УДК 622.242.6–192:620.178

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО–ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВКРИТОЇ ХРОМОВИМ ПОКРИВОМ ДІЛЯНКИ ШТОКА ПОРШНЕВОГО НАСОСА ДВОСТОРОННЬОЇ ДІЇ В УМОВАХ ПОЗАШТАТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В. В. Остапович*, Л. Я. Роп'як, А. С. Величкович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: publishlab@nung.edu.ua

Реалізовано інженерний підхід щодо дослідження напружено-деформованого стану ділянки з покриттям штока бурового поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження. Розглянуто найбільш навантажений елемент штока, який вкритий електролітичним матовим хромом. Для розрахунків застосовано стержневу модель з неоднорідного матеріалу, попереччя якої є двозв'язною областю із змінними від шару до шару параметрами пружності та міцності. Поведінку такої моделі спершу розглянуто за однорідного стискання чи розтягування, тобто при звичному експлуатаційному навантаженні штока, а потім в умовах позаштатного поперечного згинання зі стисканням, яке спричинене зносом деталей пари тертя "крейцкопф – напрямні станини насоса". Отримано аналітичні залежності для визначення нормальних, дотичних та еквівалентних напружень в неоднорідному шаруватому матеріалі ділянки штока. Для здійснення конкретних числових розрахунків представлена підзадача про визначення максимальних внутрішніх зусиль в штоці у випадку позаштатної ситуації. Детально проаналізовано розподіл у хромовому покритті та в матеріалі основнови штока еквівалентних напружень, які визначали за енергетичною теорією Губера-Мізеса-Генкі. Здійснено оцінку міцності ділянки штока з хромовим покриттям за умов позаштатних навантажень.
Ключові слова: поршневий насос, шток, знос, покриття, позаштатне навантаження, напружено–деформований стан.

Реализован инженерный подход к исследованию напряженно-деформированного состояния участка с покрытием штока бурового поршневого насоса двухстороннего действия в условиях внештатного нагружения. Рассмотрен наиболее нагруженный элемент штока, который покрыт электролитическим матовым хромом. Для расчетов применена стержневая модель из неоднородного материала, поперечное сечение которой является двухсвязной областью с переменными от слоя к слою параметрами упругости и прочности. Поведение такой модели сначала рассмотрено при однородном сжатии или растяжении, то есть при обычной эксплуатационной нагрузке штока, а затем в условиях внештатного поперечного изгиба с сжатием, которое вызвано износом деталей пары трения "крейцкопф – направляющие станины насоса". Получены аналитические зависимости для определения нормальных, касательных и эквивалентных напряжений в неоднородном слоистом материале участка штока. Для осуществления конкретных числовых расчетов представлена подзадача об определении максимальных внутренних усилий в штоке в случае внештатной ситуации. Детально проанализировано распределение в хромовом покрытии и в материале основы штока эквивалентных напряжений, которые определяли за энергетической теорией Губера-Мизеса-Генки. Осуществлена оценка прочности участка штока с хромовым покрытием при условиях внештатных нагрузок.
Ключевые слова: поршневой насос, шток, износ, покрытие, внештатная нагрузка, напряженно–деформированное состояние.

Engineering approach is applied to the study of the stress-deformed state of the rod part with the coating of the bucket pump within freelance activity. The most loaded element of the rod is considered; the one is covered with matte electrolytic chromium. A non-homogeneous beam model, which has a double cross section and the varying parameters of elasticity and strength, is studied. Primarily, the model is kept within normal rod load; secondarily, it is put to the emergency, caused by the wearing of crosshead and frame rails friction couple. The distribution of normal, tangential, and equivalent stress can be revealed in the non-homogeneous layered material of the rod's part. To do specific calculations, a sub-problem is given,

i.e. the maximum internal forces are determined in the rod within an emergency. The detailed analysis of the distribution of chromium coating and the material of the rod base equivalent stresses are determined according to the energy theory of Huber-Mises-Hencky. The strength of the rod section with chromium coating is assessed within abnormal loading.
Keywords: Piston pump, rod, wear, coatings, and freelance load, stress-deformed state.

Вступ

В багатьох галузях науки і техніки для надання поверхням деталей виробів спеціальних властивостей застосовують металеві покриття. Ринок все більше заповнюється деталями та елементами конструкцій з різноманітними видами захисних покриттів, а кількість технологій їх отримання невпинно зростає. Разом з тим, практичне застосування деталей з покриттями стикається з проблемою їх передчасного руйнування переважно внаслідок адгезійного відшарування та когезійного розтріскування. Тому іноді стається так, що захисні покриття в умовах екстремального навантаження, або ж за режимів експлуатації, які не передбачались на стадії проектування, можуть приводити до зниження роботоздатності і погіршення експлуатаційних характеристик порівняно з елементами конструкцій без покриття. Зараз найбільш розповсюдженими є покриття, які отримують хімічними та електрохімічними методами з наданням переваги електрохімічному методу [1 – 4]. Зокрема, для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості штоків бурових насосів застосовують процес електрохімічного хромування. Цей процес істотно збільшує строк експлуатації штока до першого ремонту, він годиться також для реставрації уже зношених деталей.

Аналіз літературних джерел

На сьогодні існує низка технічних рішень та перевірених алгоритмів щодо керування технологічним процесом електрохімічного хромування, які дозволяють отримувати якісні покриття за критеріями твердості, пористості, міцності зчеплення з основою, зносостійкості та корозійної стійкості тощо. Зазначимо, що при вірно підібраних технологічних параметрах хромування, обробки поверхні та подальшої експлуатації сталевих деталей із хромовими покриттями їх зносостійкість зростає у чотири – п’ять разів порівняно зі сталевими деталями без покриття [4, 5].

До композицій «основний матеріал – покриття» завжди слід ставити особливу вимогу обов’язкового поєднання високого рівня спеціальних властивостей (наприклад твердості, електрохімічних та трибологічних властивостей) з достатнім запасом міцності, надійності та довговічності. Тут найперше потрібна оцінка статичної міцності композиції матеріалів як єдиного цілого під дією експлуатаційних навантажень. Опір руйнуванню та роботоздатність як самого покриття так і загалом об’єкта вкритого покриттям залежать від їх напружено-деформованого стану у процесі експлуатації. В роботі [6] досліджували вплив нормальних напружень при одноосному розтягуванні та дотичних напружень при крученні циліндричних сталевих зразків з хромовим гальванічним покриттям на зміну електродного потенціалу та виникнення в покритті тріщин.

При розрахунку довгомірних штоків на міцність зазвичай їх моделі розглядають в стані однорідного осьового розтягування чи стискання. Шток поршневого насоса розраховують на стійкість і втому (при розтягуванні – стисканні). В розрахунковій схемі розглядають стержень, який знаходиться, з однієї сторони, у защемленні і піддається з іншої сторони, дії осьової сили. Проміжною опорою (ущільненням гідравлічної частини) нехтують. Розрахунок на втому штока виконують для найтоншої ділянки штока [7].

У випадку з дослідженням напруженого-деформованого стану та оцінкою міцності сталевого штока бурового насоса двосторонньої дії ми стикнулися зі специфічною ситуацією позаштатних навантажень. Така ситуація виникає внаслідок зносу деталей зворотньо-поступальної пари тертя «крейцкопф – напрямні станини насоса» і зміщення осі штока відносно його початкового положення. Це призводить до зміни характеру деформації матеріалу штока і зниження коефіцієнта запасу міцності [8, 9]. Замість закладеного у проектному розрахунку штатного центрального розтягування чи стискання штока, ще додатково отримуємо позаштатне поперечне згинання. Внаслідок цього в матеріалі штока відбувається не тільки кількісна, але і якісна зміна напруженного стану з лінійного на плоский. Однак у літературі відсутні дані про напружений стан штока з покриттям поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження, що і стримує раціональний вибір покриттів для підвищення зносостійкості.

Метою статті є дослідження напружено-деформованого стану та оцінка міцності вкритої

хромовим покривом ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження.

Виклад основного метаріалу

Розглянемо елемент ділянки штока із хромовим покриттям (рис. 1), який зазнає поперечного згинання із стисканням (чи розтягуванням) при виникненні позаштатної ситуації, спричиненої зносом поступальної пари тертя, яка детально описана в роботах [8 – 10].

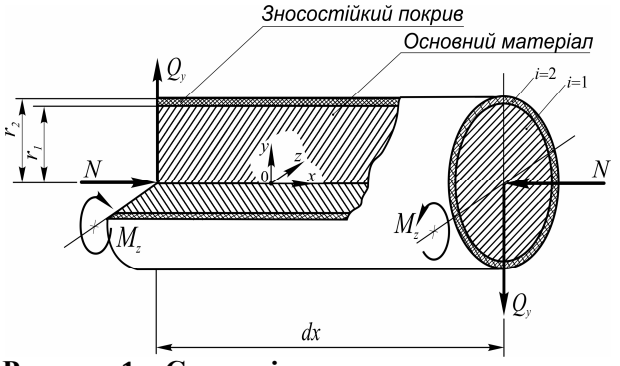


Рисунок 1 – Схема ділянки штока з хромовим покриттям в умовах позаштатного навантаження

Отже маємо задачу про поперечне згинання із стисканням ділянки кусково-однорідного циліндричного стержня. Його попереччя є двозв'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 деталі записуватимемо 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 з покриттям представимо їх інтегральними статичними еквівалентами: N – осьова сила, Q_y – поперечне зусилля, M_z – згинальний момент, які вважаємо відомими.

Властивості матеріалів однорідних областей визначаються модулями Юнга E_i, коефіцієнтами Пуассона ν_i та межами текучості $\sigma_{ті}$ чи міцності $\sigma_{мі}$. Для внутрішнього шару (основи) приймемо позначку $i=1$, для зовнішнього шару (зносостійкий покрив) – $i=2$, площу поперечного перерізу і-го шару позначатимемо F_i.

Користуючись принципом суперпозиції для лінійних систем, визначимо напруження в композиції матеріалів штока спершу від стискання чи розтягування, потім від згинання і нарешті від дії поперечних сил [11, 12].

Визначення напружень від дії осьової сили

Осьова сила розподілиться між областями стержня нерівномірно:

$$N=\sum_{i=1}^{n=2}N_i=\sum_{i=1}^{n=2}\int_{F_i}\sigma_{xi}dF_i\,. \qquad (1)$$

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

$$\frac{\sigma_{x1}}{E_1}=\frac{\sigma_{x2}}{E_2}\,. \qquad (2)$$

Розв'язуючи разом (1) і (2) та враховуючи гіпотезу про жорстку нормаль, отримаємо значення нормальних напружень у кожному шарі матеріалу стержня від дії осьової сили N (рис. 1):

$$\sigma_{xk}=-\frac{N}{F_k}\frac{E_kF_k}{\sum_{i=1}^{n=2}E_iF_i},\ k=1,\ 2\,, \qquad (3)$$

або детальніше

$$\sigma_{x1}=\frac{-N}{F_1\left(1+\frac{E_2F_2}{E_1F_1}\right)}=\frac{-4N}{p\left(d_1^2+\frac{E_2}{E_1}d_2^2[1-\varsigma^2]\right)}, \qquad (4)$$

$$\sigma_{x2}=\frac{-N}{F_2\left(1+\frac{E_1F_1}{E_2F_2}\right)}=\frac{-4N}{p\left(d_2^2[1-\varsigma^2]+\frac{E_1}{E_2}d_1^2\right)}, \qquad (5)$$

де $d_i=2r_i$, $\varsigma=d_1/d_2$.

Отримані вирази (4) та (5) показують, що нормальні напруження від дії осьової сили в розглянутій ділянці штока з покриттям розподілені пропорційно до інтегральних жорсткостей на розтяг (стиск) матеріалу основи та покриття.

Визначення напружень від дії згинального моменту

Інтегральний взаємозв'язок між згинальним моментом і нормальними напруженнями в матеріалі ділянки штока з покриттям є таким:

$$M_z = \sum_{i=1}^{n=2} \int_{F_i} y s_{xi} dF_i \,. \qquad (6)$$

Вирази сумісності деформацій різних концентричних шарів матеріалу стержня мають такий вигляд:

$$\varepsilon_{xi} = k\, y = const \,, \qquad (7)$$

а їх фізичні співвідношеня подамо у такому виді

$$\sigma_{xi} = E_i \varepsilon_{xi} \,, \quad i = 1,\ 2 \,, \qquad (8)$$

де k – кривина деформованої осі штока в позаштатній ситуації навантаження, ε_{xi} – лінійні деформації.

Інтегруючи вираз (6) з урахуванням (7) та (8), отримаємо, що

$$\sigma_{xk} = \frac{M_z y}{J_{zk}} \frac{E_k J_{zk}}{\sum_{i=1}^{n=2} E_i J_{zi}} \,, \; k = 1,\ 2 \,, \qquad (9)$$

де J_{zi} – екваторіальний момент інерції площі поперечня *i*-го шару матеріалу штока.

Деталізуємо (9), описавши геометричні жорсткості при згинанні шарів матеріалу ділянки штока з покриттям:

$$\sigma_{xi} = \frac{64 E_i M_z y}{p\,(E_1 d_1^4 + E_2 d_2^4 [1 - \zeta^4])} \,. \qquad (10)$$

Аналізуючи вираз (10), бачимо, що чим жорсткіший шар матеріалу композиції на згин, тим більші напруження у ньому виникають. Слід також зазначити, що у матеріалі покриття та основни ділянки штока градієнт нормального напруження за товщиною шарів є різним.

Визначення напружень від дії поперечної сили

Тепер розглянемо дотичні напруження, які виникають в матеріалі штока за наявності поперечної сили Q_y (рис. 1). Для зручності введемо позначення коефіцієнта зведення

$$k_i = E_i / E_1 \,, \quad i = 1,\ 2 \,.$$

Застосовуючи введений коефіцієнт, запишемо низку необхідних нам в подальшому виразів:

– функція зведеного статичного моменту площі довільної частини поперечня ділянки штока з покриттям

$$\sum_{i=1}^{n=2} \int_{F^*} k_i y dF_i = \frac{2}{3}(r_1^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} H(r_1 - y) + \frac{2}{3} k_2 (r_2^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \times$$
$$\times \left[1 - \left(\frac{r_1^2 - y^2}{r_2^2 - y^2} \right)^{\frac{3}{2}} H(r_1 - y) \right] H(r_2 - y),$$

де F^* – частина площі поперечня ділянки штока, що обмежена дугою поверхні штока і її хордою, яка паралельна до осі z і знаходиться на відстані y від цієї осі, $H(x)$ – функція Гевісайда;

– функція зведеної ширини неоднорідного поперечня

$$\sum_{i=1}^{n=2} k_i b(y) = 2\sqrt{r_1^2 - y^2}\, H(r_1 - y) + 2k_2 \sqrt{r_2^2 - y^2} \times$$
$$\times \left[1 - \sqrt{\frac{r_1^2 - y^2}{r_2^2 - y^2}} H(r_1 - y) \right] H(r_2 - y);$$

– зведений екваторіальний момент інерції шаруватого поперечня

$$J_z^* = \frac{p}{64} \left[d_1^4 + k_2 d_2^4 (1 - \zeta^4) \right].$$

Тепер, використовуючи теорію Журавського про дотичні напруження в стержнях [11, 12], функцію розподілу дотичних напружень можемо подати в такому вигляді:

$$\tau_{xy}(y) = \frac{Q_y \sum_{i=1}^{n=2} \int_{F^*} k_i y dF_i}{J_z^* \sum_{i=1}^{n=2} k_i b(y)} \,. \qquad (11)$$

Аналізуючи формулу (11), бачимо, що дотичні напруження за товщиною кожного шару матеріалу змінюються нелінійно, а на межі покриття з основним матеріалом матиме місце точка зламу, оскільки розрив має похідна від функції дотичного напруження за координатою *y*. Також бачимо, що $\tau_{xy}(r_2) = 0$, а $\tau_{xy}(0) \to \max$.

Визначення еквівалентних напружень

Тільки точки матеріалу на зовнішній поверхні штока перебуватимуть в лінійному напруженому стані (в цих точках дотичні напруження відсутні), решта точок ділянки штока з покриттям перебувають в складному напруженому стані (рис. 2). Для оцінки міцності

скористаємось теорією Губера-Мізеса-Генкі [12]. Тут за критерій міцності взято величину питомої потенціальної енергії формозміни, яку накопичує матеріал штока з покриттям під дією навантаження. Еквівалентні напруження визначатимемо так:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right]}, \quad (12)$$

де головні напруження в точках матеріалу ділянки з покриттям

$$\left.\begin{matrix}\sigma_1\\ \sigma_3\end{matrix}\right\} = \frac{1}{2}\sigma_x \pm \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2+4\tau_{xy}^2}, \quad \sigma_2 = 0. \quad (13)$$

Підставляючи (13) в (12), після простих перетворень остаточно отримаємо, що

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2+3\tau_{xy}^2} = \sqrt{(\sigma_N+\sigma_M)^2+3\tau_{xy}^2}, \quad (14)$$

де нормальні напруження від осьової сили s_N визначаємо з виразів (4) та (5), нормальні напруження від згину σ_M – за формулою (10), а дотичні напруження τ_{xy} обчислимо, користуючись виразом (11). У залежностях (12)–(14) індекс *i* опущено.

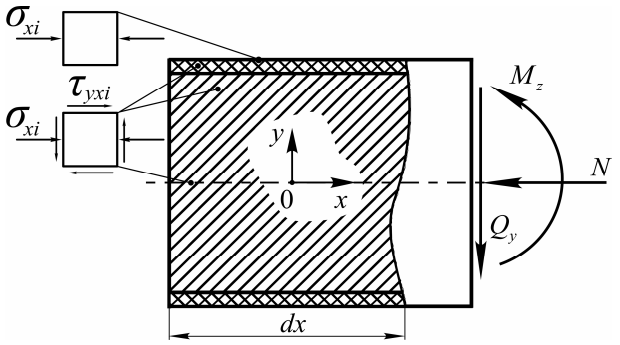


Рисунок 2 – Напружений стан в точках ділянки штока з одношаровим покриттям в умовах позаштатного навантаження

Числова оцінка отриманих результатів

Застосуємо отримані вище результати для числової оцінки міцності штока з покриттям в конкретній інженерній задачі. Нехай буровий поршневий насос двосторонньої дії УНБ-600 працює з циліндровою втулкою, внутрішній діаметр якої $D_v = 160$ *мм*, і забезпечує при цьому тиск $p = 16,5$ *МПа*. Насос укомплектовано хромованим штоком, який має зовнішній діаметр попереччя $d_2 = 70$ *мм*, а хромове покриття завтовшки 0,5 *мм*. У процесі експлуатації шток отримує додаткове перевантаження, спричинене зносом пари тертя «крейцкопф – напрямні станини насоса». Нагадаємо, що при дослідженні напруженого стану ділянки штока з покриттям ми вважали поперечне зусилля Q_y та згинальний момент M_z відомими. Тепер для одержання конкретних числових оцінок скористаємось низкою результатів, які ми отримали раніше в роботах [9, 10]. Нехай стан штока такий, що серед усіх розглянутих в роботі [9] моделей слід обрати стержневу модель із шарнірним закріпленням його лівого краю і жорстким закріпленням правого краю (рис. 3).

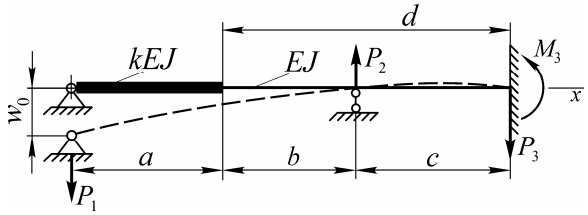


Рисунок 3 – Модель силового аналізу штока при виникненні позаштатної ситуації

Результати силового аналізу для штока без покриття подамо в такому вигляді:

$$P_1 = \frac{12EJw_0}{\zeta}, \quad P_2 = \frac{12EJw_0}{\zeta}\cdot\frac{(3l-c)}{2c}, \quad (15)$$

$$M_3 = \frac{12EJw_0}{\zeta}\frac{(l-c)}{2}, \quad P_3 = \frac{18EJw_0}{\zeta}\cdot\frac{(l-c)}{c}, \quad (16)$$

де w_0 – вертикальне відхилення лівого краю штока внаслідок зносу деталей пари тертя «крейцкопф – напрямні станини насоса»;

$$\zeta = 4\left[\frac{1}{k}a^3 + d(a^2+al+l^2)\right] - c(3l-c)^2;$$

$l = a + d$; k – відношення жорсткостей на згин ділянок штока.

Слід зазначити, що при здійсненні силового аналізу прийняли до уваги, що $J / J_z^* \approx 1$.

Вирази згинальних моментів та поперечних сил, що виникають у попереччях штока, мають такий вигляд:

$$M(x) = -P_1x + P_2(x-s)H(x-s), \quad (17)$$

$$Q(x) = -P_1 + P_2H(x-s), \quad (18)$$

де $s = a + b$ – віддаль від крейцкопфа до середини ущільнення штока.

Для штока поршневого бурового насоса двосторонньої дії УНБ-600 приймемо такі параметри (рис. 3): $a = 575\ мм$, $d = 1130\ мм$; в крайньому лівому положенні штока $b = 715\ мм$, $c = 415\ мм$; максимальна величина ходу штока $\eta = 400\ мм$; діаметр надставки штока $D_1 = 120\ мм$; діаметр штока $d_2 = 70\ мм$. При зміні положення штока параметри b та c можуть змінюватись на величину ходу штока. Приймемо значення початкового вертикального відхилення осі крейцкопфа $w_0 = 0,001\ м$.

На рис. 4 подано розподіл згинальних моментів та поперечних сил за довжиною штока для його різних положень. Аналіз графіків вказує на те, що найбільш небезпечна комбінація згинального моменту і поперечної сили виникає при крайньому правому положенні штока на віддалі 0,89 *м* від його лівого торця. Тут матимемо: $M(0,89) = -616,4\ Нм$; $Q(0,89) = 1,14\ кН$.

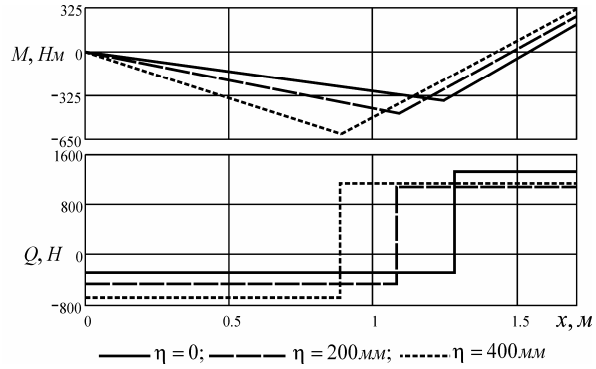
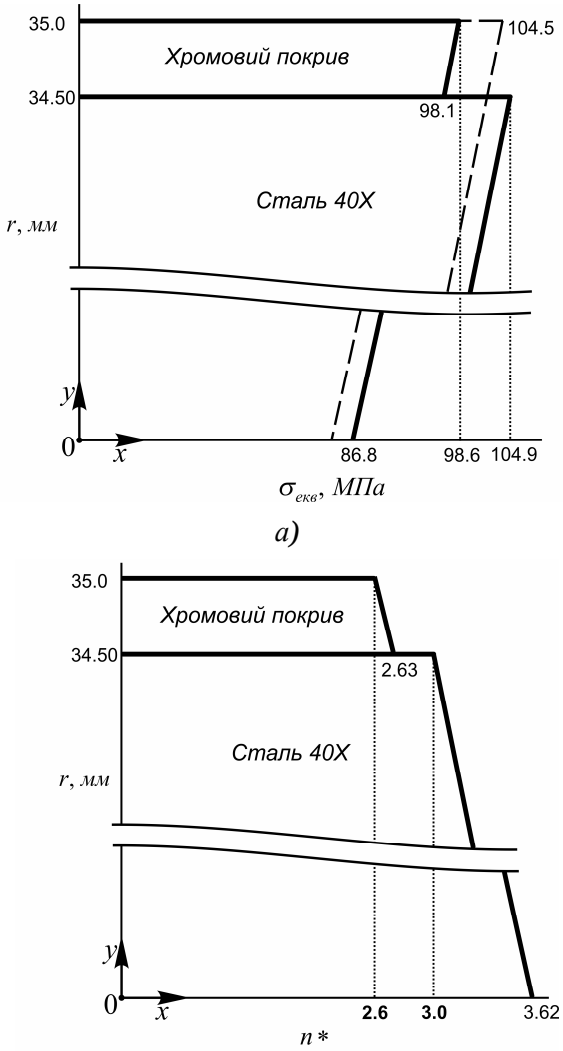


Рисунок 4 – Згинальні моменти та поперечні сили в суцільному штоці при виникненні позаштатної ситуації

Механічні властивості покриттів характеризує низка показників: модуль пружності, границі плинності чи міцності, міцність зчеплення покриття з основою, мікротвердість тощо. Значення цих показників для основних видів хромових покриттів є встановленими. Для електрохімічного хромового покриття (матовий хром) завтовшки 0,5 *мм* приймемо значення модуля пружності $E_2 = 1,7 \cdot 10^{11}\ Па$, а значення границі міцності $\sigma_{м2} = 257\ МПа$ [4]. Для матеріалу основи штока (сталь 40Х), приймемо відповідно $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}\ Па$, $\sigma_{т1} = 315\ МПа$. На рис. 5, *а* подано розподіл еквівалентних напружень в ділянці штока з хромовим покриттям, обчислених за енергетичною теорією міцності Губера-Мізеса-Генкі із урахуванням позаштатних навантажень, які виникли внаслідок зносу деталей пари тертя «крейцкопф – напрямні станини насоса». Пунктиром показано розподіл еквівалентних напружень в штоці без покриття за аналогічних умов навантаження. На рис. 5, *б* подано розподіл значень коефіцієнта запасу статичної міцності $n*$, з яким експлуатується композиція матеріалів ділянки штока в позаштатній ситуації.



а – еквівалентні напруження в ділянці штока з хромовим покриттям;
б – розподіл коефіцієнта запасу міцності

Рисунок 5 – Оцінка статичної міцності вкритої хромовим покривом ділянки штока в умовах позаштатного навантаження

Вираз (14) вказує на те, що еквівалентні напруження за висотою поперечного перерізу (у кожному шарі матеріалу) змінюються нелінійно, однак через малість дотичних напружень τ_{xy} порівняно з сумою нормальних $\sigma_N + \sigma_M$ ця нелінійність на графіку (рис. 5, *а*) не візуалізується. У місці з'єднання хромового покриття з матеріалом основни (сталь 40Х) еквівалентні напруження змінюються стрибкоподібно. Аналізуючи одержану оцінку міцності (рис. 5, *б*), можна зробити висновок про те, що ділянка штока з хромовим покриттям задовольняє умову статичної міцності як за звичних експлуатаційних навантажень штока, так і при змодельованій позаштатній ситуації. Матеріал основи (сталь 40Х) експлуатується з коефіцієнтом запасу $n^* = 3{,}0$, а хромове покриття з $n^* = 2{,}6$. Розкид коефіцієнтів запасу міцності, з якими працюють окремі шари матеріалу, є відносно невеликим, а відношення максимальних значень до мінімальних не перевищує 1,2. Це вказує на те, що варіюючи на стадії розроблення технологічного процесу виготовлення нових чи реставрації зношених штоків насоса геометричними, фізико-механічними та технологічними факторами процесу нанесення зносостійкого електрохімічного хромового покриття цілком, реальною є можливість оптимізації напружено-деформованого стану в системі «основа – зносостійке покриття», результатом чого стане одержання рівноміцної композиції матеріалів.

Практичний інтерес викликає запитання про те, як змінюватиметься напружений стан хромового покриття за різної його товщини. Тут щодо кінцевої оцінки міцності покриття найбільш інформативними є числові величини еквівалентних напружень. На рис. 6 представлені розв'язки попередньої задачі для штоків з різною товщиною δ хромових покривів (решта параметрів уже розглянутої задачі залишились незмінними). Аналіз отриманих результатів вказує, що чим меншою є товщина хромового покриття, тим більші напруження в ньому виникають (за інших однакових умов експлуатації штока). Зростання напружень із зменшенням товщини покриття не можна назвати істотним, зокрема, при товщині покриву $\delta = 0{,}5$ *мм* максимальні еквівалентні напруження в ньому склали 98,6 МПа, а при товщині $\delta = 0{,}2$ *мм* – 100 МПа відповідно. Однак важливим є те, що із зменшенням товщини хромового покриття зростає його границя міцності, а швидкість її зростання виявляється вищою за швидкість збільшення еквівалентних напружень [4]. Тому хромове покриття меншої товщини експлуатуватиметься з вищим коефіцієнтом запасу міцності. Однак для забезпечення підвищення ресурсу роботи штока поршневого насоса двосторонньої дії (із умови зносу) необхідно добиватися нанесення товстого шару хромового покриття.

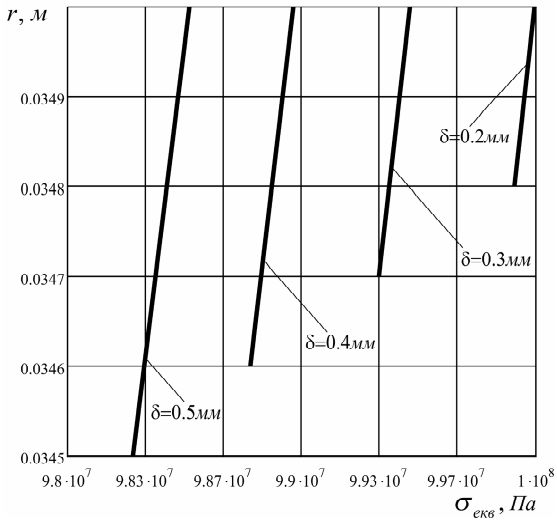


Рисунок 6 – Розподіл еквівалентних напружень в хромових покриттях різної товщини δ в умовах позаштатного навантаження штока

Зрозуміло, що кінцевим розрахунком, який визначає придатність штока з покриттям до тривалої експлуатації, повинен стати розрахунок на зношування та втомну міцність. За результатами даної роботи можна визначити номінальні нормальні і дотичні напруження для проведення такого розрахунку. Тоді після опису характеру циклічних навантажень і визначення границь витривалості і коефіцієнтів їх зменшення можна без особливих труднощів здійснити такий розрахунок.

Автори усвідомлюють, що сполучення в композитній системі матеріалів з різною жорсткістю приводить до певних похибок покладеної в основу наших розрахунків технічної теорії брусів. Однак застосування саме цієї теорії дозволило одержати компактні аналітичні розв'язки, придатні для оцінки міцності як зносостійкого покриття, так і найбільш навантаженої ділянки штока загалом. Відмова від гіпотези жорсткої нормалі на етапі моделювання з метою урахування згинної депланації поперечних перерізів композиційної ділянки штока (та можливо ефекту обтиснення) вимагає використання більш багатих математичних моделей бруса, що внесе до

кінцевих результатів незначні поправки, однак зробить розрахунок значно громіздкішим.

ВИСНОВКИ

Запропоновано та детально опрацьовано технічну модель істотно неоднорідного (шаруватого) стержня для дослідження напружено-деформованого стану вкритої хромовим покриттям ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії. Покриття нанесене електрохімічним методом: основа – сталь 40Х; зносостійкий поверхневий шар – матовий хром. У використаній моделі поперечям стержня є двозв'язна область із змінними від шару до шару параметрами пружності та міцності. Поведінку такої моделі розглянуто у випадку виникнення позаштатного поперечного згинання із стисканням чи розтягуванням, яке спричинене зносом деталей пари тертя «крейцкопф – напрямні станини насоса». Отримано розподіл еквівалентних напружень в неоднорідному шаруватому матеріалі найбільш навантаженої ділянки штока та здійснено оцінку міцності такої ділянки з урахуванням позаштатних напружень за різної товщини хромового покриття. В рамках використаної моделі, користуючись одержаними в роботі результатами, можна перейти до оцінки напружено-деформованого стану ділянки штока з шаруватим покриттям, яке містить довільну кількість шарів. Вказано чіткий алгоритм використання аналітичних результатів роботи, отримано та проаналізовано числові розв'язки для конкретної інженерної задачі.

Завданнями для наступних етапів досліджень автори бачать спробу уточнення розглянутих задач шляхом залучення більш багатих математичних моделей бруса з покриттям та урахування впливу залишкових напружень, які виникають у процесі формування зносостійких покриттів.

1 Davis J. R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance / J. R. Davis. – ASM International IOM Communications, 2001. – 328 p. 2 Gao W. Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials / W. Gao, Zh. Li . – Woodhead Publishing Ltd, 2008. – 658 p. 3 Saji V. S. Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials. Series in Metals and Surface Engineering / V. S. Saji, R. Cook. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – 417 p. 4 Богорад Л. Я. Хромирование / Л. Я. Богорад. – Л.: Машиностроение, 1984. – 97 с. 5 Сорокин В. М. Совмещенный технологический процесс вибронатирания с упрочнением ППД хромових покрытий на нежестких штоках (валах) гидро-пневмоцилиндров / В. М. Сорокин, А. В. Михеев, Н. М. Тудакова и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2012. – № 4. – С. 3–7. 6 Остапович В. В. Електрохімічні дослідження захисної дії та роботоздатності гальванічних покриттів / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 2 (39). – С. 71–75. 7 Верзилин О. И. Современные буровые насосы / О. И. Верзилин. – М.: Машиностроение, 1971. – 256 с. 8 Остапович В. В. Вплив зносу деталей пари крейцкопф – напрямні поршневого насоса двосторонньої дії на його кінематичні та силові параметри / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як, А. Ю. Годлевський // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2011. – № 3. – С. 64–70. 9 Величкович А. С. Аналіз позаштатного напружено-деформованого стану штока поршневого насоса двосторонньої дії, спричиненого зносом пари тертя «крейцкопф – напрямні» / А. С. Величкович, В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2012. – № 1, 2 (44). – С. 36–50. 10 Остапович В. В., Величкович А. С. Визначення позаштатних напружень в штоці бурового насоса, спричинених зносом пари крейцкопф – напрямні / В. В. Остапович, А. С. Величкович // Міжнар. наук.-техн. конф. «Нафтогазова енергетика 2013». – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – С. 104 – 106. 11 Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применение: Пер. с нем. / Х. Хан. – М.: Мир, 1988. – 344 с. 12 Gere J. M. Mechanics of materials / J. Gere, B. Goodno. – Stamford: Cengage Learning, 2012. – 620 p.

Поступила в редакцію 17.12.2013 р.

Рекомендували до друку докт. техн. наук, проф. Лютак І. З. та докт. техн. наук, проф. Мірошников В. В.