

УДК 539.3

В. Лях, канд. фіз.-мат. наук, В. Андрущенко, пров. інж.

ВИВЧЕННЯ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ МАТЕРІАЛІВ ПРИ МІКРОІНДЕНТУВАННІ СФЕРИЧНИМ ІНДЕНТОРОМ

У роботі за допомогою методу скінченних елементів досліджено напружено-деформований стан матеріалу під індентором. Властивості матеріалу моделювалися за білінійним законом. Особливу увагу приділяється розвитку зон пластичної деформації.

This paper addresses finite element study of elasto-plastic behaviour and mechanical parameters of materials within microindentation by spherical indenter. Strain-stress state is analyzed beneath the indenter. The progress of plastic zones is under particular attention. The results are compared with experimental data.

1. Вступ

Задача про контакт тіл з неузгодженими поверхнями є фундаментальною задачею механіки матеріалів. Тоді як індентування матеріалів, традиційно, один з основних методів визначення їх механічних властивостей, а неперервне індентування – найголовніший з методів неруйнівного контролю конструкційних характеристик і стану матеріалів [1,2]. Тому задача пружно-пластичного контакту сфери з півпростором має визначальне теоретичне й прикладне значення.

В останні роки, індентування, зокрема сферичне, розробляється й досліджується як ефективний, неруйнівний метод визначення механічних властивостей матеріалів [3-6]. Цей метод застосовується у випадках, коли неможливо провести традиційні випробування на розрив. Основне завдання – зв'язати експериментальні діаграми індентування з стандартними деформаційними кривими.

У роботі викладено результати вимірювання пружних властивостей матеріалів шляхом мікроіндентування сферичним індентором. За допомогою методу скінченних елементів досліджено напружено-деформований стан матеріалу під індентором.

2. Скінченно-елементна модель

Розрахунок ефективно провести, використовуючи двовимірну вісесиметричну модель. Сферичний індентор моделюється півсферою, а досліджуваний матеріал – товстою круглою пластинною (див. рис.1).

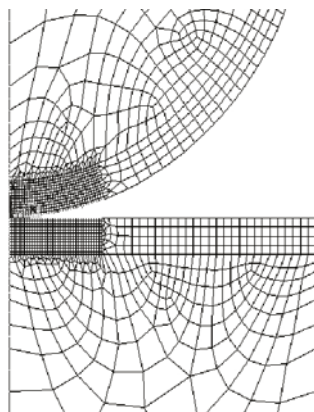


Рис. 1

При цьому півсфера моделюється рухливою, а підложка затиснена. Розмір області контакту настільки малий щодо розмірів тіл, що відповідно до принципу Сен-Венана можна вважати, що конкретні умови навантаження й закріплення тіл на краях не впливають на напружено-деформований стан у досліджуваній області, поблизу контакту двох тіл.

При заданій глибині заглиблення сфери, сила контактної взаємодії, з якою сфера вдавлюється в півпростір, визначається за реакціями у базових закріплених вузлах підложки. Радіус контактної поверхні визначається шляхом знаходження краю контакту або розташування останнього задіяного контактного елемента.

Є два шляхи змодельювати контактну взаємодію. Або прикласти силу до півсфери й потім визначити відповідний зсув півсфери. Або задати зсув ω півсфери щодо нерухливої підложки, а потім установити відповідну силу контакту.

3. Чисельні результати і їх аналіз

Незважаючи на різноманітні можливості мікроіндентування у встановленні механічних характеристик матеріалів, визначення напружено-деформованого стану під індентором можливо тільки при розв'язанні відповідної контактної задачі. На практиці це приводить до істотних труднощів, пов'язаних з тим, що форма й розміри пружно-пластичної границі й характер її розвитку заздалегідь невідомі.

Побудована скінченно-елементна схема дозволяє розглядати всілякі комбінації матеріалів, у рамках використаної фізичної моделі білінійної поведінки матеріалів. Тут наводяться результати тільки для випадку, коли сфера є абсолютно твердою, а матеріал півпростору – алюмінієвий сплав АМг 6 з модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона й границею текучості, відповідно, 71 ГПа, 0.31 і 0,19 ГПа.

На початку, при малих контактних навантаженнях деформація буде протікати пружно. Відповідно до критерію Мізеса, умовою виникнення пластичної течії є:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (1)$$

де $\sigma_i, i=1,2,3$, – головні напруження у складному напруженому стані, S_y – напруження текучості матеріалу при простому розтягу. Вираз в правій частині (1) прийнято називати еквівалентним напруженням σ_e (або напруженням Мізеса). Причому в пружному режимі, максимальне еквівалентне напруження завжди виникає під контактною поверхнею.

Ситуація, коли з'являється пластична течія, а саме виникає точка, у якій виконується критерій (1), і відповідні їй параметри контакту, сила P , зсув ω , площа контакту A називаються критичними: P_c, ω_c, A_c . Співставляючи фактичні параметри із критичними, можна судити про початок пластичності або її стадії. Тому зручно за допомогою критичних величин зробити вихідні дані й результати всякої моделі безрозмірними. Пронормовані параметри будуть:

$$P^* = P/P_c, \omega^* = \omega/\omega_c, A^* = A/A_c.$$

На рис.2 маркерами 'x' представлено відношення середнього тиску до напруження текучості залежно від безрозмірної глибини заглиблення. Для порівняння суцільною лінією позначений розподіл, що відповідає розв'язку Герца. Поки $\omega^* < 3$ розв'язки добре узгоджуються, а пластичні деформації ще порівняно малі. При наступному вдавлюванні відхилення стають істотними.

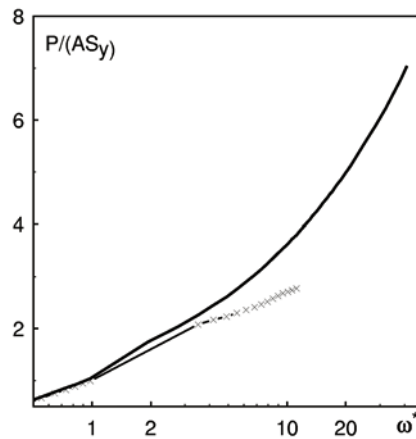


Рис. 2

При заглибленні ω , що незначно перевищує критичне значення, пластична область мала й обмежена під контактної поверхнею пружним матеріалом (див. рис. 3 – показано еквівалентне напруження тільки в пластичних зонах). З подальшим заглибленням пластична область збільшується поки не досягне контактної поверхні (рис.4). Після того як пластична деформація досягла поверхні контакту, в околиці її центра усе ще зберігається пружний об'єм матеріалу. У дійсності, ця пружна область перейде в пластику з подальшим зростанням вдавлювання. Рис. 5 показує пластичну область саме в момент, коли контактна поверхня повністю стала пластичною. Ряд повторних скінченно-елементних розрахунків було проведено, щоб установити параметри у двох важливих випадках, коли: 1) пластична деформація вперше виходить на контактну поверхню; 2) контактна поверхня вперше стає цілком пластичною. У даних ситуаціях величини ω^* визначені з точністю до 10%. Отримані результати добре узгоджуються з відомими у літературі даними [5]. Щоб вирішити задачу більш точно, потрібно значно більш тривалі розрахунки і поліпшена сіткаскінченних елементів.

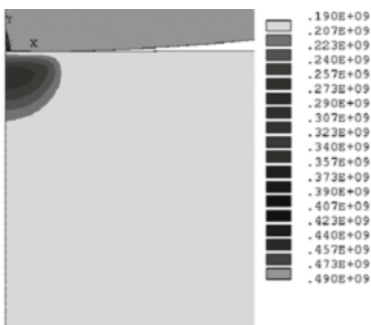


Рис. 3
 $\omega^* = 2.8$

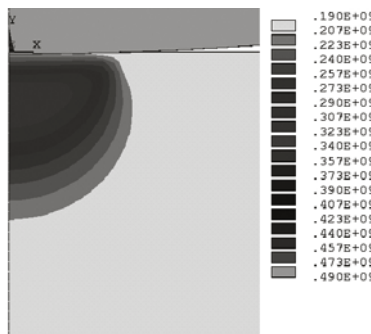


Рис. 4
 $\omega^* = 6.3$

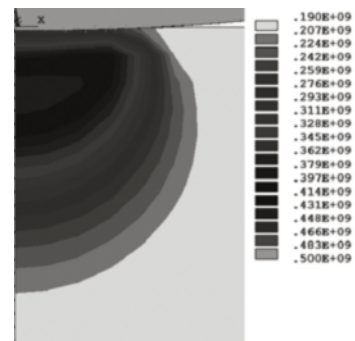


Рис. 5
 $\omega^* = 72$

Нарешті, на рис. 6-8 представлено розподіли нормального зсуву u_z (вісь z – спрямована перпендикулярно до поверхні напівплощини), нормального σ_z й дотичного τ_{xz} напружень (тут $\omega^* = 72$). З цих рисунків видно, що на відміну від ситуації розтягування матеріалу, де матеріал би вже давно втратив суцільність і зруйнувався, в умовах контактного стискання реальні напруження значною мірою перевершують границю текучості й інші критичні для матеріалу параметри.

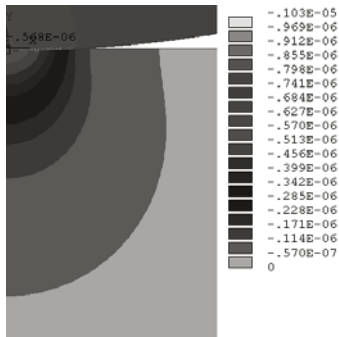


Рис. 6

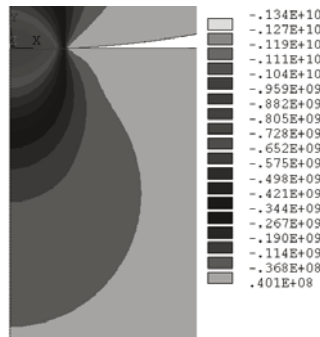


Рис. 7

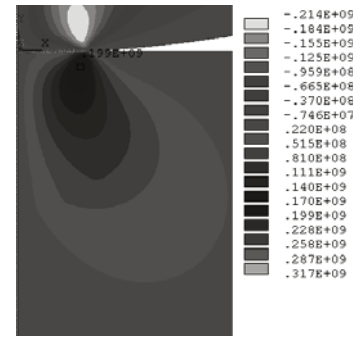


Рис. 8

4. Висновки

У роботі викладені результати 2-вимірного осесиметричного скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану при вдавлюванні твердої сфери в пружно-пластичну основу. Вивчено розвиток зони пластичної деформації. Із указаною точністю встановлені параметри її ключових станів. Досліджено рівень механічних напружень під індентором.

1. Головин Ю.И., Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикромрамах, тонких приповерхностных слоях и пленках // ФТТ. – 2008. – Т. 50. № 12. – С. 2113-2142. 2. Головин Ю.И. и др., Неустойчивое пластическое течение в сплаве Al-3% Mg в процессе непрерывного наноиндентирования // ФТТ. – 2002. – Т. 44. № 7. – С. 1254-1259. 3. Sinclair G.B. et al., Quasi-static normal indentation of an elasto-plastic half-space by a rigid sphere – II. Results // Intern. J. Solids and Structures. – 1985. – Vol. 21. N 8. – P. 865-888. 4. Mata M., O. Casals, J. Alcalá, The plastic zone size in indentation experiments: The analogy with the expansion of a spherical cavity // Intern. J. Solids and Structures. – 2006. – Volume 43, N 20. – P. 5994-6013. 5. Kral E.R.I., Komvopoulos K., Bogy D.B., Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Repeated Indentation of a Half-Space by a Rigid Sphere // J. of Appl. Mechanics. – 1993. – Vol. 60. – P. 829-841. 6. Ye N., Komvopoulos K., Effect of Residual Stress in Surface Layer on Contact Deformation of Elastic-Plastic Layered Media // ASME J. Tribol. – 2003. – Vol.125. – P. 692-699.

Надійшла до редколегії 11.26.09

УДК 532.5

О. Хорошилов, канд. фіз.-мат. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ ТИСКУ У ЗАДАЧАХ АЕРОДИНАМІКИ КОНІЧНИХ ТІЛ ПРИ НАЯВНОСТІ НА ЇХ ПОВЕРХНІ ІНТЕНСИВНОГО ПОВЕРХНЕВОГО МАСОПЕРЕНОСУ

Проведено теоретичне дослідження характеру полів тиску при надзвуковому вісесиметричному обтіканні конічного тіла, з поверхні якого здійснюється інтенсивний рівномірно розподілений вдув маси газу. Доведено, що тиск досягає свого абсолютного максимального значення всередині збуреної області течії на поверхні розподілу двох потоків.

The analytical investigation of character of fields of pressure is conducted at supersonic axial flow over of conical body, through which surface the intensive distributed injection of mass of gas is made. It is proved, that the pressure reaches the absolute maximum rating inside perturbed area of flow on a surface of separation of two flows

1. Вступ

Дослідження інтенсивного масопереносу на поверхні тіл, що знаходяться у високошвидкісному потоці газу, мають значний інтерес як для вдосконалення систем теплозахисту літальних апаратів, так і для розробки засобів керування їх аеродинамічними характеристиками. Одним з підходів до вирішення таких задач є математичне моделювання реальних фізичних явищ за допомогою примусового вдуву маси газу скрізь пористу поверхню тіл. З практичної точки зору найбільший інтерес мають моделі, які описують інтенсивний вдув, коли прикордонний шар відтискується від поверхні тіла, поблизу якої локалізується область течії газу, що вдувається.

2. Постановка задачі

Скрізь оболонку круглого конуса, що знаходиться у надзвуковому потоці, вдувається газ рівномірно вдовж всієї поверхні тіла під деяким довільним кутом β ($0 < \beta < \pi/2$) до неї. Стрибок ущільнення Ω приєднаний до миска конуса, а швидкість газу, який вдувається, є такою, що відповідає режиму сильного вдуву [2], коли газ, що вдувається, відтискує прикордонний шар від пористої поверхні і локалізується поблизу тіла. Прикордонний шар трансформується в тонку зону взаємодії двох потоків газу й у першому наближенні замінюється конічною поверхнею контактного розриву. Схема обтікання наведена на рис. 1, де I – область течії зовнішнього потоку між поверхнею стрибка ущільнення Ω та поверхнею контактної розриву Θ , II – область течії газу, що вдувається, яка обмежена поверхнями контактної розриву Θ і пористого конуса Δ . У випадку надзвукової швидкості газу, що вдувається,