

## ПРО ВПЛИВ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТОНКИХ ПЛІВОК

Тарас Нагірний<sup>1</sup>, Костянтин Червінка<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Університет Зельної Гури, м. Зельона Гура, t.nahirny@iim.uz.zgora.pl,

<sup>2</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, kostiantyn.tchervinka@lnu.edu.ua

Стан поверхні твердих тіл є важливим чинником впливу на напруження, деформації та експлуатаційні характеристики. Шорсткість та мікронерівності поверхні впливають на локальний розподіл механічних полів, зносостійкість і коефіцієнт тертя, міцність тіла тощо. Ці ефекти виразно проявляються у тонких плівках, товщина яких порівнянна з розмірами поверхневих нерівностей. Моделюванню та дослідженню такого впливу присвячено чимало робіт, зокрема [1 – 3]. Описуючи тонкі плівки, зокрема отримані напиленням на плоску поверхню, слід враховувати різні умови на поверхнях таких плівок. У рамках термомеханіки локально неоднорідного твердого тіла [1] це можна моделювати різними крайовими умовами на густину маси та несиметричними джерелами маси у модифікованому рівнянні для густини.

У термінах густини маси  $\rho$ , компонент тензора напружень  $\sigma_{ij}$  одновимірна за координатою  $x$  ситуація у вільному від силового навантаження шарі (область  $|x| \leq l$ ) описується такою системою рівнянь [1]

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dx} = 0, \quad \frac{d^2\sigma_{yy}}{dx^2} = \frac{d^2\sigma_{zz}}{dx^2} = -2\mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{d^2\rho}{dx^2},$$
$$\frac{d^2\rho}{dx^2} - \xi_m^2 (\rho - \rho_*) = -\xi_m^2 \left( A e^{\xi_m(x-l)} + B e^{-\xi_m(x+l)} \right), \quad (1)$$

умовами на поверхнях  $x = \pm l$

$$\rho(+l) = \rho_a^+, \quad \sigma_{xx}(+l) = 0, \quad \rho(-l) = \rho_a^-, \quad \sigma_{xx}(-l) = 0, \quad (2)$$

а також умовами

$$\int_{-l}^l \sigma_{yy} dx = 0, \quad \int_{-l}^l x \sigma_{yy} dx = 0, \quad \int_{-l}^l \sigma_{zz} dx = 0, \quad \int_{-l}^l x \sigma_{zz} dx = 0. \quad (3)$$

Вираз у дужках у правій стороні другого рівняння (1) пов'язаний з джерелами маси, які разом із крайовими умовами для густини дозволяють моделювати спосіб формування поверхні. Такий вигляд джерел маси не враховує області піків опорної кривої профілю реальної шорсткої поверхні. Узагальнення джерел маси спрямоване на врахування усіх закономірностей кривої

Аббота-Фаєрстоуна представлено у [3]. Параметри  $A$  та  $B$  визначаємо із рівностей джерел маси на поверхнях  $x = \pm l$  тіла збуренням  $\rho_a^+ - \rho_*$ .

Рисунки 1, 2 ілюструють розподіл приведених напружень  $\sigma_{yy} / \sigma_0$  по товщині тонкої плівки для  $\rho_a^- = 0$ ,  $\rho_a^+ = \rho_* / 2$ ,  $\xi_m l = 3, 20$  (рис. 1 і 2 відповідно),  $\sigma_0 = -2\mu a_m \rho_* (3\lambda + 2\mu) / (\lambda + 2\mu)$ ,  $\xi_- / \xi_m = 1.8$ ,  $\xi_+ / \xi_m = 0.2; 0.6; 1.8$  (криві 1–3). Для ідентичних поверхонь шару розподіл напружень є симетричним відносно серединної поверхні шару.

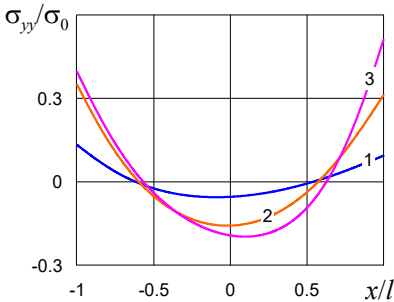


Рис.1

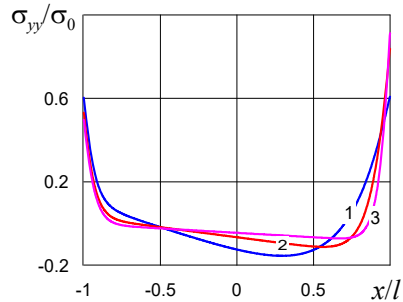


Рис. 2

На основі виконаних досліджень можна стверджувати, що розподіл та значення напружень суттєво залежать від способу формування та обробки поверхні тіла. Тому стан реальних поверхонь твердих тіл є важливим фактором, який слід враховувати при моделюванні напружено-деформованого стану і прогнозуванні експлуатаційних, у тому числі міцнісних, характеристик елементів конструкцій та приладів.

1. *Нагірний Т. С., Червінка К. А.* Основи механіки локально неоднорідних деформівних твердих тіл.– Львів: Растр-7, 2018. – 204 с.
2. *Nahirnyj T., Tchervinka K.* Mathematical modeling of structural and near-surface non-homogeneities in thermoelastic thin films // Int. J. Eng. Sci. – 2015. – **91**. – P.49–62.
3. *Nahirnyj T., Saşıadek M., Tchervinka K.* Modeling the effect of surface roughness on mechanical fields in an elastic solid bounded by nominally flat surfaces // Int. J. Sol. Struct. – 2024. – **302**. – 112979.

#### ON INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT ON THE STRESSES AND STRAIN IN THIN FILMS

*Within the model of a locally inhomogeneous elastic body, the effect of roughness (the method of surface formation) on the stresses in a thin film is illustrated. The topography of the real surface of the body is taken into account by the choice of mass sources in the equation for the mass density and the corresponding boundary conditions. The research was carried out neglecting the profile peaks zone of material ratio curve for various roughness parameters of the thin film surfaces.*