

УДК 539.3

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200550

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДИНАМІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ТІЛ З ТРІЩИНАМИ

Баженов В. А., Вабищевич М. О.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЛ С ТРЕЩИНАМИ

Баженов В. А., Вабищевич М. О.

RESEARCH OF NONLINEAR DYNAMIC DEFORMATION OF SPATIAL BODIES WITH CRACKS

Vazhenov V., Vabischevich M.

Об'єктом досліджень є процес динамічної взаємодії складної системи циклічно-симетричних деталей опорного з'єднання з урахуванням наявності стаціонарних тріщин. Для значної кількості конструктивних елементів та деталей, що експлуатуються в умовах динамічних навантажень, характерним є виникнення та розповсюдження тріщин в зонах суттєвих пластичних деформацій. Зокрема, для опорного пристрою, який являє собою циклічно симетричне тіло з граничним випадком неоднорідності, при дії імпульсних навантажень на границях з'єднань циліндричної частини з виступами виникають зони пластичної течії. За умови наявності в означених областях тріщин, виникає необхідність достовірного визначення параметрів руйнування та прогнозування росту тріщини в часі.

Для побудови моделей означеного класу об'єктів одним з найбільш універсальних та достовірних чисельних методів є напіваналітичний метод скінченних елементів.

В даній роботі представлені результати обчислення на базі напіваналітичного методу скінченних елементів параметрів механіки руйнування для об'єкта з неоднорідними фізико-механічними властивостями при наявності стаціонарних тріщин в умовах імпульсного навантаження та пластичних деформацій. Чисельне дослідження виконано в два етапи. На першому етапі встановлено закономірності пружно-пластичного динамічного деформування системи. Визначені найбільш ймовірні зони накопичення пошкоджень та виникнення тріщин, що є причиною виходу з ладу елементів конструкції. На другому етапі розглянута модель із тріщиною, яка розташована в зоні пластичних деформацій, обчислені значення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень та досліджено їх еволюцію у часі.

Отримані результати досліджень можуть бути використані при чисельних розрахунках неоднорідних тіл з пошкодженнями типу тріщин в умовах пружно-пластичних динамічних деформацій.

Ключові слова: динамічне навантаження, скінченно-елементна модель, стаціонарні тріщини, параметри механіки руйнування.

Объектом исследований является процесс динамического взаимодействия сложной системы циклично-симметричных деталей опорного соединения с учетом наличия стационарных трещин. Для значительного количества конструктивных элементов и деталей, эксплуатируемых в условиях динамических нагрузок, характерно возникновение и распространение трещин в зонах существенных пластических деформаций. В частности, для опорного устройства, которое представляет собой циклически симметричное тело с предельным случаем неоднородности, при действии импульсных нагрузок на границах соединений цилиндрической части с выступлениями возникают зоны пластического течения. При наличии в указанных областях трещин, возникает необходимость достоверного определения параметров разрушения и прогнозирования роста трещины во времени.

Для построения моделей указанного класса объектов одним из самых универсальных и достоверных численных методов является полуаналитический метод конечных элементов.

В данной работе представлены результаты вычисления на базе полуаналитического метода конечных элементов параметров механики разрушения для объекта с неоднородными физико-механическими свойствами при наличии стационарных трещин в условиях импульсной нагрузки и пластических деформаций. Численное исследование выполнено в два этапа. На первом этапе установлены закономерности упругопластического динамического деформирования системы. Определены наиболее вероятные зоны накопления повреждений и возникновения трещин, что является причиной выхода из строя элементов конструкции. На втором этапе рассмотрена модель с трещиной, расположенной в зоне пластических деформаций, вычисленные значения динамических коэффициентов интенсивности напряжений и исследованы их эволюция во времени.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при численных расчетах неоднородных тел с повреждениями типа трещин в условиях упругопластических динамических деформаций.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, конечно-элементная модель, стационарные трещины, параметры механики разрушения.

1. Вступ

Прагнення до збільшення терміну експлуатації відповідальних об'єктів сучасної техніки веде до використання конструктивних елементів і деталей при наявності в них тріщин. В багатьох випадках вони знаходяться під дією доволіно розподілених у просторі та часі нестационарних динамічних навантажень різної тривалості. Визначення тріщиностійкості зазначених об'єктів є вирішальним фактором запобіганню можливих аварійних ситуацій.

Зважаючи на технічні труднощі та високу вартість проведення натурних випробувань, вирішення задач про обчислення динамічних параметрів руйнування означеного класу об'єктів із залученням експериментальних методів є майже неможливим. У зв'язку з цим постає необхідність більш глибокого теоретичного

вивчення особливостей поведінки таких конструкцій та створення відповідних чисельних засобів по визначенню динамічних параметрів механіки руйнування.

Аналіз відомих публікацій [1–3] показує, що основними об'єктами дослідження механіки руйнування при динамічному навантаженні залишаються двовимірні тіла. При розгляді просторових тіл для заданого класу задач, як правило, обмежуються об'єктами з однорідними фізико-механічними властивостями та стаціонарними тріщинами.

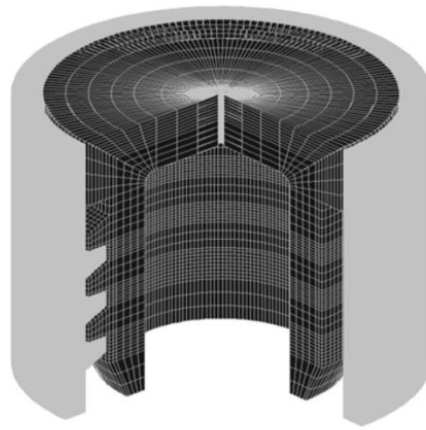
Найбільш поширений та універсальний чисельний метод для побудови моделей означеного класу об'єктів є напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), розвиток якого відображений в працях [4–6]. На основі НМСЕ широко розглянуті підходи до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) та J -інтеграла в просторових задачах статички та динаміки для однорідних тіл зі стаціонарними тріщинами [7–9]. Разом з тим питання обчислення параметрів механіки руйнування на базі НМСЕ для тіл з неоднорідними фізико-механічними властивостями при наявності тріщин в умовах імпульсного навантаження в літературі висвітлено недостатньо. Це підтверджує актуальність теоретичних досліджень.

Отже, *об'єктом досліджень* є процес динамічної взаємодії складної системи циклічно-симетричних деталей опорного з'єднання з урахуванням наявності стаціонарних тріщин. *Метою роботи* є визначення параметрів тріщиностійкості для деталей вище вказаного замикаючого з'єднання.

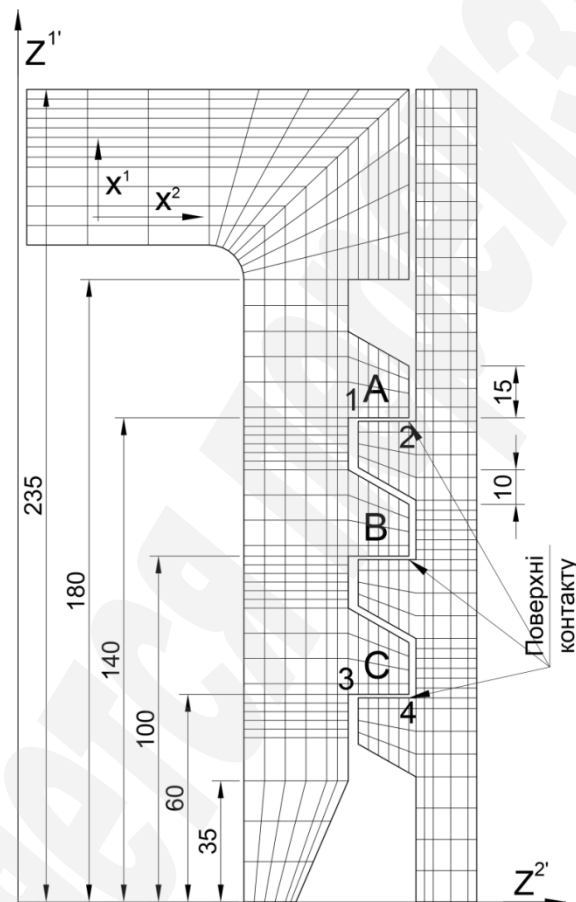
2. Методика проведення досліджень

Чисельні дослідження виконувалися на базі НМСЕ з використанням програмного забезпечення SAFEM Науково-дослідним інститутом будівельної механіки Київського національного університету будівництва та архітектури (НДІ БМ КНУБА). Основна задача полягала у побудові просторової скінченно елементної моделі (СЕМ) об'єкту із застосуванням розроблених спеціальних скінчених елементів, які моделюють наявність тріщини та контакту.

Основна (внутрішня) деталь опорного з'єднання (рис. 1) являє собою масивний циліндр з 4 рядами секторних виступів, рівномірно розміщених по кільцевій координаті на зовнішній поверхні. Зовнішня деталь теж виготовлена у формі циліндра з 3-ма рядами виступів на внутрішній поверхні. Через виступи відбувається взаємодія (контакт) між внутрішньою та зовнішньою деталями опорного пристрою. Призначення об'єкту дослідження – утримання снаряду в стволі гармати. Явище пострілу моделюється імпульсним навантаженням прикладеним до верхнього торця кришки внутрішньої деталі. Швидкість збільшення та термін дії тиску дозволяє прикладати його миттєво інтенсивністю $q_a = 0.739 \cdot 10^8$ Па та утримувати на інтервалі часу $t \in [0; 2.4 \cdot 10^{-4}]$ с. Модуль пружності матеріалу $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Па, щільність $\rho = 7.8 \cdot 10^3$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, границя текучості $\tau_s = 2.7 \cdot 10^8$ Па.



a



б

Рис. 1. Об'єкт дослідження: *a* – комп'ютерна модель;
б – скінченноелементна модель

Аналіз окремих елементів [10] показав суттєву нерівномірність навантаження виступів вздовж кільцевої координати, що вимагає просторового моделювання з'єднання, як циклічно-симетричної конструкції. В поперечному перерізі конструкція апроксимується набором однорідних та неоднорідних кільцевих скінченних елементів (СЕ). В області вирізів модуль пружності, щільність та коефіцієнт Пуасона приймаються рівними нулю. Моделювання контактної взаємодії між виступами проводиться за допомогою

спеціальних контактних СЕ, які сприймають тільки нормальні до поверхні контакту стискаючі навантаження. Урахування наявності тріщини в зонах пластичних деформацій забезпечується введенням в розрахункову схему спеціально розробленими для задач динаміки СЕ з тріщинами.

Дослідження збіжності рішень показало, що при збільшенні числа вузлів сіткової області більш ніж у два рази (від 500 до 940) або числа членів ряду Фур'є з 12 до 20 відмінність максимальних напружень не перевищує 5%. При апроксимації конструкції вздовж окружної координати утримується 20 членів ряду Фур'є, в поперечному перерізі зберігається сітка – 20×47, крок у часі $\Delta t = 3 \cdot 10^{-6}$ с. Для забезпечення необхідної точності розв'язання системи рівнянь достатньо було застосування значення $\varepsilon = 10^{-3}$.

3. Результати дослідження та обговорення

Аналіз напружено-деформованого стану об'єкту показав, що максимально навантаженими є кутові зони, де конструктивно поєднуються секторні виступи з тілом циліндра. Значення інтенсивності напружень, отримані в цих областях на основі пружного розрахунку досягають величин, що перевищують значення межі текучості матеріалу, що веде до необхідності розв'язання пружнопластичної задачі динамічного деформування.

На початкових етапах деформування виникають хвилі напружень, вздовж Z^1 у стволі внутрішньої деталі, рівень яких значно менший границі текучості. Пластичні деформації виникають в процесі коливання всієї деталі та носять локальний характер (області виступів). Вперше з'являються при $t = 6.6 \cdot 10^{-5}$ с і розвиваються до $t = 29.1 \cdot 10^{-5}$ с, коли набувають своїх максимальних значень. Зони нелінійної роботи матеріалу представлені на виступах у вигляді ізоліній в момент часу $t = 29.1 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 2).

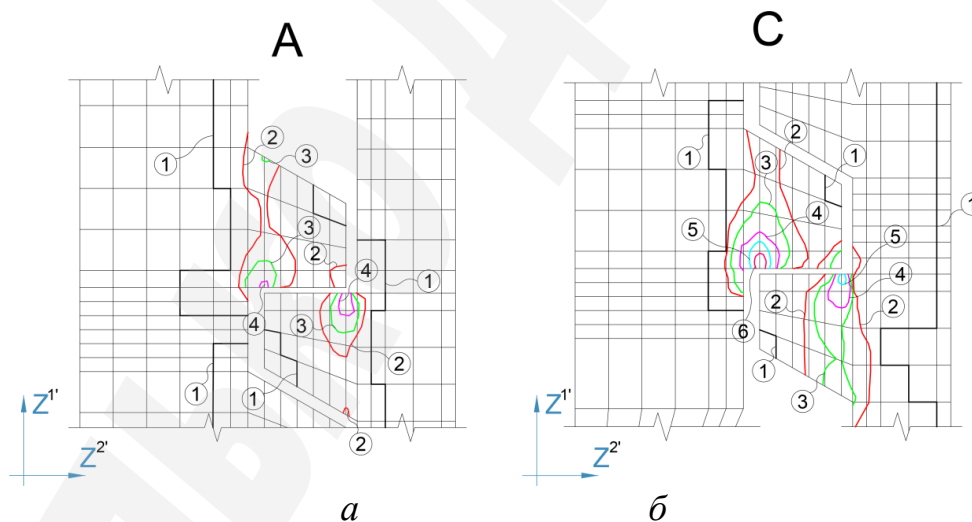


Рис. 2. Інтенсивності пластичних деформацій в перерізі I–I: *a* – в зоні третього виступу; *б* – в зоні першого виступу
(1 – 0.0 %, 2 – 0.09 %, 3 – 0.19 %, 4 – 0.28 %, 5 – 0.37 %, 6 – 0.47 %)

Після визначення напружено-деформованого стану об'єкту в зонах максимальних пластичних деформацій за допомогою спеціальних скінченних

елементів були змодельовані похилі кільцеві тріщини з вершинами біля границь виступів (рис. 3).

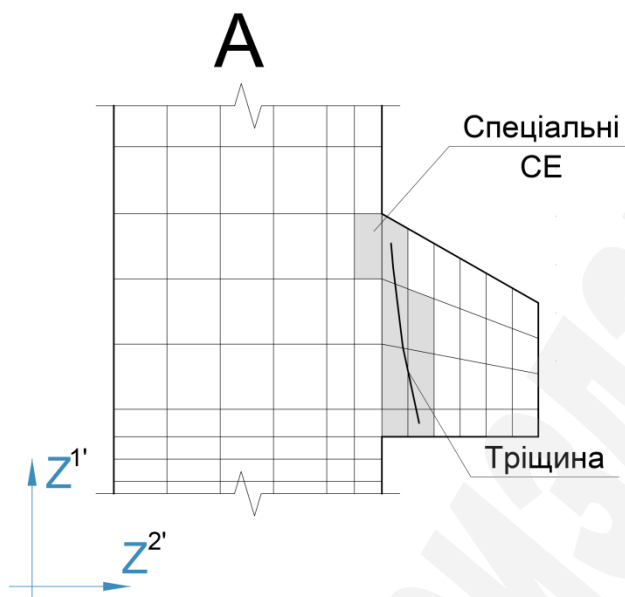


Рис. 3. Фрагмент скінченно-елементної моделі зі спеціальними скінченними елементами з тріщинами

Обчислення КІН проводилося двома методами: прямим (лінії) та на основі енергетичного підходу (метод реакцій, марки). Результати показані на рис. 4 у вигляді нормованих значень динамічного КІН K_c/q . Коефіцієнт інтенсивності напружень другого роду K_{II} (пунктирна лінія, квадрати) складає приблизно 10÷12 % від K_I (суцільна лінія, кружки).

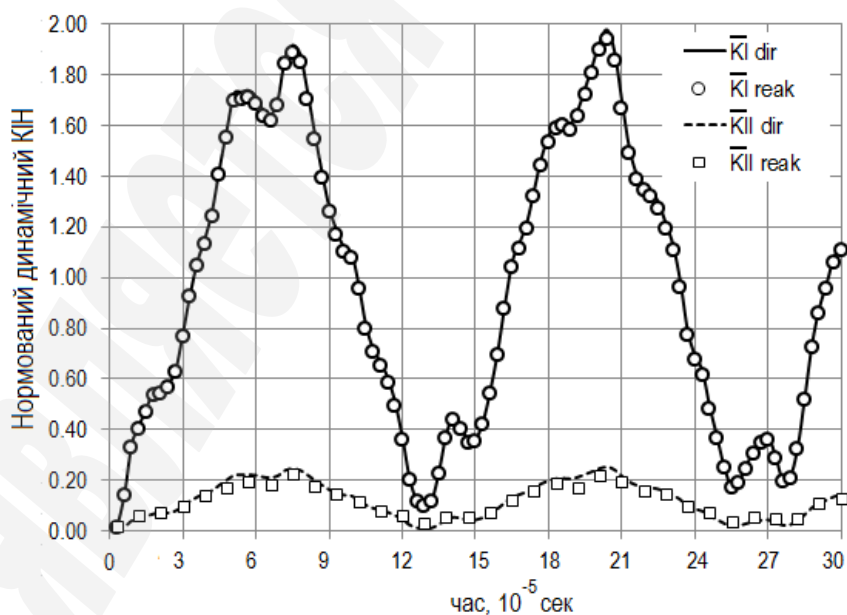


Рис. 4. Еволюція динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень

Як видно з графіків на рис. 4, відмінність результатів, отриманих з використанням різних підходів не перевищує 2–3 %, що цілком прийнятно для задач динаміки.

4. Висновки

За результатами скінчено-елементного розрахунку деталей опорного з'єднання встановлено, що максимально навантаженими є кутові зони, де конструктивно поєднуються секторні виступи з тілом циліндра. Визначені найбільш ймовірні зони виникнення тріщин, які виникатимуть в зонах, де інтенсивність пластичних деформацій складатиме від 0,19 до 0,47 %. Обчислені значення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень (ДКІН) та дослідження їх еволюція у часі, показали, що максимальні величини нормованих ДКІН першого роду не перевищують величини 2,0, а другого роду – 0,25. При цьому величини змінюються циклічно з періодом $12,9 \cdot 10^{-5}$ с. Отримані результати досліджень можуть бути використані при чисельних розрахунках неоднорідних тіл з пошкодженнями типу тріщин в умовах пружно-пластичних динамічних деформацій.

References

1. Funari, M. F., Lonetti, P., Spadea, S. (2019). A crack growth strategy based on moving mesh method and fracture mechanics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 102, 103–115. doi: <http://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.03.007>
2. Ooi, E. T., Shi, M., Song, C., Tin-Loi, F., Yang, Z. J. (2013). Dynamic crack propagation simulation with scaled boundary polygon elements and automatic remeshing technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 106, 1–21. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.02.002>
3. Zhang, Y., Zhuang, X. (2019). Cracking elements method for dynamic brittle fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 102, 1–9. doi: <http://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.09.015>
4. Bazhenov, V. A., Guliar, O. I., Piskunov, S. O., Sakharov, O. S. (2002). Чисельне моделювання нелінійного деформування, континуального і дискретного руйнування методом скінчених елементів. *Технологічні системи*, 2, 30–33.
5. Guliar, A. I. (1984) Об одном методе расчёта пространственных конструкций на основе обобщения полуквантитативного варианта МКЭ для замкнутых некруговых конечных элементов. *Сопrotivlenie materialov i teoriia sooruzhenii*, 44, 44–46.
6. Hrechukh, N. A., Pyskunov, S. O., Ostapenko, R. M. (2006). Обчислення КІН в просторових тілах обертання при температурному навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 80, 38–53.
7. Guliar, A. I., Topor, A. G., Solodei, I. I. (1997). Обобщение МКЭ для исследования динамического деформирования неоднородных тел вращением при импульсном нагружении. *Сопrotivlenie materialov i teoriia sooruzhenii*, 63, 103–114.
8. Solodei, I. I. (2002) Напіваналітичний метод скінчених елементів в дослідженні пружнопластичних криван неоднорідних призматичних тіл. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 71, 90–98.
9. Solodei, I. I., Vabishchevych, M. O., Sakharov, O. S., Guliar, O. I. (2006). Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень призматичних тіл з

trishchynamy pry dii dynamichnoho navantazhennia. *Opir materialiv i teoriia sporud*, 78, 61–76.

10. Sakharov, A. S., Guliar, A. I., Topor, A. G. (1986). Analiz napriazhenno-deformirovannogo sostoianii tel vrashcheniia s vyrezami, narushaiushchimi osevuuiu simmetriiu. *Problemy prochnosti*, 6, 69–73.

The object of research is the process of dynamic interaction of a complex system of cyclically symmetric parts of the support joint, taking into account the presence of stationary cracks. A significant number of structural elements and parts operated under dynamic loads are characterized by the occurrence and propagation of cracks in areas of significant plastic deformation. In particular, for the supporting device, it is a cyclically symmetric body with a limiting case of heterogeneity, under the action of pulsed loads, plastic flow zones arise at the boundaries of the joints of the cylindrical part with projections. If there are cracks in these areas, it becomes necessary to reliably determine the fracture parameters and predict the crack growth over time.

To build models of this class of objects, one of the most universal and reliable numerical methods is the semi-analytical finite element method.

In this paper, the results of calculating of the parameters of fracture mechanics on the basis of the semi-analytical method of finite elements are presented for an object with inhomogeneous physical and mechanical properties in the presence of stationary cracks under conditions of pulsed loading and plastic deformations. The numerical study is performed in two stages. At the first stage, the laws of the elastic-plastic dynamic deformation of the system are established. The most probable zones of damage accumulation and cracking are determined, which is the reason for the failure of structural elements. At the second stage, a model with a crack located in the zone of plastic deformations is considered, the calculated values of the dynamic stress intensity factors are studied, and their evolution over time is investigated.

The obtained research results can be used in numerous calculations of inhomogeneous bodies with damage such as cracks in the conditions of elastic-plastic dynamic deformations.

Keywords: *dynamic load, finite element model, stationary cracks, fracture mechanics parameters.*