

## ОЦІНКА МІЦНОСТІ ВКРИТОЇ ШАРУВАТИМ ПОКРИТТЯМ ДІЛЯНКИ ШТОКА БУРОВОГО НАСОСА З УРАХУВАННЯМ ПОЗАШТАТНИХ НАПРУЖЕНЬ

© Величкович А. С., Роп'як Л. Я., 2017

The stressed-deformed state of the double-coated rod part of a bucket pump is researched. The coating has a steel base and some aluminum sputtering; the part of upper aluminum layer gets affected by microarc oxidation then. A non-homogeneous beam model, which has a multiple 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 material of the coated rod. The strength of such a part is assessed under normal and abnormal circumstances.

**Keywords:** Piston pump, rod, coating, normal stress, and tangential stress.

Досліджено напружено-деформований стан зміцненої двошаровим покриттям ділянки штока бурового насоса двосторонньої дії. Покриття формували на сталевій основі шляхом напилення шару алюмінію з подальшим оксидуванням частини його верхнього шару в режимі мікродугових розрядів. Для розрахунків застосовано стержневу модель із неоднорідного матеріалу, попереччя якої є багатозв'язною областю, де параметри пружності та міцності змінюються від шару до шару. Поведінку такої моделі спершу розглянуто при звичайному експлуатаційному навантаженні штока, а потім при виникненні позаштатної ситуації, яка спричинена зносом деталей пари тертя "крейцкопф – напрямні станини насоса". Отримано розподіл нормальних, дотичних та еквівалентних напружень в неоднорідному матеріалі зміцненої ділянки штока. Здійснено оцінку міцності такої ділянки як при звичайних експлуатаційних навантаженнях, так і з урахуванням позаштатних напружень.

**Ключові слова** – поршневий насос, шток, покриття, нормальні напруження, дотичні напруження.

Штоки поршневих насосів односторонньої та двосторонньої дії служать для передачі зусилля від крейцкопфа (повзуна) механічної частини на поршень, який переміщається у циліндровій втулці гідравлічної частини. Штоки належать до довгомірних деталей типу тіл обертання. Особливо у складних умовах експлуатуються штоки бурових поршневих насосів двосторонньої дії, які зазнають значних знакозмінних динамічних навантажень та піддаються реверсивному тертю у зоні взаємодії із гумовим манжетним ущільненням гідравлічної частини і контактують із буровим розчином, що містить у своєму складі абразивні частинки гірської породи. Це призводить до швидкого виходу їх з ладу за рахунок корозійно-механічного зносу.

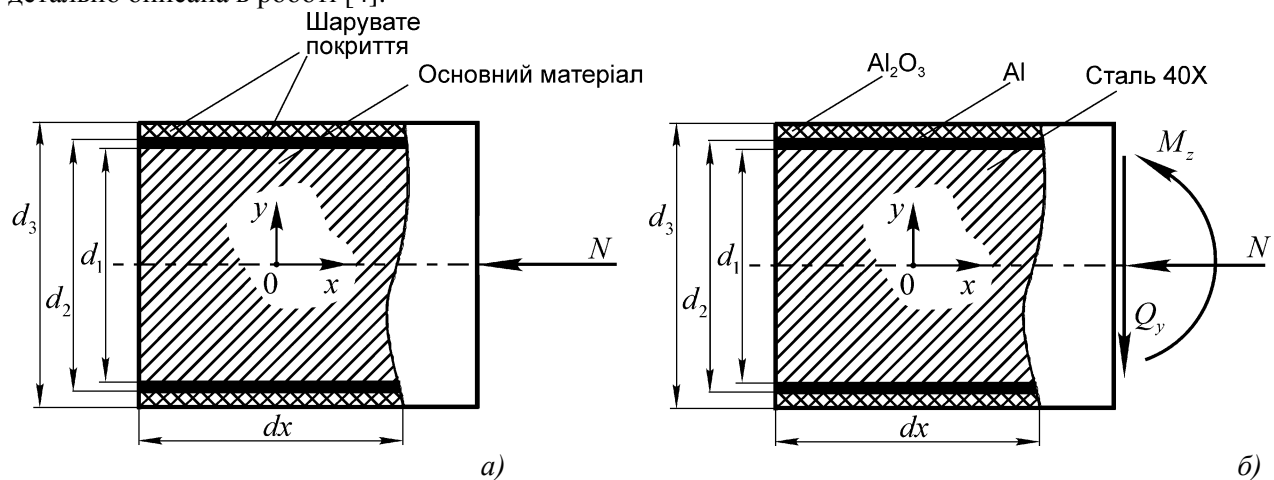
Штоки відносять до змінних деталей гідравлічної частини насоса. Заміна зношених штоків на нові вимагає значних трудових і матеріальних затрат. Тому для підвищення ресурсу роботи штоків застосовують конструкторські, технологічні та експлуатаційні методи.

Найбільш різноманітними є технологічні методи, які забезпечують підвищення зносостійкості робочої циліндричної частини штока поршневого насоса за рахунок збільшення її твердості: об'ємне гартування, поверхневе гартування струмами високої частоти, хіміко-термічна обробка, фрикційно-зміцнююча обробка, механо-ультразвукова обробка, алмазне вигладжування, електроіскрове легування, нанесення хромових гальванічних покриттів, напилення газотермічних покриттів, формування двошарових покриттів.

Особливо перспективними є покриття, які формують з використанням функціонально орієнтованих технологій. Ці технології забезпечують отримання нових властивостей деталей з покриттями [1]. До таких покриттів можна віднести двошарові покриття, які формують шляхом нанесення на сталеву основу шару алюмінію з подальшим мікродуговим оксидуванням його верхньої частини, залишаючи перехідний – непрооксидований алюмінієвий шар невеликої товщини для забезпечення дифузійного зв'язку покриття зі сталеву основою [2, 3]. Двошарові покриття можна використовувати, як при розробці технологічних процесів виготовлення нових штоків поршневих насосів, так і відновлення їх зношеної робочої частини. Однак у літературі практично відсутні данні про несучу здатність такого типу покриттів, що стримує їх широке застосування в техніці.

Технологія зміцнення робочої поверхні штока бурового насоса описаним методом [3] передбачає заміну певної кількості одного матеріалу іншим. Таким чином, частина штока, яка зазнає зміцнення, перетворюється на стержневу ділянку з шаруватого матеріалу. Виникає запитання щодо оцінки експлуатаційної міцності одержаної композиції матеріалів. Особливої актуальності це запитання набуває у випадку виникнення позаштатних ситуацій [4], які через зміну характеру деформації призводять до зниження коефіцієнту запасу міцності штока загалом.

Розглянемо елемент ділянки штока із покриттям (рис. 1), який стискатиметься (чи розтягуватиметься) осьювою силою  $N$  у штатній ситуації навантаження (рис. 1, а) та зазнаватиме згинання зі стисканням (чи розтягуванням) при виникненні позаштатної ситуації (рис. 1, б), що детально описана в роботі [4].



а – експлуатаційне навантаження; б – навантаження при виникненні позаштатної ситуації  
Рисунок 1 – Схема навантаження елемента ділянки штока з покриттям

Отже, маємо дві окремі задачі, перша про стискання, а друга про згин зі стисканням ділянки кусково-однорідного циліндричного стержня. Його попереччя 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 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 плоскі попереччя справджується. Нормальні  $\sigma_x$  та дотичні  $\tau_{xy}$  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  $\nu_i$  та межами текучості  $\sigma_{Ti}$  чи міцності  $\sigma_{mi}$ . Для внутрішнього шару (основи) прийемо позначку  $i=1$ , для прошарку –  $i=2$  та для зовнішнього шару –  $i=3$ , площу поперечного перерізу  $i$ -го шару позначатимемо  $F_i$ .

Розглядаємо випадок навантаження, зображений на рис. 1, а. Осьова сила розподілиться між областями стержня нерівномірно (рис. 2):

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

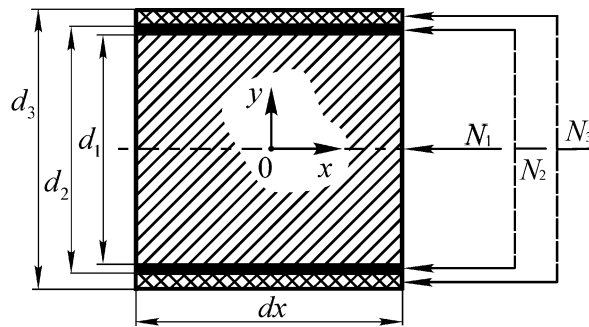


Рисунок 2 – Розподіл поздовжніх сил за областями стержня

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

$$\sigma_{x1} = \frac{-N}{F_1 \left( 1 + \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1} + \frac{E_3 F_3}{E_1 F_1} \right)} = \frac{-4N}{\pi \left( d_1^2 + \frac{E_2}{E_1} d_2^2 [1 - \zeta^2] + \frac{E_3}{E_1} d_3^2 [1 - \psi^2] \right)} , \quad (4)$$

$$\sigma_{x2} = \frac{-N}{F_2 \left( 1 + \frac{E_1 F_1}{E_2 F_2} + \frac{E_3 F_3}{E_2 F_2} \right)} = \frac{-4N}{\pi \left( d_2^2 [1 - \zeta^2] + \frac{E_1}{E_2} d_1^2 + \frac{E_3}{E_2} d_3^2 [1 - \psi^2] \right)} , \quad (5)$$

$$\sigma_{x3} = \frac{-N}{F_3 \left( 1 + \frac{E_1 F_1}{E_3 F_3} + \frac{E_2 F_2}{E_3 F_3} \right)} = \frac{-4N}{\pi \left( d_3^2 [1 - \psi^2] + \frac{E_1}{E_3} d_1^2 + \frac{E_2}{E_3} d_2^2 [1 - \zeta^2] \right)} , \quad (6)$$

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

Отримані вирази показують, що осьові напруження в розглянутій ділянці штока з покриттям розподілені пропорційно до інтегральних жорсткостей на розтяг (стиск) кожного шару.

Проілюструємо одержаний результат. За приклад візьмемо один з можливих варіантів виготовленої або відновленої ділянки штока. Композиція матеріалів є такою, що виконується умова  $E_3 > E_1 > E_2$ . Модулі пружності основного матеріалу, прошарку та верхнього шару покриття відповідно:  $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ,  $E_2 = 0,71 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ,  $E_3 = 2,9 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Характерні діаметри попереччя штока (рис. 1):  $d_1 = 68,3 \text{ мм}$ ;  $d_2 = 68,4 \text{ мм}$ ;  $d_3 = 70 \text{ мм}$ . Введемо безрозмірні величини

$\tilde{\sigma} = \sigma / \sigma_{\text{ном}}$ ,  $\tilde{r} = y / r_3$ , де номінальне нормальне напруження  $\sigma_{\text{ном}} = N / \sum_{i=1}^{n=3} F_i$ . На рис. 3

суцільними лініями подано схему розподілу абсолютних значень нормальних напружень у поперечні зміцненої ділянки штока з покриттям при розтягуванні чи стисканні. Для порівняння штриховою лінією показано розподіл напружень у стержні без покриття. Бачимо, що напруження в різних шарах матеріалу не однакові, а при переході від шару до шару змінюються стрибкоподібно. Що жорсткіший матеріал шару композиції, то більші напруження у ньому виникають, зокрема в твердому шарі покриття ( $Al_2O_3$ ) напруження на 36 % перевищують номінальні, натомість у податливому прошарку ( $Al$ ) вони на 67 % менші за номінальні напруження.

Перейдемо до розгляду схеми навантаження елемента ділянки штока з покриттям при виникненні позаштатної ситуації (рис. 1, б). В цьому разі, крім уже розглянутого центрального розтягування чи стискання, ще маємо додаткове поперечне згинання композиційної ділянки штока. Дослідимо напружений стан у шарах матеріалу від позаштатних навантажень.

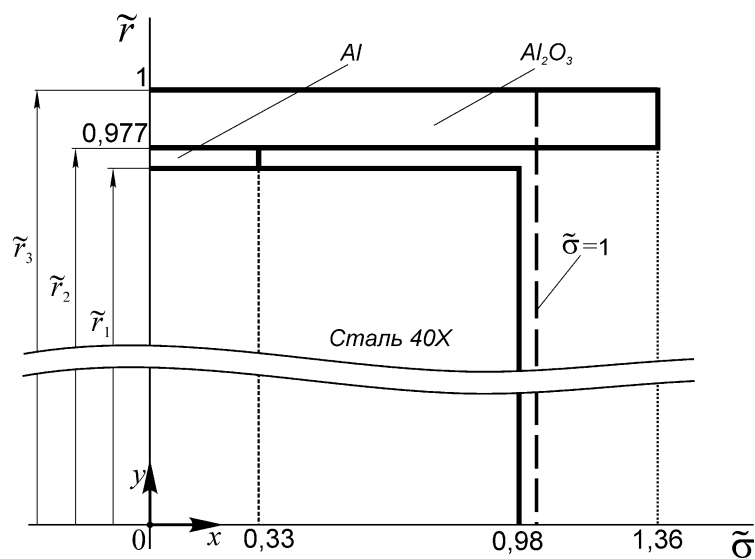


Рисунок 3 – Напружений стан зміцненої ділянки штока при стисканні чи розтягуванні

Почнемо з визначення нормальних напружень, які виникають внаслідок згинання [5]. Інтегральний взаємозв'язок між згинальним моментом і нормальними напруженнями в матеріалі відновленої ділянки штока буде

$$M_z = \sum_{i=1}^{n=3} \int_{F_i} y \sigma_{xi} dF_i. \quad (7)$$

Вирази сумісності деформацій різних шарів матеріалу стержня мають вигляд

$$\varepsilon_{xi} = \kappa y = \text{const}, \quad (8)$$

а фізичні співвідношення подамо у такому виді

$$\sigma_{xi} = E_i \varepsilon_{xi}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

де  $\kappa$  – кривина деформованої осі штока в позаштатній ситуації навантаження,  $\varepsilon_{xi}$  – лінійні деформації.

Зінтегрувавши вираз (7) з урахуванням (8) та (9), отримаємо

$$\sigma_{xk} = \frac{M_z y}{J_{zk}} \frac{E_k J_{zk}}{\sum_{i=1}^{n=3} E_i J_{zi}}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (10)$$

де  $J_{zi}$  – екваторіальний момент інерції площі попереччя  $i$ -го шару матеріалу.

Деталізуємо (10), описавши геометричні жорсткості при згинанні усіх шарів матеріалу зміцненої ділянки штока

$$\sigma_{xi} = \frac{64 E_i M_z y}{\pi (E_1 d_1^4 + E_2 d_2^4 [1 - \zeta^4] + E_3 d_3^4 [1 - \psi^4])}. \quad (11)$$

Проілюструємо одержаний результат на прикладі ділянки штока, яку ми уже розглядали вище. На відміну від попереднього прикладу за номінальне приймемо максимальне нормальне напруження, яке виникає при згинанні стержня без покриття  $\sigma_{ном} = 32 M_z / \pi d_3^3$ . На рис. 4 суцільними лініями подано схему розподілу абсолютних значень нормальних напружень у попереччі зміцненої двошаровим покриттям ділянки штока при згинанні. Штриховою лінією показано розподіл напружень у стержні без покриття. Бачимо, що напруження за товщиною кожного окремого шару змінюються лінійно, а на межах різних матеріалів мають місце розриви – стрибки. Так як і при стисканні, що жорсткіший шар матеріалу композиції на згин, то більші напруження у ньому виникають, зокрема у верхньому твердому шарі покриття максимальні напруження на 34,1 % перевищують номінальні, натомість у податливому прошарку вони на 67,9 % менші за номінальні напруження. Слід також зазначити, що у різних шарах матеріалу стержня градієнт нормального напруження за товщиною шарів є різним, зокрема в оксиді алюмінію (зовнішньому шарі покриття) він найменший, а в алюмінії (прошарку) – найбільший.

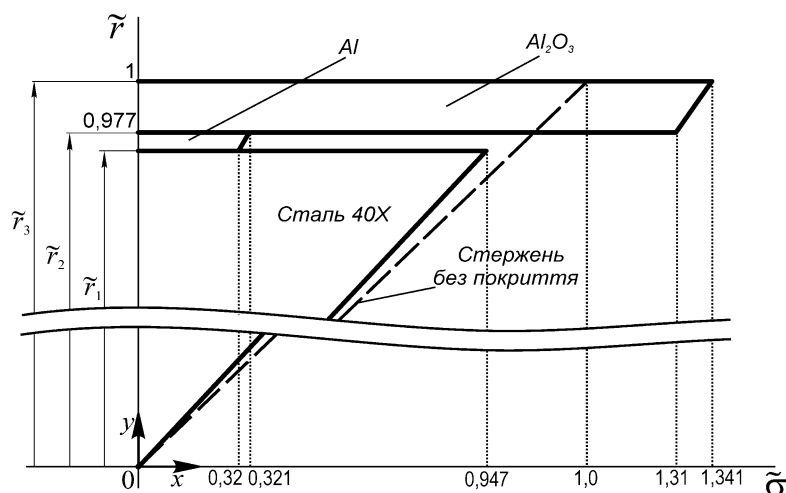


Рисунок 4 – Схема розподілу нормальних напружень у ділянці штока з покриттям при згинанні у позаштатній ситуації

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

$$k_i = \frac{E_i}{E_1}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Застосовуючи введений коефіцієнт запишемо низку необхідних нам виразів:

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

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n=3} \int_{F^*} k_i y dF_i = & \frac{2}{3} (r_1^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} H(r_1 - y) + \frac{2}{3} k_2 (r_2^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \times \left[ 1 - \left( \frac{r_1^2 - y^2}{r_2^2 - y^2} \right)^{\frac{3}{2}} H(r_1 - y) \right] H(r_2 - y) + \\ & + \frac{2}{3} k_3 (r_3^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \left[ 1 - \left( \frac{r_2^2 - y^2}{r_3^2 - y^2} \right)^{\frac{3}{2}} H(r_2 - y) \right], \end{aligned}$$

тут  $r_i = d_i / 2$ ,  $H(x)$  – функція Гевісайда;

– функція зведеної ширини неоднорідного попереччя

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n=3} k_i b(y) = & 2\sqrt{r_1^2 - y^2} H(r_1 - y) + 2k_2 \sqrt{r_2^2 - y^2} \times \left[ 1 - \sqrt{\frac{r_1^2 - y^2}{r_2^2 - y^2}} H(r_1 - y) \right] H(r_2 - y) + \\ & + 2k_3 \sqrt{r_3^2 - y^2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{r_2^2 - y^2}{r_3^2 - y^2}} H(r_2 - y) \right]; \end{aligned}$$

– зведений екваторіальний момент інерції неоднорідного попереччя

$$J_z^* = \frac{\pi}{64} \left[ d_1^4 + k_2 d_2^4 (1 - \zeta^4) + k_3 d_3^4 (1 - \psi^4) \right].$$

Тепер, використовуючи теорію Журавського про дотичні напруження в стержнях [6, 7], функцію розподілу дотичних напружень можемо подати в такому вигляді

$$\tau_{xy}(y) = \frac{Q_y \sum_{i=1}^{n=3} \int_{F^*} k_i y dF_i}{J_z^* \sum_{i=1}^{n=3} k_i b(y)}. \quad (12)$$

На рис. 5 суцільними лініями подано розподіл абсолютних значень дотичних напружень у попереччі ділянки штока з покриттям при її поперечному згинанні. Тут  $\tilde{\tau} = \tau_{xy} / \tau_{ном}$ , де за номінальне прийнято максимальне дотичне напруження, яке виникає при поперечному згинанні стержня без покриття  $\tau_{ном} = 16Q_y / 3\pi d_3^2$ .

На виділеній частині графіка у збільшеному масштабі ділянка  $AB$  зображає розподіл дотичних напружень у верхньому шарі покриття штока, ділянка  $BC$  – у прошарку, а ділянка  $CD$  – в основному матеріалі. Бачимо, що дотичні напруження за товщиною кожного окремого шару змінюються нелінійно, а на межах різних матеріалів мають місце точки зламу, оскільки розриви має похідна від функції дотичного напруження за координатою  $y$ . Для порівняння штриховою лінією показано розподіл дотичних напружень у стержні без покриття. Слід відзначити, що максимальні дотичні напруження в зміцненій ділянці виявились на 4,5% меншими за напруження в стержні без покриття.

Застосуємо отримані вище результати для числової оцінки міцності в конкретних інженерних задачах. Нехай буровий поршневий насос УНБ-600 працює з циліндровою втулкою, внутрішній діаметр якої  $D_v = 160$  мм, і забезпечує при цьому тиск  $p = 16,5$  МПа. Нормальні стискаючі

напруження в новому суцільному штоці бурового поршневого насоса двосторонньої дії визначають за формулою  $\sigma = p(D_v / d_{um})^2$ .

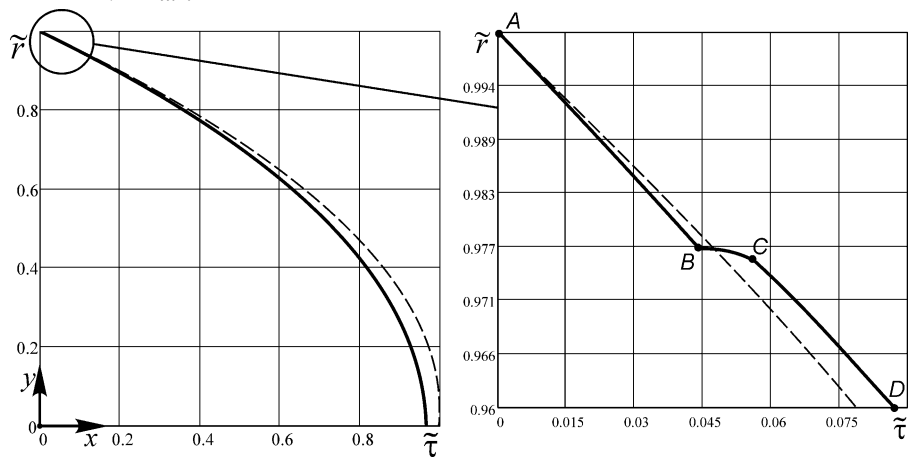
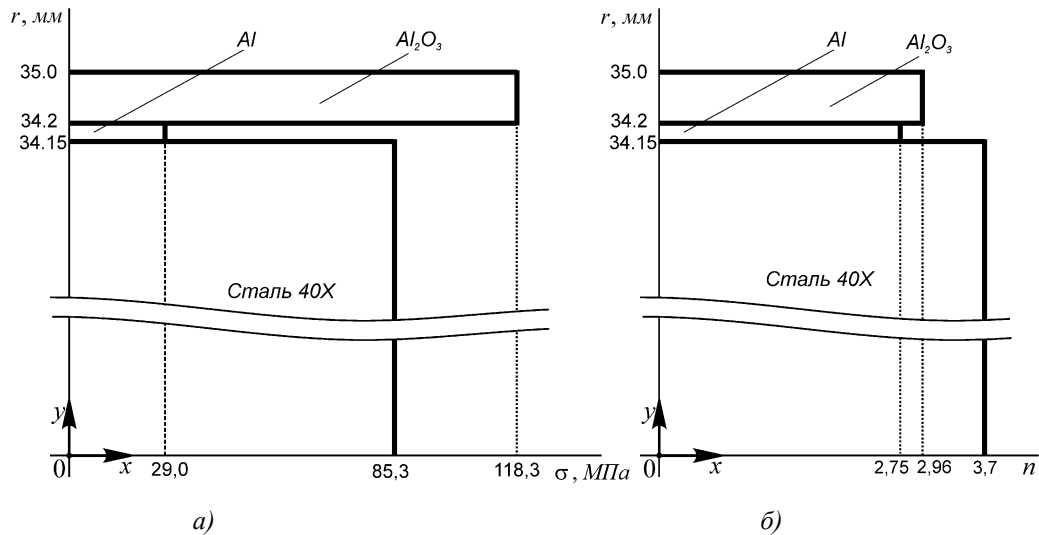


Рисунок 5 – Розподіл дотичних напружень в матеріалі зміцненої ділянки штока при поперечному згинанні у позаштатній ситуації

У штоці з діаметром попереччя  $d_{um} = 70$  мм такі напруження дорівнюватимуть 87 МПа. Далі через технічну потребу ділянку штока, яка при експлуатації контактує з ущільненням, зміцнили шляхом формування двошарового покриття, отримавши на цій ділянці композицію матеріалів, зображену на рис.1, а. Використовуючи (4) – (6) одержимо картину напруженого стану у ділянці штока з покриттям (рис. 6, а). Врахуємо значення механічних характеристик матеріалів, які прийемо за критерій статичної міцності: границя текучості для сталі 40Х – 315 МПа; границя міцності для оксиду алюмінію – 350 МПа; границя текучості для алюмінію – 80 МПа. На рис. 6, б подано розподіл значень коефіцієнта запасу статичної міцності  $n$ , з яким експлуатується композиція матеріалів зміцненої ділянки штока (рис. 6, б).



а) – напружений стан у ділянці штока з покриттям; б) – розподіл коефіцієнта запасу міцності  
Рисунок 6 – Оцінка статичної міцності ділянки штока з покриттям при штатних навантаженнях

Тепер ускладнимо попередню задачу. Шток, котрий працює в описаних вище умовах, отримує додаткове перевантаження, спричинене зносом пари тертя “крейцкопф – напрямні станини”. У цьому разі звертаємось до схеми навантаження зміцненої ділянки штока, яка зображена на рис. 1, б. Для одержання конкретних числових оцінок скористаємось низкою результатів, які ми одержали в роботі [4]. Нехай стан штока такий, що з посеред усіх розглянутих в роботі [4] моделей слід обрати стержневу модель із шарнірним закріпленням його лівого краю і жорстким закріпленням правого краю (рис. 7).

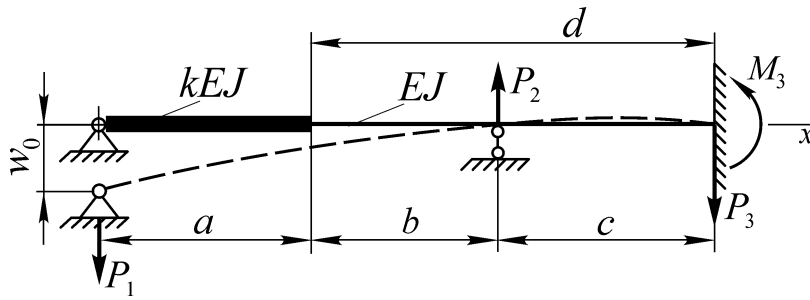


Рисунок 7 – Модель силового аналізу штока при виникненні позаштатної ситуації

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

$$P_1 = \frac{12EJw_0}{\zeta}, \quad P_2 = \frac{12EJw_0}{\zeta} \cdot \frac{(3l-c)}{2c}, \quad (13)$$

$$M_3 = \frac{12EJw_0}{\zeta} \cdot \frac{(l-c)}{2}, \quad P_3 = \frac{18EJw_0}{\zeta} \cdot \frac{(l-c)}{c}, \quad (14)$$

де  $w_0$  – відхилення лівого краю штока внаслідок зносу пари тертя “крейцкопф – напрямні станини”,

$\zeta = 4 \left[ \frac{1}{k} a^3 + d(a^2 + al + l^2) \right] - c(3l-c)^2$ ,  $l = a + d$ ,  $k$  – 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 поперечнях штока, мають вигляд

$$M(x) = -P_1 x + P_2 (x-s) H(x-s), \quad (15)$$

$$Q(x) = -P_1 + P_2 H(x-s), \quad (16)$$

тут  $s = a + b$ .

Для штока поршневого насоса УНБ-600 прийемо такі параметри (рис.7):  $a = 575 \text{ мм}$ ,  $d = 1130 \text{ мм}$ ; в крайньому лівому положенні штока  $b = 715 \text{ мм}$ ,  $c = 415 \text{ мм}$ ; максимальна величина ходу штока  $\eta = 400 \text{ мм}$ ; діаметр надставки штока  $D_1 = 120 \text{ мм}$ , діаметр штока  $D_2 = 70 \text{ мм}$ . При зміні положення штока параметри  $b$  та  $c$  можуть змінюватись на величину ходу штока  $\eta$ . Прийемо значення початкового вертикального зміщення  $w_0 = 0,001 \text{ м}$ .

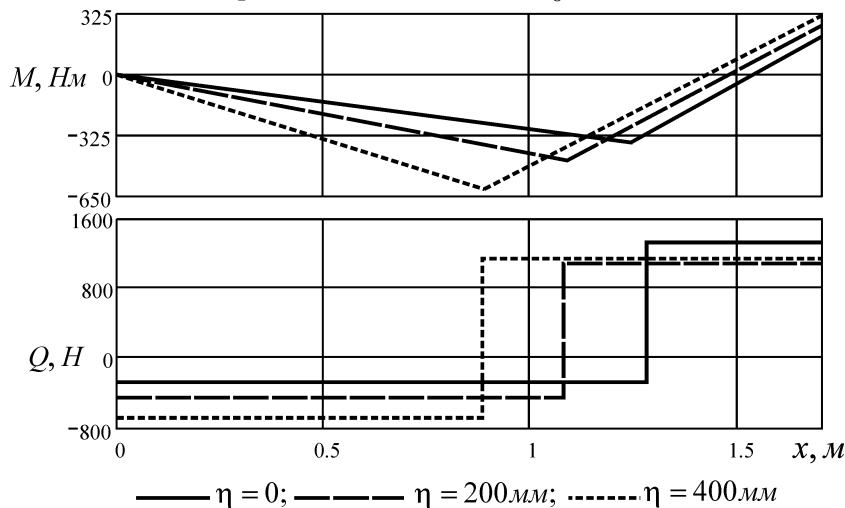


Рисунок 8 – Згинальні моменти та поперечні сили в штоці при виникненні позаштатної ситуації



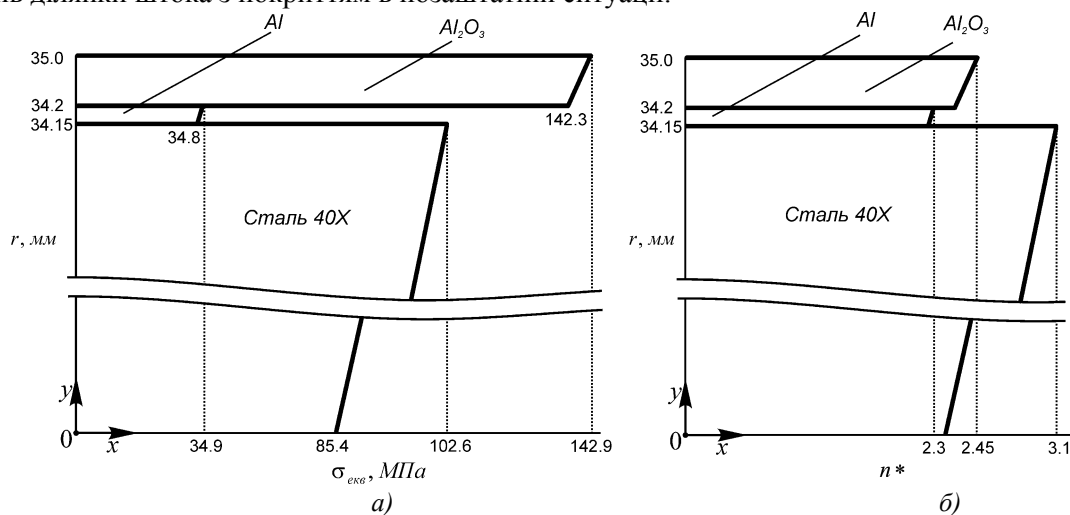
На рис. 8 подано розподіл згинальних моментів та поперечних сил за довжиною штока для його різних положень. Аналіз графіків вказує на те, що найбільш небезпечна комбінація згинального моменту і поперечної сили виникає при крайньому правому положенні штока на віддалі 0,89 м від його лівого торця, тут матимемо:  $M(0,89) = -616,4 \text{ Нм}$ ;  $Q(0,89) = 1,14 \text{ кН}$ .

Більшість точок зміцненої ділянки штока перебувають в складному напруженому стані. Для оцінки міцності скористаємось теорією Губера-Мізеса [7]. Еквівалентні напруження обчислюватимемо за формулою

$$\sigma_{екв} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (15)$$

тут нормальні напруження від осьової сили  $\sigma_N$  визначаємо з виразів (4) – (6), нормальні напруження від згину  $\sigma_M$  – за формулою (11), а дотичні напруження  $\tau_{xy}$ , обчислимо користуючись виразом (12).

На рис. 9, а подано розподіл еквівалентних напружень, обчислених за енергетичною теорією міцності Губера-Мізеса в зміцненій ділянці штока із врахуванням позаштатних напружень, які виникли внаслідок зносу пари тертя “крейцкопф – напрямні станини”. Поряд, на рис. 9, б подано розподіл значень коефіцієнта запасу статичної міцності  $n^*$ , з яким експлуатується композиція матеріалів ділянки штока з покриттям в позаштатній ситуації.



а – еквівалентні напруження в ділянці штока з покриттям; б – розподіл коефіцієнта запасу міцності  
Рисунок 9 – Оцінка статичної міцності ділянки штока з покриттям з урахуванням позаштатних напружень

Аналізуючи одержані оцінки міцності (рис. 6 та рис. 9) можемо зробити висновок про те, що ділянка штока з покриттям задовольняє умову статичної міцності як за звичних експлуатаційних навантажень штока (рис. 6), так і при змодельованій позаштатній ситуації (рис. 9). Слід звернути увагу на те, що отримана в процесі виготовлення штока композиція матеріалів із проміжним прошарком є досить вдалою з погляду забезпечення міцності об’єкту загалом. Розкид коефіцієнтів запасу міцності, з якими працюють окремі шари матеріалу є відносно невеликим, а відношення максимальних значень до мінімальних не перевищує 1,35. Це вказує на те, що варіюючи на стадії проектування геометричними, фізико-механічними та технологічними факторами процесу формування покриття, цілком реальною є можливість оптимізації напружено-деформованого стану в системі “основа-шарувате покриття”, результатом чого стане одержання рівномірних композицій.

Зрозуміло, що кінцевим розрахунком, який визначить придатність зміцненої ділянки штока з покриттям до тривалої експлуатації, повинен стати розрахунок на зношування та втомну міцність. За результатами даної роботи ми зможемо 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 жорсткого і м'якого матеріалів призводить 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 об'єкту загалом. Відмова від гіпотези жорсткої нормалі на етапі моделювання з метою врахування згинної депланції поперечних перерізів композиційної ділянки (та можливо ефекту обтиснення) вимагає використання більш багатих математичних моделей бруса, що внесе до кінцевих результатів невеличкі поправки, однак зробить розрахунок значно громіздкішим.

**Висновки.** В роботі запропоновано та детально опрацьовано технічну модель істотно неоднорідного стержня для дослідження напружено-деформованого стану зміцненої ділянки штока бурового насоса двосторонньої дії. Зміцнення штока здійснено шляхом формування двошарового покриття на сталевій основі: основа – сталь 40Х; зносостійкий поверхневий шар – оксид алюмінію; прошарок – алюміній. У використаній моделі поперечням стержня є багатозв'язна область, де параметри пружності та міцності змінюються від шару до шару. Поведінку такої моделі спершу розглянуто при звичному експлуатаційному навантаженні штока, а потім при виникненні позаштатної ситуації, яка спричинена спрацюванням деталей пари тертя “крейцкопф – напрямні станини”. Отримано розподіл нормальних, дотичних та еквівалентних напружень в неоднорідному матеріалі ділянки штока з покриттям. Здійснено оцінку міцності такої ділянки як при звичайних експлуатаційних навантаженнях, так і з урахуванням позаштатних напружень. Слід зауважити що в рамках використаної моделі, користуючись одержаними в роботі результатами можна легко перейти до оцінки напружено-деформованого стану ділянки штока з шаруватим покриттям, яке містить довільну кількість шарів.

Завданнями наступних етапів досліджень автори бачать спробу уточнення розглянутих задач та оптимізацію напружено-деформованого стану у системі “основа - двошарове покриття” шляхом урахування впливу залишкових напружень, які виникають у процесі формування шаруватих покриттів, та варіюванням градієнтних властивостей фізико-механічних характеристик композиції матеріалів, яку одержують у результаті зміцнення штока.

### *Література*

1. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Zhenqian Wu. Structure and mechanical properties of ceramic coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation on aluminized steel / Wu Zhenqian, XiaYuan, Li Guang, Xu Fangtao // *Applied Surface Science* 253 (2007). P. 8398-8403.
3. Поп'як Л. Я. Конструювання двошарових покриттів алюмінію – оксид алюмінію / Л. Я. Поп'як // *Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17 – 22 сентября 2012 г. В 3-х томах.* – Донецк: ДонНТУ, 2012. Т. 2. – С. 356–357.
4. Величкович А. С. Аналіз позаштатного напружено-деформованого стану штока поршневого насоса двосторонньої дії, спричиненого зносом пари тертя “крейцкопф-направні” / А. С. Величкович, В. В. Остапович, Л. Я. Поп'як // *Прогресивні технології і системи машинобудування.* – Донецьк: Донецький національний технічний університет. – 2012. – Вип. 1, 2 (44). – С. 36–50.
5. Тимошенко С. П. *Механика материалов* / С. П. Тимошенко, Д. М. Гере. – М.: Мир, 1976. – 550 с.
6. Хан Х. *Теория упругости: Основы линейной теории и ее применение: Пер. с нем.* / Х. Хан. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
7. Работнов Ю. Н. *Механика деформируемого твердого тела* / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука. – 1988. – 712 с.