

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛІЗНАВСТВО

УДК 620.192.46

Петро Ясній, Юрій Пиндус, Олег Галушак

СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКРИТТЯ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ В СПЛАВІ Д16Т ЗА РЕГУЛЯРНОГО НА- ВАНТАЖЕННЯ

В роботі описано створення моделі плоского зразка з центральною тріщиною за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) в програмному комплексі ANSYS. Змодельовано ріст та закриття втомної тріщини за регулярного циклічного навантаження з урахуванням залишкових напружень в околі вістря тріщини та контакту її берегів. Для виконання всіх етапів моделювання створено відповідні макроси. Проаналізовано можливість використання МСЕ для оцінки впливу залишкових пластичних деформацій і залишкових стискувальних напружень на закриття втомної тріщини.

Ключові слова: закриття тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень, ріст втомної тріщини, метод скінченних елементів.

Явище передчасного контакту берегів зростаючої втомної тріщини протягом деякої позитивної частини циклу напружень є важливим феноменом експериментальної механіки втомного руйнування. Цей феномен, який називають змиканням або закриттям тріщини (ЗТ), широко використовується для пояснення численних кінетичних ефектів, які супроводжують втомне руйнування конструкційних матеріалів.

Вважається, що закриття тріщини (ЗТ) виявив В. Елбер [1, 2]. ЗТ визначає в її вершині деяке значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{op} (пропорційне довжині тріщини і нормальному напруженню в момент відкриття тріщини), перешкоджаючи зниженню цього параметра до рівня мінімального значення КІН циклу навантаження K_{min} . На підставі отриманих результатів В. Елбер дійшов висновку, що частка циклу навантаження, яка знаходиться нижче K_{op} , що відповідає моменту розкриття тріщини, не вносить вкладу в ріст втомної тріщини (РВТ). Вказуючи на необхідність врахування явища закриття тріщини при аналізі напружено-деформованого стану тіл з тріщинами, він увів ефективне значення розмаху КІН [2]:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}, \quad (1)$$

де K_{max} — максимальне значення КІН циклу навантаження.

Ефект ЗТ кількісно оцінюється коефіцієнтом відкриття тріщини U [3]:

$$U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min}) = \Delta K_{eff} / \Delta K. \quad (2)$$

Експериментальні методи визначення ΔK_{eff} є дуже трудомісткими. Для їх проведення необхідні значні затрати часу та зусиль. У зв'язку з цим актуальності набувають аналітично-експериментальні методи, у тому числі комп'ютерне моделювання фізико-механічних процесів у вістрі тріщини. Одним з найефективніших та найпоширеніших сучасних підходів до вирішення таких завдань є використання методу скінченних елементів (МСЕ). Суть даного методу полягає в апроксимації досліджуваного тіла деякою моделлю, котра являє собою сукупність елементів зі скінченною кількістю ступенів вільності [4]. Однією з найпопулярніших багатofункціональних програм, які дозволяють використовувати МСЕ, є ANSYS. Цей програмний комплекс дозволяє розв'язувати широкий спектр інженерних задач, зокрема механіки деформівного твердого.

Метою даної роботи було за допомогою програмного комплексу ANSYS змоделювати процеси РВТ та одержати результати моделювання.

Дослідження відкриття втомної тріщини МСЕ.

В програмному комплексі ANSYS моделювали плоский прямокутний зразок з центральною тріщиною, виготовлений з алюмінієвого сплаву Д16Т згідно з ГОСТом 25.506-85. Для цього було зроблено спеціальний макрос. Він містить набір команд, які задають характеристики матеріалу, створюють усі складові моделі та скінченноелементну сітку. Завдяки використанню цього макросу можна легко відтворювати однакові умови при кожному моделюванні. Створено модель половини зразка і накладено умови симетрії на ліву частину моделі. Завдяки умовам симетрії така модель повністю моделює цілий зразок. Скінченноелементна модель зображена на рис. 1.

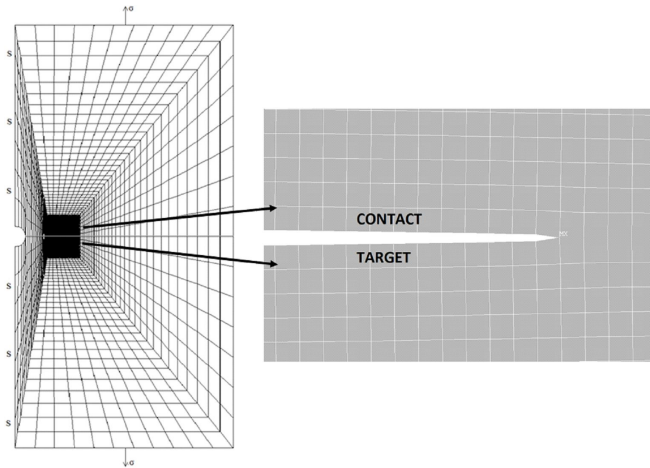


Рисунок 1. Скінченноелементна модель зразка, створена в програмі ANSYS

При моделюванні відтворено умови експерименту та характеристики сплаву Д16Т при температурі 293 К. Механічні властивості та хімічний склад алюмінієвого сплаву Д16Т наведено в роботі [5]. Розрахунки МСЕ проводили за умов плоского напруженого стану (plane stress), враховуючи ефект Баушінгера. Для створення скінченноелементної сітки використали елемент PLANE182, який в програмі ANSYS передбачений для створення плоских двовимірних моделей. Він визначається чотирма вузлами з двома ступенями

вільності в кожному вузлі, може приймати чотирикутну або трикутну форму. Елемент має властивості пластичності, пружності, жорсткості, значних переміщень і деформацій. У праці [6] проведено обґрунтування розміру сітки скінченних елементів для моделювання росту тріщини в аналогічних умовах. Встановлено, що для моделювання РВТ оптимальним є розмір елемента 10 мкм. Подальше подрібнення сітки елементів вимагає більшого часу на розрахунки, але не покращує точності моделювання. Сітку скінченних елементів створено найбільш детальною вздовж площини росту тріщини на відстань до 5 мм від неї.

На береги тріщини накладали умови контакту для відтворення процесів, що виникають при її закритті внаслідок залишкових деформацій, контактних стискувальних напружень на берегах тріщини та залишкових напружень спереду вістря тріщини. Для створення контактних поверхонь використовували скінченні елементи CONTA171 і TARGE169. Ці елементи підходять для використання у моделі, створеній з використанням елемента PLANE182.

Розроблено методику моделювання проростання втомної тріщини. При створенні моделі визначали початкове положення вістря тріщини перед початком розрахунків. Таким чином, у зразку зразу створювали тріщину певної довжини. Для цього на вузлові точки вздовж лінії росту тріщини від концентратора напружень до обраного початкового вістря не накладали ніяких обмежень. Попереду фронту тріщини моделювали цілісний матеріал, через який може відбуватися РВТ. Для цього на вузлові точки вздовж лінії росту тріщини, які заходяться після початкового вістря, накладали фіксацію по осі Y.

На наступному етапі створили макрос для моделювання РВТ. Він містить усі необхідні команди. До моделі прикладали регулярне циклічне навантаження, яке створювало в ній напруження брутто, аналогічне експерименту, що моделювався. З допомогою експериментальних КДВР визначали швидкість РТВ, що відповідає модельованому напруженню брутто. Після прикладання циклу навантаження визначали величину, на яку повинна була вирости тріщина. Підростання тріщини за кожен цикл сумували, доки їх сума не ставала більшою за крок сітки скінченних елементів. Після цього

знімали фіксацію по осі Y з вузлових елементів, що знаходилися у вістрі в цей момент. Під час наступних кроків циклу навантаження процес повторювали. Таким чином, було забезпечено швидкість РТВ, аналогічну експериментальній.

Для вимірювання розкриття тріщини в моделі розробили спеціальний макрос. Він дозволяє визначити переміщення вузлів моделі у кожен момент часу. Таким чином макрос забезпечує можливість вимірювати розкриття у точці з будь-якими та b та r , які необхідні для отримання точних даних. Для вимірювання розкриття визначали вузол, в якому знаходилася вершина тріщини у цей момент. Після цього вибирали два вузли, які знаходяться з двох боків від площини проростання тріщини на відстані r від її вершини та з базою b . Якщо при наступних кроках навантаження збільшувалася довжина тріщини, то точка виміру переміщувалася відповідно для збереження b та r сталими. Згідно з експериментальними даними [7] вимірювання необхідно проводити якомога ближче до вістря втомної тріщини. Відповідно було обрано $r = 0,06$ мм та базу b безпосередньо на березі тріщини, адже така точність є досяжною при комп'ютерному моделюванні.

Навантаження прикладали до верхньої частини моделі ступінчато, розділяючи максимальне значення кожного кроку на частини. З допомогою спеціально створеного макросу після кожного приросту навантаження визначали різницю δ_1 та δ_2 між положенням контрольних вузлів (рис. 2) при мінімумі циклу навантаження та при поточному навантаженні.

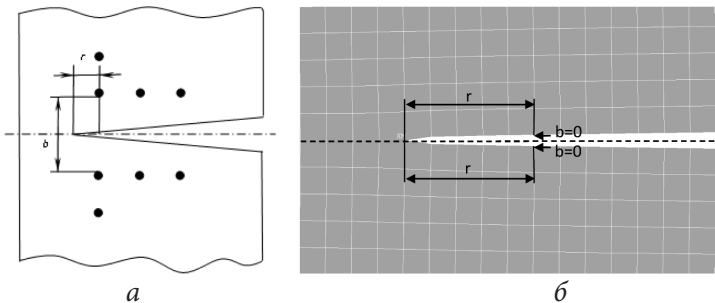


Рисунок 2. Схема вимірювання розкриття вершини тріщини:
а) при експерименті; б) в ANSYS

Розкриття у вістрі тріщини обчислювали за формулою $\delta = \delta_1 + \delta_2$ і зберігали це значення разом із даними про поточний крок в окремий файл. На рис. 3 наведено отримані криві залежностей розкриття δ від напруження бруто P на півциклі навантаження після пророщування тріщини на 2 мм за циклічного навантаження.

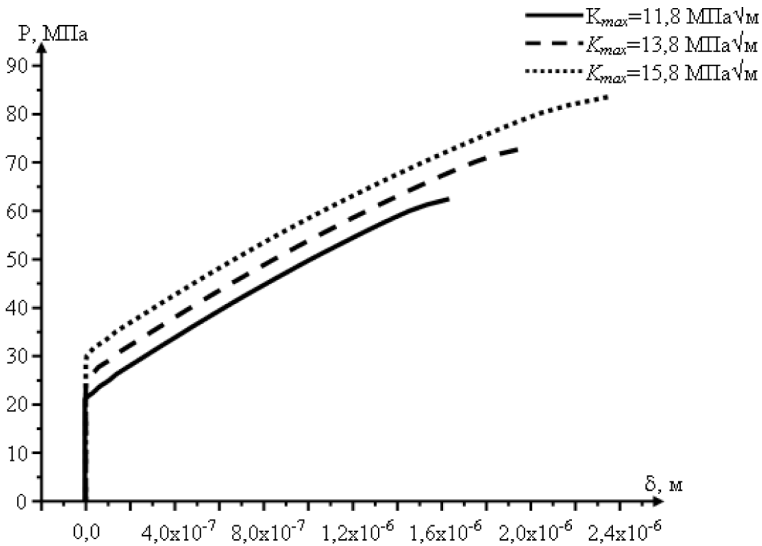


Рисунок 3. Діаграми P - δ , отримані завдяки моделюванню в ANSYS

Для знаходження моменту розкриття тріщини обрано метод, аналогічний обробці експериментальних даних у праці [7]. Момент, коли береги тріщини втрачали контакт і починали віддалятися, вважали моментом розкриття тріщини та зберігали для кожного кроку.

Розрахунковий комплекс ANSYS зберігає результати розрахунку НДС, зокрема пластичних деформації, на кожному кроці навантаження та враховує їх при розрахунку на наступному кроці (циклі).

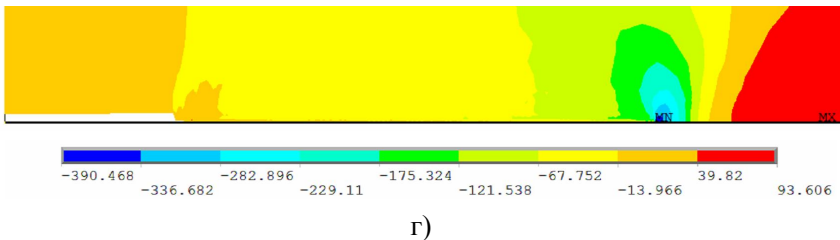
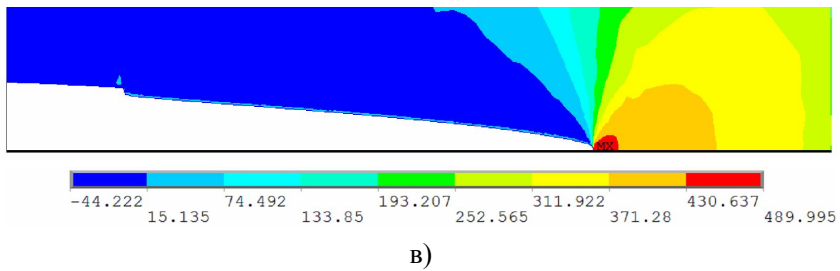
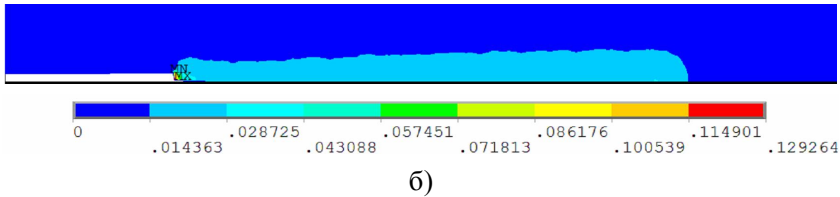
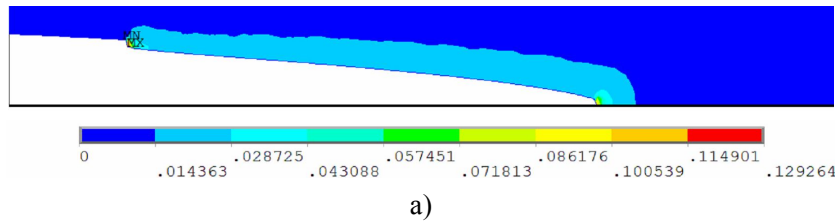


Рисунок 4. Результати скінченноелементного моделювання НДС на берегах та у вістрі пророщеної на 2 мм тріщини: а) нормальні пластичні деформації при $\sigma=84$ МПа; б) нормальні пластичні деформації при розвантаженні, $\sigma=0$ МПа; в) нормальні напруження при $\sigma=84$ МПа; г) нормальні напруження при розвантаженні, $\sigma=0$ МПа.

На рис. 4 наведено результати скінченноелементного розрахунку нормальних напружень і нормальних пластичних деформацій в околі вістря тріщини та на її берегах, після пророщування тріщини на 2 мм.

Висновки. З рисунка 4 бачимо, що при пророщуванні тріщини на її берегах утворюються залишкові пластичні деформації (утяжки). Завдяки цьому при розвантажуванні береги тріщини змикаються до часно, до повного розвантаження, що й зумовлює ефект закриття тріщини (перегин кривих, рис.3). Крім цього, з рис. 4 (г) бачимо, що на берегах тріщини при розвантаженні виникають контактні залишкові стискувальні напруження. Таким чином, розроблена модель дає можливість враховувати вплив залишкових пластичних деформацій і, відповідно, залишкових стискувальних напружень на берегах тріщини, а також залишкових деформацій і напружень спереду вістря тріщини на ефект закриття втомної тріщини за різних умов навантаження.

Література

1. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension / W. Elber // Eng. Fract. Mech. — 1970. — vol. 2, №1. — P. 37–45.
2. Elber W. The significance of fatigue crack closure / W. Elber // Damage tolerance in Aircraft structures. — Philadelphia (PA): ASTM STP №486, 1971. — P. 230–242.
3. Романив О.Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б. Н. Андрусив // Физ.-хим. механика материалов. — 1983. — №3. — С. 47–61.
4. Giuseppe P. The finite-element method, Part I. / P. Giuseppe // Antennas and Propagation Magazine, IEEE — 2007. — P. 180–182.
5. Ясній П. Вплив асиметрії циклу навантаження на характеристики циклічної тріщиностійкості алюмінієвого сплаву Д16Т / П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль: ТДТУ, 2007. — Т.12. — №1. — С. 7–12.
6. Пиндус Ю. Адаптація розмірів сітки скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану у вістрі тріщини в пружно-пластичній постановці за умов плоскої деформації / Ю. І. Пиндус, О. М. Галушак // Збірник тез доповідей наукової конференції механіко-технологічного факультету Тернопіль-

ського національного технічного університету імені Івана Пулюя. — Тернопіль: ТНТУ, 2011. — С. 12.

7. Ясній П. Методика дослідження ефекту закриття втомної тріщини з допомогою оптичного методу координатних сіток / П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — 2009. — Т.14 — №2 — С. 7–14.

**Petro Yasniy, Yuriy Pyndus,
Oleh Halushchak**

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE FATIGUE CRACK APPEARANCE IN ALLOY Д16Т AT CYCLIC LOADING

In this paper creation of central cracked flat specimen model using the finite element ANSYS simulation software is described. A fatigue crack growth and fatigue crack closure under constant amplitude cyclic loading has been modeled with taking into account the residual stresses and crack surfaces contact in crack tip. Software macros for all stages of modeling have been created. The possibility of using FEM to evaluate the effects of residual plastic deformations and residual compressive stresses on fatigue crack closure has been analyzed.

Keywords: *crack closure, stress intensity factor, fatigue crack growth, finite element method.*