

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ ЧИ КРУЧЕННІ

к.т.н., доц. Л. Я. Роп'як, к.т.н., доц. А. С. Величкович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

Інститут інженерної механіки, кафедра КМВ

E-mail: L.ropjak@ukr.net

Досліджено напружено-деформований стан сталевих деталей з двошаровими покриттями (алюміній – оксид алюмінію) за розтягування чи кручення. Здійснено оцінку міцності розробленого покриття при експлуатаційних навантаженнях.

Деталі сучасних машин і обладнання працюють в складних умовах – при значних навантаженнях, за підвищених температур, контактують з агресивними середовищами із вмістом абразиву. Це призводить до передчасного виходу з ладу деталей за рахунок поверхневого руйнування внаслідок корозійно-механічного зношування та водневого окрихчування.

Для підвищення ресурсу роботи застосовують різноманітні типи покриттів, які забезпечують раціональне поєднання властивостей матеріалів: основу виготовляють із сталі, а на робочу поверхню деталі наносять покриття заданої товщини для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик. Залежно від службового призначення деталей для зміцнення їх робочих поверхонь застосовують одно-, дво- або багатошарові покриття [1 – 5]. Враховуючи специфічні умови експлуатації обладнання в сірководневих середовищах нафтогазової промисловості перспективним є застосування двошарових покриттів: нижній шар із алюмінію, який наносять будь-яким відомим методом на сталь; верхній шар із оксиду алюмінію, який формують плазмово-електролітичним (мікродуговим) оксидуванням алюмінію [3 – 5]. Верхній шар покриття завдяки вмісту α -фази оксиду Al_2O_3 забезпечує високу твердість і зносостійкість поверхні, а нижній – алюмінієвий шар надійно захищає сталь від наводнення в агресивних середовищах.

Проведений аналіз літературних джерел засвідчив, що дослідники зосереджуються на вивченні корозійних властивостей, зносостійкості, будови покриттів, однак практично відсутні відомості про напружено-деформований стан деталей з двошаровими покриттями, що стримує їх раціональне застосування в техніці.

Мета роботи – дослідження напружено-деформованого стану сталевих деталей з двошаровим покриттям системи: алюміній – оксид алюмінію при розтягуванні чи крученні.

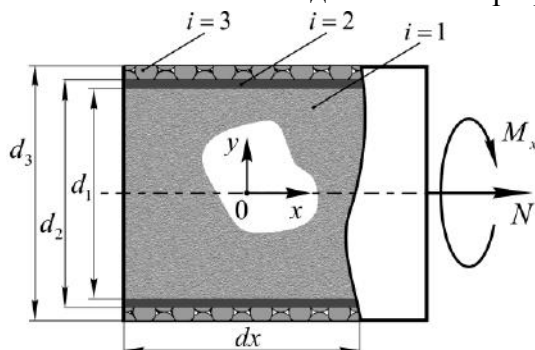


Рис. 1. Розрахункова модель зразка із шаруватим покриттям

Опишемо напружений стан циліндричного зразка з покриттям при центральному розтягуванні та крученні. Розглянемо вкритий двошаровим покриттям елемент стержня (рис. 1), який навантажують осовою силою N або крутним моментом M_x . Його поперечня є багатозв'язною областю, де параметри пружності та міцності змінюються від шару до шару,

тобто є кусково-сталими функціями від радіальної координати. Вирази напружено-деформованого стану для усіх шарів матеріалу запишемо на основі однакових статичних та кінематичних гіпотез лінійної теорії стержнів. Податливістю стержня до поперечних деформацій зсуву та обтисненням нехтуємо і вважаємо, що гіпотеза про жорстку нормаль справджується. Нормальні σ_x та дотичні τ_{xy} напруження в поперечному перерізі ділянки зразка з покриттям представимо їх інтегральними статичними еквівалентами – відповідно N та M_x , які вважаємо відомими. Також вважаємо, що властивості матеріалів однорідних областей повністю визначаються модулями Юнга E_i , модулями зсуву G_i та межами текучості σ_{ti} , τ_{ti} чи міцності σ_{mi} , τ_{mi} . Для внутрішнього шару (основи) приймемо позначку $i=1$, для прошарку – $i=2$ та для зовнішнього шару – $i=3$, площу поперечного перерізу i -го шару позначатимемо F_i , а його полярний момент інерції – $J_{\rho i}$.

За розтягу осьова сила розподілиться між областями зразка нерівномірно:

$$N = \sum_{i=1}^{n=3} N_i = \sum_{i=1}^{n=3} \int_{F_i} \sigma_{xi} dF_i. \quad (1)$$

Умову сумісності деформацій різних шарів матеріалу з урахуванням фізичних співвідношень подамо в такому вигляді

$$\frac{\sigma_{xi}}{E_i} = \frac{\sigma_{x(i+1)}}{E_{i+1}}, \quad i=1, 2. \quad (2)$$

Розв'язуючи разом (1) і (2) та враховуючи гіпотезу плоских перерізів, одержимо значення нормальних напружень у кожному шарі матеріалу стержня

$$\sigma_{xk} = \frac{N}{F_k} \frac{E_k F_k}{\sum_{i=1}^{n=3} E_i F_i}, \quad k=1, 2, 3, \quad (3)$$

або детальніше для шару керамічного покриття

$$\sigma_{x3} = \frac{4N}{\pi \left(d_3^2 [1-\psi^2] + \frac{E_1}{E_3} d_1^2 + \frac{E_2}{E_3} d_2^2 [1-\zeta^2] \right)}, \quad (4)$$

де $\zeta = d_1 / d_2$, $\psi = d_2 / d_3$.

Аналогічно, при крученні матимемо

$$\tau_{xyk}(\rho) = \frac{M_x \rho}{J_{\rho k}} \frac{G_k J_{\rho k}}{\sum_{i=1}^{n=3} G_i J_{\rho i}}, \quad k=1, 2, 3, \quad (5)$$

зокрема для шару керамічного покриття

$$\tau_{xy3}(\rho) = \frac{32 M_x \rho}{\pi \left(d_3^4 [1-\psi^4] + \frac{G_1}{G_3} d_1^4 + \frac{G_2}{G_3} d_2^4 [1-\zeta^4] \right)}, \quad \frac{d_2}{2} \leq \rho \leq \frac{d_3}{2}, \quad (6)$$

де ρ – полярна координата.

Отримані вирази показують, що напруження σ_x та τ_{xy} в розглянутому стержні з двошаровим покриттям розподілені пропорційно до інтегральних жорсткостей відповідно на розтяг та кручення кожного шару.

Проілюструємо одержаний результат. Композиція матеріалів зразка є такою, що виконуються умови $E_3 > E_1 > E_2$ та $G_3 > G_1 > G_2$. Модулі пружності та модулі зсуву основного матеріалу, прошарку та верхнього шару покриття становлять відповідно: $E_1 = 210 \text{ ГПа}$, $G_1 = 80 \text{ ГПа}$, $E_2 = 71 \text{ ГПа}$, $G_2 = 26 \text{ ГПа}$, $E_3 = 350 \text{ ГПа}$, $G_3 = 135 \text{ ГПа}$. Характерні діаметри поперечця стержня (рис. 1): $d_1 = 3,3 \text{ мм}$; $d_2 = 3,4 \text{ мм}$; $d_3 = 5 \text{ мм}$.

Введемо безрозмірні величини $\tilde{\sigma} = \sigma_{xk} / \sigma_0$, $\tilde{r} = 2y / d_3$, $\tilde{\tau} = \tau_{xyk} / \tau_0$, $\tilde{r}^* = 2\rho / d_3$, де номінальні напруження $\sigma_0 = N / \sum_{i=1}^{n=3} F_i$, $\tau_0 = 16M_x / \pi d_3^3$. Результати розрахунків наведено на

рис. 2. Суцільними лініями подано схеми розподілу абсолютних значень нормальних та дотичних напружень в матеріалі шаруватого зразка при розтягуванні (рис. 2, а) та крученні (рис. 2, б). Штриховою лінією показано розподіл напружень у стержні без покриття.

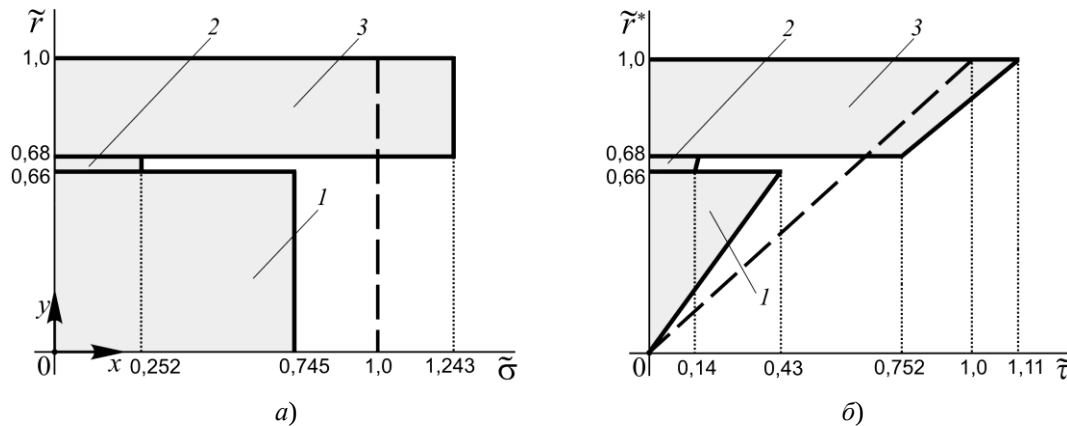


Рис. 2. Напружений стан шаруватого зразка за розтягу та кручення:
1 – основа зразка (сталь 40Х); 2 – прошарок Al; 3 – шар керамічного покриття Al_2O_3

Бачимо, що напруження при переході від шару до шару покриття змінюються стрибкоподібно. Що жорсткіший матеріал шару композиції, то більші напруження у ньому виникають, зокрема в твердому шарі напруження від розтягу на 24 %, а від кручення на 11 % перевищують значення номінальних напружень.

Представлено технічну модель істотно неоднорідного стержня для дослідження напружено-деформованого стану зразків із поліфункціональним покриттям. У межах цієї моделі, можна перейти до оцінок напруженого стану деталей, які містять покриття з довільною кількістю шарів. Запропонована конструкція шаруватого покриття (основа – сталь; прошарок – алюміній або його сплав; верхній шар – оксидний) придатна для зміцнення при виготовленні нових чи реновації зношених деталей машин і елементів конструкцій, які працюють в складних умовах.

Запропонована композиція матеріалів із проміжним прошарком із алюмінію є доволі вдалою з погляду забезпечення експлуатаційної міцності сталевих деталей.

У подальших дослідженнях планується розвинути розглянуті задачі та оптимізувати напружено-деформований стан композиції “основа – двошарове покриття” з урахуванням залишкових напружень, які виникають у процесі формування шарів запропонованого покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тюрин Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич. – К.: Наукова думка, 2008. – 216 с.
2. Гнеденков С. В. Плазменное электролитическое оксидирование металлов и сплавов в тартратсодержащих растворах / С. В. Гнеденков, О. А. Хрисанфова, А. Г. Завидная. – Владивосток.: Дальнаука, 2007. – 144 с.
3. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
4. Трибологічні властивості комбінованих металооксидокерамічних шарів на легких сплавах / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – №2. – С. 55 – 64.
5. Роп'як Л. Я. Шляхи підвищення ефективності технологічного процесу плазмово-електролітичного оксидування алюмінію та якості покриттів / Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології в машинобудуванні: V-та Всеукр. наук.-техн. конф. Національний університет “Львівська політехніка”, 8 – 12 лютого 2016 р.: Збірник наукових праць, 2016. – С. 122 – 125.