

УДК 655.1/3:54.03

В. М. Юзевич*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка***М. Ф. Ясінський, Л. М. Ясінська, А. В. Маркелова***Українська академія друкарства***ПОВЕРХНЕВИЙ ЕФЕКТ ПРИ ВДАВЛЮВАННІ
ТВЕРДОГО ІНДЕНТОРА В ПРУЖНИЙ ПІВПРОСТІР**

Проведено оцінювання впливу поверхневого шару S_r^S на енергетичні характеристики твердих тіл у контактних задачах.

Поверхневий шар, індентор, пружний півпростір, тверде тіло, контактні задачі

Відомі приклади, коли поверхнево-активне середовище, яке взаємодіє з поверхнею твердого тіла, може суттєво впливати на особливості проникнення в нього металевого індентора. Дослідження таких взаємодій належить до класу контактних задач, частковим випадком яких є задачі вимірювання твердості й мікротвердості [1–6]. Проведемо оцінку впливу поверхневого шару S_r^S на енергетичні характеристики твердих тіл у контактних задачах.

При дослідженні поведінки енергетичних характеристик твердих тіл, що контактують з адсорбційно-активним середовищем, беруть до уваги зміни, які відбулися в процесі пластичної деформації поверхневих шарів [1, 4], і не враховують дію середовища на пружне формування.

В експериментах вимірювання твердості індентор удавлюють, зокрема, у плоский зразок [3–5]. Зразок моделюють пружним півпростором, який займає електропровідне тіло ($z > 0$), контактуючи при цьому з вакуумом ($z < 0$). Нехай у точці O на поверхні півпростору в напрямку осі z діє параболічної форми абсолютно твердий індентор, обмежений поверхнею $z = A_z \cdot r^2$ (z, r — циліндричні координати, A_z — задана постійна) (див. рисунок).

При поступовому проникненні індентора в тіло пластична деформація поблизу точки M_z починає розвиватися, якщо глибина вдавлення [4]

$$C_z = OM_z = d_z^2 \cdot A_z / 2$$

досягає критичної величини $C_z = C_z^{(1)} = C_z^{(1)} \approx 0,25 \cdot d_z$, де $d_z = d_z^{(1)}$ — діаметр контактуючої поверхні.

Роботу W_z , виконану при вдавленні індентора в тверде тіло, розрахуємо за співвідношенням [2]:

$$W_z = \int_0^{C_z^0} P_z \cdot dC_z = 8 \cdot E \cdot C_0^{2,5} / (15 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{2 \cdot A_z}), \quad (1)$$

де C_z^0 — глибина вдавлення ($0 < C_z^0 < C_z^1$); P_z — зусилля вдавлення.

Робота W_z витрачається на деформацію об'ємної частини тіла і фізичної поверхні розділу S_r^s .

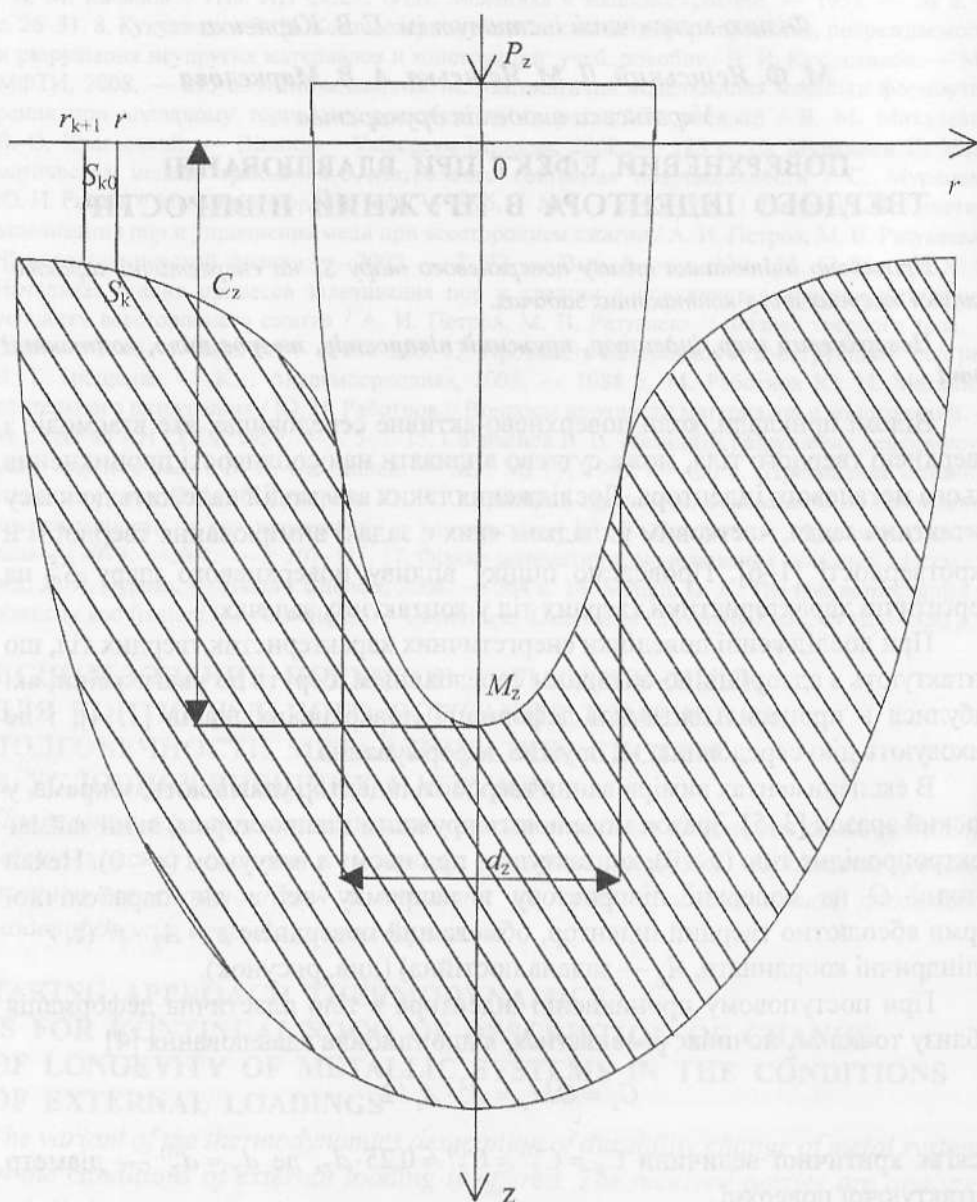


Схема вдавлювання індентора навантаженням P_z у поверхню тіла

(1) При розрахунку роботи деформування поверхневої фази W_z^s , яка є складовою частиною W_z , необхідно визначити переміщення \vec{u} точок півпростору по осі z залежно від координати r . Якщо $r = 0$, то згідно з [4]

$$u \Big|_{r=0} = C_z = (d_z)^2 \cdot A_z / 2. \quad (2)$$

Переміщення $u(r)$ в області $r \in [0; d_z/2]$ легко знайти, оскільки відома форма поверхні індентора $z = A_z \cdot r^2$, тобто

$$u = C_z - A_z \cdot r^2. \quad (3)$$

Припустимо, що геометричні розміри поверхні контакту між індентором і тілом досить малі порівняно з максимальним переміщенням C_z^1 . Наближено вважаємо, що в точці M_z діє зосереджена сила. Для оцінки переміщення u при $r > d_z/2$ використаємо розв'язок задачі Бусінеска [2]

$$u \Big|_{r > d_z/2} = B_z / r, \quad (4)$$

де B_z — константа, яка визначається з умови

$$u \Big|_{r=d_z/2} = C_z - A_z \cdot d_z^2 / 4. \quad (5)$$

Вираз питомої роботи деформування фізичної поверхні запишемо аналогічно як для об'ємного тіла [6]

$$w_z^S = \int_0^{C_z^0} \sigma_{\alpha\beta}^S \cdot d\varepsilon_{\alpha\beta}^S = \sigma_0^S \cdot \varepsilon_0^S, \quad (6)$$

де $w_z^S = \Delta W_z^S / \Delta S_r$; ΔW_z^S — робота деформування поверхневої фази S_r^S , яка покриває елемент поверхні площею ΔS_r ; $\alpha, \beta = 1, 2$; ε_0^S — перший інваріант тензора поверхневих деформацій.

При розрахунку w_z^S нехтуємо залежністю σ_0^S від деформації поверхні. Вважаємо, що поверхневі зусилля можна зобразити як [4, 6]

$$\sigma_{\alpha\beta}^S = \sigma_0^S \cdot \delta_{\alpha\beta}. \quad (7)$$

Повна робота деформування поверхневої фази S_r^S у цьому випадку має вигляд [4]

$$W_z^S = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} w_z^S \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sigma_0^S \cdot \varepsilon_0^S \cdot dr \cdot d\varphi, \quad (8)$$

де r, φ — полярні координати на поверхні тіла з центром у точці M_z , через яку проходить вісь індентора.

Інтеграл у виразі (8) визначаємо наближено числовим методом. Для цього на поверхні розділу S_r^S від точки M_z проводимо концентричні кола радіусом r_k (наприклад, $r_{k+1} - r_k = 1$ мм, $k = 1, 2, \dots$ — номер кільця), розділивши площину на кільця рівної ширини.

Під дією індентора (див. рисунок) кільця переходять у криволінійні поверхні, які з достатньою точністю можна вважати боковими поверхнями зрізаних конусів.

В околі точки M_z при прогині поверхні зразка внаслідок руху індентора вздовж осі z частина індентора може прилягати до його поверхні. Отже, воронка, яка виникла в зразку в околі точки M_z , має форму індентора [4]. Зовні області контакту з індентором маємо симетричну відносно осі z поверхню, що нагадує конічну, де замість твірної проходить крива лінія $f_c(r)$, яку апроксимуємо параболічною залежністю.

У цьому випадку деформацію кільця означимо так

$$\varepsilon_{k0}^S = (S_k - S_{k0}) / S_{k0}. \quad (9)$$

Тут S_{k0} , S_k — площі недеформованого кільця і відповідного йому зрізаного конуса (при деформуванні кільце переходить у бокову поверхню зрізаного конуса, див. рисунок); ε_k^S — відносна деформація k -го кільця.

В обчисленнях приймаємо [4]

$$\sigma_0^S = 1,6 \text{ Н/мм}; C_z^I = 2,5 \text{ мм}; d_z^I = 10 \text{ мм}; A_z^I = 0,005 \text{ 1/мм}; \quad (10)$$

$$E = 10 \text{ ГПа}; \nu = 0,31; r_{k-1} - r_k = 1 \text{ мм}.$$

Результати розрахунків величини роботи деформування W_z^S репрезентуємо в чотирьох варіантах:

- а) $C_z = 0,001 \text{ мм}; W_z^S = 7,82 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}; W_z = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Дж};$
 б) $C_z = 0,1 \text{ мм}; W_z^S = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}; W_z = 0,177 \text{ Дж};$
 в) $C_z = 1 \text{ мм}; W_z^S = 5,62 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}; W_z = 56 \text{ Дж};$
 г) $C_z = 2,5 \text{ мм}; W_z^S = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}; W_z = 553 \text{ Дж}.$ (11)

На основі отриманих результатів (11) виявлено, що робота деформування W_z^S поверхневої фази металу в пружній області на 7–8 порядків менша об'ємної W_s . Це означає, що зовнішнє адсорбційне середовище на пружний деформований стан усього зразка, а також твердість (і мікротвердість M_T) майже не впливає. У розглянутій задачі вважаємо, що взаємодія тіла із зовнішнім агресивним середовищем обмежується адсорбцією, що спричиняє зменшення тільки поверхневих зусиль. Крім того, нехтуємо дифузією частинок домішок в об'єм твердого тіла.

Аналіз результатів даної задачі дозволяє дійти висновку, що, використовуючи співвідношення для поверхневого натягу σ_0^S [4], поправку на процес зміни (унаслідок адсорбції) мікротвердостей M_{Tz} , M_{Tn} у пружній області деформування зразків металу можна не брати до уваги (тобто не слід

ураховувати прояв історії навантаження (ефекту пам'яті) зразка в оцінках $M_{T\zeta}$, $M_{T\eta}$). Частинки домішки, що з'явилися на зовнішній поверхні металу внаслідок адсорбції, будуть змінювати мікротвердість зразка, але це буде вплив на його граничний стан, який проявиться за межами пружної області.

1. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин — М. : Наука, 1980. — 304 с. 2. Дмуховская И. Г. Феноменологическая модель охрупчивания металлов в условиях адсорбционного воздействия жидкометаллических сред / И. Г. Дмуховская, В. В. Попович. // Физ.-хим. мех. материалов. — 1982. — № 6. — С. 5–13. 3. Кац А. М. Теория упругости / А. М. Кац — М. : ГИТТЛ, 1956. — 208 с. 4. Сопрунок П. М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів / П. М. Сопрунок, В. М. Юзевич. — Львів : СІОЛІОМ, 2005. — 292 с. 5. Сухорольський М. А. Математичні моделі та методи механіки тонкостінних пружних тіл при локальних навантаженнях: автореф. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.- мат. наук: 01.02.04 / НАН України; Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача. — Львів, 2003. — 33 с.

ПОВЕРХНОСТНИЙ ЕФФЕКТ ПРИ ВДАВЛИВАННІ ТВЕРДОГО ІНДЕНТОРА В УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

Осуществлена оценка влияния поверхностного слоя S_r^s на энергетические характеристики твердых тел в контактных задачах.

SUPERFICIAL EFFECT IS AT HARD HARDNESS INDENTATION IN RESILIENT PIVPROSTIR

The estimation of influence of superficial layer is done S_r^s on power descriptions of solids in contact tasks.

Стаття надійшла 06.05.2010