програмні комплекси нелінійної динаміки інтегровані у зручний графічний інтерфейс.

Типові процеси, що можуть бути реалізовані в комплексі ANSYS Explicit Dynamics:

- квазістатика;
- високошвидкісні та ультразвукові удари;
- проникнення тіла в різні середовища;
- руйнування з утворенням друзок;
- процеси із складними контактними взаємодіями;
- технологічні процеси з великими пластичними деформаціями;
- ударні випробування при падінні;
- вибухове навантаження об'єктів;
- взаємодія ударних хвиль з об'єктами.

Для задання діаграми деформування матеріалу Д16чТ використовується модель Steinberg Guinan Strength, яка базується на формулі:

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{G}_P}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\dot{G}_T}{G_0} \right) (T - 300) \right], \quad (2.7)$$

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \left(1 + \frac{\sigma'_{0,2P}}{\sigma_{0,2_0}} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\dot{G}_T}{G_0} \right) (T - 300), \quad (2.8)$$

$$\text{при умові, що } \sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \leq \sigma_{0,2_{max}} \quad (2.9)$$

де G_0 – модуль зсуву у первісному стані ($T = 300\text{K}$, $P = 0$, $\varepsilon = 0$); $\dot{G}_P = dG/dP$; $\dot{G}_T = dG/dT$; P – тиск; η – коефіцієнт стиснення; T – температура; $\sigma_{0,2}$ – границя текучості; $\sigma_{0,2_0}$ – границя текучості у первісному стані ($T = 300\text{K}$, $P = 0$, $\varepsilon = 0$); β – коефіцієнт зміцнення; ε – пластична деформація; ε_i – початкова еквівалентна пластична деформація; n – експонента зміцнення.

Константи для опису дійсної діаграми деформування досліджуваного сплаву були визначені авторами відповідного довідника [106]. Оскільки натурні випробування проводили при кімнатній температурі, прийнято що $\dot{G}_T = 0$ для того щоб виключити вплив температурної складової в залежності від якої дійсна діаграма змінює кут нахилу та максимальне напруження розриву.

На рис. 2.14 зображено скінчено-елементну модель чверті робочої області досліджуваного зразка та дорна без залишкових напружень та прикладання навантаження.

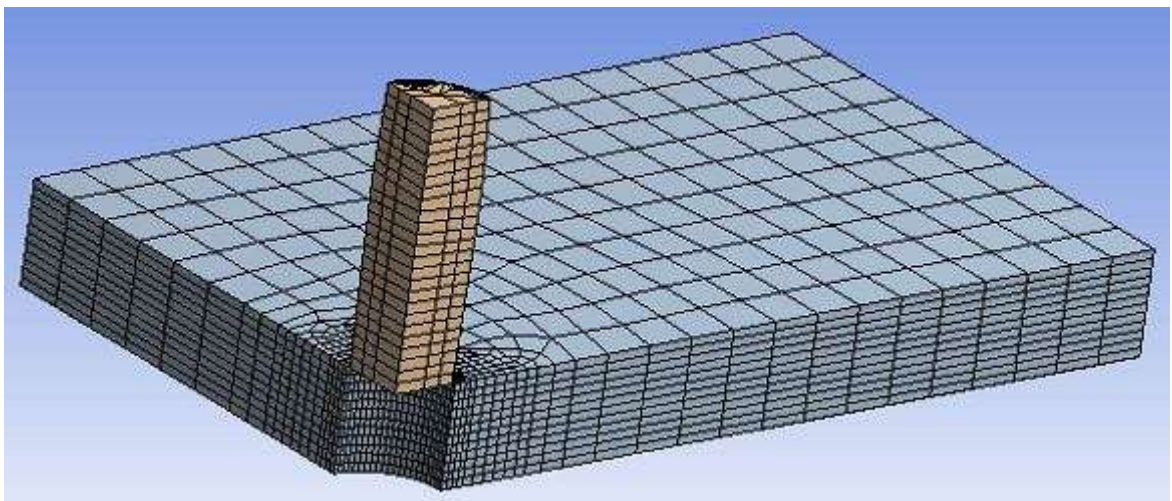


Рисунок 2.14 – Модель робочої області чверті досліджуваного зразка без залишкових напружень та навантаження.

Висновки

1. Розроблено методику експериментальних досліджень циклічної тріщиностійкості пластини з алюмінієвого сплаву Д16чГ з отвором після дорнування та без нього за регулярного навантаження на базі електрогідравлічної випробувальної машини СТМ-100.

2. Доопрацьовано методику оцінки мікроструктури попередньо деформованого матеріалу, мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин з використанням електронної мікроскопії;

3. Розроблені моделі розрахунку МСЕ НДС в околі отвору після дорнування, а також за номінального навантаження.

Розділ 3. Вплив експлуатаційних чинників на зародження та ріст тріщин від функціональних отворів

3.1. Зародження та поширення втомних тріщин за осьового навантаження

Для досліджень використовувалася електрогідравлічна машина СТМ-100, температура випробувань – 293К. З отриманих даних побудовано діаграму деформування для досліджуваного алюмінієвого сплаву Д16чТ (рис. 3.1).

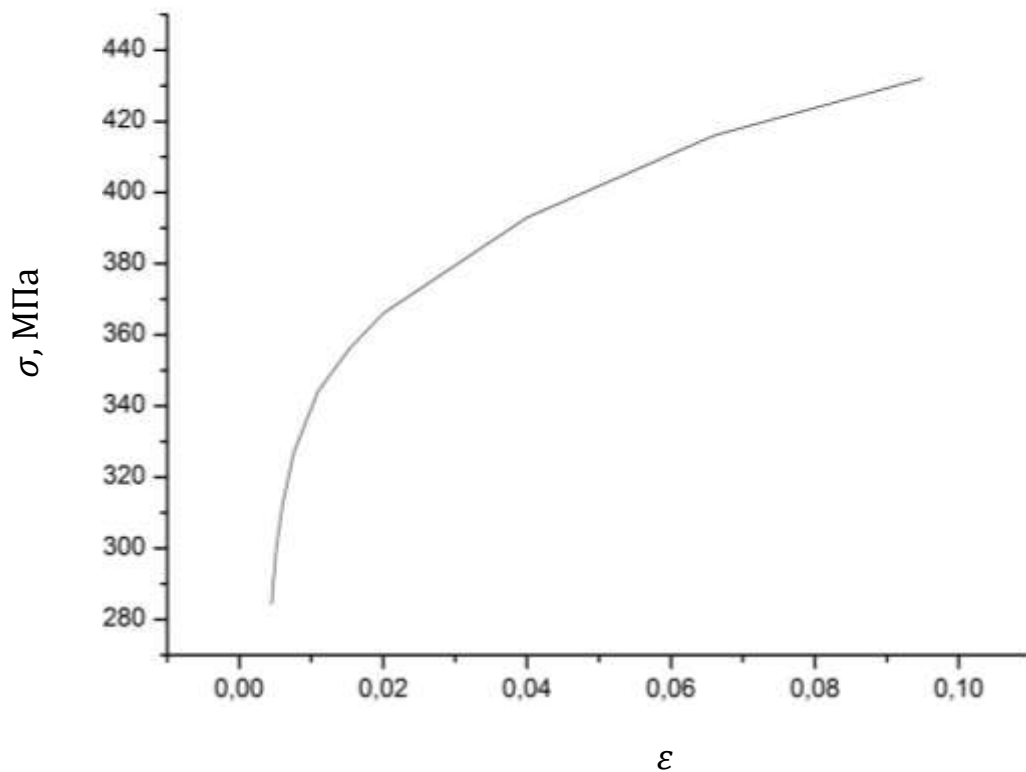


Рисунок 3.1 – Діаграма розтягу алюмінієвого сплаву Д16чТ

У табл. 3.1 представлені хімічний склад та механічні властивості алюмінієвого сплаву Д16чТ.

Таблиця 3.1.

Хімічний склад та механічні властивості алюмінієвого сплаву Д16чТ

Cu, %	Mg, %	Mn, %	Si, %	Fe, %	Ti, %	Al
4,0	1,6	0,75	0,07	0,05	0,03	Основа
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$		$\sigma_B, \text{МПа}$			$\sigma_B / \sigma_{0,2}$	
300		430			1,53	

Для дослідження зародження втомних тріщин у пластинах із алюмінієвого сплаву Д16чТ (рис. 2.1) за навантаження сталої амплітуди (брутто) $\sigma = 147 \text{МПа}$ використовували описану у розділі 2.2 електрогідравлічна машина СТМ-100. Частота навантаження $f = 15 \text{Гц}$, форма циклу $P = f(t)$ – синусоїда, асиметрія циклу навантаження $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.002$, температура випробувань – 20°C .

Для експериментальних досліджень втомного руйнування зразків із дорнованими отворами характерна півеліптична форма втомної тріщини. Початкова втомна макротріщина майже завжди зароджувалася з боку входу дорна (А, В). Коли втомна тріщина проростала на сторону С, D її розміри характеризувалися параметрами довжинами поверхневих тріщин c_1 та c_2 (див. рис. 2.1) на вході та на виході дорна відповідно. Швидкість поширення тріщини значно збільшувалася.

На рис. 3.2 зображено графіки поширення поверхневої втомної макротріщини до довжини 5 мм в залежності від натягу дорнування для отворів діаметром 8 мм та 10 мм [107].

На рис. 3.3 зображено узагальнені графіки поширення поверхневої втомної макротріщини до довжини 5 мм для діаметрів отвору 8 мм (рис. 3.3а) та 10 мм (рис. 3.3б) для різних величин відносного натягу дорнування.

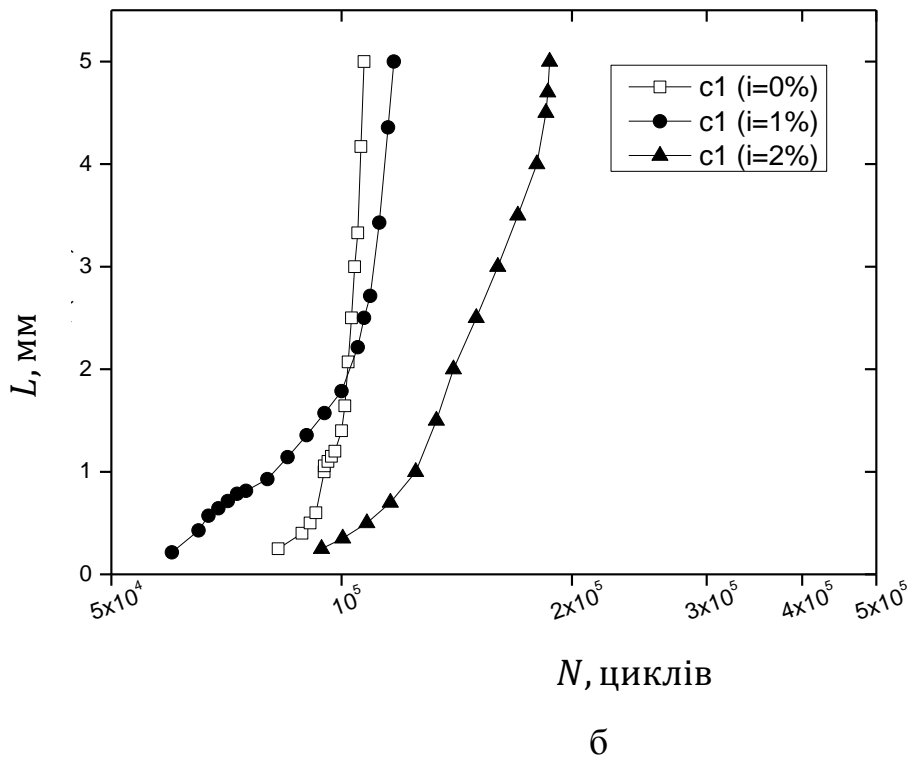
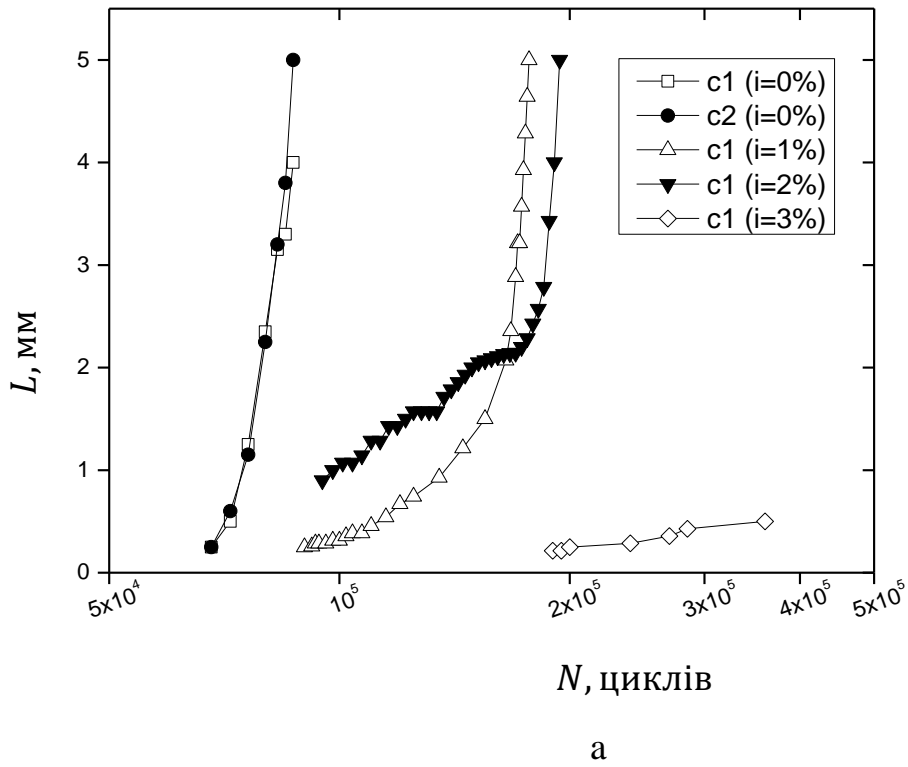
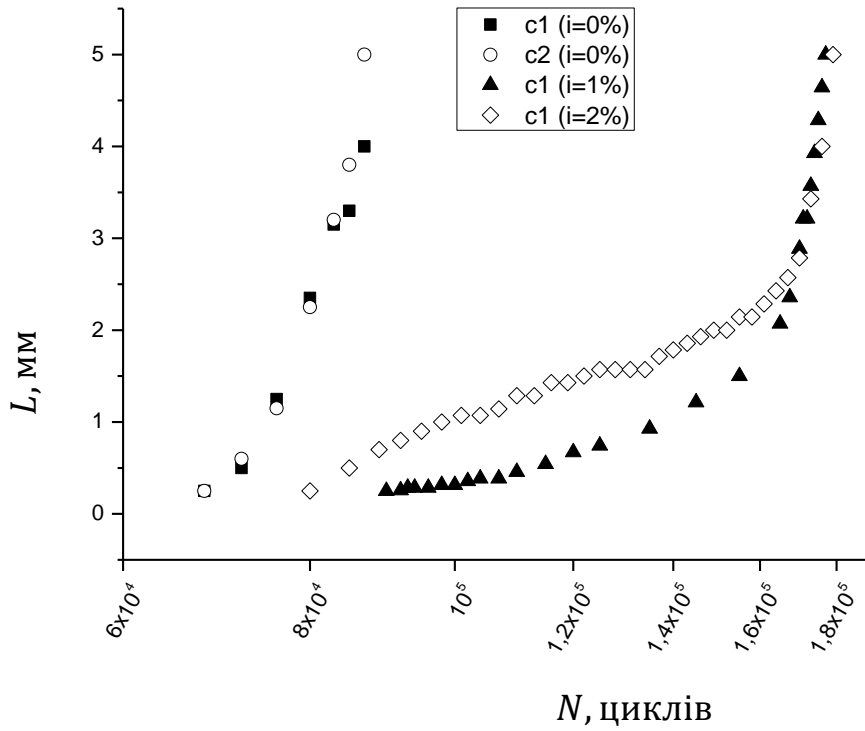
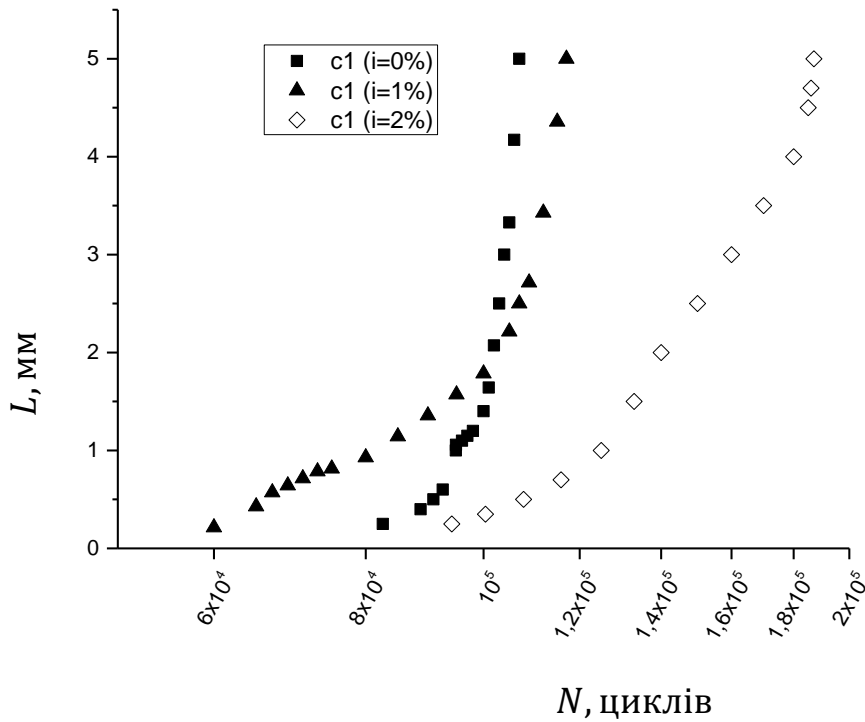


Рисунок 3.2 – Поширення поверхневої втомної макротріщини c_1 та c_2 до довжини 5 мм у досліджуваних зразках для отворів діаметром 8 мм(а) та 10 мм(б) за натягу дорнування $i = 0 \dots 3\%$



а



б

Рисунок 3.3 – Поширення поверхневої втомної макротріщини до 5 мм у досліджуваних зразках: а – діаметр отвору 8 мм; б – діаметр отвору 10 мм за натягу дорнування $i = 0 \dots 3\%$

Виявлено тенденцію підвищення кількості циклів до зародження втомної макротріщини від отворів у досліджених зразках із збільшенням відносного натягу дорнування.

З рис. 3.3б видно, що втомна макротріщина зародилася швидше з отвору де використовували дорнування з натягом 1%. Це зумовлено тим, що поширення втомної тріщини від отвору без дорнування відбувалося всередині тіла досліджуваного зразка з послідуочим виходом на поверхню.

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 (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Період зародження втомної тріщини довжиною $L \approx 0,25$ мм в залежності від натягу дорнування $i = 0 \dots 3\%$

$d_{\text{поч}},$ мм	$d_{\text{кінц}},$ мм	$i,$ %	$\sigma_{\text{min}},$ МПа	$\sigma_{\text{max}},$ МПа	R	f, Гц	$N_{0,25},$ цикл	$N_f,$ цикл
8,03	8,03	0	0,3	147	0,002	15	37000	94047
7,91	8,03	0,0149	0,3	147	0,002	15	95000	189907
7,83	8,02	0,0237	0,3	147	0,002	15	69000	189791
7,75	8,01	0,0325	0,3	147	0,002	15	290000	>106
10,04	10,04	0	0,3	147	0,002	15	50000	114223
9,91	10,02	0,011	0,3	147	0,002	15	66000	126997
9,82	10,01	0,019	0,3	147	0,002	15	80000	202925
9,68	10	0,032	0,3	147	0,002	15	370000	>106
12,02	12,02	0	0,3	147	0,002	15	107000	117737
11,86	12,02	0,0133	0,3	147	0,002	15	>106	>106
11,73	12,01	0,0233	0,3	147	0,002	15	>106	>106
11,67	12	0,0275	0,3	147	0,002	15	>106	>106

3.2. Зародження та поширення втомних тріщин за одновісного розтягу

Для аналізу мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин у досліджуваних зразках використовували растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И.

Метою даного дослідження було встановлення моменту і місця зародження тріщини, її поведінки в початковій фазі поширення, а також форми і розмірів макротріщини.

Важливим завданням був аналіз мікромеханізмів руйнування, встановлення його характеру, характерних ознак, встановлення зв'язку з розвитком тріщини, а також стійкістю зразка в цілому.

Дослідження реалізовували відповідно до наступної схеми:

- аналіз поверхні руйнування для встановлення форми і фронту тріщини;
- аналіз зони тріщини в кутових її частинах;
- локалізація місця зародження тріщини, а також прилеглої ділянки;
- аналіз центральної частини поширення тріщини для установлення характерних ознак мікромеханізмів руйнування;
- аналіз фронту макротріщини при переході до зони долому.

Для аналізу впливу поверхневого пластичного деформування на мікроструктурні зміни в матеріалі досліджували прилеглі до поверхні дорнування шари матеріалу.

Аналізували поверхню втомного руйнування зразків з дорнованими і недорнованими отворами. Виявили, що форма фронту і траєкторія поширення втомної тріщини в дорнованих і недорнованих зразках з отворами відрізняється.

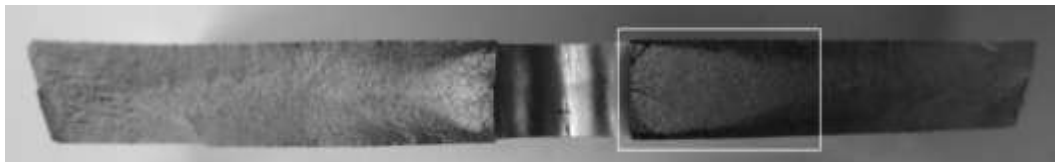
Фронт втомної тріщини в зразках з отворами після механічної обробки наближений до півеліптичного (рис. 3.4а). Тріщина зароджується

переважно в середній (по товщині) ділянці отвору і поширюється в тіло зразка. Фронт тріщини набуває півеліптичної форми (рис. 3.4б). Причому, на зовнішній поверхні зразків тріщина спочатку відсутня. Лише коли довжина тріщини в середній ділянці зразка сягає 3-4 мм, довжина її на поверхні зразка дорівнює приблизно 0,25 мм [108-111].

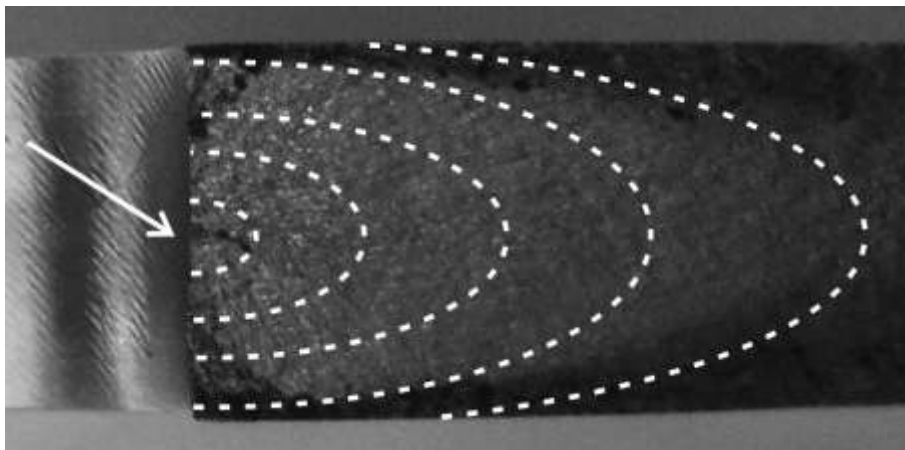
Швидкість поширення тріщини недорнованих зразків після виходу її на бічну поверхню значно збільшується. Зокрема після реєстрації тріщини на поверхні довжиною 1 мм зразки руйнувалися через 15000-20000 циклів навантаження.

У дорнованих зразках тріщина виникає на кромці отвору, переважно з боку входу дорна в отвір, і поширюється в тіло зразка (рис. 3.4в). Фронт тріщини спочатку набуває чвертьеліптичної форми (рис. 3.4г), а в подальшому стає півеліптичним (рис. 3.4г). Треба зазначити, що втомна тріщина в зразках з дорнованими отворами спочатку не виходить на поверхню отвору, а проростає до протилежної стінки зразка на відстані 1-2 мм від отвору. При цьому залишається тонка незруйнована смужка вздовж отвору, товщиною 1-2 мм (рис. 3.4д). Такий ефект виникає внаслідок дії залишкових стискувальних напружень в околі отвору дорнованих зразків. При подальшому поширенні втомної тріщини, вказана смужка руйнується за в'язким механізмом з утворенням ямок відриву.

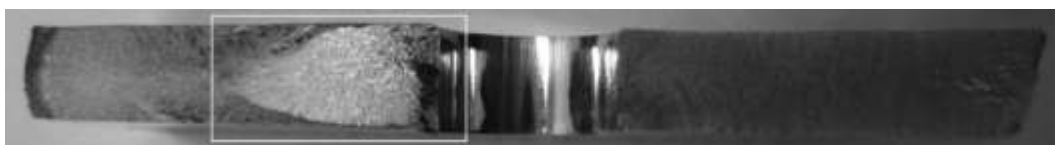
Такі особливості формування початкового фронту тріщини і його трансформації упродовж подальшого розвитку тріщини, без її виходу на поверхню утруднює надійну діагностику елементів конструкцій з використанням оптичних методів і вимагає додаткових засобів контролю пошкоджуваності елементів конструкцій.



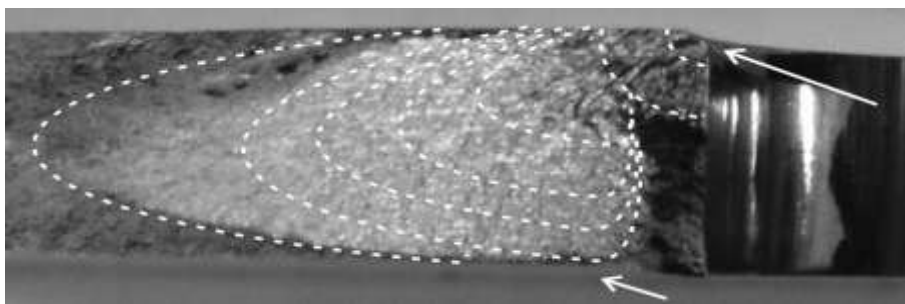
а



б



в



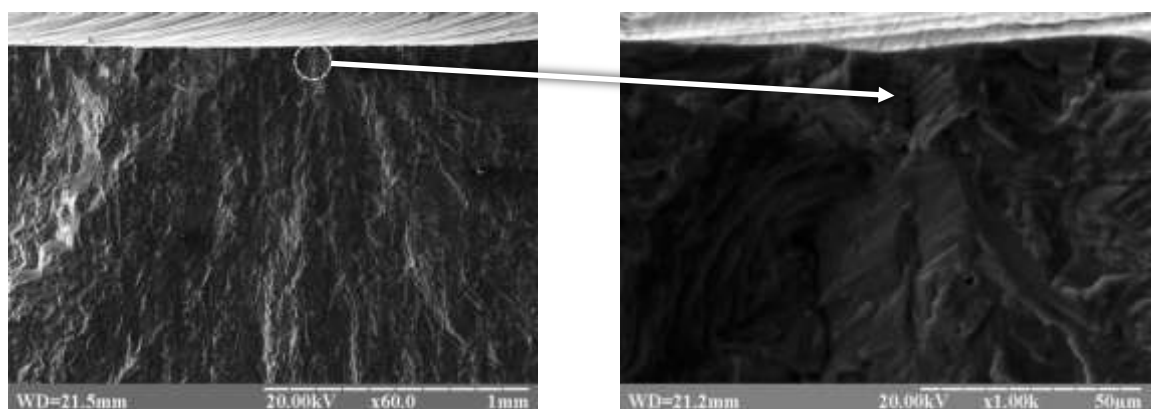
г

Рисунок 3.4 – Місце зародження та фронт поширення втомної тріщини в зразку з отвором після механічної обробки –а,б та з отвором після дорнування з натягом 2% - в, г

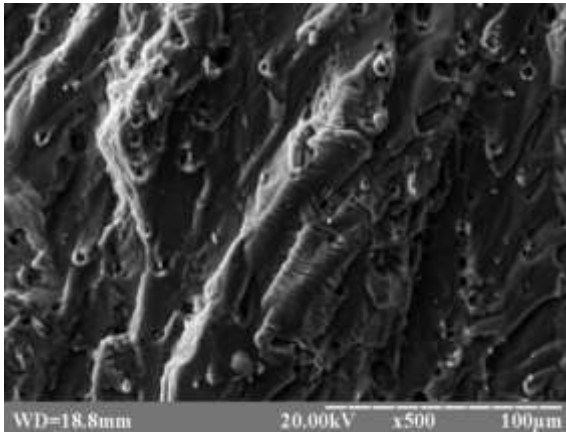
Після реєстрації у зразках втомної тріщини довжиною ≈ 1 мм на зовнішній поверхні, кількість циклів навантажування до зруйнування складала 30 000-60 000 циклів за натягу дорнування 1% і 90 000-150 000 циклів за натягу дорнування 2%.

Втомна тріщина зароджується і на початковому етапі поширюється площинами ковзання всередину від поверхні зразка під кутом приблизно 45° до осі нормальних напружень. Характерне місце зародження втомної тріщини зображено на рис. 3.5а.

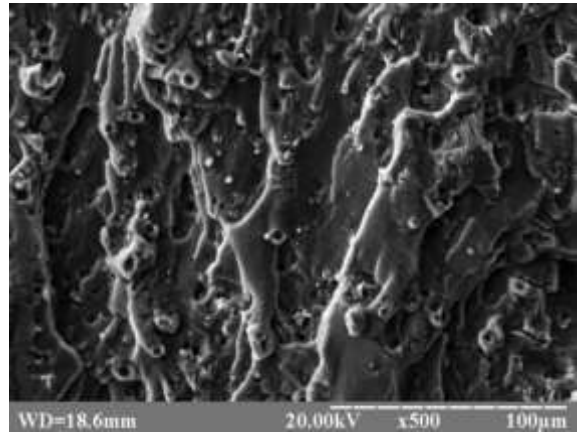
На стадії усталеного росту втомної тріщини формуються виражені втомні борозенки, розміщені окремими терасами. На поверхні зламу чітко видно гребені, що розділяють тераси з втомними борозенками. Напрямок гребенів паралельний до напрямку поширення втомної тріщини. Характерні фрагменти ділянок усталеного розвитку втомної тріщини подано на рис. 3.5б, в. Втомні борозенки розміщені на терасах, розмір яких сумірний з розміром структурних елементів алюмінієвого сплаву. Орієнтація окремих терас змінюється від зерна до зерна (рис. 3.5е). Наявність в структурі сплаву масивних включень спричиняє локальне в'язке руйнування матеріалу за механізмом росту мікропор (рис. 3.5в).



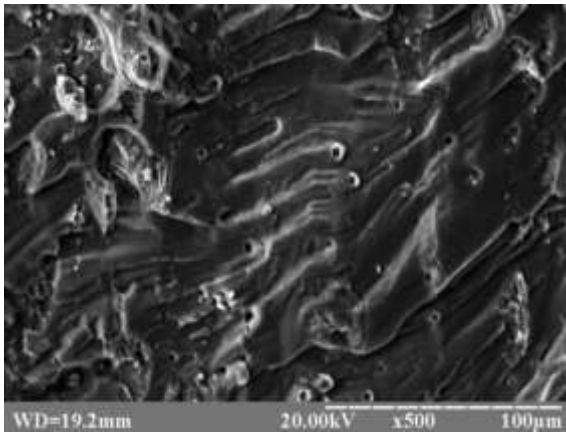
а



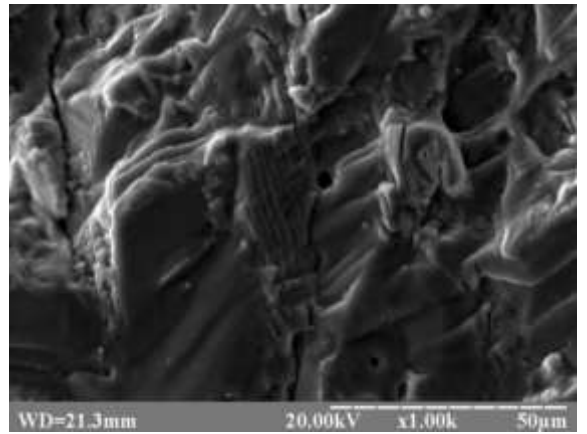
б



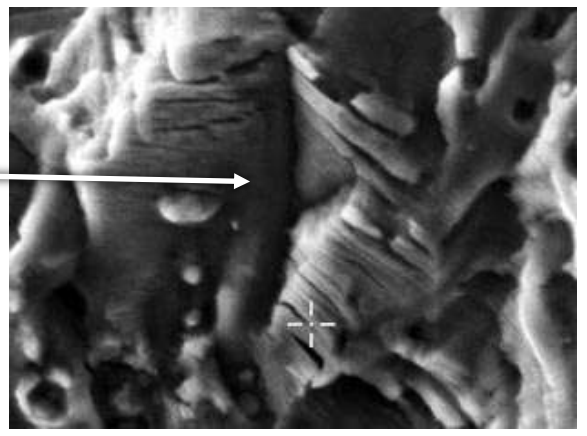
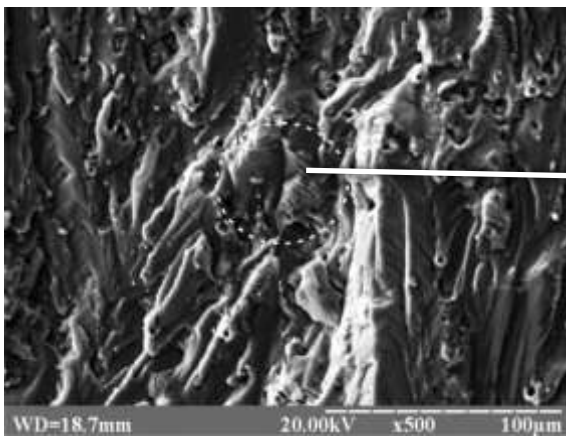
в



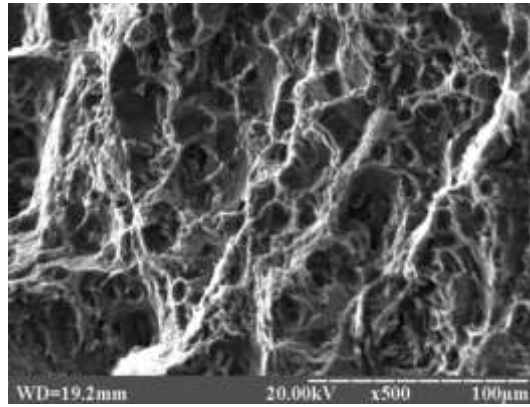
г



д



е



є

Рисунок 3.5 – Мікромеханізми зародження та поширення втомної тріщини.

На початку росту втомної тріщини крок втомних борозенок невеликий (рис. 3.5г). В межах однієї тераси втомного зламу борозенки мають близький за значенням крок. Проте, вздовж всього фронту тріщини, втомні борозенки не мають строго фіксованої величин, що спричинено нерівномірністю підростання втомної тріщини в різних зернах.

Зі збільшенням швидкості росту тріщини на поверхні руйнування утворюються втомні борозенки з більшим кроком, а навколо включень ямки відриву. При значній швидкості росту втомної тріщини утворюються вторинні мікротріщини (рис. 3.5д).

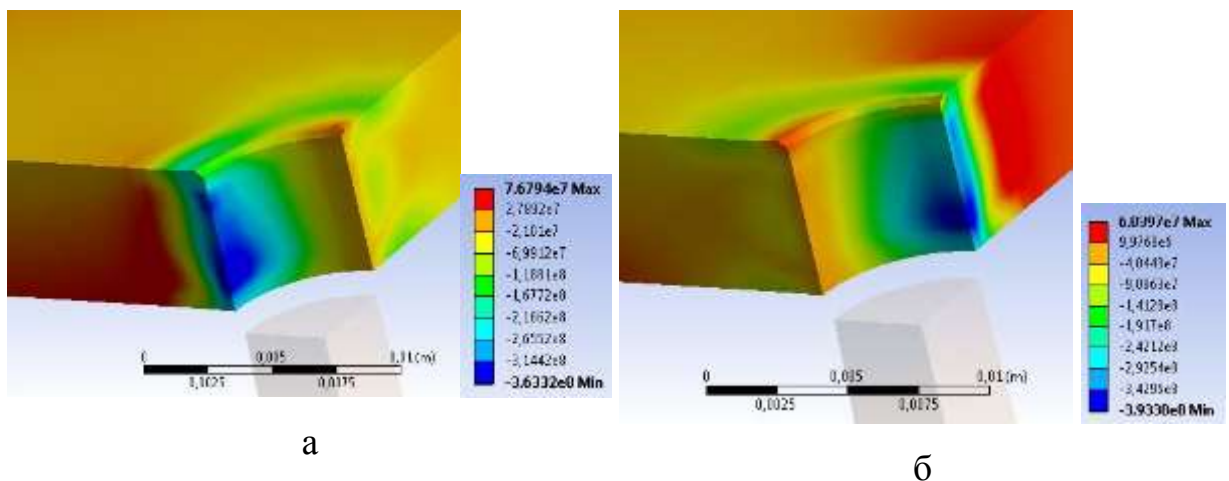
Остання ділянка поверхні руйнування відповідає долому зразка. Зокрема на рис. 3.5є зображено фрагмент ділянки долому, який демонструє механізм в'язкого, ямкового відриву.

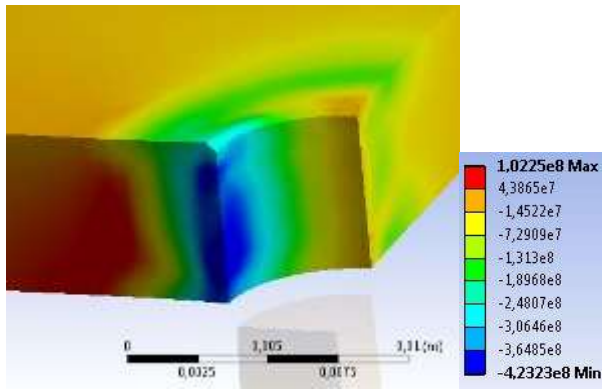
3.3. Розрахунок залишкових полів напружень та деформації методом скінчених елементів

Для дослідження НДС та залишкових напружень стиску в околі функціонального отвору використовували скінчено-елементну модель чверті пластини з центральним отвором (рис. 2.1). НДС функціонального отвору аналізували з використанням скінчено-елементної моделі, описаної у розділі 2.4.

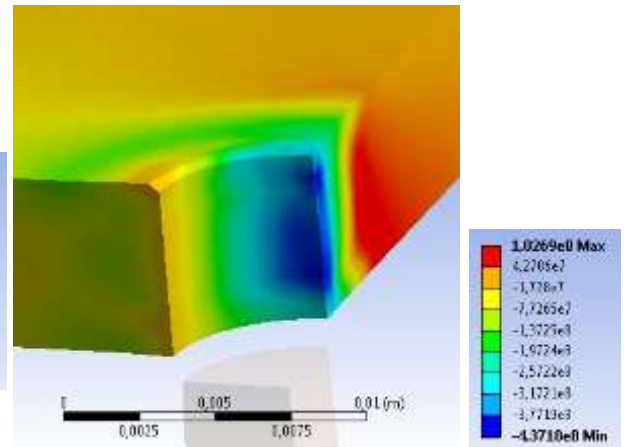
На даній моделі було досліджено НДС в околі отвору після дорнування, а також за циклічного навантаження. Руйнування зразка, поширення тріщин і пошкоджувальність структури на даному етапі розрахунку не виконували.

На рисунках 3.6-3.8 зображено розподіл залишкових стискувальних напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та 12 мм за натягу дорнування $i = 1\%, 2\%, 3\%$ [112].

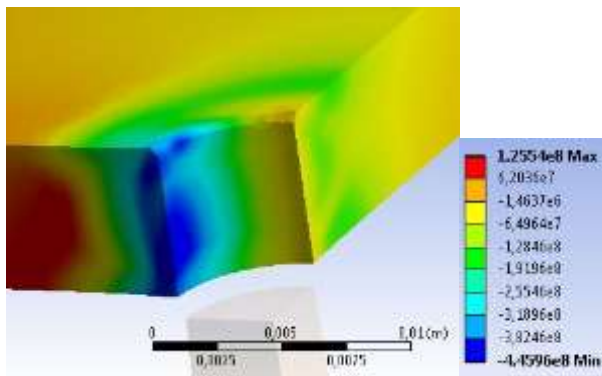




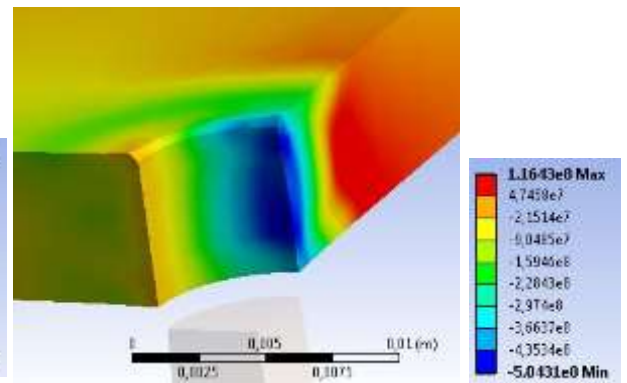
В



Г

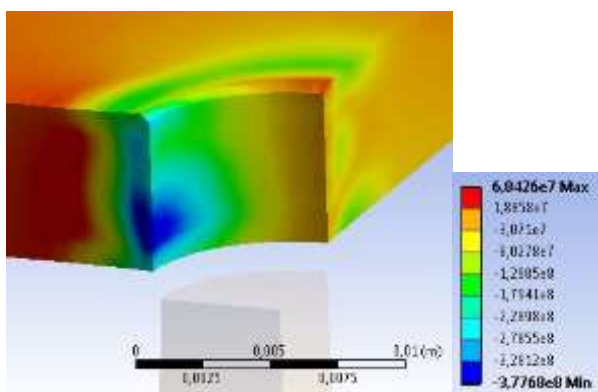


Д

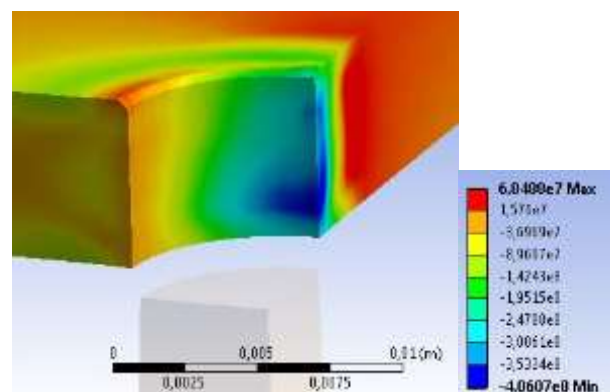


е

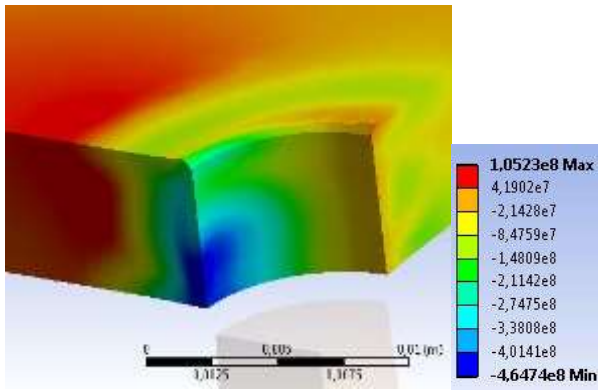
Рисунок 3.6 – Розподіл залишкових стискувальних напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) по осі Х (а, в, е) та Y (б, г, д)



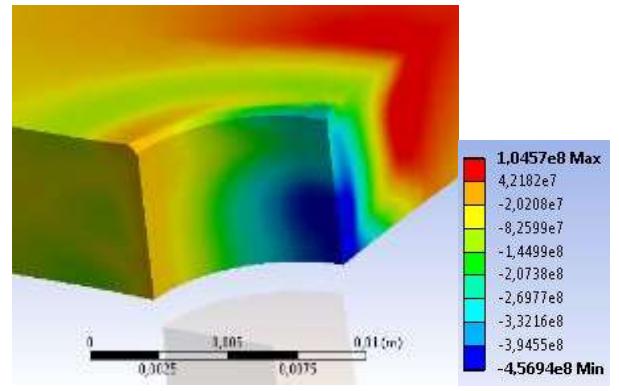
а



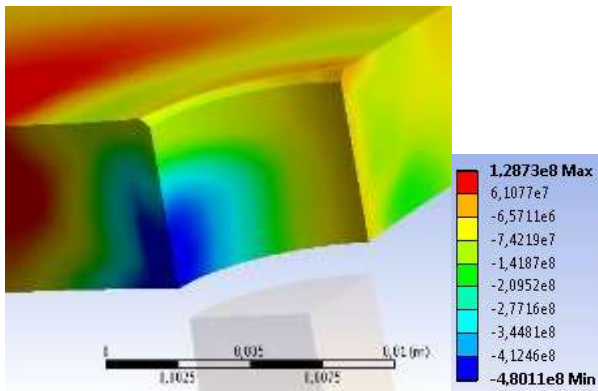
б



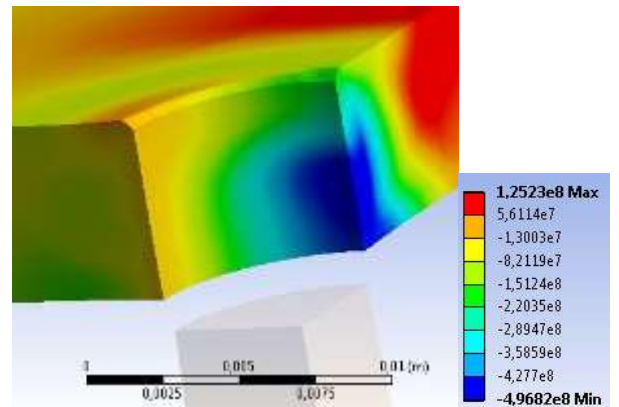
В



Г

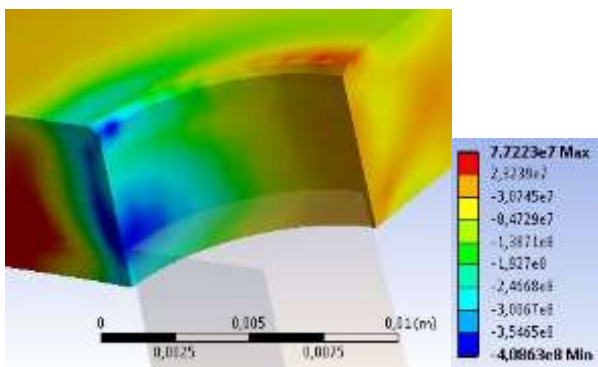


Д

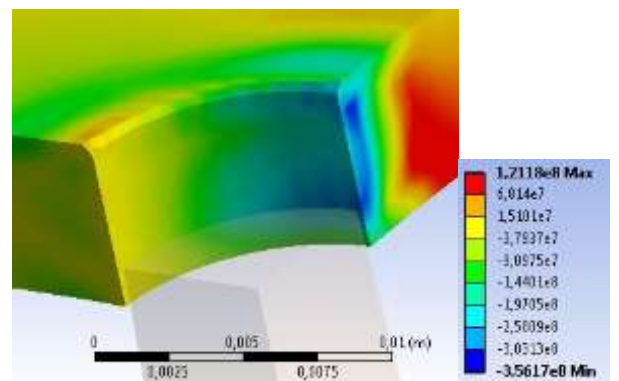


е

Рисунок 3.7 – Розподіл залишкових стискувальних напружень в околі функціонального отвору діаметром 10 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) по осі X (а, в, е) та Y (б, г, д)



а



б

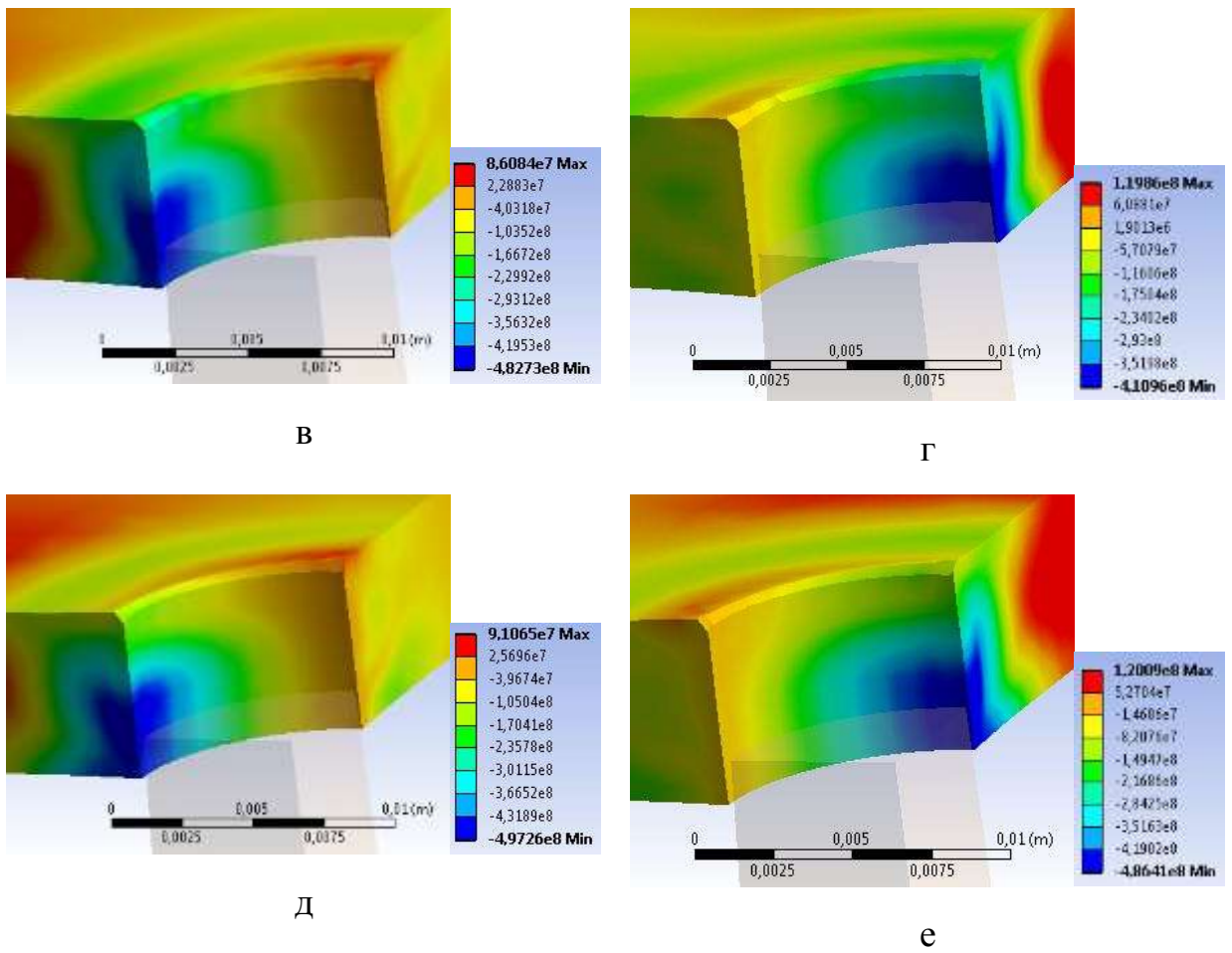


Рисунок 3.8 – Розподіл залишкових стискувальних напружень в околі функціонального отвору діаметром 12 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) по осі Х (а, в, е) та Y (б, г, д)

З рисунків 3.6-3.6 видно, що максимальні залишкові напруження стиску зосереджені в середній по товщині ділянці отвору та ближче до виходу дорна, а мінімальні – на вході дорна.

На рис. 3.9 показано НДС в околі функціонального отвору діаметром 8 мм за номінального навантаження та без дорнування [113-114].

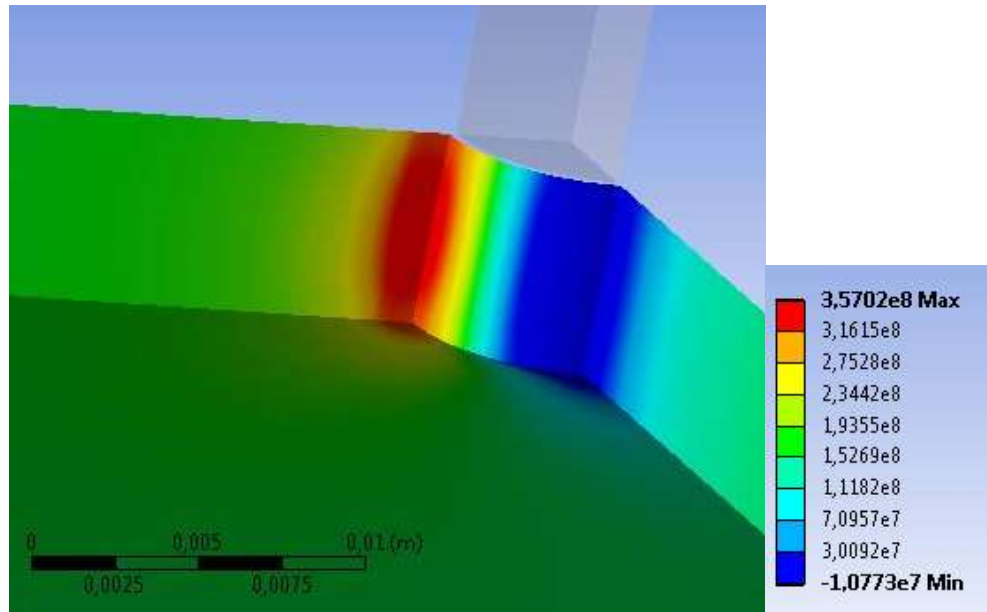
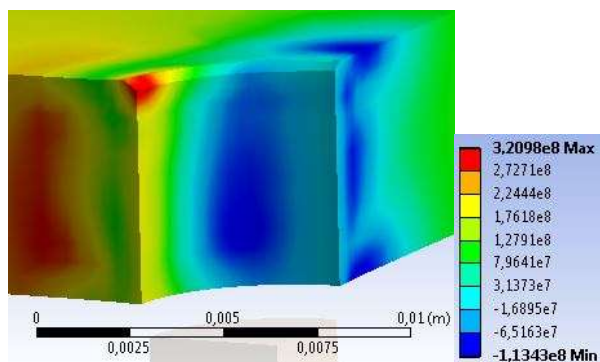


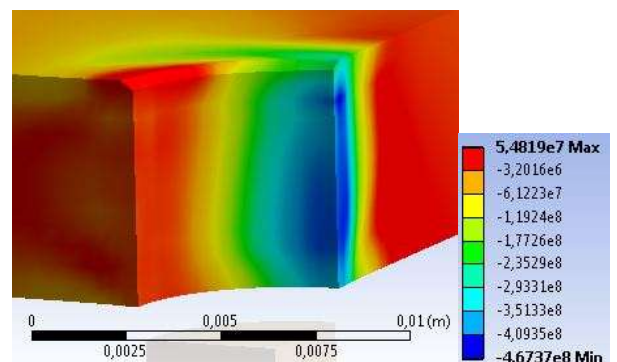
Рисунок 3.9 – НДС в околі функціонального отвору діаметром 8 мм без дорнування за номінального навантаження

З рис. 3. видно, що максимальні напруження розтягу виникають в середній по товщині ділянці зразка. Для отворів діаметром 10 мм та 12 мм спостерігається аналогічний розподіл локальних напружень. Тому, втомна тріщина зароджується саме в середній по товщині ділянці отвору.

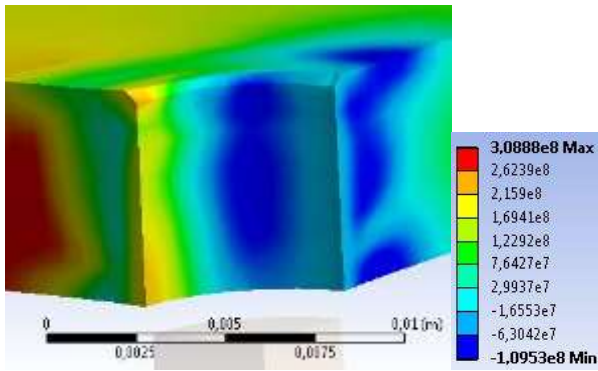
На рис. 3.10 зображено НДС в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та 12 мм за натягу дорнування $i = 1\%, 2\%, 3\%$ та номінального навантаження.



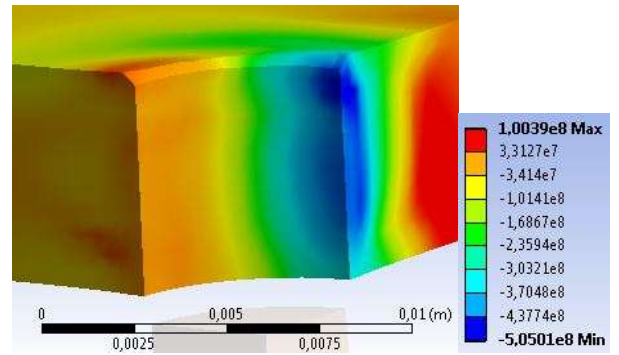
а



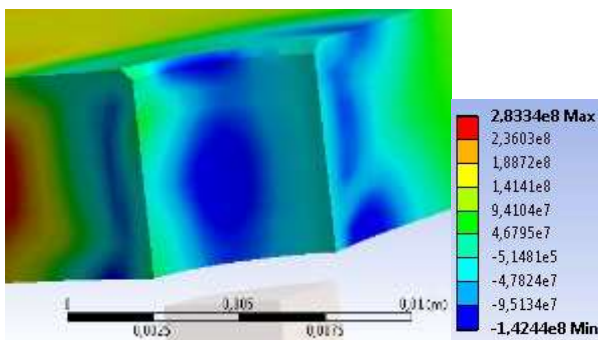
б



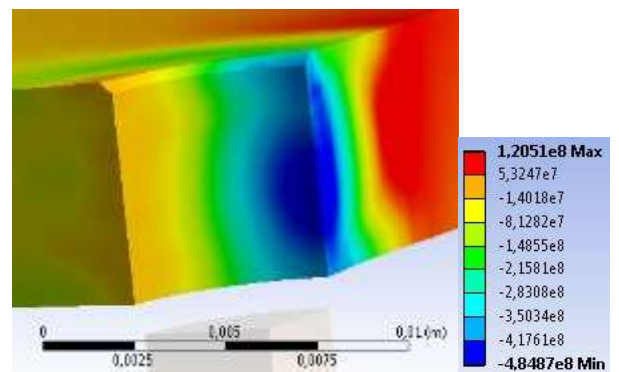
В



Г

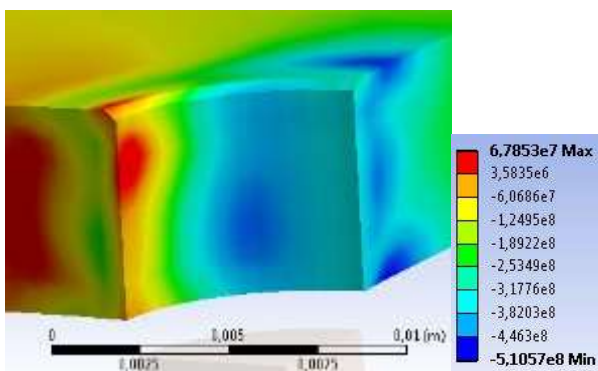


Д

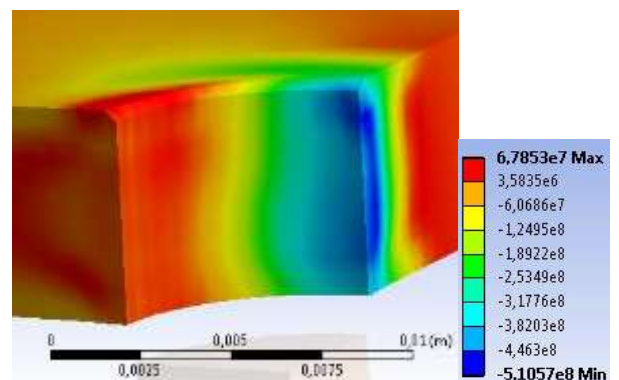


е

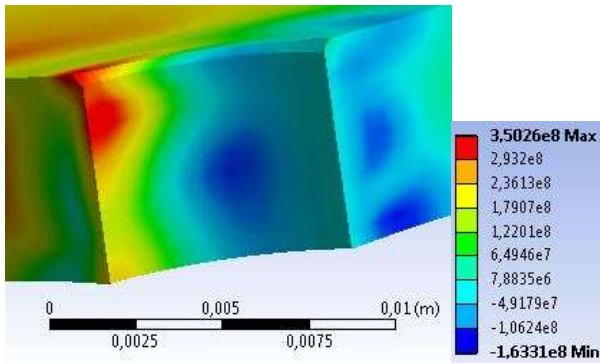
Рисунок 3.10 – НДС в околі функціонального отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) та номінального навантаження по осі X (а, в, е) та Y (б, г, д)



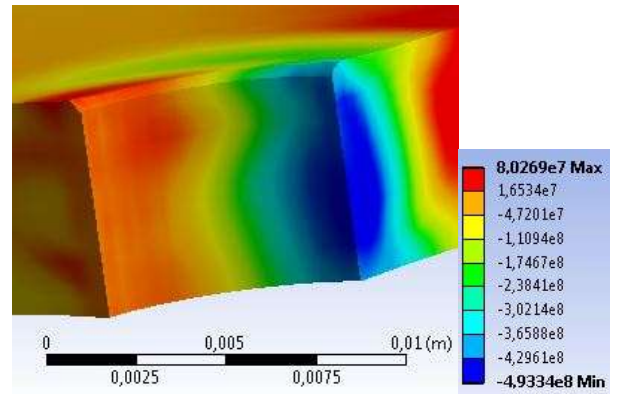
а



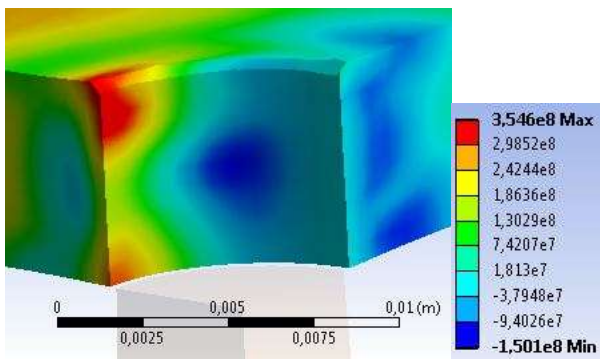
б



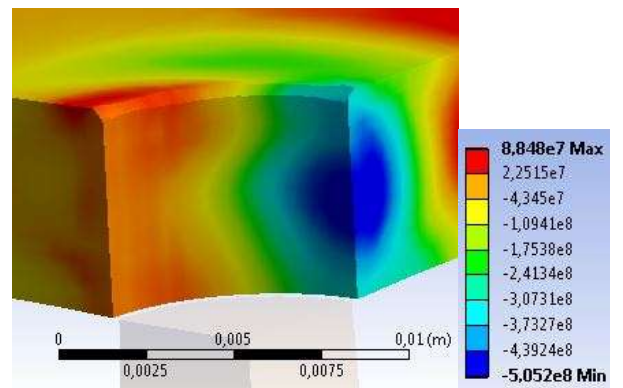
В



Г

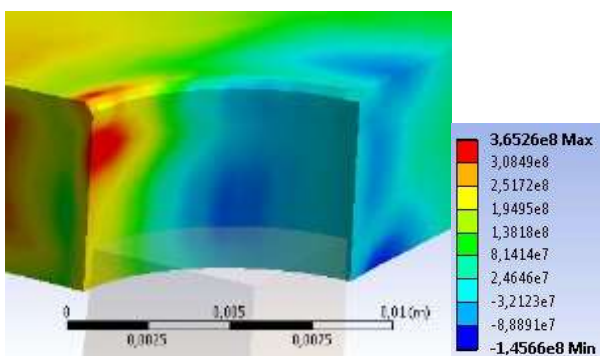


Д

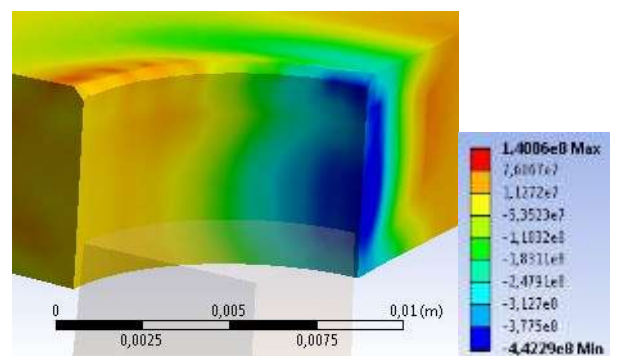


е

Рисунок 3.11 – НДС в околі функціонального отвору діаметром 10 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) та номінального навантаження по осі X (а, в, е) та Y (б, г, д)



а



б

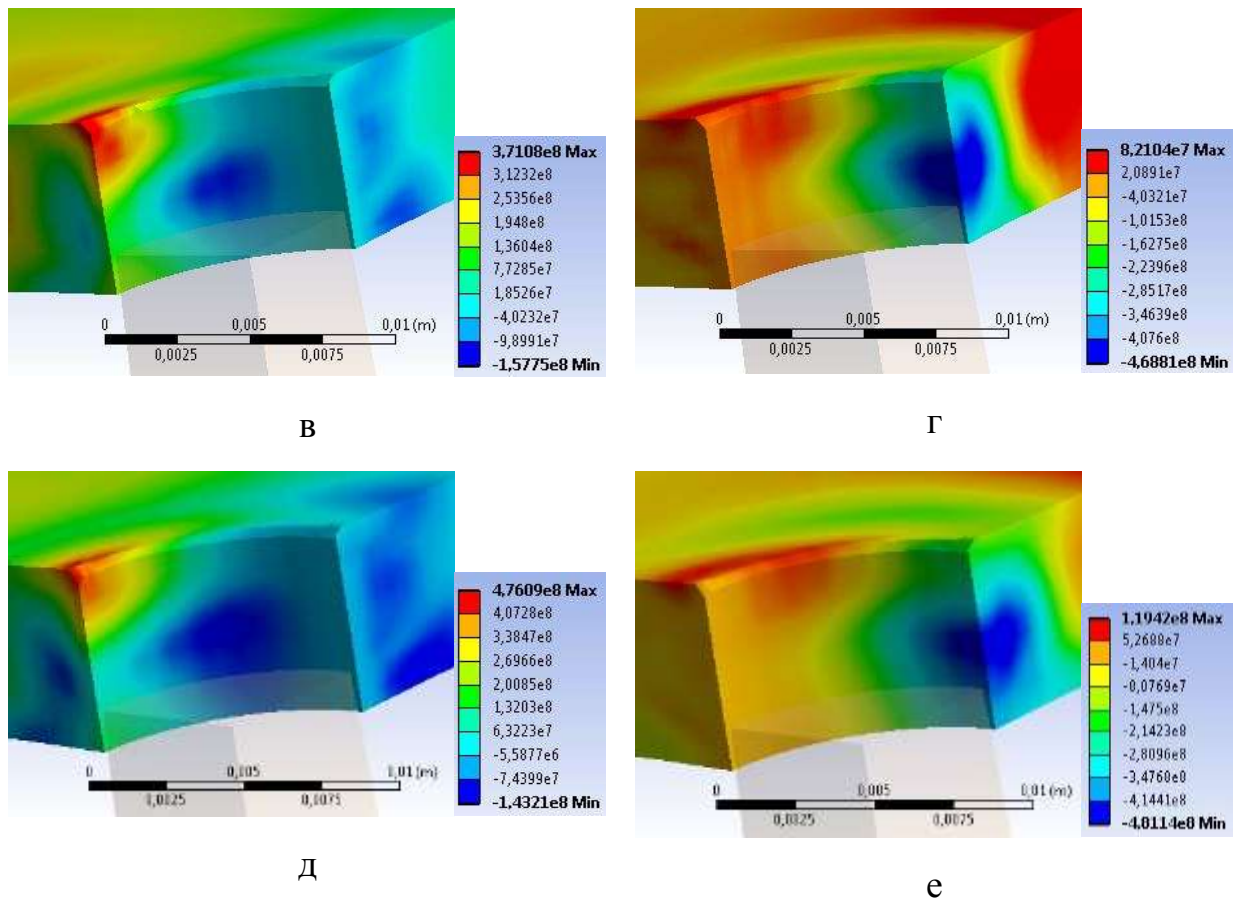
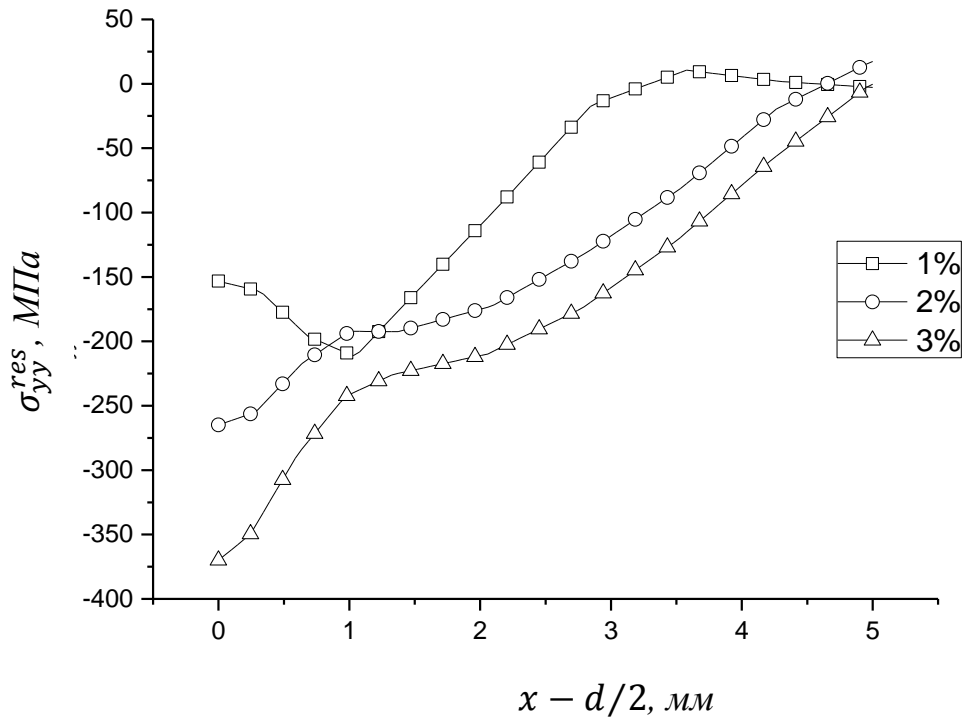


Рисунок 3.12 – НДС в околі функціонального отвору діаметром 12 мм за натягу дорнування 1% (а, б), 2% (в, г) та 3% (д, е) та номінального навантаження по осі X (а, в, е) та Y (б, г, д)

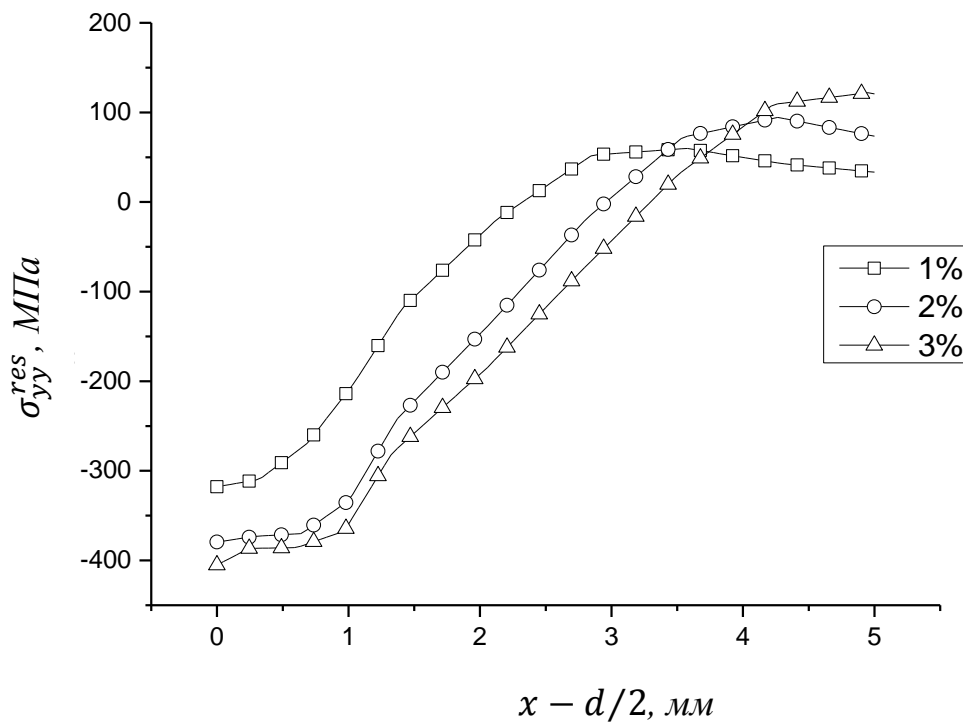
З рисунків 3.10-3.12 видно, що максимальні напруження за розтягу зосереджені на вході дорна. За дорнування з відносним натягом 3% цей ефект частково нівелюється та напруження рівномірніше розподіляються по всій поверхні отвору.

Мікромеханізми зародження та поширення втомних тріщин у експериментальних зразках із дорнованими отворами та без дорнування описані у розділі 3.2.

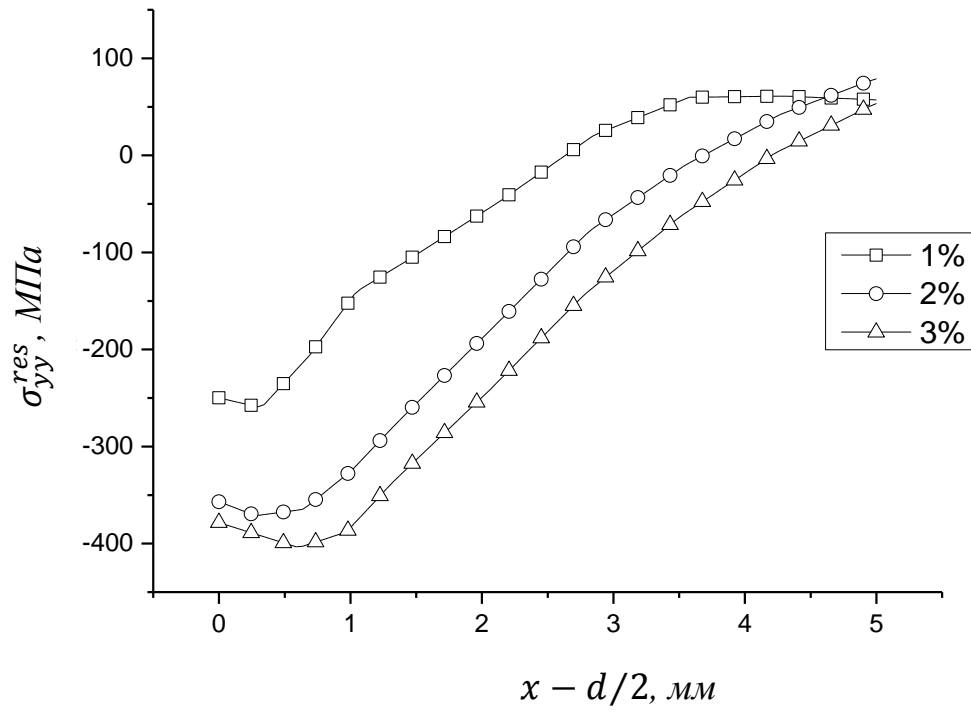
На рис. 3.13 зображено графіки розподілу залишкових стискаючих напружень в околі функціональних отворів діаметрами 8 мм, 10 мм та 12 мм після дорнування з відносними натягами 1%, 2%, 3%.



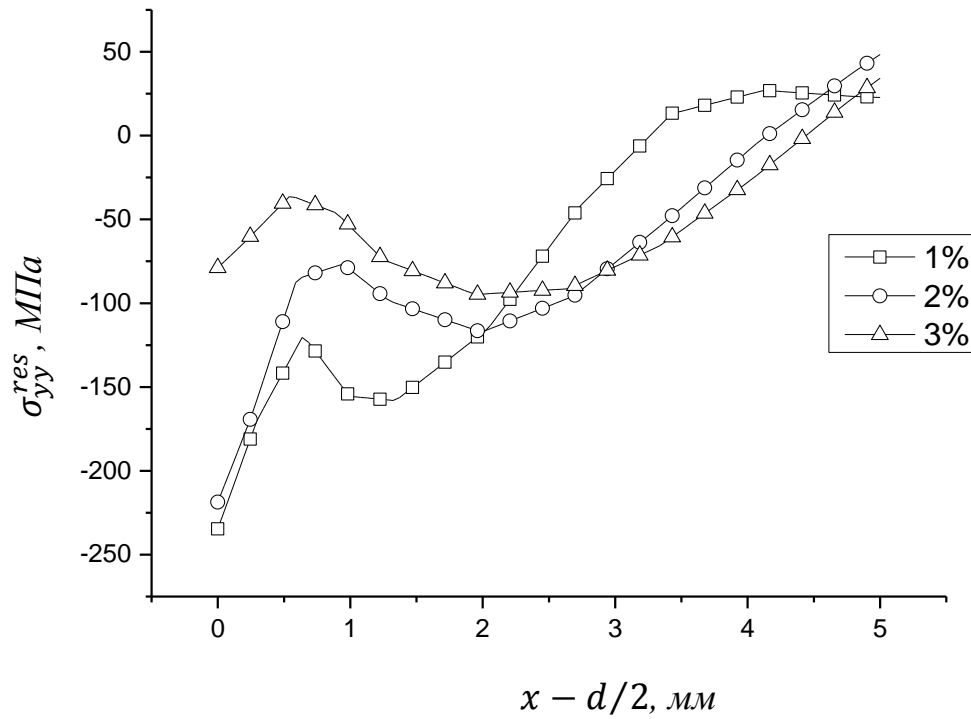
a



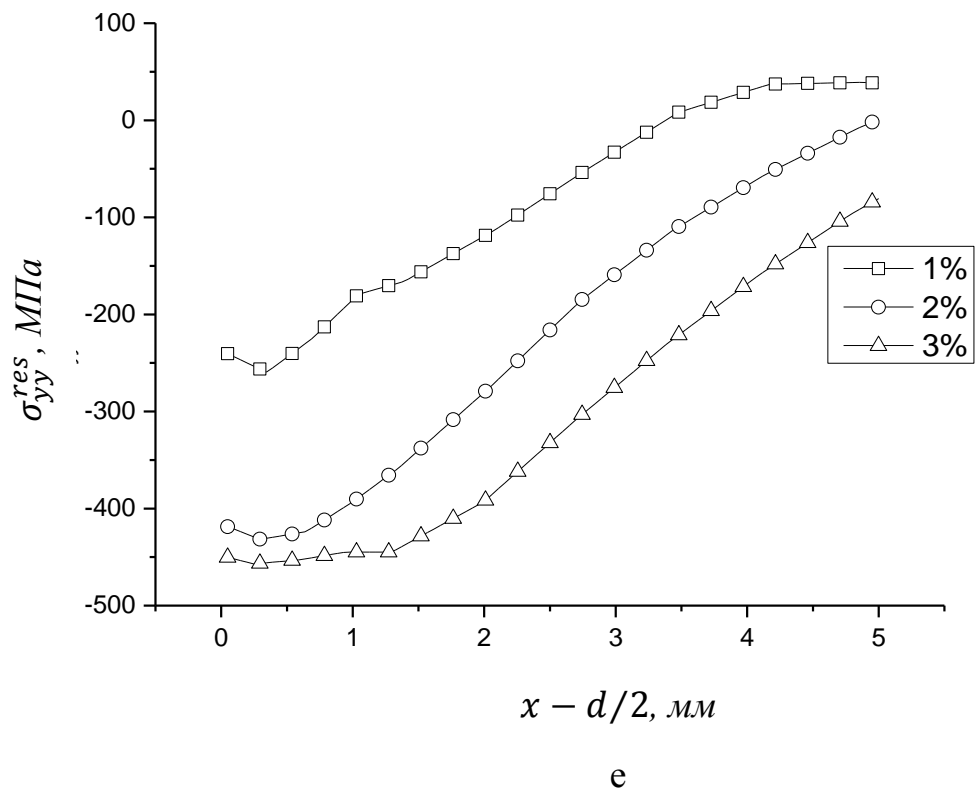
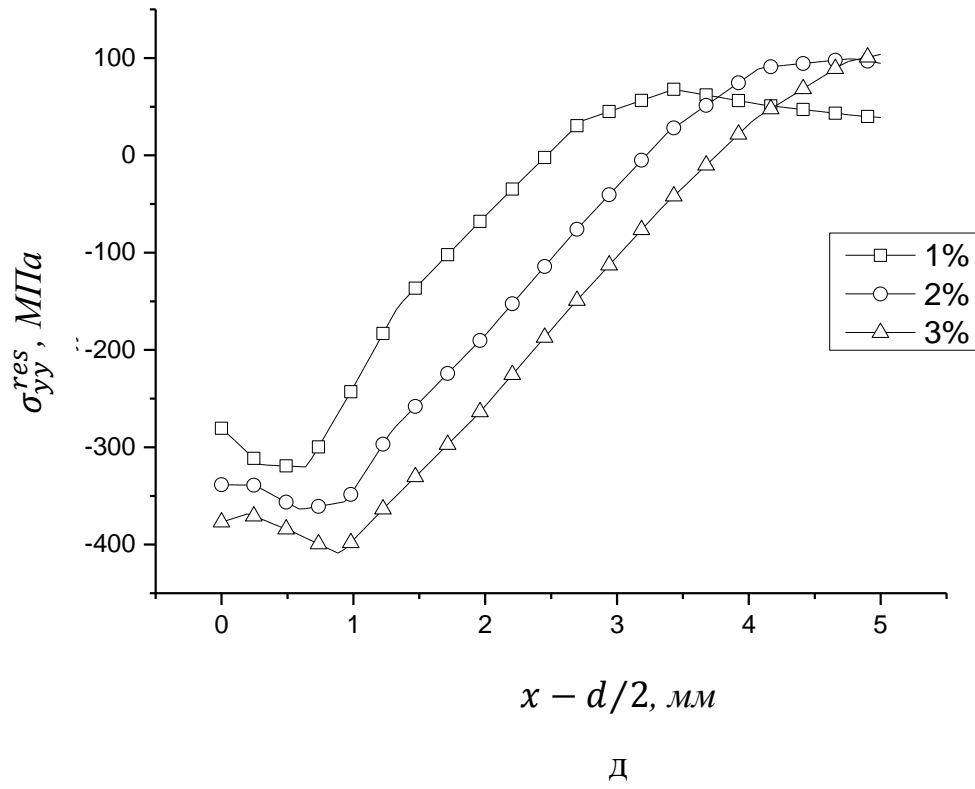
б

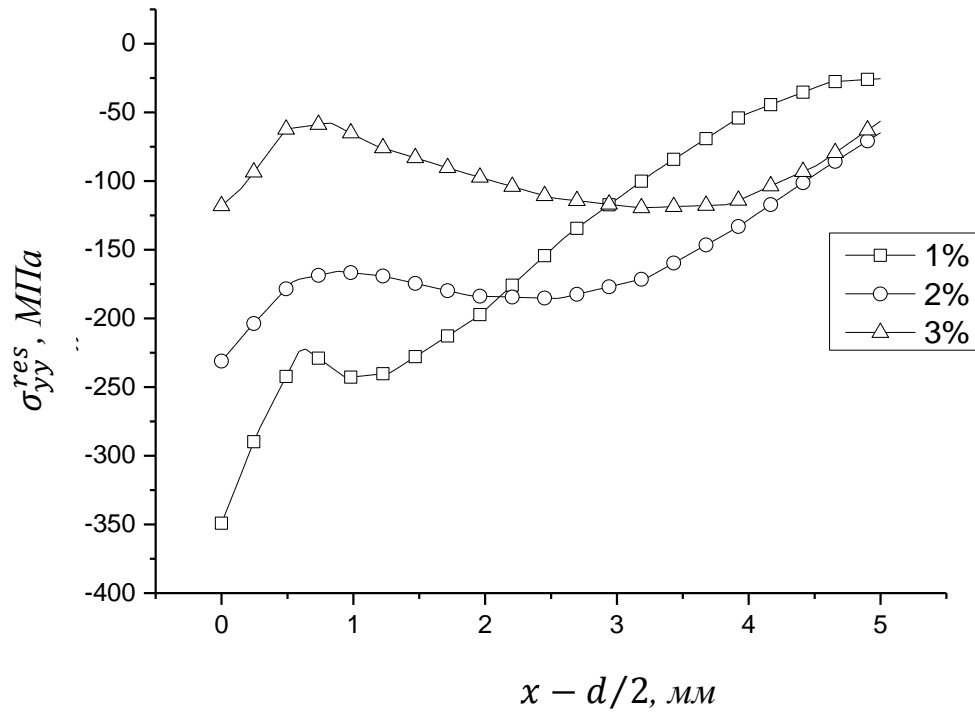


B

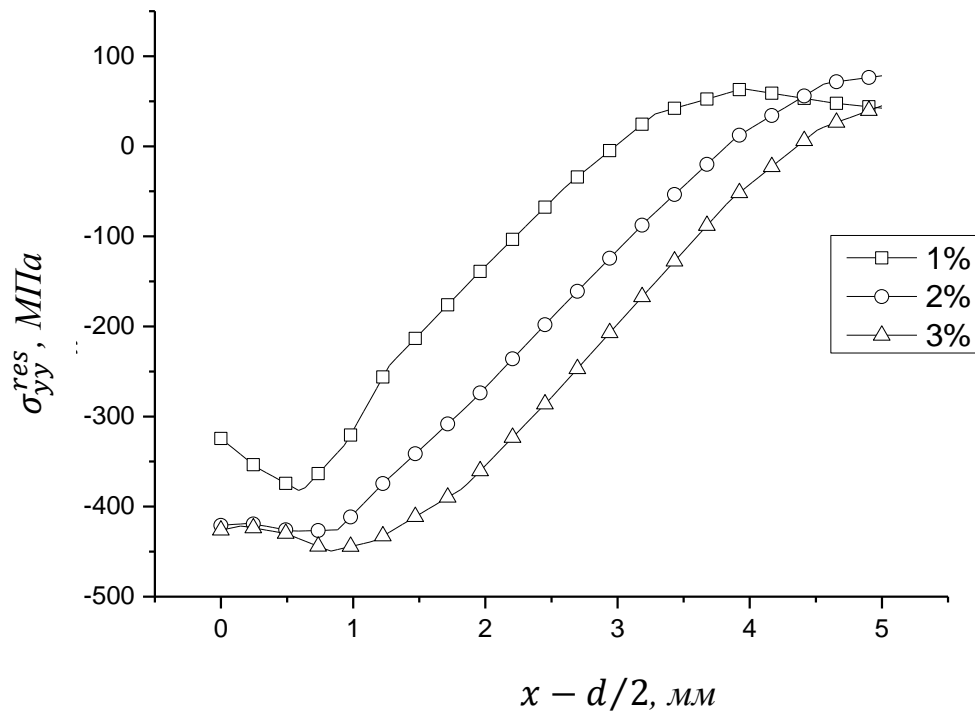


Gamma

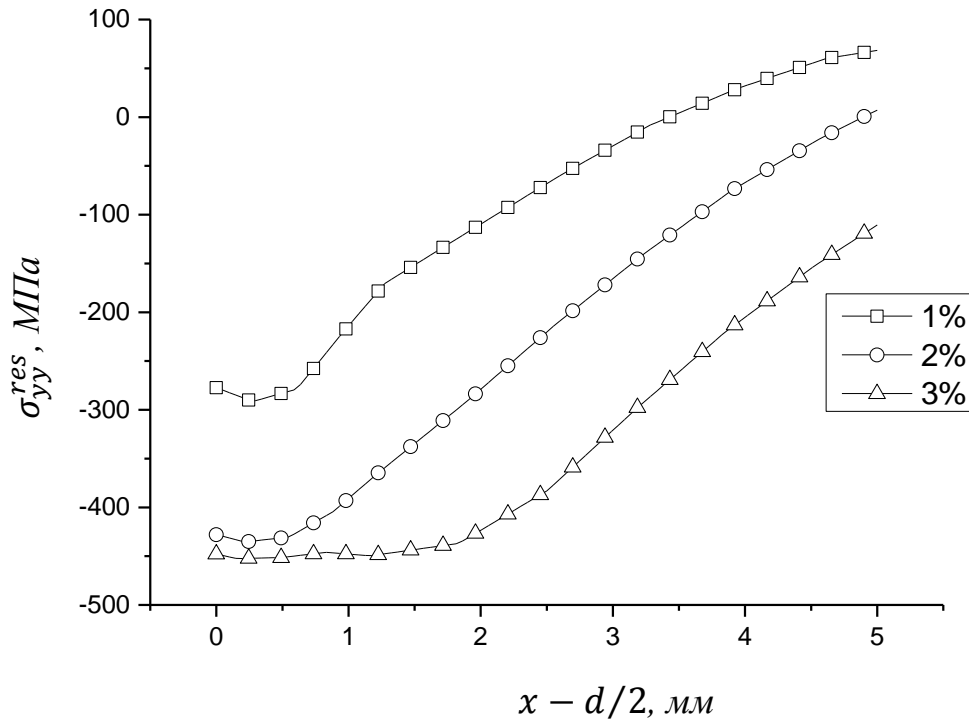




Э

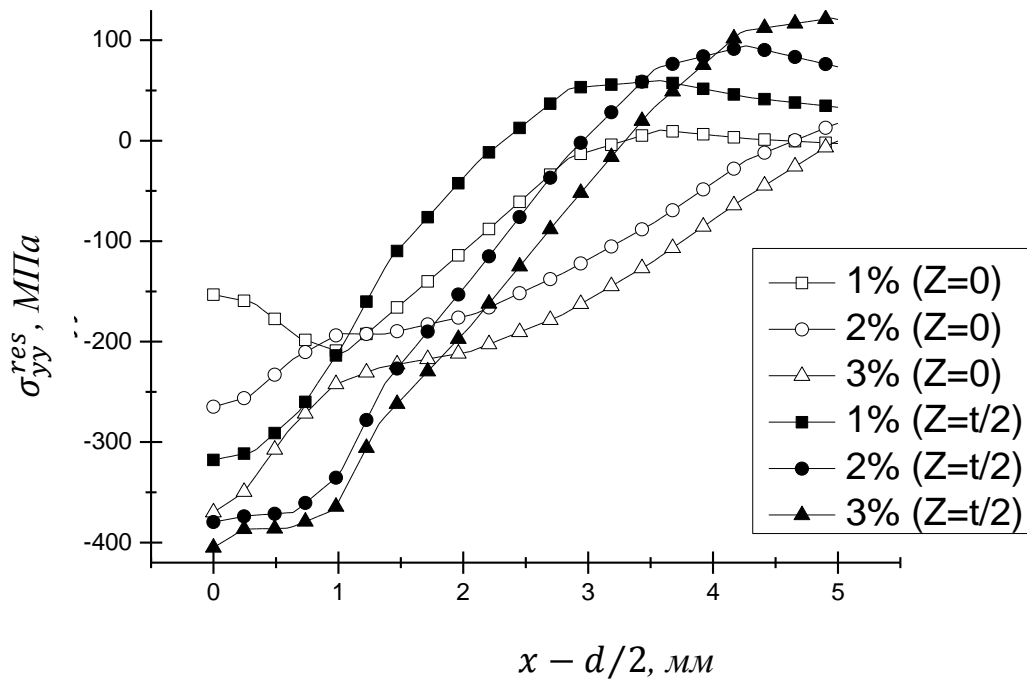


Ж

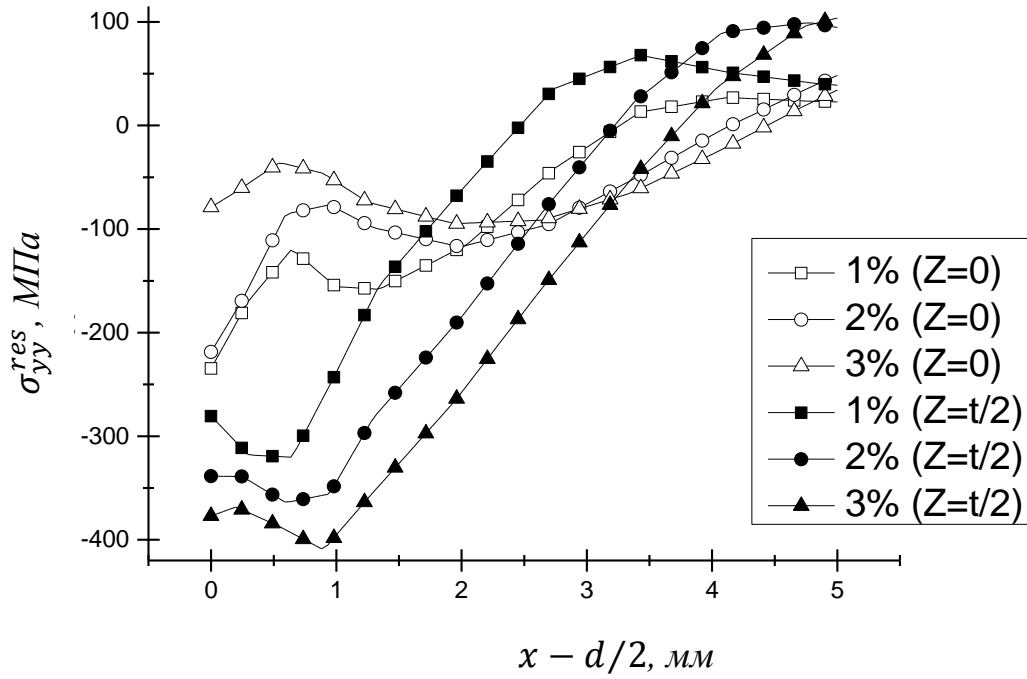


3

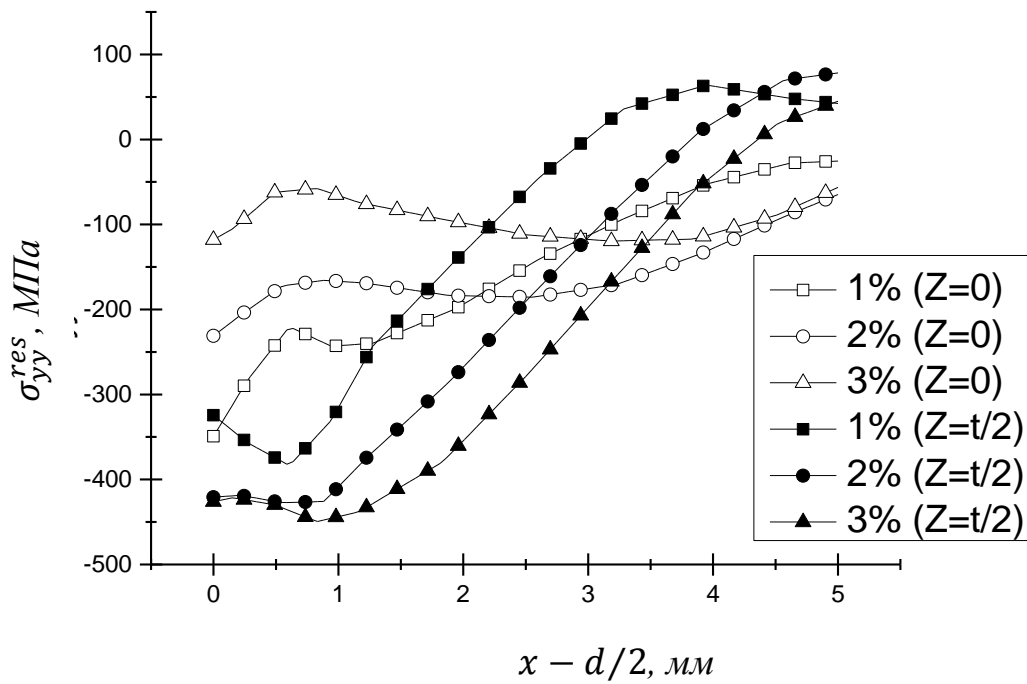
Рисунок 3.13 – Розподіл локальних залишкових стискаючих напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (а,б,в), 10 мм (г,д,е) та 12 мм (є,ж,з) при $Z = 0$ мм (а,г,є), $Z = t/2$ (б,д,ж) та $Z = t$ (в,є,з).



а



б



в

Рисунок 3.14 – Залишкові напруження стиску в околі функціональних отворів діаметром 8 мм (а), 10 мм (б) та 12 мм (в) після дорнування з натягом 1%, 2%, 3% на глибині $Z = 0$ (вхід дорна) та $Z = t/2$ (середня по товщині ділянка зразка).

На рис. 3.13-3.14 показано вплив дорнування з відносними натягами 1%, 2%, 3% на рівень залишкових стискувальних напружень на вході дорна та в середній ділянці отвору. На відстані 2,5-3,5 мм від отвору виникають залишкові напруження розтягу. З рис. 3.13-3.14 видно, що залишкові напруження стиску збільшуються прямо пропорційно підвищенню величини відносного натягу дорнування, як на вході дорна, так і в середній ділянці отвору. Рівень залишкових напружень стиску на вході дорна значно менший, ніж в середній ділянці отвору. Ця тенденція спостерігається для всіх досліджених відносних натягів дорнування. Тому, втомна тріщина при натурних випробуваннях завжди зароджувалася у експериментальних зразках із дорнованими отворами на вході дорна.

3.4. Зародження та ріст втомних тріщин від функціональних отворів з урахуванням залишкових напружень

Для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень нормального відриву K використовували методику Newman та Raju [115].

Відповідно K визначається за формулою:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot F_{ch} \left(\frac{a}{c_1}, \frac{a}{t}, \frac{r}{t}, \frac{r}{W}, \frac{c_1}{W}, \varphi \right) \quad (3.1)$$

де σ – це нетто-напруження розтягу; t – товщина зразка; $2W$ – ширина зразка; r – радіус отвору; φ – кут між положенням тріщини по відношенню до лицевої сторони; Q – поправочний коефіцієнт форми концентратора, який визначається за формулою:

$$Q = 1 + 1,464 \cdot \left(\frac{c_1}{a}\right)^{1,65}$$

Функція F_{ch} – це поправочний коефіцієнт для кутової тріщини у пластині, визначається як:

$$F_{ch} = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot f_\varphi \cdot f_W$$

Параметри M_1 , M_2 , M_3 , g_1 , g_2 , g_3 , f_φ , f_W визначаються наступним чином

$$M_1 = \sqrt{\frac{c}{a}} \cdot \left(1 + 0,04 \cdot \frac{c}{a}\right)$$

$$M_2 = 0,2 \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^4$$

$$M_3 = -0,11 \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^4$$

$$g_1 = 1 + \left[0,1 + 0,35 \cdot \left(\frac{c}{a}\right) \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2\right] \cdot (1 - \sin \varphi)^2$$

$$g_2 = \frac{1 + 0,358 \cdot \lambda + 1,425 \cdot \lambda^2 + 2,156 \cdot \lambda^4}{1 + 0,13 \cdot \lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{c}{r} \cdot \cos(0,85 \cdot \varphi)}$$

$$g_3 = \left(1,13 - 0,09 \cdot \frac{c}{a}\right) \cdot [1 + 0,1 \cdot (1 - \cos \varphi)^2] \cdot \left[0,85 + 0,15 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

$$f_\varphi = \left[\left(\frac{c}{a}\right)^2 \cdot \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi\right]^{\frac{1}{4}}$$

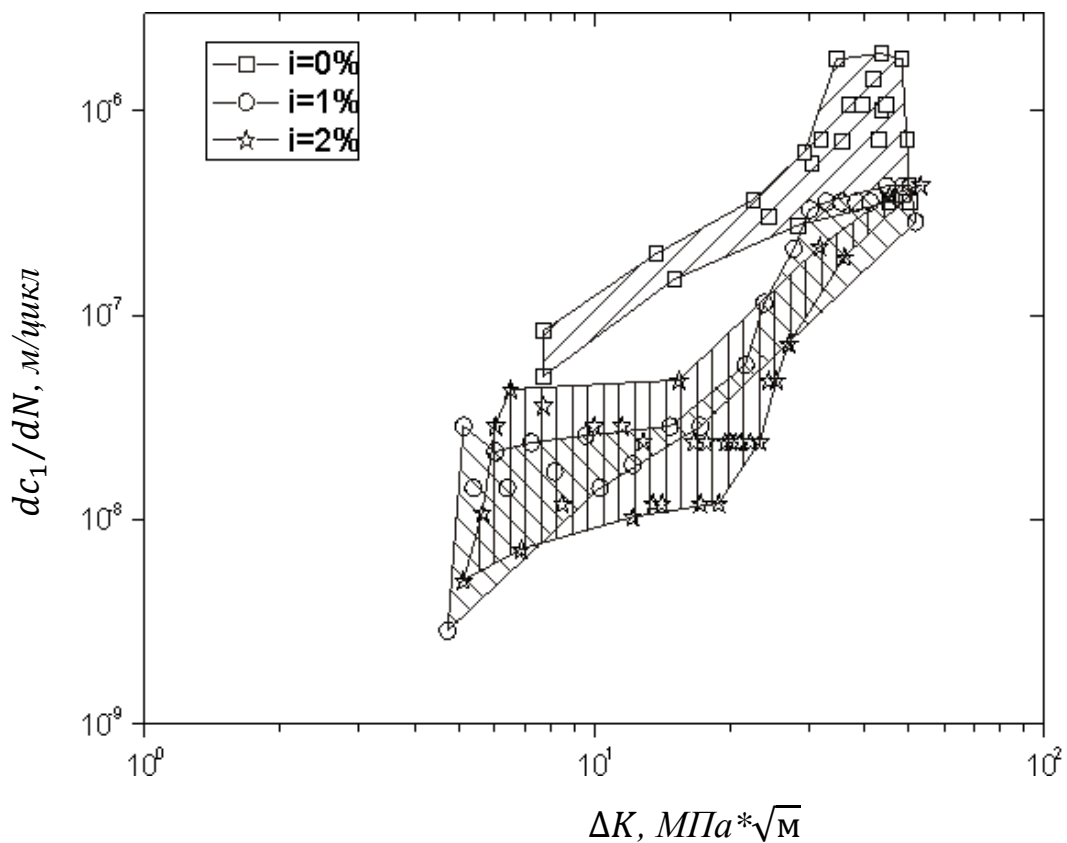
$$f_W = \left[\sec\left(\frac{\pi \cdot r}{2 \cdot W}\right) \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot (2 \cdot r + n \cdot c)}{4 \cdot (W - c) + 2 \cdot n \cdot c}\right) \cdot \sqrt{\frac{a}{t}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

На рис. 3.14 показано кінетичні діаграми втомного руйнування у координатах РВТ- ΔK [116].

Тут, розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK визначали за формулою (3.1), де σ замінюється на $\Delta\sigma$ (різниця між максимальним σ_{max} та мінімальним σ_{min} напруженням).

На рис. 3.15 зображено залежність швидкості росту поверхневої тріщини dc_1/dN від ефективного розмаху ΔK_{eff} . Розмах ефективного КІН визначали за формулою (3.1) замінивши $\Delta\sigma$ на $\Delta\sigma_{eff}$, яке обчислювали за формулою:

$$\Delta\sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{op}.$$



а

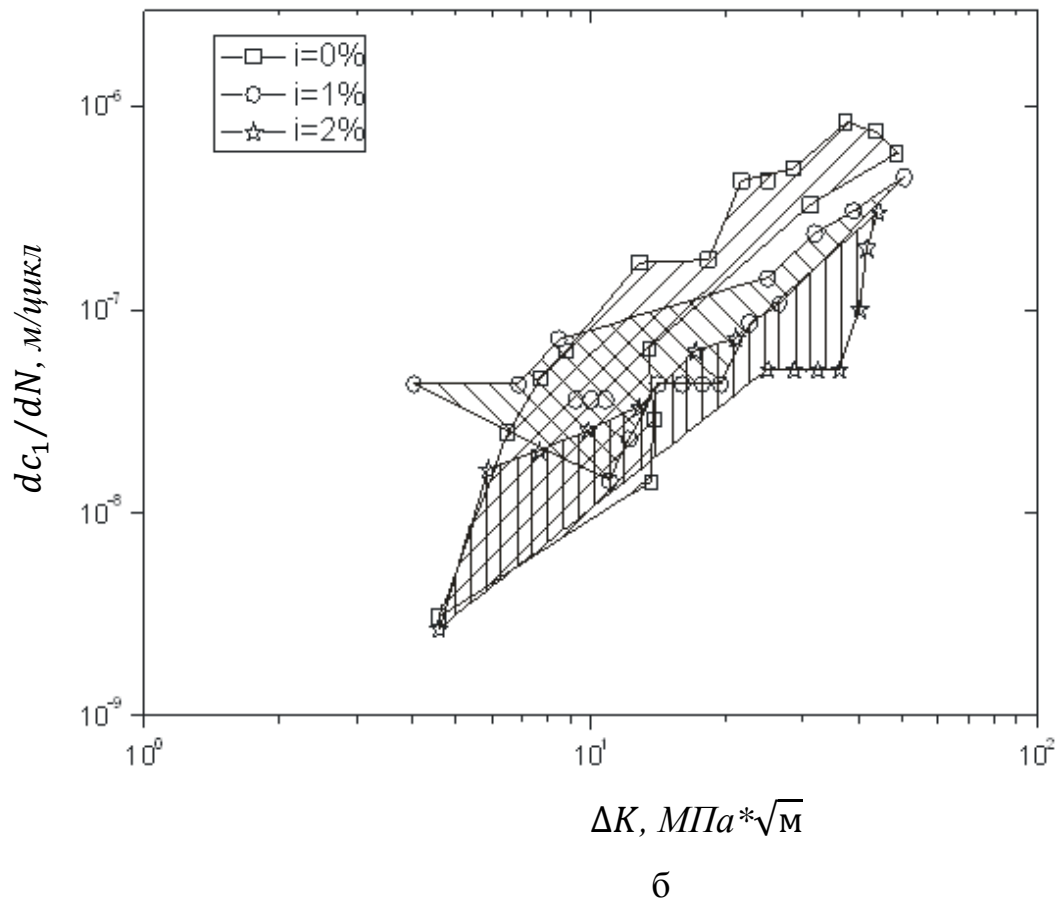


Рисунок 3.14 – Кінетична діаграма втомного руйнування отримана на зразках із отвором діаметром 8 mm – а та 10 mm – б

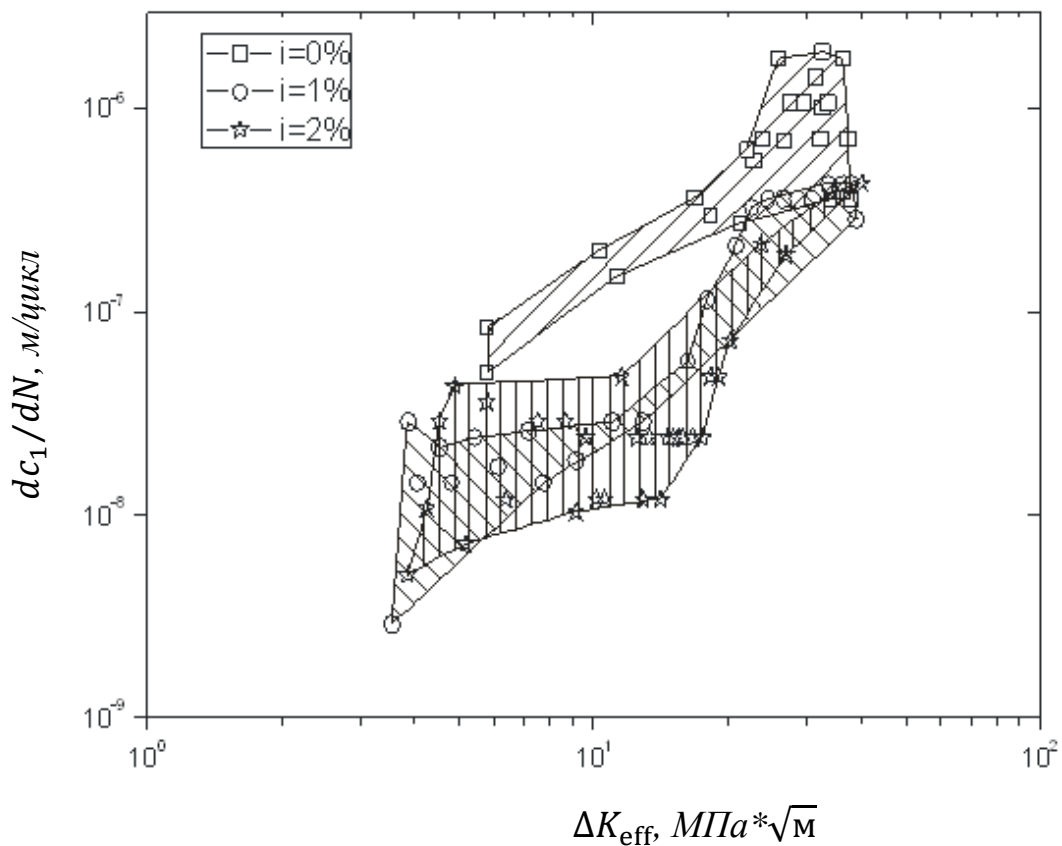
Напруження відкриття тріщини для різних асиметрій циклу визначаються із наступних рівнянь:

$$\left(\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}}\right)_{R=0} = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{max}}{\sigma_B}\right)^2, \quad \text{для } R = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}} = \left(\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}}\right)_{R=0} \cdot (1 - R)^2 + R, \quad \text{для } R \geq 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}} = \left(\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}} \right)_{R=0} \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_{min}}{\sigma_B} \right)^2 \right)^2, \quad \text{для } R \leq 0 \quad (3.4)$$

На рис. 3.15 зображені кінетичні діаграми втомного руйнування для ΔK_{eff} . Незалежно від натягу дорнування тріщини зароджуються від кромek пластично деформованих отворів з боку входу дорна. Кількість циклів до зародження втомної макротріщини на поверхні довжиною 0,25 mm від отворів збільшується із підвищенням відносного натягу дорнування. Це зумовлено домінуючим впливом залишкових стискувальних напружень в околі зміцнених отворів. З підвищенням відносного натягу дорнування від 1% до 2% ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень та швидкість поширення втомної тріщини зменшуються.



а

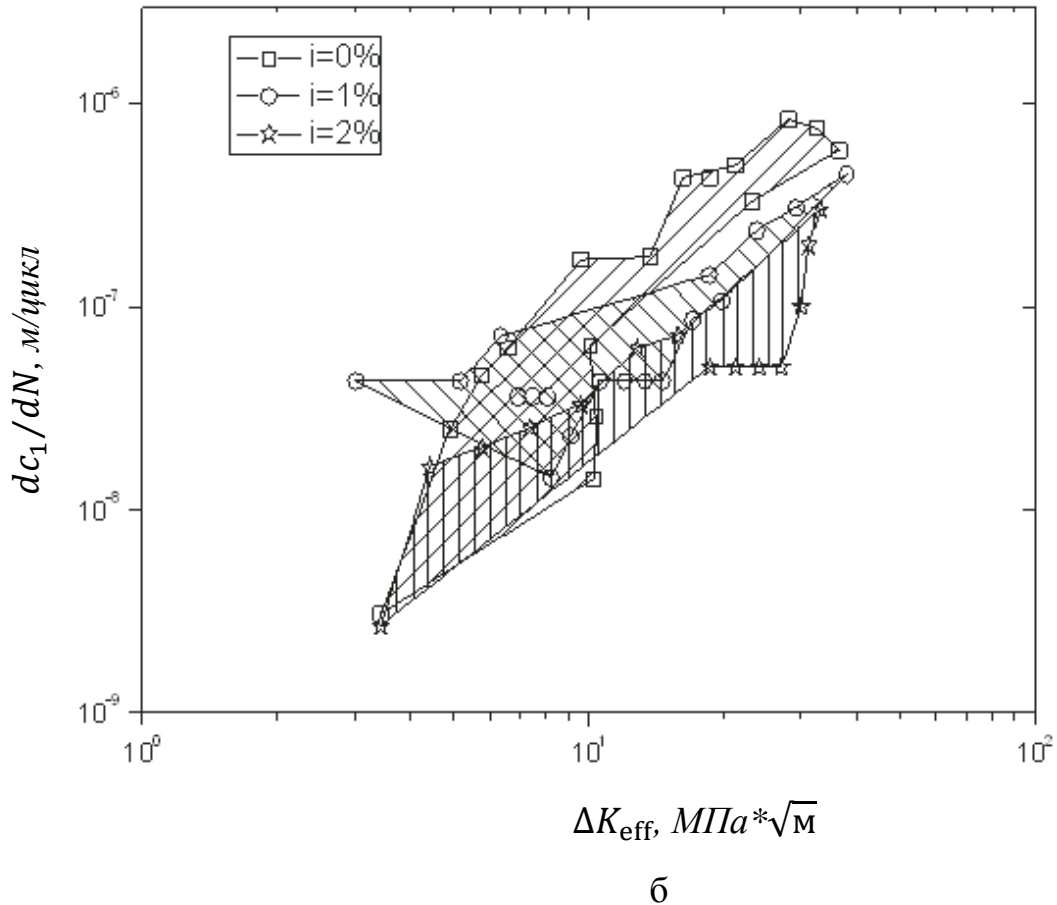


Рисунок 3.15 – Кінетична діаграма втомного руйнування в ефективних координатах отримана на зразках із отвором діаметром 8 mm – а та 10 mm – б.

Висновки

1. Проаналізовано мікромеханізми зародження та поширення втомних тріщин від функціональних отворів використовуючи описані у розділі 2.3 методики фрактографічних досліджень. Фронт втомної тріщини в зразках з отворами після механічної обробки наближений до півеліптичного. Тріщина зароджується переважно в середині (по товщині) ділянці отвору і поширюється в тіло зразка. Фронт тріщини набуває півеліптичної форми.
2. Виявлено, що у дорнованих зразках тріщина виникає на кромці отвору, переважно з боку входу дорна в отвір, і поширюється в тіло зразка.

Фронт тріщини спочатку набуває чвертьеліптичної форми, а в подальшому стає півеліптичним. Втомна тріщина в зразках з дорнованими отворами спочатку не виходить на поверхню отвору, а проростає до протилежної стінки зразка на відстані 1-2 мм від отвору. При цьому залишається тонка незруйнована смужка вздовж отвору, товщиною 1-2 мм. Такий ефект виникає внаслідок дії залишкових стискувальних напружень в околі отвору дорнованих зразків.

3. Створено модель для розрахунку пружно-пластичного деформування пластини з центральним отвором під час дорнування з натягом 1%, 2%, 3% для отворів діаметром 8 мм, 10 мм, 12 мм за використанням методу скінчених елементів за допомогою програмного модуля ANSYS Explicit Dynamics. Побудовано залежності розподілу локальних залишкових напружень стиску в околі отвору від величини відносного натягу дорнування. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування збільшуються залишкові напруження стиску, а також ширина ділянки стискувальних напружень біля отвору. Виявлено, що найменші локальні залишкові напруження стиску виникають з сторони входу дорна для всіх досліджених натягів дорнування 1%-3%, а найбільші – у середній ділянці отвору, ближче до виходу дорна. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування (від 1% до 3%) різниця між найменшими та найбільшими локальними залишковими напруженнями стиску зменшується.

4. Визначено коефіцієнти інтенсивності напружень для кутової тріщини з урахуванням залишкових напружень за допомогою методики Newman та Raju. Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування досліджуваних зразків у подвійних логарифмічних координатах. Досліджено основні закономірності впливу пластичного дорнування отворів з відносним натягом 1-3% на зародження та перебіг поширення

втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ. Виявлено, що незалежно від натягу дорнування тріщини зароджуються від кромek пластично деформованих отворів з боку входу дорна. Кількість циклів до зародження втомної макротріщини на поверхні довжиною 0,25 mm від отворів збільшується із підвищенням відносного натягу дорнування. Це зумовлено домінуючим впливом залишкових стискувальних напружень в околі зміцнених отворів. З підвищенням відносного натягу дорнування від 1% до 2% ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень та швидкість поширення втомної тріщини зменшуються.

Розділ 4. Прогнозування зародження та росту втомних тріщин від функціональних отворів

4.1. Розрахунок локальних напружень в околі отвору методом скінчених елементів за регулярного навантаження

На рис. 4.1 зображено розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм та натягу дорнування 1%, отриманих моделюванням методом скінчених елементів, від кількості півциклів навантаження на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$).

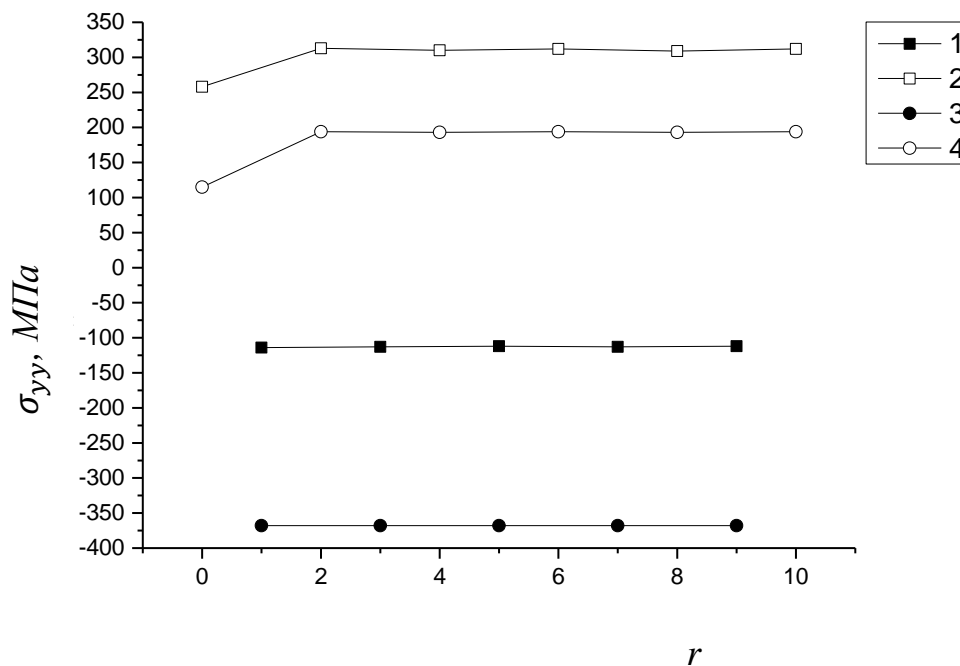
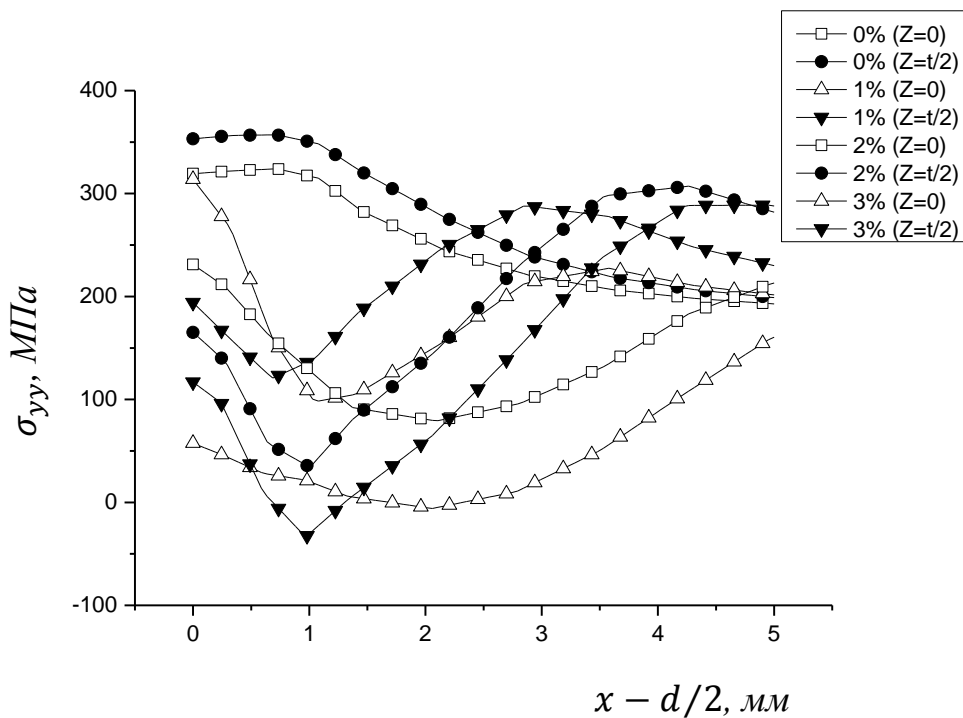


Рисунок 4.1 – Залежність локальних мінімальних σ_{yy}^{min} (1,3) та максимальних σ_{yy}^{max} (2,4) напружень від кількості півциклів навантаження r в околі функціонального отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, $Z = 0$ (1,2), $Z = t/2$ (3,4)

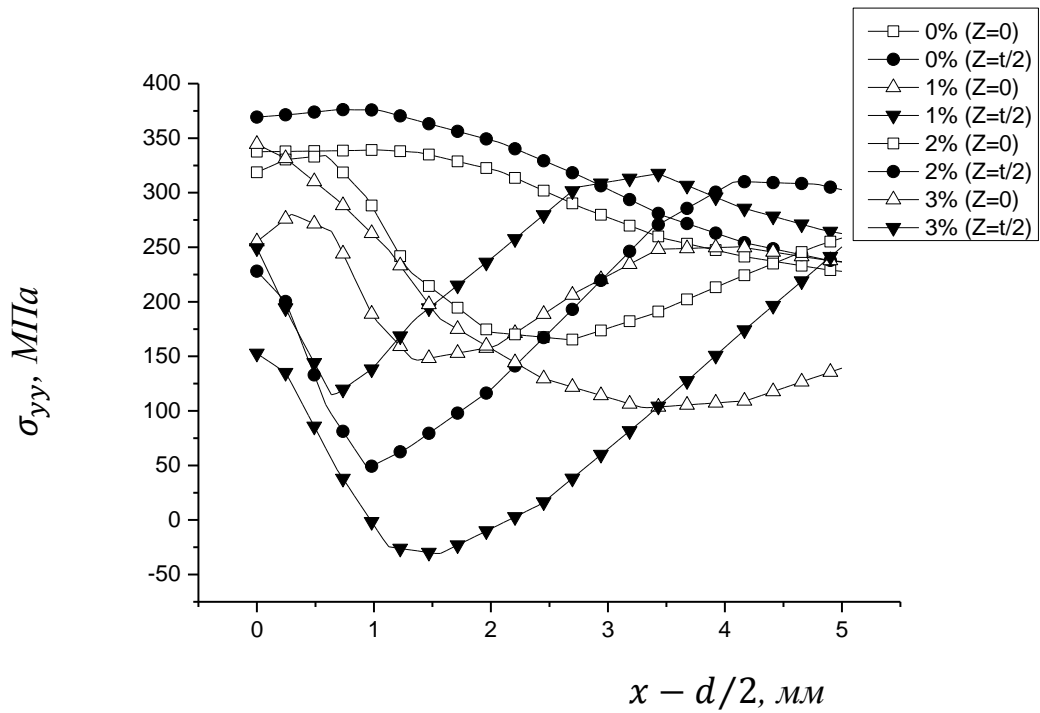
Оскільки локальні напруження σ_{yy}^{min} і σ_{yy}^{max} стабілізуються уже на 2 півциклі навантаження, то в подальшому обчислювали НДС враховуючи лише 2 півцикли навантаження.

На рис. 4.2 зображено розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та 12 мм на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$) для другого півциклу навантаження.

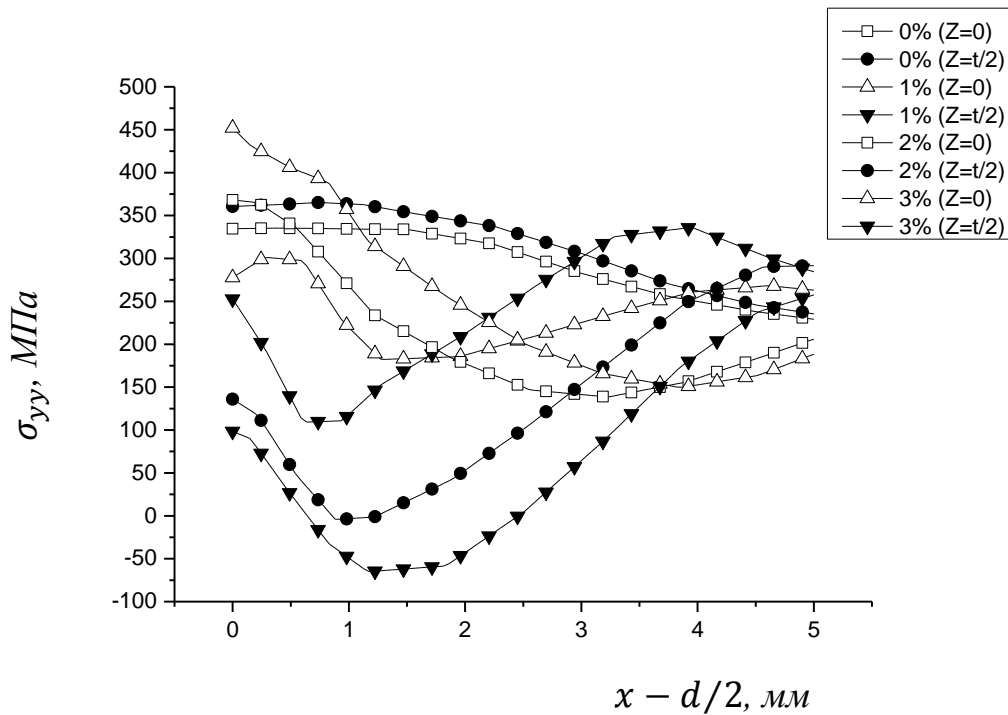
На рис. 4.3 [117] зображено розподіл розмаху локальних напружень біля отворів діаметром 8 мм (рис. 4.3а), 10 мм (рис. 4.3б), 12 мм (рис. 4.3в) для натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%) для другого півциклу навантаження. Обчислювали розподіл розмаху локальних напружень на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$).



а

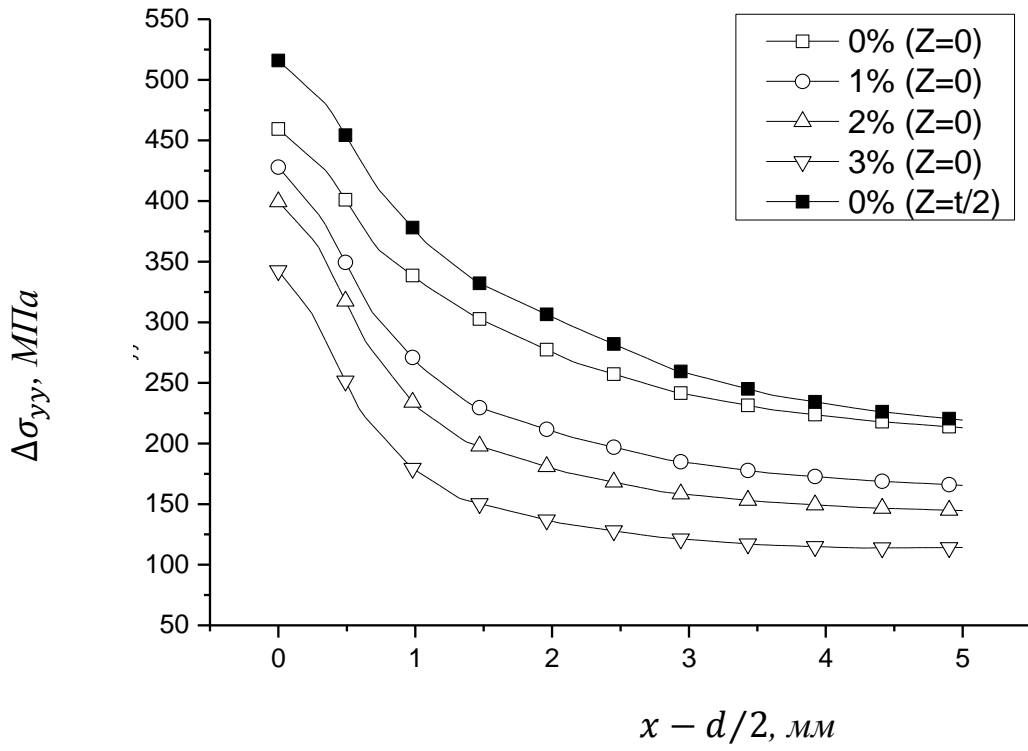


б

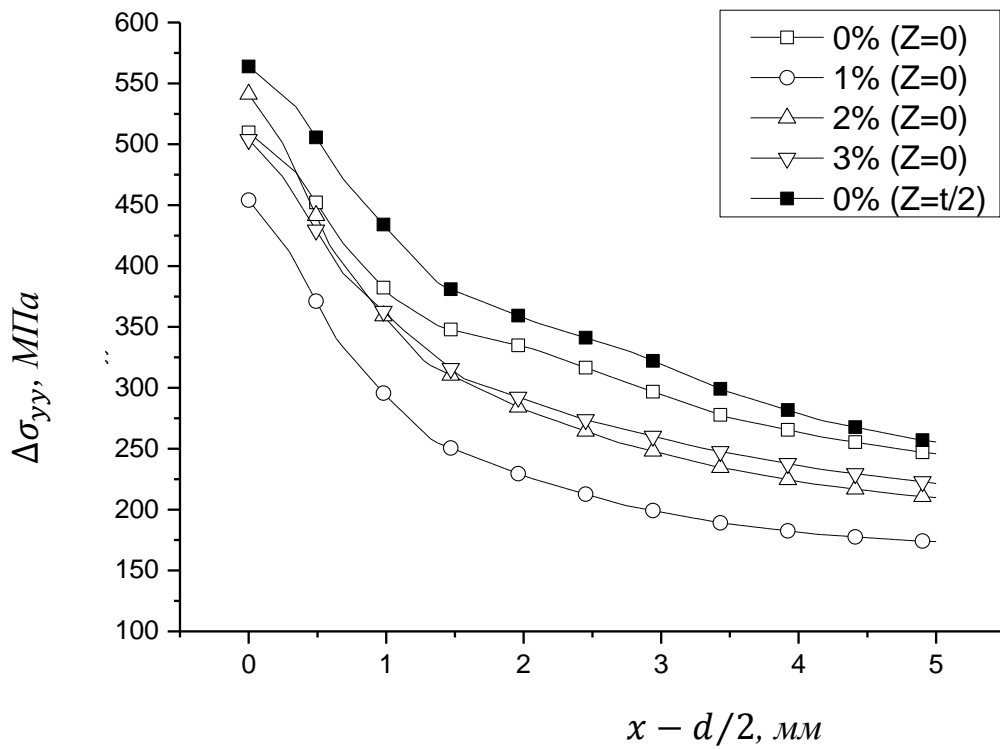


в

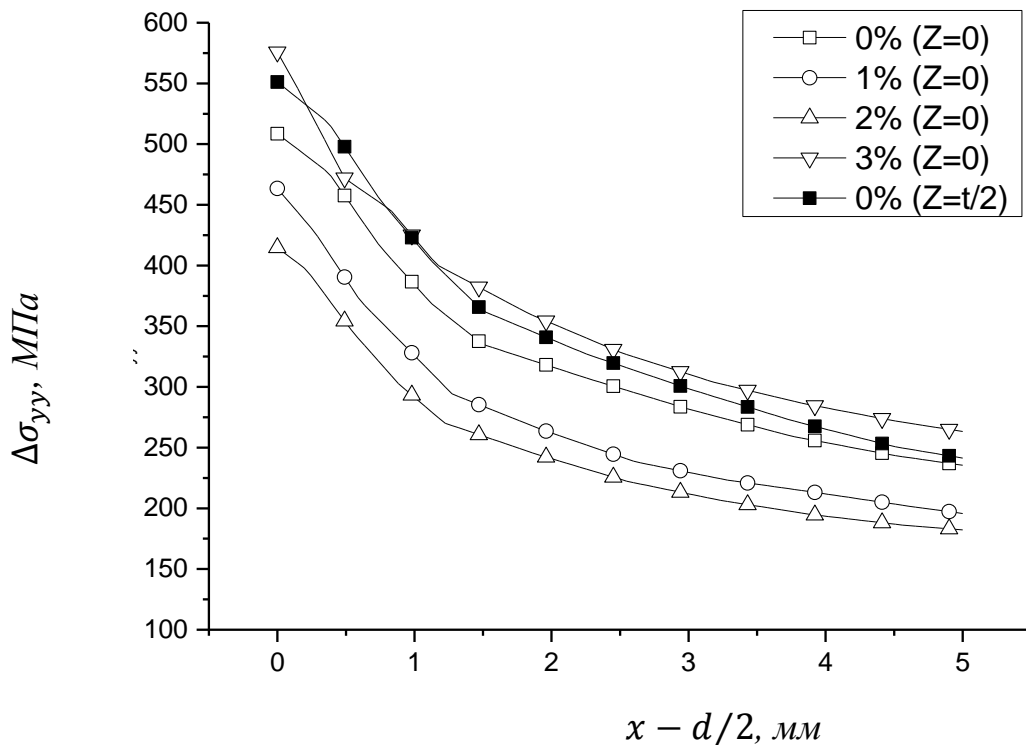
Рисунок 4.2 – Розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (а), 10 мм (б), 12 мм (в) на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$).



a



б



в

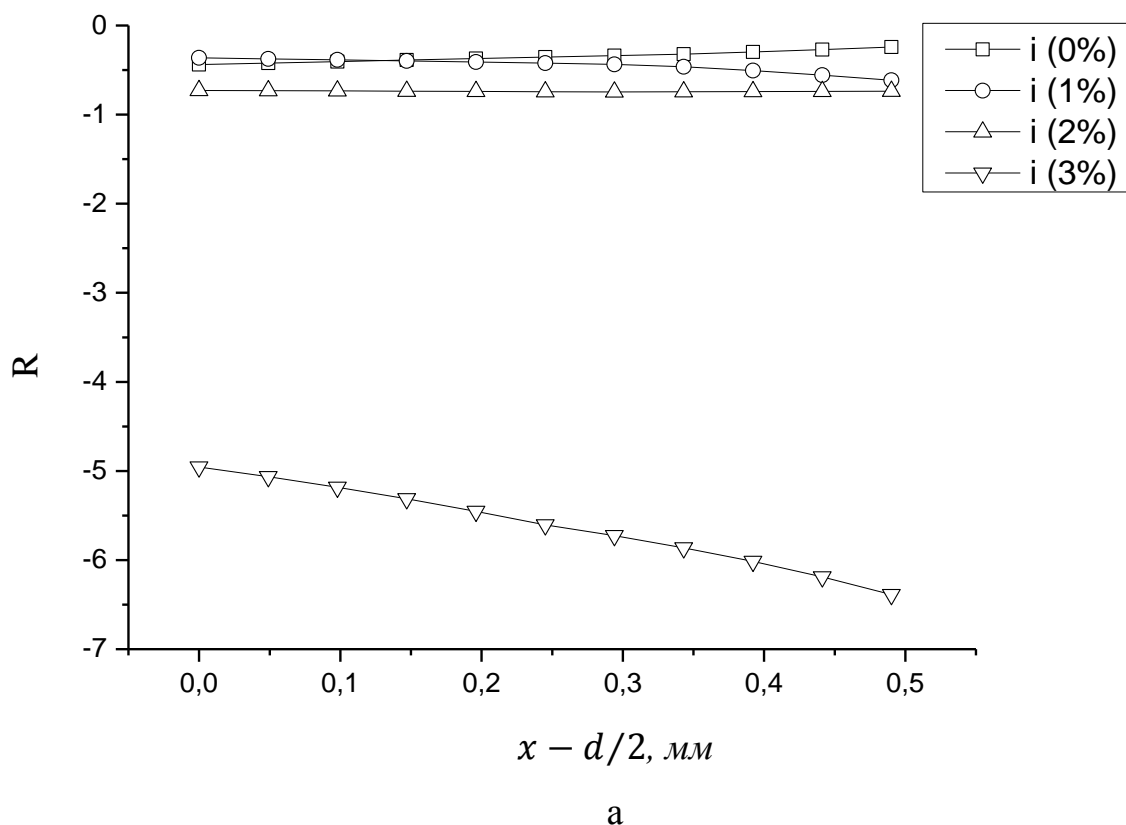
Рисунок 4.3 – Графіки розподілу розмаху напружень для отворів діаметром 8 мм (а), 10 мм (б), 12 мм (в), натягів дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%).

Із отриманих результатів слідує, що найбільший розмах локальних напружень виникає у середній частині по товщині отвору без дорнування ($i=0\%$, $Z = t/2$). Це пояснює експериментальні дослідження, де тріщина зароджувалася та поширювалася в середній частині зразка ($Z = t/2$) за однобічного розтягу.

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 ($i=1\%...3\%$) на кромці отвору значно менші ніж у середній частині.

4.2. Розрахунок локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження в околі отвору методом скінчених елементів за регулярного навантаження

На рис. 4.4 зображено розподіл локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження $R_{yy} = \sigma_{yy}^{min} / \sigma_{yy}^{max}$ біля отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування, отриманих моделюванням методом скінчених елементів. Розподіл локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) та середній частині циліндричної поверхні зразка ($Z = t/2$).



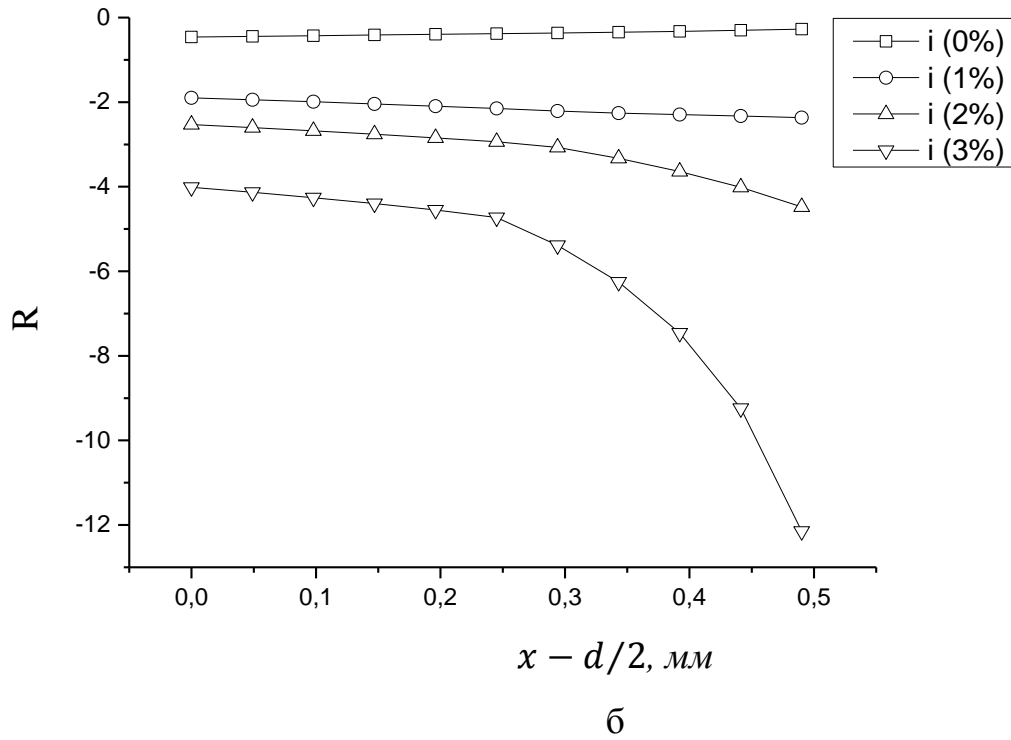
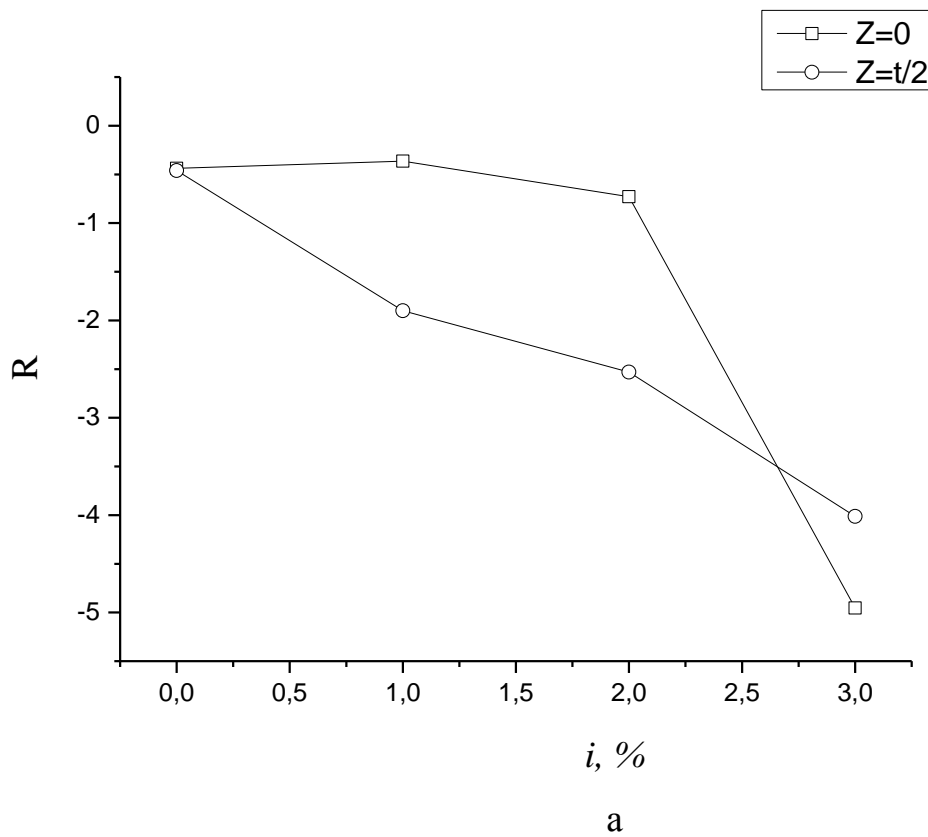


Рисунок 4.4 – Розподіл локального коефіцієнта асиметрії циклу навантаження біля отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%): а – $Z = 0$; б – $Z = t/2$.



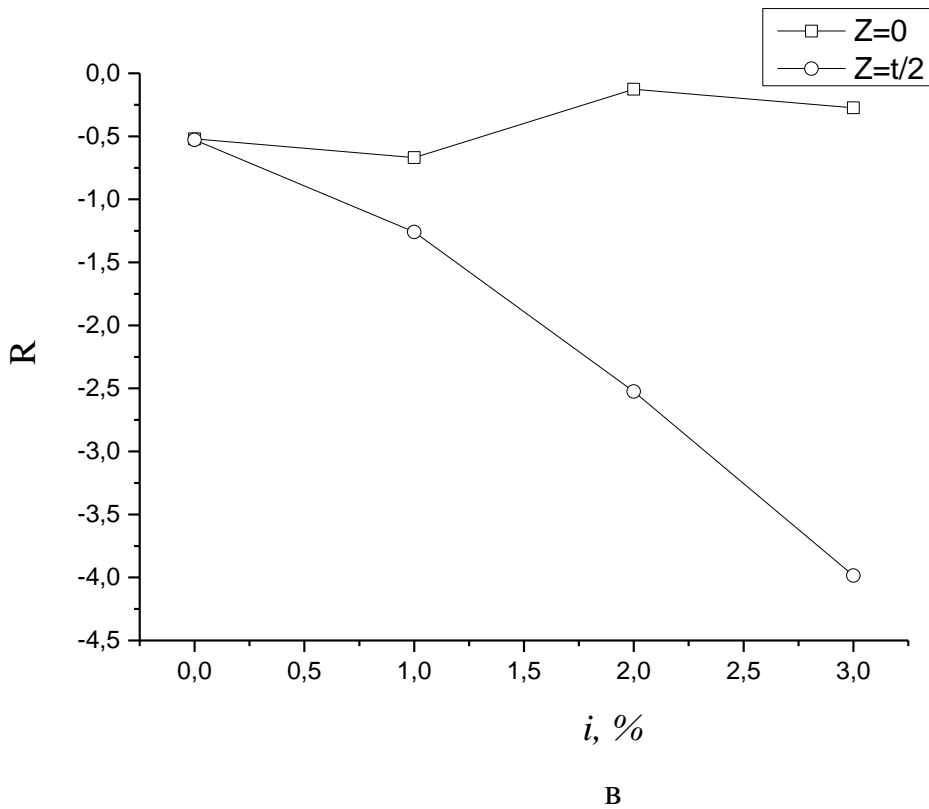
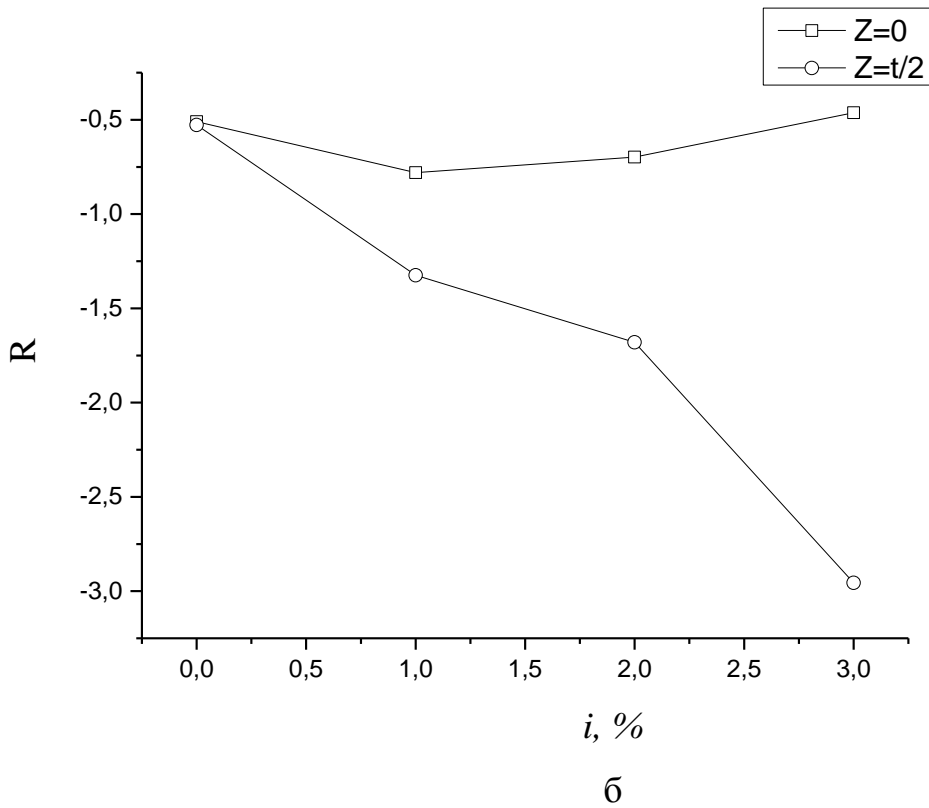
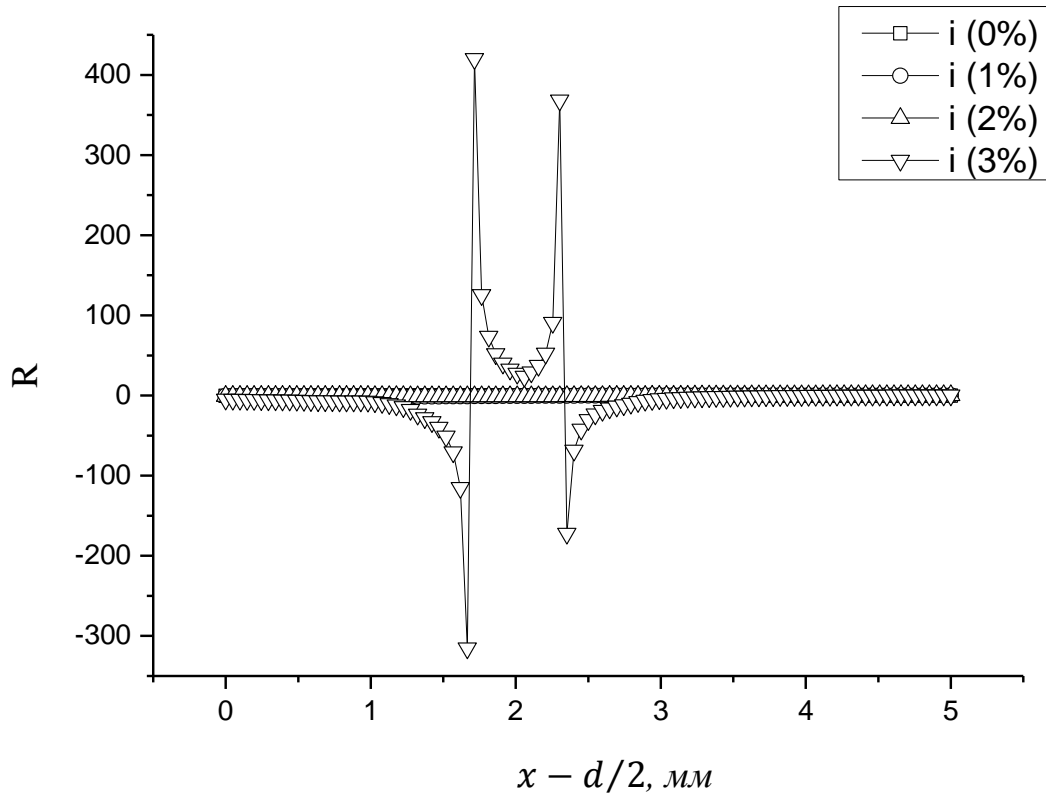
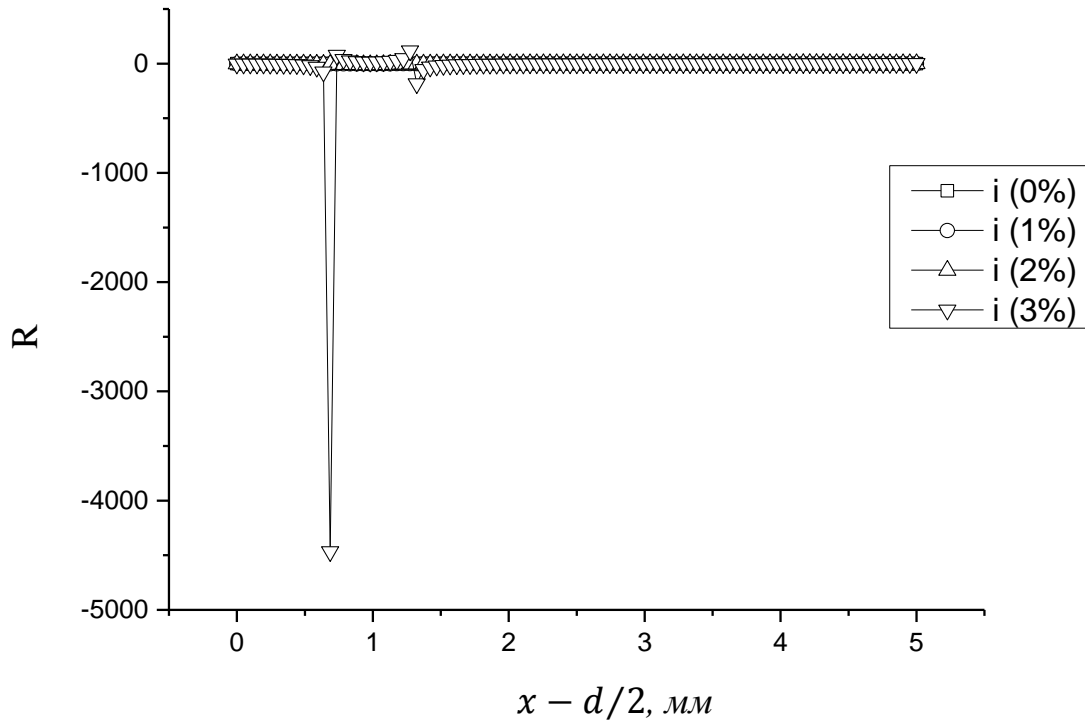


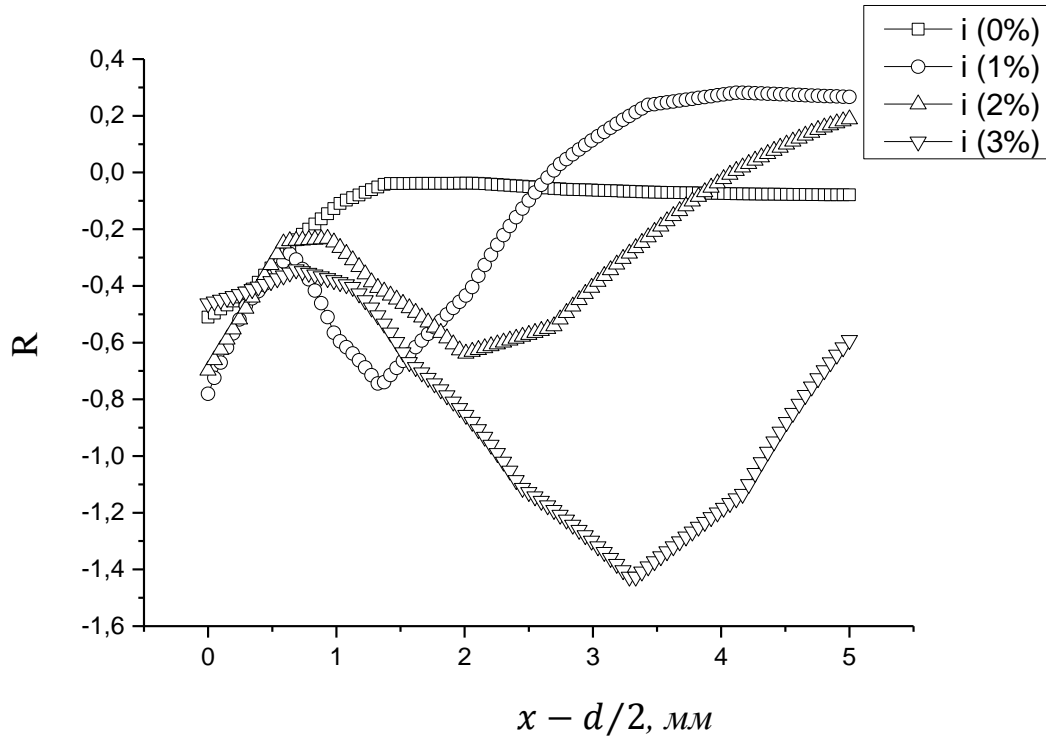
Рисунок 4.5 – Розподіл локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження R на циліндричній поверхні отвору в залежності від натягу дорнування (0%...3%) для отворів діаметром 8 мм (а), 10 мм (б), 12 мм (в).



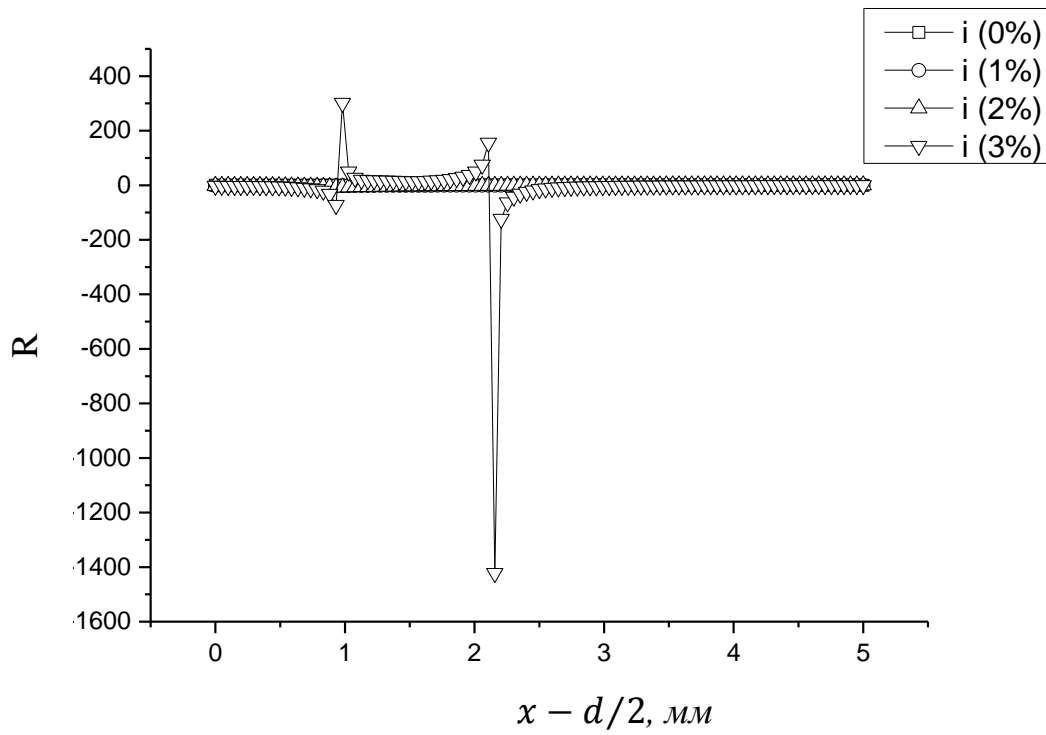
а



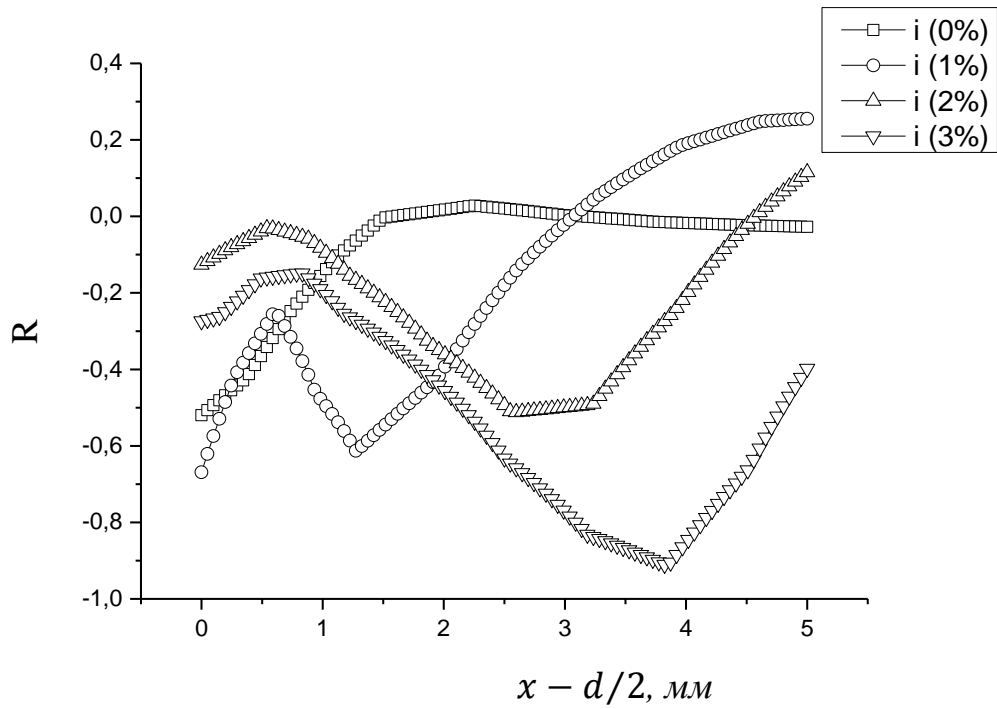
б



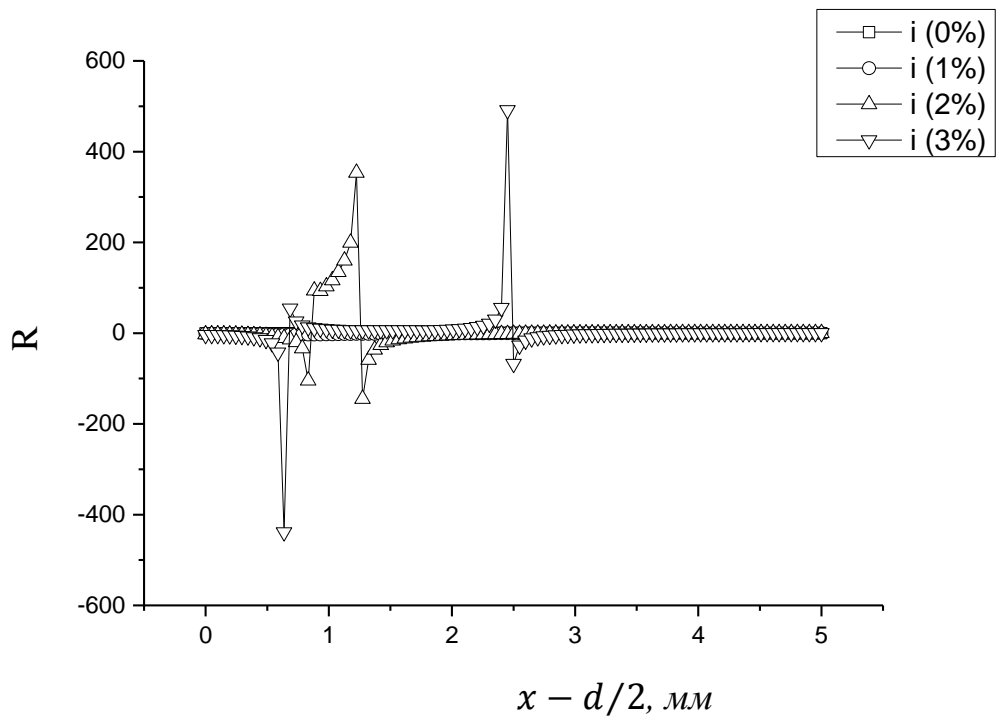
B



Г

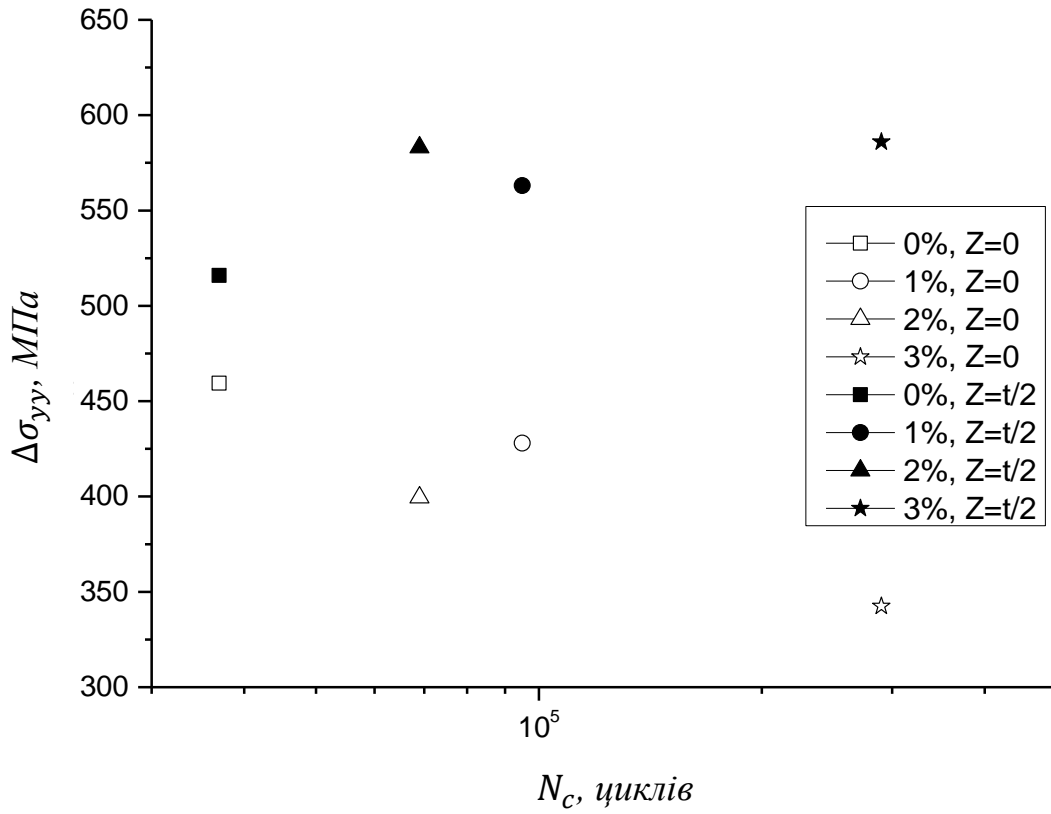


Д

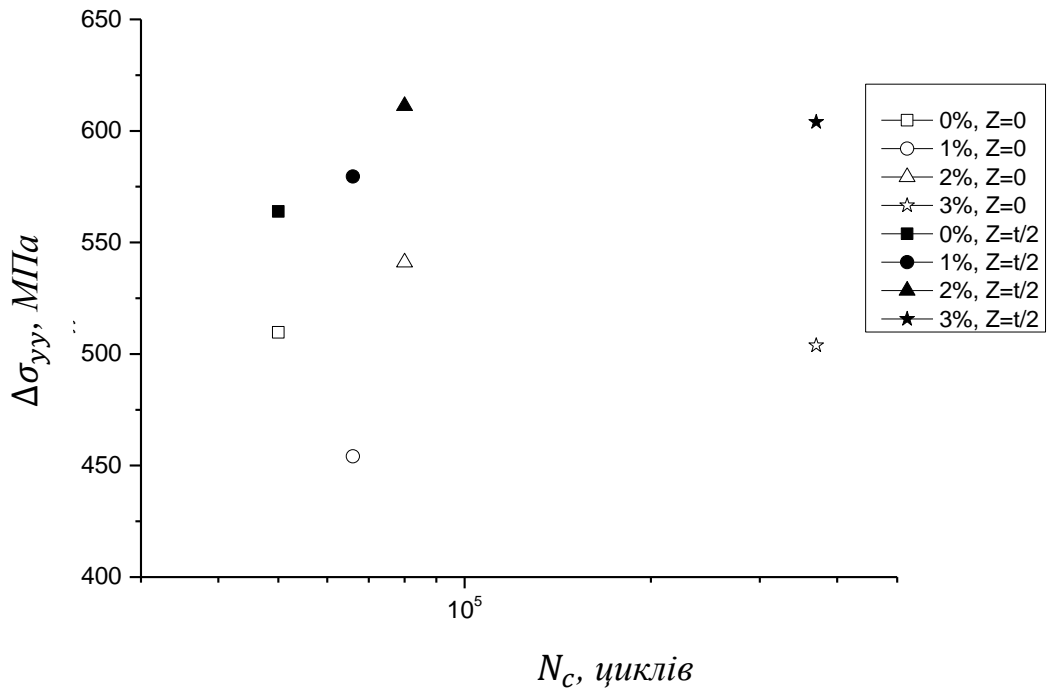


е

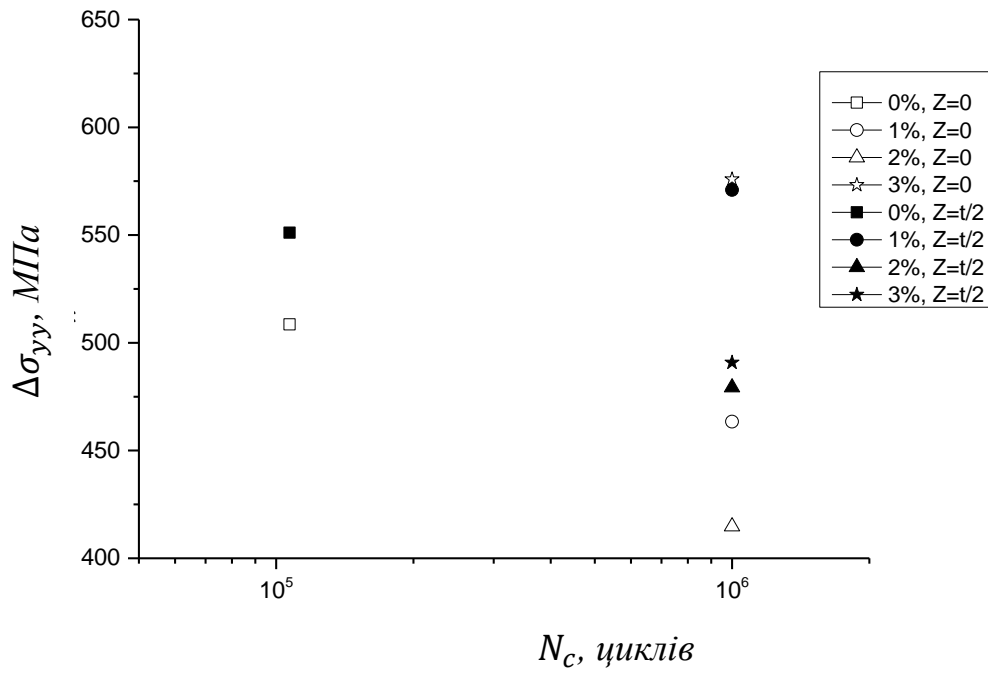
Рисунок 4.6 – Розподіл асиметрії циклу навантаження на глибині від 0 мм до 5 мм від поверхні отвору у другому півциклі навантаження за діаметра отворів 8 мм (а, б), 10 мм (в, г), 12 мм (д, е) на вході дорна (а, в, д) та в середній по товщині ділянці отвору (б, г, е)



а

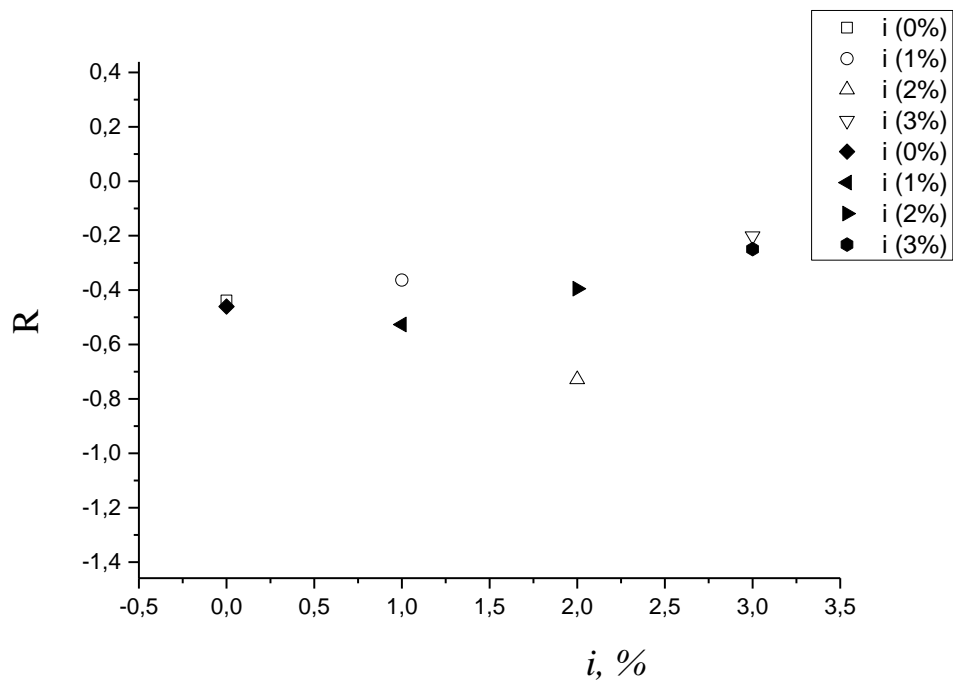


б



в

Рисунок 4.7 – Розмах напружень на циліндричній поверхні отвору у другому півциклі навантаження в залежності від кількості циклів до зародження тріщини довжиною 0,25 мм: а – діаметр отвору 8 мм; б – діаметр отвору 10 мм; в – діаметр отвору 12 мм



а

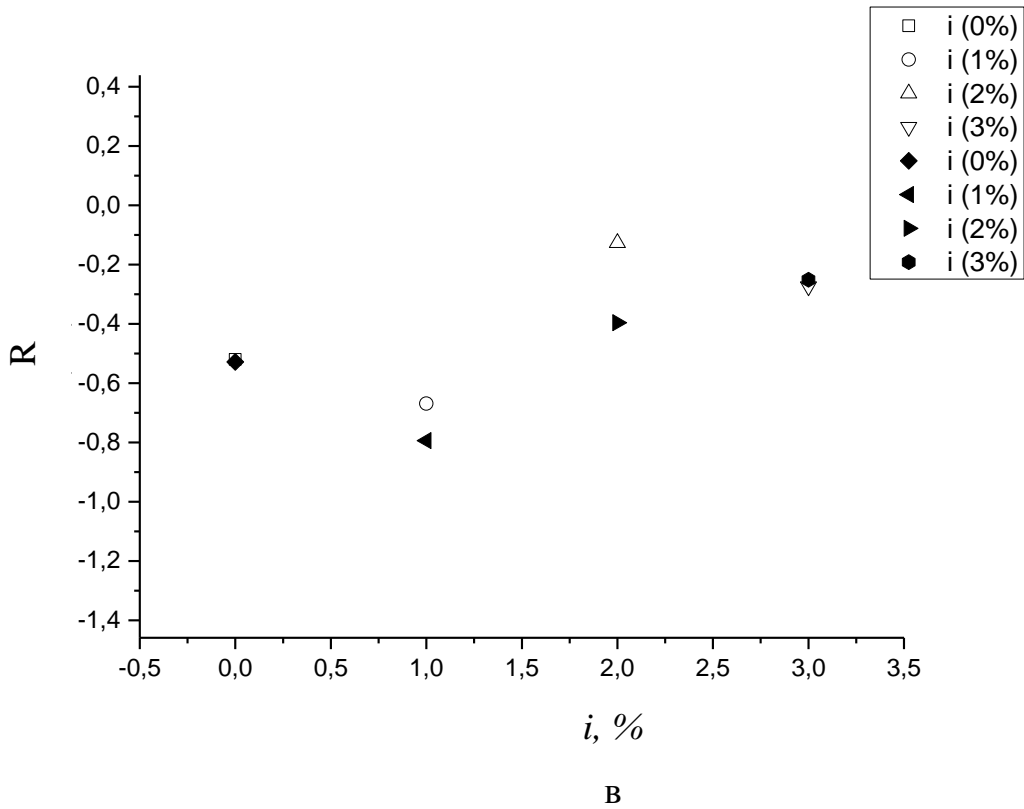
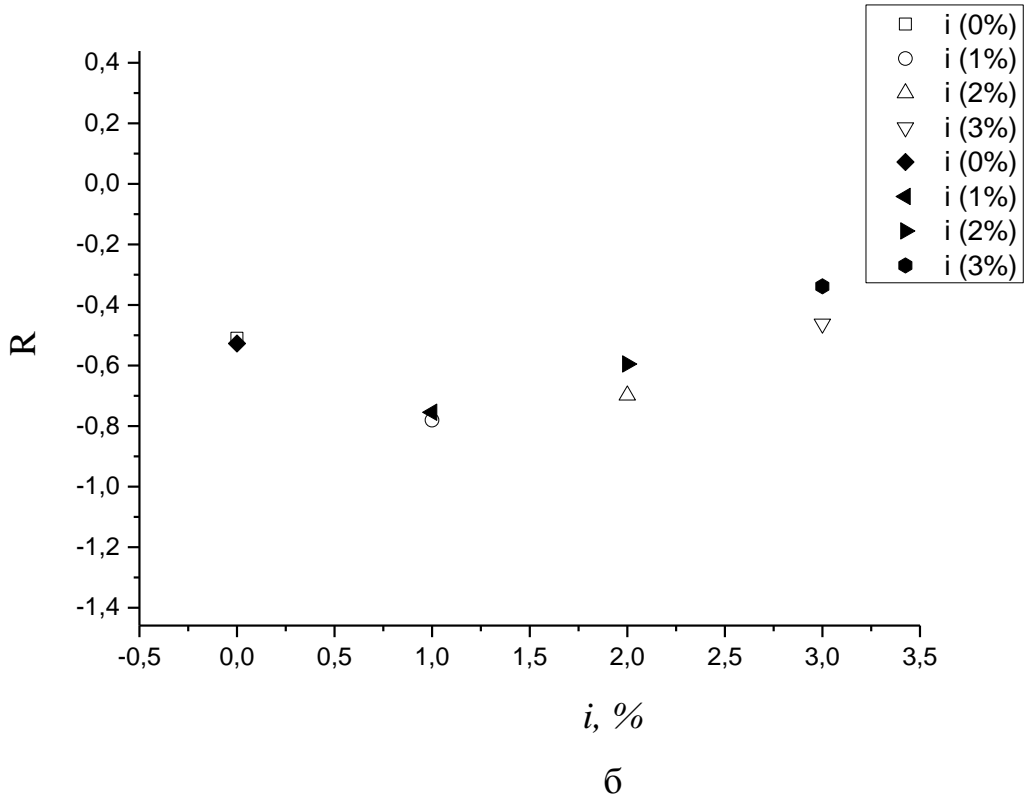


Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнта асиметрії циклу навантаження на циліндричній поверхні отвору у другому півциклі від натягу дорнування: а – діаметр отвору 8 мм; б – діаметр отвору 10 мм; в – діаметр отвору 12 мм;

4.3. Прогнозування періоду до зародження втомної тріщини з урахуванням залишкових стискаючих напружень після поверхневого пластичного зміцнення

Для побудови кривих втоми довговічності до зародження втомної тріщини:

- 1) використали експериментальні дані по зародженню втомної тріщини;
- 2) використали локальні максимальні напруження розтягу та розмах локальних напружень розтягу, отримані розрахунком МСЕ;
- 3) експериментальні дані апроксимували за формулою:

$$y = a + b \cdot \ln x \quad (4.1)$$

де y – локальні напруження розтягу, отримані розрахунком МСЕ; x – кількість циклів; a , b – параметри кривої.

У таблиці 4.1 представлені параметри a , b кривої втоми довговічності до зародження втомної тріщини для отворів діаметром 8 мм та 10 мм від локальних напружень σ_{yy} на поверхні та на глибині, що дорівнює величині зони передруйнування алюмінієвого сплаву Д16чТ d^* .

На рис. 4.9 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від локальних максимальних напружень σ_{yy}^{max} в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) для другого півциклу навантаження.

На рис. 4.10 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від розмаху

локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) для другого півциклу навантаження.

Таблиця 4.1

Параметри a , b кривої втоми довговічності до зародження втомної тріщини

Вид напруження	Діаметр отвору, мм	a	Розкид параметру a	b	Розкид параметру b
σ_{yy}^{max} при $x = d/2$	8	1649,79	549,44	-124,27	47,98
σ_{yy}^{max} при $x = d/2$	10	89,89	332,48	19,43	28,82
σ_{yy}^{max} при $x = d/2 + d^*$	8	1770,22	323,69	-136,81	26,79
σ_{yy}^{max} при $x = d/2 + d^*$	10	1167,71	813,81	-87,35	70,56
$\Delta\sigma_{yy}$ при $x = d/2$	8	1016,27	174,87	-53,35	15,27
$\Delta\sigma_{yy}$ при $x = d/2$	10	465,08	325,66	3,18	28,23
$\Delta\sigma_{yy}$ при $x = d/2 + d^*$	8	1083,75	174,73	-58,40	15,26
$\Delta\sigma_{yy}$ при $x = d/2 + d^*$	10	531,77	127,67	-14,68	11,07

На рис. 4.11 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від локальних максимальних напружень σ_{yy}^{max} на глибині d^* в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ на

поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) для другого півциклу навантаження.

На рис. 4.12 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ на глибині d^* в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ на поверхні зразка з боку входу дорна ($Z = 0$) для другого півциклу навантаження.

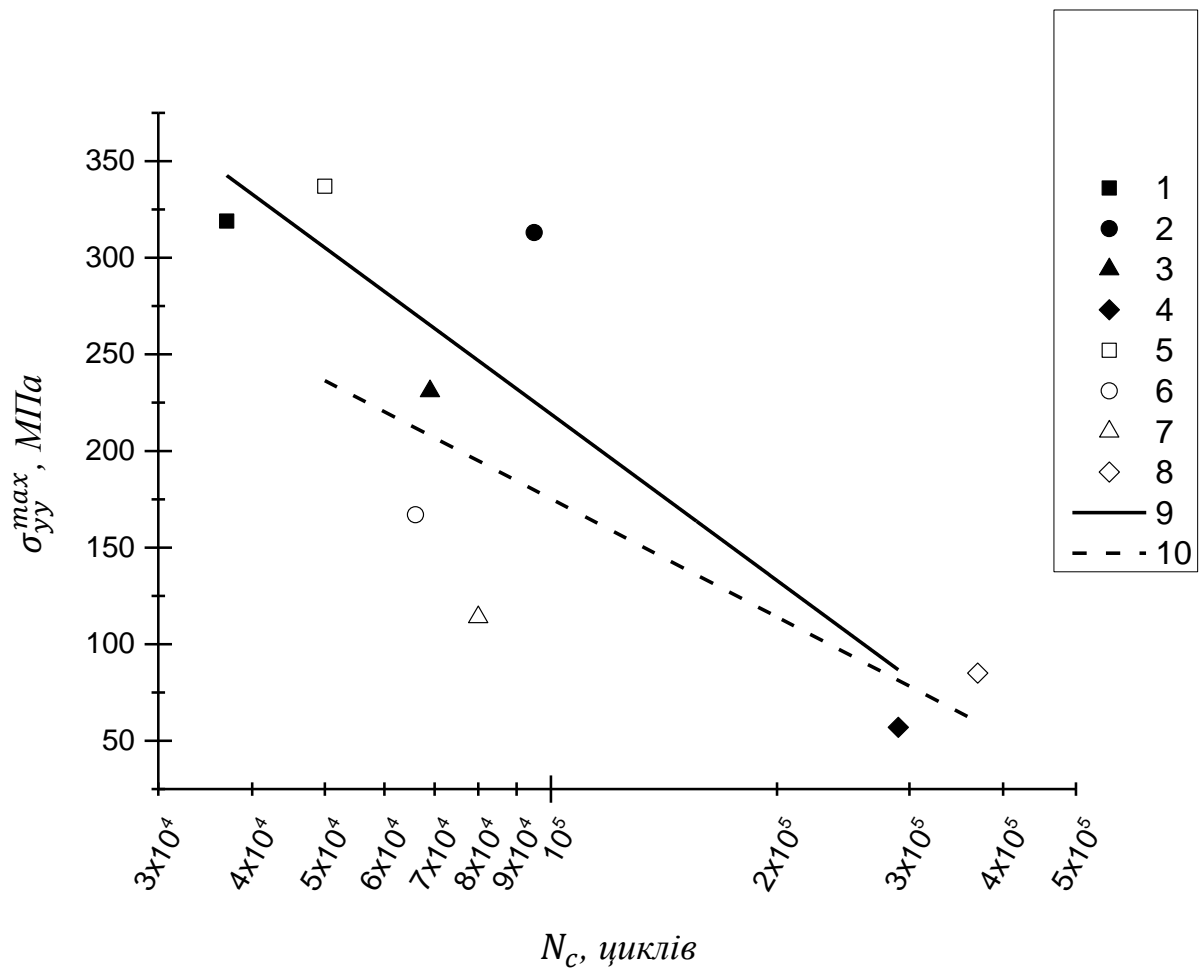


Рисунок 4.9 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від максимальних напружень σ_{yy}^{max} в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

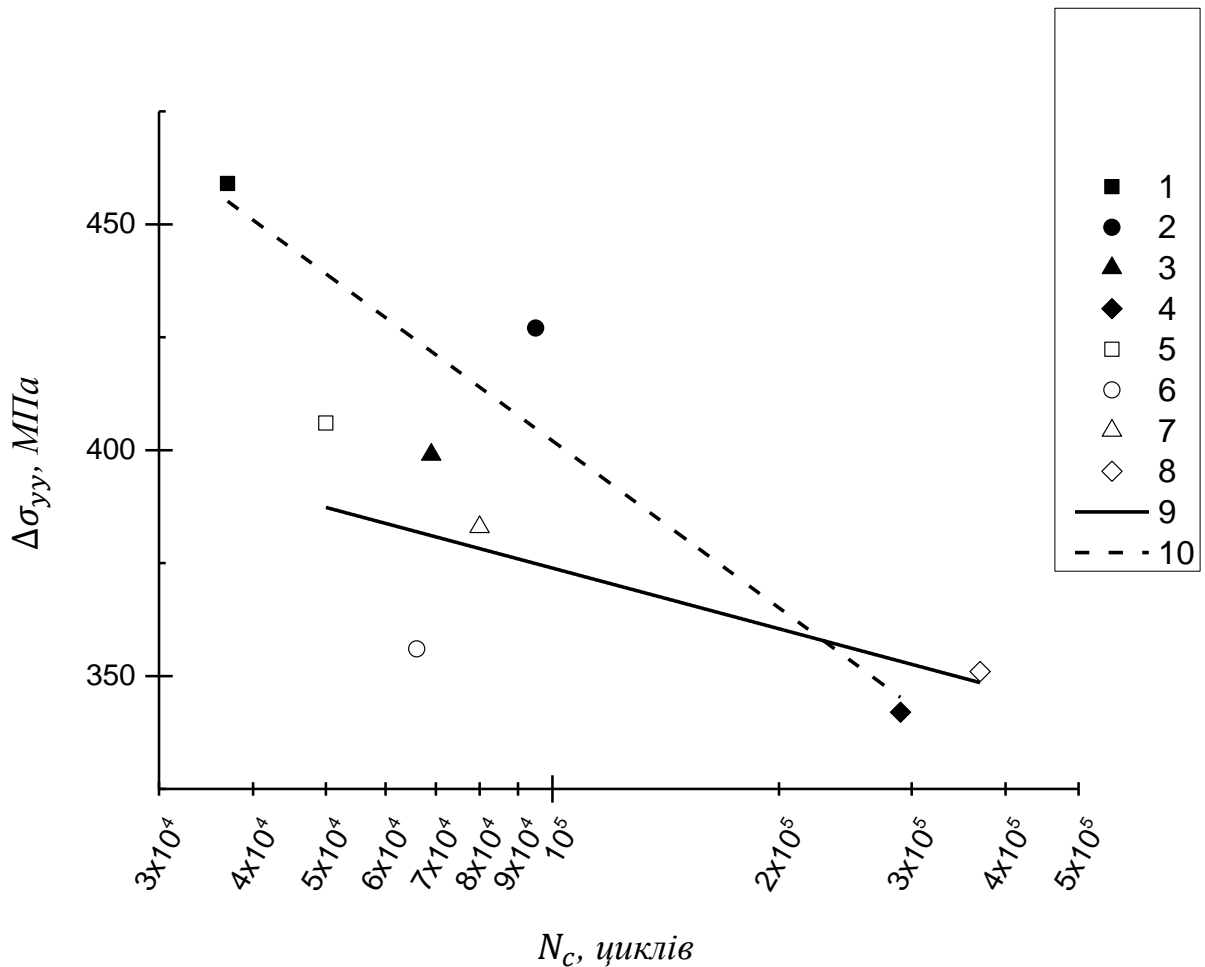


Рисунок 4.10 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

Залишкові напруження стиску більші для діаметра отвору 10 мм за натягу дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ проти діаметра 8 мм і відповідно розмах локальних напружень також підвищується. Ці відмінності розподілу локальних залишкових стискувальних напружень зумовлені тим, що абсолютний натяг дорнування відрізняється для діаметрів отвору 8 мм та 10 мм за однакового відносного натягу дорнування. Наприклад, для діаметра отвору 8 мм та відносного натягу 3% абсолютний натяг становить

0,24 мм, а для діаметра отвору 10 мм та відносного натягу 3% абсолютний натяг становить 0,30 мм. В результаті отвір діаметром 10 мм піддається більшій пластичній деформації при проходженні дорна.

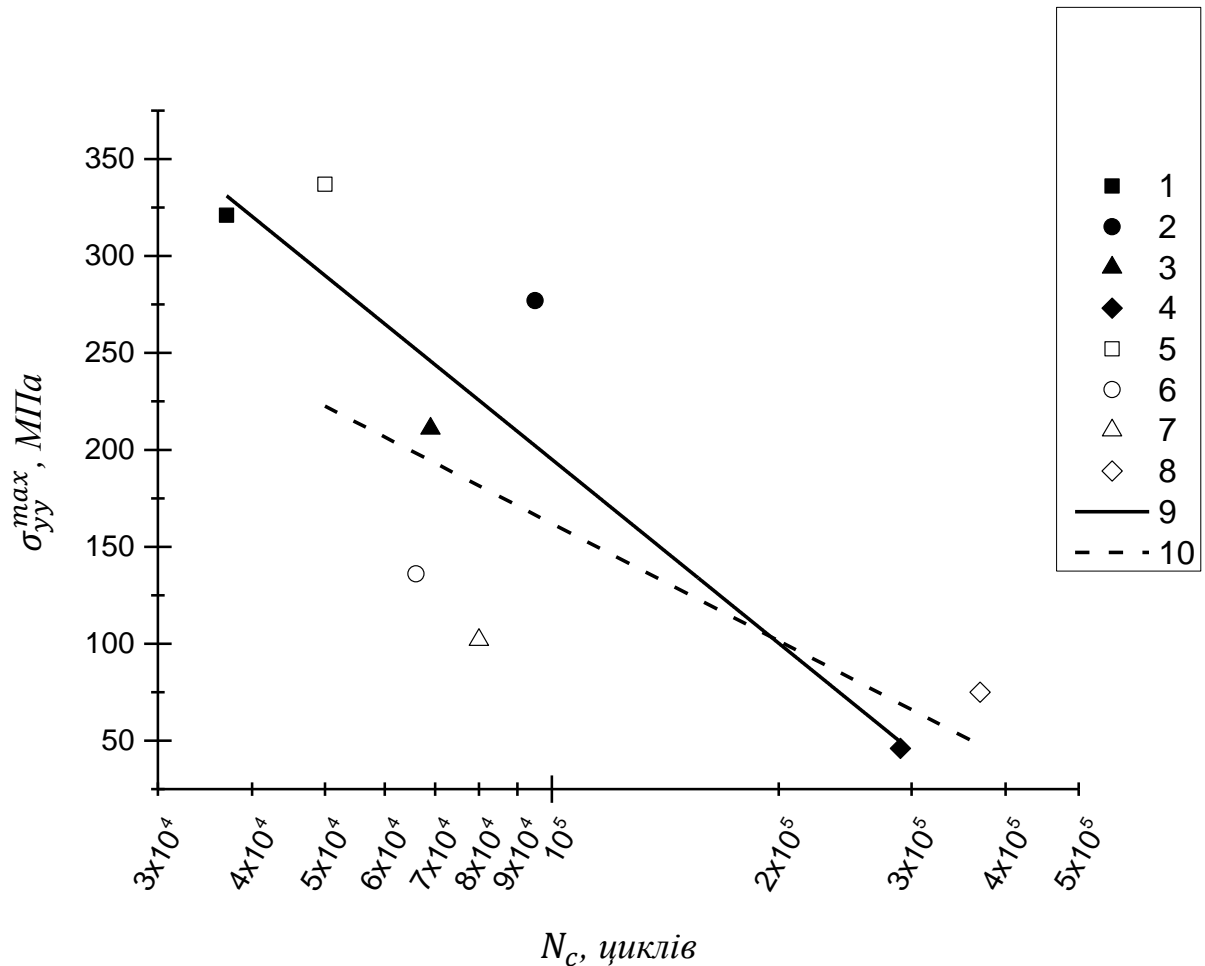


Рисунок 4.11 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від максимальних напружень σ_{yy}^{max} на глибині d^* в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

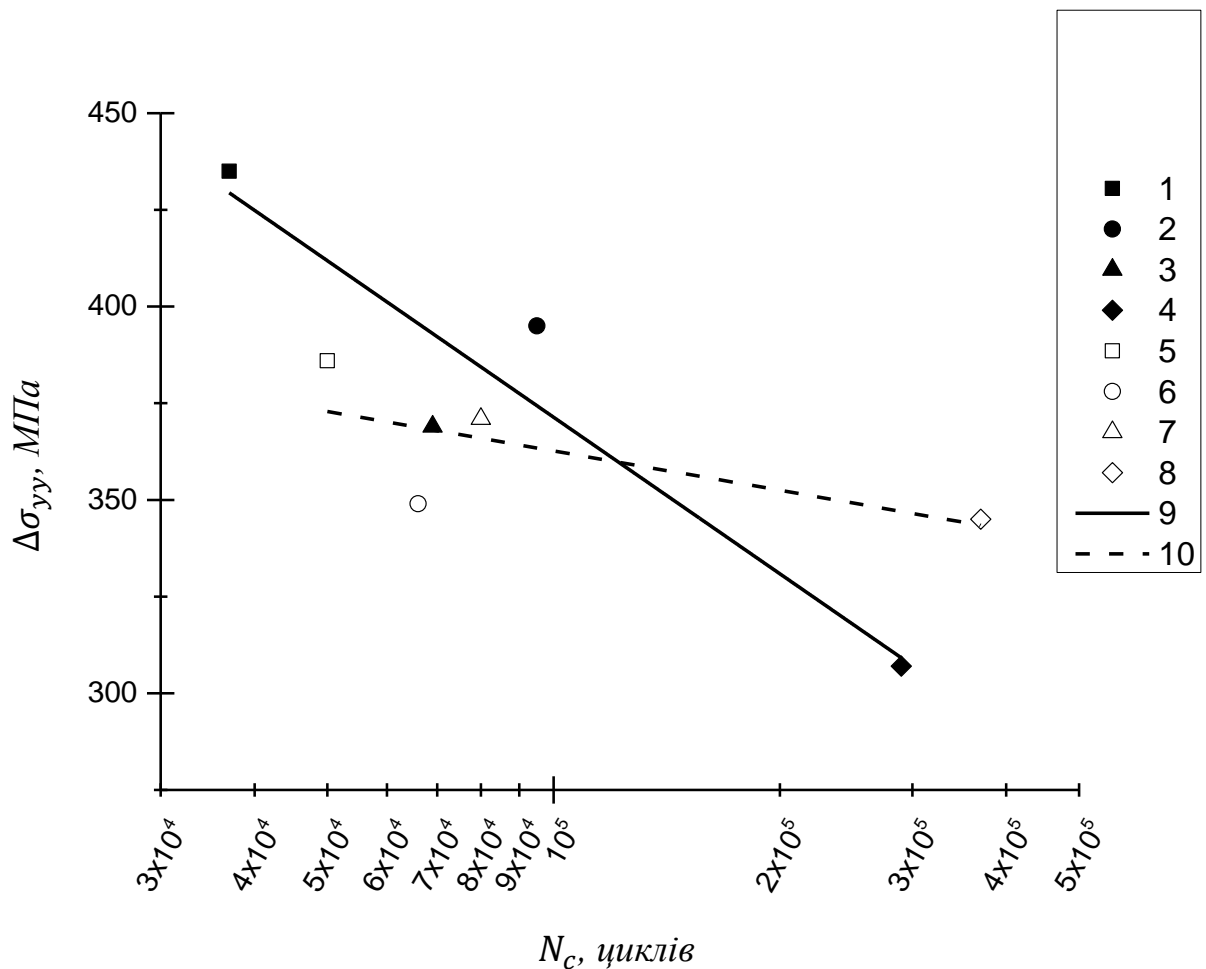


Рисунок 4.12 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ на глибині d^* в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

З рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**-4.12 слідує, що довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм від отвору діаметром 8 мм та 10 мм за натягу дорнування $i = 1\%$ підвищується у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин з отворами. Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i = 2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з

отворами.

Висновки

Створено модель для розрахунку методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS одновісного циклічного пружно-пластичного деформування пластини з центральним деформаційно зміцненим отвором діаметром 8 мм, 10 мм, 12 мм з натягом 1%, 2%, 3%.

Обчислено найбільші і найменші локальні напруження за циклічного пружно-пластичного деформування розтягом алюмінієвих пластини з центральним отвором діаметром 8 мм, 10 мм після дорнування з натягом 1%, 2%, 3% методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу ANSYS.

Побудовано залежності розподілу локальних залишкових напружень стиску в околі отвору від величини відносного натягу дорнування. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування збільшуються залишкові напруження стиску, а також ширина ділянки стискувальних напружень біля отвору.

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.

Виявлено, що найменші локальні залишкові напруження стиску виникають з сторони входу дорна для всіх досліджених натягів дорнування 1%-3%, а найбільші – у середній ділянці отвору, ближче до виходу дорна. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування (від 1% до 3%) різниця між найменшими та найбільшими локальними залишковими напруженнями стиску зменшується.

У середній ділянці циліндричної поверхні отвору ($Z = t/2$) розрахункові локальні коефіцієнти асиметрії циклу у другому півциклі навантаження, знижуються із збільшенням відстані від краю отвору та із збільшенням відносного натягу дорнування. Найменші значення локального коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R_{\sigma_{yy}} = -4 \dots -5$ для натягу дорнування 3% і сталі по товщині зразка ($Z = 0 \dots 6$ мм).

Отримано залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини в алюмінієвих зразках від локальних максимальних напружень σ_{yy} та розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм та 10 мм. Дорнування з натягом $i = 1\%$ підвищує довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин. Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i = 2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

Загальні висновки

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукової задачі, що полягає у підвищенні втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами за рахунок створення залишкових напружень стиску в поверхневих шарах циліндричної поверхні отвору.

1. Досліджено вплив натягу дорнування та діаметра функціональних отворів на довговічність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження. Виявлено, що дорнування з натягом $i = 1\%$ підвищує довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин. Аналогічна залежність спостерігали для дорнування з натягом $i = 2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

2. Досліджено вплив натягу дорнування на кінетику та мікромеханізми росту тріщин в силових конструктивних елементах крила транспортного літака. Виявлено, що на відміну від пластин із отворами після механічної обробки, тріщина в яких зароджуються в серединній ділянці отвору, в пластинах із дорнованими отворами втомна тріщина зароджуються від кромки отвору з боку входу дорна. Тривалий час тріщина проростає всередині пластини без появи на бічних поверхнях для недорнованих зразків, та на поверхні з боку виходу дорна для дорнованих.

3. Методом скінчених елементів досліджено вплив натягу дорнування функціональних отворів на залишковий напружений стан силових конструктивних елементів крила транспортного літака. Отримано залежності розподілу локальних залишкових напружень стиску в околі отвору від величини відносного натягу дорнування. Із збільшенням

величини відносного натягу дорнування збільшуються залишкові напруження стиску, а також ширина ділянки стискувальних напружень біля отвору. Виявлено, що найменші локальні залишкові напруження стиску виникають з сторони входу дорна для всіх досліджених натягів дорнування 1%-3%, а найбільші – у середній ділянці отвору, ближче до виходу дорна. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування (від 1% до 3%) різниця між найменшими та найбільшими локальними залишковими напруженнями стиску по товщині пластини зменшується.

4. Методом скінчених елементів досліджено пружно-пластичне циклічне одновісне деформування пластин з функціональними отворами діаметром 8 мм, 10 мм, 12 мм після дорнування з натягом 1%, 2%, 3%. Отримано розподіл розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$, максимальних та мінімальних напружень σ_{yy}^{\max} та σ_{yy}^{\min} в околі отвору від кількості циклів навантаження та відносного натягу дорнування.

5. Обґрунтовані критерії циклічної міцності силових конструктивних елементів із зміцненими функціональними отворами. Основними критеріями для прогнозування довговічності пластин із дорнованими отворами діаметром 8 мм і 10 мм вибрано розмах напружень на поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}$ та розмах напружень на відстані, що дорівнює ширині зони передруйнування d^* від поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}^*$.

6. Розроблено конструктивно-технологічні рекомендації для підвищення втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака. За рахунок значних пластичних деформацій досягали значних залишкових напружень стиску на поверхні отвору, які суттєво зменшують максимальні напруження при циклічному навантажуванні.

Література

1. Pantelakis Sp.G. Tensile and energy density properties of 2024, 6013, 8090 and 2091 aircraft aluminum alloy after corrosion exposure [Text] / Pantelakis Sp.G., P.G. Daglaras, Ch.Ak. Apostolopoulos: Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2000 – p. 33.
2. Rodopoulos C.A. Theoretical analysis on the behaviour of short fatigue cracks [Text] / C.A. Rodopoulos, E.R. de los Rios: International Journal of Fatigue, 2002. - 24. - pp.719–724.
3. Christopher D. Fatigue crack growth and life predictions under variable amplitude loading for a cast and wrought aluminum alloy [Text] / Christopher D. Glancey, Robert R. Stephens: International Journal of Fatigue, 2006. - 28. - pp.53–60.
4. Афанасьев Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов [Текст] - Киев: Изд-во АН СССР, 1953. - 128с.
5. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов [Текст] // М.: Metallurgizdat. 1963. – 258с.
6. Иванова В. С. Природа усталости металлов [Текст] / Иванова В. С., Терентьев В. Ф. // М.: Metallurgizdat. - 1975. – 455с.
7. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов [Текст] // М.: Metallurgiya. - 1976. – 455с.
8. Ярема С. Я. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия [Текст] // Физ.-хим. механика материалов. - 1973. - 6. - С.66-72.
9. Прокопенко А. В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение I. Зависимость предела текучести от глубины слоя [Текст] / Прокопенко А. В., Торгов В. Н. // Проблемы прочности. - 1986. - 4. - С.28-34.

10. Терентьев В. Ф. Эволюция циклической повреждаемости металлических материалов [Текст] // Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. - 1983. - С.38.
11. Miller K. J. The two thresholds of fatigue behaviour [Text] // Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. - 1993. - 16. - P.931-939.
12. Панасюк В.В. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]. Т.9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій: довідн. посібник / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін, С.А. Бичков, О.Г. Моляр, О.І. Семенець, В.С. Кравець, В.Я. Дереча. – Львів: Вид-во "Сполом", 2007. – 1068с.
13. Miller K. Y. Cumulative damage laws for fatigue crack initiation and stage I propagation [Text] / Miller K. Y., Zacharian K. P. // J. Strain Analysis. - 1977. - 12. - P.262-270.
14. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению [Текст] // М.: Атомиздат. - 1975. – 191с.
15. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность [Текст] / Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. // М.: Машиностроение. - 1975. - 3. – 488с.
16. Серенсен С.В. Руководство по определению расчетных характеристик сопротивления усталости деталей машин [Текст] / Серенсен С.В., Когаев В.П. // М.: ВНИИНМАШ и ИМАШ. - 1971. - 106с.
17. Серенсен С.В. Руководство по расчету на усталость деталей машин в вероятностном аспекте [Текст] / Серенсен С.В., Когаев В.П. // М.: ВНИИ нормализации в машиностроении и ГНИИМАШ. - 1972. – 107с.
18. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов [Текст] // М.: Машгиз. - 1962. - С.260.
19. Иванова В.С. Усталостные разрушения металлов [Текст] // М.: Metallurgia. - 1962. - С.258.

20. Иванова В.С. Природа усталости металлов [Текст] / Иванова В.С., Терентьев В.Ф. // М.: Metallurgy. - 1965. - С.456.
21. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность (справочник) [Текст] / Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. // М.: Машиностроение. - 1985. - С.224.
22. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] // М.: Машиностроение. - 1977. - С.232.
23. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов [Текст] // М.: Машиностроение. - 1964. - С.275.
24. E. Orowan Theory of fatigue of metals [Text] // Proc. Roy. Soc. (A). - 1939. - Vol.171. - P.79.
25. P.J.E. Forsyth Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys [Text] // Acta Met. - 1963. - 7. - P.703-715.
26. P.J.E. Forsyth Causes of mixed fatigue-tensile-crack growth and significance of microscopic crack behaviour [Text] // Metals Technol. - 1978. - 10. - P.351-357.
27. G.R. Irwin. Fracture Handbuch der Physik [Text] // Springer. - Berlin, 1958. - 6. - P.551-590.
28. Irwin G.R. Analyses of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate [Text] // Trans. ASME. J. of Appl. Mechanics. - 1957. - Vol.24. - P.361-364.
29. H. Tada The stress analysis handbook (2-nd ed.) [Text] / H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin // St.Lois: Paris Production Inc. - 1985. - P.167.
30. P. Paris The fracture mechanics approach to fatigue [Text] // Fatigue. – An Interdisciplinary Approach // Syracuse (N.Y.): Syracuse Univ. Press. - 1964. - P.107-132.
31. P. Paris A critical analysis of fatigue propagation laws [Text] / P. Paris, F. Erdogan // Trans. ASME. J.Basic.Eng. - 1963. - 4. - P.528-534.

32. Paris P.C. Twenty years of reflection on questions involving fatigue crack growth [Text] / Paris P.C., Hermann L. // Fatigue Thresholds: Proc Int. Conf. - Stockholm, 1981. - 1. - P.11-32.
33. Erdogan F. Stress intensity factors [Text] // Trans ASME. J. Appl. Mech. - 1983. - 4. - P.992-1002.
34. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов [Текст] // Наук. думка. - Киев, 1971. - С.267 .
35. Трощенко В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. // Наук. думка. - Киев, 1987. - С.256.
36. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках [Текст] // Наук. думка. - Киев, 1978. - С.174.
37. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов [Текст] // Наук. думка. - Киев, 1991. - С.416.
38. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами [Текст] // Наук. думка. - Киев, 1969. - С.246.
39. Панасюк В.В. Распределение напряжений около трещины в пластинах и оболочках [Текст] / Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацишин А.П. // Наук. думка. - Киев, 1976. - С.444.
40. Ярема С.Я. Метод испытания металлов на циклическую трещиностойкость [Текст] / Ярема С.Я., Панасюк В.В., Попович В.В. // - Львов, 1978. - 56с.: Препринт / АН УССР. Физ.–мех. ин–т; № 9.
41. Ярема С.Я. Методология определения сопротивления развитию трещин (трещиностойкости) материалов при циклическом нагружении [Текст] // Физ.–хим. механика материалов. - 1981. - 4. - С.100-110.
42. Ярема С.Я. Исследования роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения [Текст] // Физ.–хим. механика материалов. - 1977. - 4. - С.3-22.

43. Ярема С.Я. О вязкости разрушения материалов при циклическом нагружении [Текст] / Ярема С.Я., Остап О.П. // Физ.–хим. механика материалов. - 1978. - 5. - С.112-114.
44. Ярема С.Я. Рост усталостной трещины в вакууме и газовых средах [Текст] / Ярема С.Я., Полутранко И.Б. // Физ.–хим. механика материалов. - 1983. - 4. - С.37-46.
45. Miller K.J. Short fatigue cracks [Text] / Miller K.J., de los Rios E.R. // Publication 13, Mechanical Engineering Publications. - London, 1992.
46. Miller K.J. The two thresholds of fatigue behaviour [Text] // Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. - 1993. - P.931-939.
47. Wanhill R.J.H. Flight simulation fatigue crack growth guidelines [Text] // Proc. 8th Int. Congress Fatigue. - Sweden, 2002. - P.573-584.
48. Halliday M. D. On predicting small fatigue crack growth and fatigue life from long crack data in 2024 aluminium alloy [Text] / Halliday M. D., Cooper C., Poole P., Bowen P. // Int. J. of Fatigue. - 2003. - Vol. 25. - P.709-718.
49. Li X.D. Micromechanical model of stage I to stage II crack growth transition for aluminium alloys [Text] // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. - 1996. - Vol. 24. - P.217-231.
50. S. Person Investigation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and subsequent propagation of very short fatigue cracks [Text] // Engineering Fracture Mechanics. - 1975. - P.235-247.
51. K.J. Miller Short crack problem [Text] // Fatigue of Engineering Materials and Structures. - 1982. - 5. - P.223-232.
52. K.J. Miller Initiation and growth rates of short fatigue cracks [Text] // In. Fundamentals of Deformation and Fracture, Eshelby Memorial Symposium, Cambridge University Press. - 1985. - P.477–500.

53. D. Kocańda Analyze propagation short fatigue ckrack from hole and micromechanism fracture lamer sheet aluminium alloy 2024-T3 [Text] / D. Kocańda, V. Hutsaylyuk, V.Hlado // Biuletyn WAT. - 2007 . - 4. - P.37–54.
54. Механика разрушения и прочность материалов [Текст]. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: Справочное пособие: В 4-х т. / Под ред. В.В. Панасюка. // Наук. думка. - Київ, 1990. - С.680.
55. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиноотривкість [Текст] // Світ. - Львів, 1998. - С.292.
56. Бухалов А.Д. Влияние холодной деформации на скорость развития усталостной трещины в стали 03X11Н10М2Т [Текст] / Бухалов А.Д., Вылежнев А.П., Симонов Ю.Н. // Вопросы металловедения стали и титановых сплавов. - Пермь, 1978. - С.14-17.
57. Романив О.Н. Кинетика и механизм роста усталостной трещины в железе [Текст] / Романив О.Н., Шур Е.А., Ткач А.И. // Физ.-хим. Механика материалов. - 1981. - 2. - С.57-66.
58. Сайто С. Влияние плотности дислокаций на скорость распространения усталостных трещин [Текст] / Сайто С., Тоета Ч., Тада Т. // J. Iron Steel Inst. Jap. - 1976. - 11. - С.688-694.
59. He G. Crack closing and permissible width of partially prestressed concrete beam under repeated loading [Text] / He G., Znoy S. // Tumu Gongcheng Xuebao. - 1988. - 3. - P.15-33.
60. Bulloch J.N. Fatigue crack growth studies in rail steel and associated weld metal [Text] // Theor. and Appl. Fract. Mech. - 1986. - 2. - P.75-84.
61. Shulte K. Influence of monotonic and cyclic predeformation of high-strength aluminium alloys [Text] / Shulte K., Nowack H., Lutjering G. // Eng. Fract. Mech. - 1980. - 14. - P.1009-1021.

62. Lindigkeit J. The effect the predeformation on fatigue crack propagation behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in inert and corrosive environment [Text] / Lindigkeit J., Gusler A., Lutjering G. // Z. Metall. - 1981. - 5. - P.322-328.
63. Liaw P.K. The effect of temperature on the fatigue crack propagation rate in aluminum [Text] / Liaw P.K., Fine M.E., Kiritani M., Ono S. // Scr. Met. - 1977. - 12. - P.1151-1155.
64. Shijve J. The effect of pre-strain on fatigue crack closure [Text] // Eng. Fract. Mech. - 4. - P.575-581.
65. Liaw P.K., Leax T.R., Williams R.C. Near- threshold fatigue crack growth behavior in copper [Text] / Liaw P.K., Leax T.R., Williams R.C. // Met. Trans. - 1982. - 9. - P.1607-1618.
66. Кайнов А.Б. Кинетика усталостного разрушения легких сплавов в [Текст] связи с пластическими деформациями при формообразовании элементов конструкций // Автореф. Дис. Канд. Техн. Наук. - М, 1986. - С.20.
67. Tanaka. K. Engineering Fracture Mechanics [Text] / Tanaka. K., Hoshide. T. and Sakai. N. - 1984. - 19. - 805p.
68. P.F.P. de Matos Reconstitution of fatigue crack growth in Al-alloy 2024-T3 open-hole specimens using microfractographic techniques [Text] / P.F.P. de Matos, P.M.G.P. Moreira, I. Nedbal, P.M.S.T. de Castro. // Engineering Fracture Mechanics. - 2005. - 72. - P.2232–2246.
69. Ali Merati Astudy of nucleation and fatigue behavior of an aerospace aluminum alloy 2024-T3 [Text] // International Journal of Fatigue. - 2005. - 27. - P.33–44.
70. Kocańda D. Reconstruction of fatigue crack growth rate for 2024-T3 aluminium alloy sheet on the basis of fractographic analysis [Text] /

- Kocańda D., Kocańda S., Torzewski J. // Archive Mech. Engineering. - 2004. - 3. - P.361-376.
71. P.J. Golden A comparison of fatigue crack formation at holes in 2024-T3 and 2524-T3 aluminum alloy specimens [Text] / P.J. Golden, A.F. Grandt Jr., G.H. Bray // International Journal of Fatigue. - 1999. - 21. - P.211–219.
72. Романів О.М. Електронна фрактографія зміцнених сталей [Текст] / Романів О.М., Зима Ю.В., Карпенко Г.В. // Наук. думка. - Київ, 1974. - С.207.
73. Одинг И.А. Структурные признаки усталости металлов как средство установления причин аварий деталей машин [Текст] // Изд-во АН СССР. - М, 1949. - С.35.
74. Jacoby G. Fractographical methods in fatigue research [Text] // Exp. Mech. . - 1963. - 5. - P.65–83.
75. Moaveni S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS [Text] // Saeed Moaveni. - New Jersey, 1999. - P.527.
76. . ANSYS, Inc. Theory Manual. 001369. Twelfth Edition. Release 5.7. [Text] / Edited by Peter Kohnke, Ph.D. - Canonsburg: Inc ANSYS, Inc. Southpoint 275 Technology, 2001. - 2352p.
77. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] - М: ДМК Пресс, 2005. - 640с.
78. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский // М. - Ленанд, 2008. - С.456.
79. Дащенко А.Ф. Ansys в задачах инженерной механики [Текст] / А.Ф. Дащенко, Д.В. Лазарева, Н.Г. Сурьянинов. - Одесса: Астропринт, 2007. - 488с.
80. О.Н. Романив Стадник Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов [Текст] / В.В. Панасюк, О.Н. Романив,

- С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. - Киев: Наукова думка, 1990. - 679с.
81. James M. R. Metallurgy Transactions [Text] / James M. R., L Morris W. - 1983. - 14A. - 153-155p.
 82. Jonol M. Fatigue Fracture and Engineering Material Structures [Text] / Jonol M., Sugeta A. - 1996. - 19(2/3). - 115p.
 83. Ritchie R. O. Small fatigue cracks: a statement of problem and potential solutions [Text] / Ritchie R. O., Lankford I. // Mater. Sci. Engng. - 1986. - 84. - P.11-16.
 84. McClung R. C. Behaviour of small fatigue cracks [Text] / McClung R. C., Chan K. S., Hudak Jr. S. J., Davidson D. L. // Fatigue and Fracture. - 1996. - 19. - P.153-158.
 85. McDowell D. L. Basic issues in the mechanics of high cycle metal fatigue [Text] // Int. J. Fracture. - 1996. - 80. - P.103-145.
 86. П. Ясній Дослідження дефектів виготовлення отворів під потайні заклепки [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Гладь: Тези доповіді науково-технічної конференції МТФ ТНТУ ім. І. Пулюя - "Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті". - Тернопіль, 2011. - 3-4с.
 87. П. Ясній Оцінювання параметрів початкових мікрodefektів конусних отворів [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Гладь: 10-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей // КІНПАТРИ ЛТД. - Львів, 2011. - С.118-120.
 88. Ясній П. Оцінювання мікропошкоджуваності отворів під потайні заклепки [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Гладь // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Спеціальний випуск. - 2011. - 1. - С.23-29.

89. Панасюк В.В. Основы механики разрушения [Текст] / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. - К: Наук. думка, 1988. - С.488.
90. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций [Текст] / Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. - К: Наук. думка, 1992. - 184с.
91. Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин [Текст] - К: Наук. думка, 1982. - 342с.
92. Андрейкив А.Е. Расчетная модель для определения периода зарождения усталостной макротрещины [Текст] // Физ.-хим. механика материалов. - 1976. - 6. - С.27–31.
93. Панасюк В.В. Зарождение усталостных трещин у концентратора напряжений [Текст] / Панасюк В.В., Остап О.П., Костык Е.М. // Физ.-хим. механ. матер. - 1985. - 6. - С.3–10.
94. Стадник М.М. Расчетная модель для определения усталостной долговечности тела, ослабленного тонкой полостью [Текст] / Стадник М.М., Ризничук Р.В. // Физ.-хим. механика материалов. - 1989. - 3. - С.83–88.
95. Панасюк В.В. К теории деформирования и разрушения металлов при циклическом нагружении [Текст] / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Дарчук А.И.: Тр. IX конференции по прочности и пластичности. - Киев-Москва, 1996. - 85–90с.
96. Горохов В. А. Обработка деталей пластическим деформированием [Текст] - Киев: Техника, 1978. - 192с.
97. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник [Текст] - М: Машиностроение, 1980. - 157с.
98. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник [Текст] - М: Машиностроение, 1987. - 327с.

99. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом [Текст] - СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2001. - 264с.
100. В.В. Воронько Скоростное дорнования отверстий авиационных конструкций [Текст] / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2009. - 41. - С.213-226.
101. Ю.А. Воробьев Сравнительный анализ способов дорнования отверстий [Текст] / Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Н. Степаненко / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского // Системи обробки інформації. - 2007. - 5. - С.35-38.
102. Скворцов В.Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра [Текст] / Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005. - 92с.
103. H.D. Gopalakrishna Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy [Text] / H.D. Gopalakrishna, H.N. Narasimha Murthy, M. Krishna, M.S. Vinod, A.V. Suresh – An experimental study / Department of Mechanical Engineering, RV College of Engineering, Bangalore // Engineering Failure Analysis. - 2010. - 17. - P.361-368.
104. Т.Ю. Степанова Технологии поверхностного упрочнения деталей машин [Текст]: Учебное пособие / Ивановский государственный химико-технологический университет 2009. - 2009. - 64с.
105. Механика разрушения и прочность материалов [Текст]. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: Справочное пособие: В 4-х т. / Под ред. В.В. Панасюка. // Наук. думка. - Київ, 1990. - С.436.
106. D.J. Steinberg Appl. Phys [Text] / D.J. Steinberg, S.G. Cochran, M.W. Guinan, J. - 1980. - 51.

107. Ясній П. Вплив дорнування отворів на зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві [Текст] / Ясній П., Гладьо С. // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – № 1. – С. 7-17.
108. Ясній П. Мікромеханізми поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві 2024-T3 [Текст] / Ясній П., Гладьо С., Гуцайлюк В. // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал "Машинознавство". – Львів: КІНПАТРІ ЛТД. – 2010. – №7. – С. 28-33.
109. Ясній П.В. Дослідження мікромеханізмів руйнування алюмінієвого сплаву Д16чТ після поверхневого зміцнення [Текст] / Ясній П.В., Гладьо С.В., Сорочак А.П. // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал "Машинознавство". – Львів: КІНПАТРІ ЛТД. – 2013. – №3-4. – С. 16-19.
110. Гуцайлюк В.Б. Микромеханизмы зарождения и развития усталостных трещин алюминиевого сплава 2024-T3 в условиях постоянного циклического нагружения [Текст] / Гуцайлюк В.Б., Гладьо С.В. // Вестник Тамбовского университета. – 2010. – Т. 15, № 3. – С. 833-834.
111. П. Ясній Дослідження мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ [Текст] / П. Ясній, С. Гладьо // Збірник тез доповідей "Актуальні задачі сучасних технологій" Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів: Тези доповідей. – Тернопіль, 11-12 грудня, 2013. – С. 58-59.
112. Ясній П.В. Формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами після дорнування [Текст] / Ясній П.В., Гладьо С.В., Скочиляс В.В., Семенець О.І. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – №6. – С.00-00.

113. Ясній П. Дослідження НДС силових конструктивних елементів з функціональними отворами за одновісного циклічного розтягу [Текст]/ Ясній П., Гладь С., Сидор П., Семенець О. // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – № 3. – С. 7-14.
 114. П. Ясній Моделювання процесу дорнування отворів в пластинах із алюмінієвого сплаву методом скінчених елементів [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Скочиляс // Матеріали IV науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" ТНТУ ім. І. Пулюя: Тези доповідей. – Тернопіль, 15-16 травня, 2014. – С. 17.
 115. Newman JC Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies [Text] / Newman JC, Raju IS: Fracture Mechanics, XIV Symposium, vol. 1, Theory and Analysis, ASTM STP 791 / In: Lewis JC, Sines G, editors // American Society for Testing and Materials. - Philadelphia, 1983. - 2. - P.38–65.
 116. П. Ясній Вплив дорнування отворів на КІНЕТИКУ зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ [Текст] / П. Ясній, С. Гладь // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя: Том II. – "Матеріалознавство та машинобудування" – Тернопіль, 20-21 листопада, 2013. – С. 83.
 117. Ясній П. Вплив параметрів дорнування функціональних отворів на втомну довговічність силових конструктивних елементів крила літака [Текст] / Ясній П., Гладь С., Скочиляс В., Семенець О. // Збірник праць. Т9: Сучасні проблеми техніки і технологій / Тернопільський осередок Наукового товариства ім. Шевченка / відп. ред.: М. Андрейчин, ред. тому: П. Ясній. – Тернопіль: Астон, 2014. – с.63-71.
12. Механіка руйнування (т.9).