

Федоряченко С.О., Король В.М, Вишневецький В.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

АНАЛІЗ КРИХКОГО ТА ПЛАСТИЧНОГО РУЙНУВАННЯ ОБОЛОНОК ПРИ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ МЕХАНІЧНОМУ ВПЛИВІ

INVESTIGATION OF DUCTILE AND BRITTLE SHELL FRAGMENTATION WHILE HIGH-ENERGY MECHANICAL INFLUENCE

Fedoriachenko S.O., Korol V.M., Vyshnevetsyi V.V.

Dnipro University of Technology

Анотація. У роботі представлено всебічний огляд моделювання циліндричних оболонок в із застосуванням методу скінчених елементів з акцентом на поведінці пластичного та крихкого руйнування під дією вибухового навантаження. Особлива увага приділяється високовуглецевим легованим сталям, які демонструють виражене фрагментування або квазикрихку поведінку та можуть утворювати менші, швидші фрагменти за певних умов. Обговорюються ключові чисельні підходи до моделювання фрагментації та розрахунку кінетичної енергії осколків, а також досліджуються відповідні конститутивні рівняння - зокрема, закон Джонсона-Кука із визначення пластичності при високих швидкостях деформації та параметри лінійної пружної механіки руйнування для фрагментативного типу руйнування. Наголошується на мікроструктурних факторах (розмір зерен, розподіл карбідів), які визначають руйнування та розподіл маси фрагментів.

Ключові слова: детонаційна хвиля, високоенергетичний вплив, пластичне руйнування, крихке руйнування.

Вступ. Вибухова фрагментація металевих оболонок є ключовим аспектом багатьох оборонних застосувань, від гранат до артилерійських снарядів. Циліндрична геометрія є поширеним конструктивним вибором, що забезпечує передбачуваний розподіл фрагментів при радіальному розширенні. Однак вибір матеріалу є вирішальним. Низьковуглецеві сталі зазвичай призводять до помірної фрагментації з масивнішими фрагментами (внаслідок пластичного руйнування), тоді як високовуглецеві сталі можуть демонструвати більш крихке руйнування і утворювати



численні дрібні фрагменти з потенційно вищою початковою швидкістю. Чисельне моделювання дозволяє детально відтворити розширення циліндричної оболонки під дією вибухового навантаження, враховуючи відносно великі пластичні деформації або крихкі тріщини при високих швидкостях деформації; термічне розм'якшення, утворення адіабатичних зсувних смуг або поширення крихких мікротріщин залежно від мікроструктури; а також швидкість осколків і розподіл маси фрагментів, які разом визначають ефективність ураження оболонки.

Експериментальні роботи підкреслюють, що високовуглецеві сталі можуть зазнавати крихкого руйнування під дією високоенергетичного навантаження, що призводить до утворення більш дрібних і численніших фрагментів. Мікроструктурний аналіз показує, що леговані карбіди та рафіновані зерна сприяють міжкристалітним або транскристалітним мікротріщинам, що суттєво змінює розподіл маси фрагментів і середній розмір фрагментів.

Для точного та візуально контрольованого розрахунку найбільш доцільним методом є чисельне моделювання. Типова циліндрична оболонка дискретизується з використанням тривимірних елементів (наприклад, тетраедричних або гексаедричних). Уточнення сітки виконується в зонах з високою швидкістю деформації або поблизу концентраторів напружень (можливих місць ініціації тріщин). У менш критичних областях можна використовувати грубіші сітки для зменшення обчислювальних витрат. Досягнення точного відтворення ударних хвиль і поширення тріщин вимагає врахування критеріїв ерозії елементів для пластичного або крихкого руйнування.

Постановка задачі. При малому кроці часу (Δt), обмеженому умовою Куранта-Фрідрікса-Леві:

$$\Delta t \leq \frac{l_{min}}{c_{wave}},$$

де l_{min} – найменший розмір елемента; c_{wave} – локальна швидкість поширення хвилі.

Існують два основні підходи для прикладення внутрішніх навантажень від вибухових речовин (ВР):

1. **Емпіричні криві ConWep**, які параметризуються масою заряду та геометрією, забезпечуючи існування функції тиску від часу.
2. **Методи сполученого Ейлер-Лагранжевого моделювання**, що дозволяє явно моделювати детонаційну хвилю та взаємодію рідини зі структурою.

Для циліндричних оболонок розв'язувач відстежує радіальне розширення до моменту руйнування, після чого можна визначити швидкості окремих фрагментів.



Пластичні сталі (наприклад, середньовуглецеві сталі з достатньою в'язкістю) добре моделюються за допомогою закону Джонсона–Кука.

$$\sigma(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, T^*) = [A + B(\epsilon_p)^2][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p)][1 - (T^*)^m]$$

де ϵ_p - пластична деформація, $\dot{\epsilon}_p$ - швидкість деформації, T^* - гомологічна температура, A, B, C, n, m - константи.

Ця модель враховує зміцнення при швидкісній деформації, термічне розм'якшення та значну пластичність перед в'язким руйнуванням або ерозією елементів. Високовуглецеві сталі можуть руйнуватися шляхом транскристалітного або міжкристалітного фрагментування з мінімальним пластичним плином. Модель, близька до пружно-пластичної, часто поєднується з критичним напруженням (σ_c) або критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{Ic}) для моделювання ерозії елементів.

Лінійно-пружна механіка руйнування може керувати розповсюдженням тріщини, якщо локальна інтенсивність напруги K_I перевищує K_{Ic} . Ерозія елемента відбувається, коли $\Delta K \geq K_{Ic}$ моделює інтенсивне фрагментування та утворює багато дрібних фрагментів.

Пластичні сталі часто утворюють адіабатичні смуги зсуву при високих швидкостях деформації, особливо на внутрішній поверхні оболонки, де радіальна деформація є найбільш інтенсивною. Локалізації зсуву згодом зливаються, що призводить до довгих кутових (45°) розломів в оболонці. Фрактографія виявляє гребені пластичної течії та пластичні зсуви.

Високоміцні високовуглецеві сталі можуть утворювати зони пошкодження мікротріщин на зовнішній поверхні оболонки під дією радіального навантаження.

При цьому, міжкристалітне або транскристалітне фрагментування може відбуватися, якщо мікроструктура містить грубі межі зерен або карбідні мережі, тоді як карбіди сплавів діють як концентратори напруги або точки «закріплення», обмежуючи пластичне ковзання та сприяючи утворенню мікротріщин при менших деформаціях.

Подрібнення зерна (менше d) збільшує площу межі зерна, підвищуючи ймовірність перетину мікротріщин і, таким чином, утворення більшої кількості дрібних фрагментів.

Карбідні виділення можуть ще більше зменшити ефективний розмір зерна з точки зору руйнування, посилюючи фрагментацію.

При лінійно-пружній механіці руйнування основною умовою крихкого фрагментування (режим I) є:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \geq K_{Ic}$$

σ - чистий натяг, a - довжина тріщини, Y - геометричний коефіцієнт.



Нестабільність виникає, коли K_I перевищує K_{Ic} . Крім того, можна використовувати швидкість виділення енергії G при $G \geq G_c$, оскільки $G = K_I^2/E'$ знаходиться у площинній деформації.

Експерименти часто показують, що кількість фрагментів N у порівнянні з масою m відповідає розподілам Мотта або Вейбулла. Двопараметрична форма Вейбулла:

$$N(> m) = \frac{M_0}{m\Gamma(1 + \frac{1}{\lambda})} \exp[-(m/m)^\lambda],$$

де m – параметр масштабу (характерна маса), λ – параметр форми, M_0 – загальна маса оболонки. Високоміцні крихкі сталі дають менше m (тобто багато дрібних фрагментів).

Таким чином, кратність елемента скінчено-елементної сітки має бути узгоджена із фізико-механічними характеристиками матеріалу оболонки, зокрема із параметром ударної в'язкості та корегуватись відповідно до експериментальних випробувань у комбінації із бризантним високоенергетичним матеріалом

Висновки. На основі проведеного аналізу та встановлених залежностей взаємодії матеріалу оболонки та високоенергетичного матеріалу визначено потенційну природу фрагментування виробу. В залежності від фізико-механічних характеристик матеріалу оболонкових конструкцій має бути застосований метод адаптації скінчено-елементної сітки для моделей Лагранжа-Ейлера.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Азюковський О.О., Гаркавенко Д.В., Гришак В.З., Зіборов К.А., Федоряченко С.О. Аналітичний підхід до розв'язку задачі нелінійної динаміки систем із змінними за часом параметрами в умовах реакції зовнішнього середовища.-Збірник наукових праць НГ -2023 - № 72 -С. 186-193.
2. Чумак Б. О., Нос О. М., Мішуков О. М. Аналіз похибок трьохпараметричних вимірювальних систем. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2014. № 3(16). С. 125-128.
3. Литовченко А.О., Хижняк В.В., Дмитрієв А.Г. Аналіз складових похибок траєкторних вимірювань натурних випробувань складних технічних об'єктів. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2020. - № 1(63). С. 68-73.



4. Petrov V.M., Shalygin A.A., Kudryavtsev A.F. A methodical approach to the solution of the aiming problem for dropping free-falling loads from unmanned aerial vehicles. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine.*, 2020, 1(38), p. 84-90
5. Ольшанський В.П, Ольшанський С.В. Динаміка матеріальної точки у руховому повітряному середовищі. / *Ольшанський В.П, Ольшанський С.В.* // 2012.
6. Ольшанський В.П, Дубовик О.А. Питання зовнішньої балістики вогнегасних речовин./ *Ольшанський В.П, Дубовик О.А.* //-Х. Митець, 2005.-236 с.
7. Steele C. R. Asymptotic Analysis and Computation for Shells. *Analytical and Computational Models of Shells* / C. R. Steele // CED. – 1989. – Vol. 3. – P. 3–31.
8. Gaetan Kerschen. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. / Gaetan Kerschen, Keith Worden, Aleksander F. Vakakis, Jean-Claude Golinval. // *Jnt. J. Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2006. – 20. – P. 505 – 592.

