

**Вельбой В.П.**Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ  
ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ  
КОНТАКТНОЇ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ  
НА ЇЇ ЗНОШУВАННЯ****Вступ**

Довговічність надійної роботи деталей пар тертя передусім визначається зносостійкістю їх контактних поверхонь. Відомі рекомендації щодо підвищення зносостійкості в основному ґрунтуються на результатах теоретичних і експериментальних досліджень механізму і наслідків взаємодії контактних поверхонь з урахуванням впливу хімічного складу і структурних перетворень контактних поверхонь, наявності зносостійких покриттів, умов силового навантаження і мащення та інших експлуатаційних чинників. Визначальними вихідними параметрами здебільшого задаються швидкість ковзання і контактний тиск з боку контртіла на поверхню зношування і зумовлені ним нормальні напруження досліджуваної поверхні.

В той же час очевидним є факт наявності тангенціальних напружень в приконтактній зоні зношеної поверхні тертя, зумовлених як контактним тиском, так і силою тертя з боку контртіла. Аналіз літературних джерел показує, що практично відсутні методики розрахунку таких напружень і дослідження їх впливу на зносостійкість контактної поверхні.

В даній роботі розглядаються питання наближеного аналізу напруженого стану приконтактної зони рухомого ковзкого контакту і визначення тангенціальних напружень у цій зоні за умови її пружної і пластичної деформації. Наведено методику і будову пристроїв для експериментального дослідження впливу попередньо напруженої контактної поверхні на її зносостійкість за однакових інших умов.

**Аналіз відомих досліджень**

Принцип створення попередніх напружень протилежного знаку тим напруженням, які виникають на робочій поверхні виробу під час його експлуатації зазвичай використовують для виготовлення важко навантажених деталей машин з метою підвищення їх міцності. Вперше цей принцип практично використаний для розрахунку скріплених циліндрів за умови дії радіальних і тангенціальних напружень плоского напруженого стану (задача Ляме і Гадоліна)). Тангенціальні стискальні напруження  $\sigma_\phi$  (рис. 1) робочої поверхні вставки 1 створюються товстостінною обоймою (бандажем) 2, напресованим на втулку з відповідним натягом. За прикладом розрахунку [1] показано, що при радіальному тиску  $p = 130$  МПа на внутрішню поверхню діаметром 60 мм товстостінного циліндра діаметром 216 мм тангенціальні розтягувальні напруження  $\sigma_\phi = 150$  МПа (рис. 1, а). Якщо вставку 1 діаметром 114 мм скріпити з натягом 1,41 мм бандажем 2 діаметром 216 мм, то за рахунок контактного тиску на внутрішній поверхні вставки виникають стискальні напруження  $\sigma_{\phi 1} = 65$  МПа (рис. 1, б). При дії того ж радіального тиску тангенціальні розтягувальні напруження внутрішньої поверхні вставки  $\sigma_\phi = 48,2$  МПа (рис. 1, в), тобто зменшуються більше ніж у 3 рази і відповідно підвищується міцність вставки.

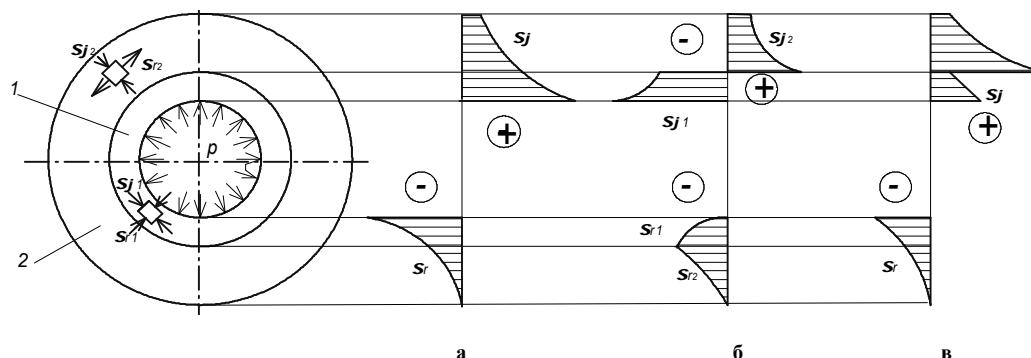


Рис. 1 – Радіальні  $\sigma_r$  і тангенціальні  $\sigma_\phi$  напруження скріплених циліндрів (задача Ляме)

До подібних конструкцій, зокрема, належать скріплені матриці з твердосплавними робочими вставками для холодного об'ємного штампування сталевих деталей. Оскільки при холодному деформуванні металів радіальний тиск на стінку вставки досягає 1200 ... 1500 МПа і більше, то вставку скріплюють декількома запресованими з натягом один в інший бандажами (рис. 2, а). Інженерна методика [2]

розрахунку таких матриць також ґрунтується на теорії плоского напруженого стану необмежених товстостінних циліндрів за умови рівномірного тиску. Відомі конструктивні схеми штампів, практичні рекомендації щодо технології виготовлення скріплених (бандажованих) матриць і виробничі показники їх стійкості [3, 4] показують, що незважаючи на суттєве спрощення моделі напруженого стану через неврахування граничних умов на торцях кінцевих циліндрів і нерівномірного тиску на робочу поверхню вставки, стійкість скріплених таким чином матриць підвищується у декілька разів. Вдосконалим різновидом попереднього створення стискальних напружень є обмотування з натягом зовнішньої поверхні вставки стрічкою [5] з високоміцного матеріалу шириною, рівною висоті матриці (рис. 2, б) або обмотування з натягом криволінійної поверхні матриці [6] високоміцним дротом (рис. 2, в).

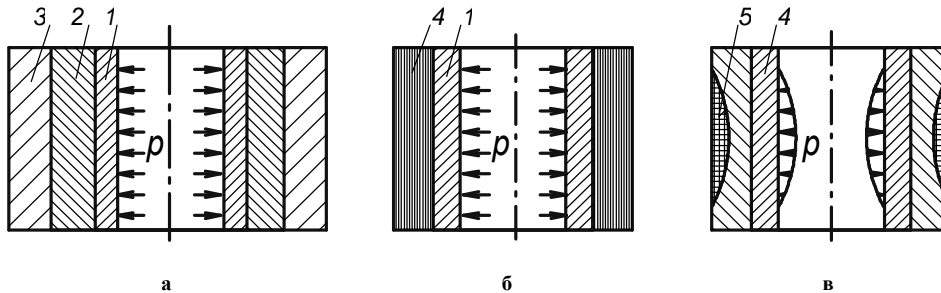


Рис. 2 – Скріплення робочих вставок матриць бандажуванням (а), обмотуванням з натягом міцною стрічкою (б) і міцним дротом (в):  
1 – робоча вставка; 2, 3 – бандаж; 4 – обмотка стрічкою; 5 – обмотка дротом

Аналітичні рішення [7] осесиметричних задач теорії пружності для кінцевих циліндрів ґрунтуються на моделі об'ємного напруженого стану для визначення осьових  $\sigma_z$ , радіальних  $\sigma_r$ , тангенціальних  $\sigma_\phi$  і дотичних  $\tau_{rz}$  напружень. Опрацюванні автором табличні дані відносної величини  $\sigma/p$  і характер розподілу складових напруженого стану за умови внутрішнього тиску  $p$  при  $b/a = 1,5$ ,  $h/a = 2$ ,  $l/h = 0,4$  (задача № 75) представлені на рис. 3. Числові значення напружень при  $z/2a = 1$  діють у серединному січенні циліндра. Показано, що при дії сталого тиску  $p$  на ділянці  $l$  внутрішньої поверхні (крива 1) виникають рівнозначні стискальні радіальні напруження  $\sigma_r(r = a)$ , які поступово (крива 2) зменшуються  $\sigma_r(r = 1,25a)$  і відсутні на зовнішній поверхні циліндра.

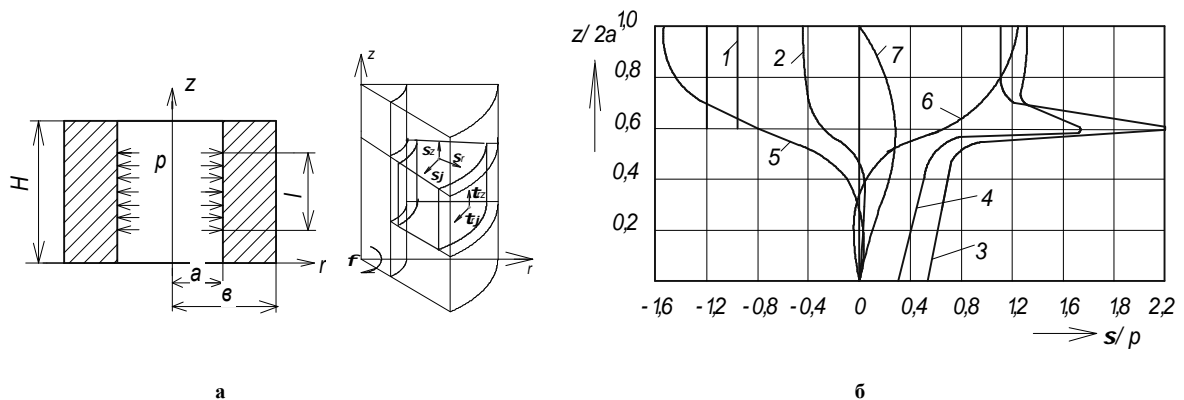


Рис. 3 – Розрахункова схема (а) і складові об'ємного напруженого стану (б) кінцевого товстостінного циліндра [7]

Тангенціальні розтягувальні (криві 3 і 4) напруження як на внутрішній  $\sigma_\phi(r = a)$ , так і на зовнішній  $\sigma_\phi(r = b)$  поверхнях досягають значного максимуму на границях дії внутрішнього тиску. Осьові напруження (крива 5) на внутрішній поверхні  $\sigma_z(r = a)$  стискальні, а на зовнішній поверхні  $\sigma_z(r = b)$  розтягувальні (крива 6), максимальні в серединному січенні циліндра і відсутні на торцях, призводять до викривлення циліндра. Дотичні напруження (крива 7) відсутні на поверхнях циліндра, а в тілі стінки розтягувальні знизу  $t_{rz}(r = 1,25a)$  і стискальні зверху.

Дослідженнями [8, 9, 10] напруженого стану наскрізних і глухонних циліндричних матриць закритих штампів з урахуванням кінцевих розмірів, конструктивних ознак і нерівномірної інтенсивності навантаження робочої поверхні також встановлено якісний і кількісний розподіл тангенціальних і осьових напружень на внутрішній і зовнішній поверхні матриці. Розроблена інженерна методика розрахунку основана на мінімізації потенціальної енергії навантаженої системи методом Ритца [11] з використанням математичного апарату варіаційного числення і фундаментальних функцій А.Н. Крилова [12]. Така методика в більшій мірі дозволяє практично реалізувати принцип попереднього напруження для раціонального конструювання матриць, навантажених нерівномірним тиском на ділянці робочої поверхні, що призводить до її пружного викривлення і відхилення від циліндричності штампованого виробу. Розроблена матриця [6], яка відрізняється тим, що з метою підвищення геометричної точності штампованих виробів шляхом зменшення впливу пружної деформації на матеріал заготовки і підвищення зносостійкості за рахунок стискальних напружень, твірна зовнішньої поверхні матриці виготовлена за кривою, адекватною кривій розподілу радіальної деформації і обмотана з натягом шарами змінною кількістю витків високоміцного дроту (рис. 2, в).

### Основна частина

Особливий інтерес представляє дослідження напруженого стану поверхонь контактної взаємодії, наприклад, вала і підшипника ковзання з урахуванням сили тертя, яка чисельно рівна тій мінімальній зовнішній дотичній силі, яку необхідно прикласти до тіла, щоб заставити його стабільно ковзати на необмежену відстань по поверхні іншого тіла. За даними роботи [13] при контакті двох сфер дотичні напруження на контактній поверхні збільшують напруження зсуву в глибинних шарах матеріалу і зміщують їх максимум в напрямі до контактної поверхні. При переміщенні сфери по поверхні пружного тіла в ньому виникають знакозмінні дотичні напруження, які призводять до втомного руйнування матеріалу. В роботі [14] показано, що при рухомому контакті шорстких поверхонь руйнування матеріалу ймовірно відбувається незалежно у двох зонах: ближче до контактної поверхні і на деякій глибині контактної зони. При досягненні коефіцієнтом тертя критичних значень виникають умови для глибинного руйнування матеріалу з утворенням крупних часточок зносу, розміри яких такого ж виміру, як і відстані між плямами контакту. Тому врахування тангенціальних напружень прилеглої до зношуваної поверхні зони рухомого контакту вимагає спеціальних досліджень з питань руйнування тіл при терті.

В даній роботі поставлена задача розробити методику попереднього створення пружних напружень в тілі зразка і дослідження впливу цих напружень на зношування контактної поверхні зразка за інших однакових умов випробування.

Відомі способи [15] для випробувань на тертя і зношування, в яких контртіло має циліндричну форму і обертається із заданою швидкістю під час випробувань, а нерухомі випробувальні зразки різної геометричної форми притискаються до зовнішньої поверхні контрзразка із заданим навантаженням. Найближчим до запропонованого способу є метод трибологічних випробувань спряжень «вкладиш підшипника – шийка колінчастого валу» [16]. Недоліком відомих способів є те, що при випробуванні на тертя і зношування задається лише контактний тиск сили притискання випробувального зразка до контртіла і не враховується напружений стан зони, прилеглої до контактної поверхні зразка.

Поставлене завдання вирішується тим, що для випробувань використовують три зразки пружного випробувального матеріалу у формі прутка однакової довжини і однакового круглого або квадратного поперечного перерізу. Одному із випробувальних зразків шляхом пластичної деформації згинанням надають остаточну U - подібну форму радіусом кривизни  $R$  з паралельними прямими ділянками (рис. 4, а) і такий зразок є еталоном для порівняння результатів випробування, а інші два зразки того ж матеріалу зігнуті з таким же радіусом кривизни  $R$  так, що у вільному стані кут між прямими ділянками одного зразка складає  $120^\circ$  (рис. 4, б), а іншого  $60^\circ$  (рис. 4, в).

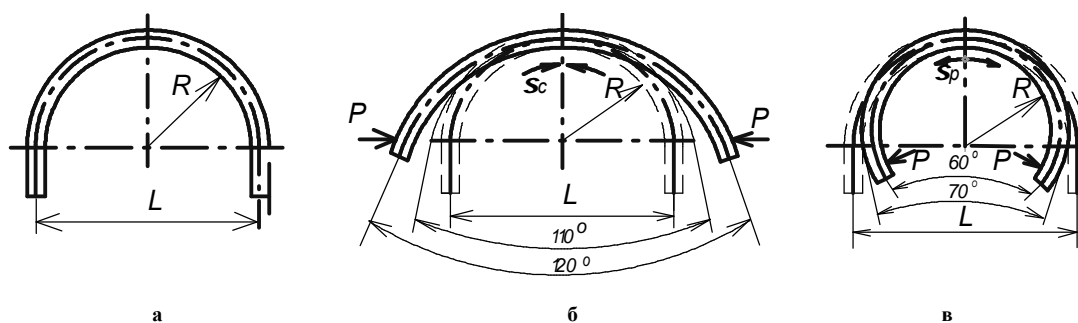


Рис. 4 – Зразки для випробування впливу попереднього напруження на зношування матеріалу

При пружному догинанні або перегинанні силою  $P$  відповідно першого і другого зразка до паралельного стану прямолінійних ділянок (пунктирні лінії на рисунку) на внутрішній поверхні першого зразка створюються стискальні  $\sigma_c$ , а другого – розтягувальні  $\sigma_p$  осьові напруження. Випробування матеріалу на зношування проводять таким чином. За певних умов навантаження, мащення, часу і швидкості обертання контргтіла випробують і отримують пляму зношування внутрішньої поверхні зразка-еталона та кількісно оцінюють ступінь його зносу, наприклад, шляхом вимірювання розмірів плями зношування або його зважування. Інші випробувальні зразки догинають або розгинають в межах пружної деформації до U - подібної форми зразка-еталона радіусом кривизни  $R$  з паралельними прямими ділянками і напружений зразок випробують на зношування за тих же умов тертя і так само кількісно оцінюють ступінь його зносу шляхом вимірювання розмірів плями зношування у напруженому стані зразка або його зважування у вільному стані. За результатами порівняння ступеню зношування ненапруженого зразка-еталона і попередньо напруженого зразка виявляють і оцінюють вплив попередньо створених напружень прилеглої до поверхні тертя зони на її зношування.

Для випробування зразків виготовлений пристрій (рис. 5), який містить важіль 1, встановлений з можливістю вільного обертання у шарнірі 2 стійки 3 під дією підвішеної наважки 4. До важеля прикріплена з можливістю знімання жорстка П - подібна скоба 5, розміщена над приводним контргтілом 6, виготовленим зі сталі 6ХС твердістю 51 ... 52 HRC у формі диска, що обертається. Радіус  $r$  диска контргтіла не більше половини радіуса  $R$  кривизни випробувального зразка 7. Випробувальний зразок 7 розміщений у жорсткій скобі 5 і закріплений в межах прямих ділянок до скоби фіксаторами 8. Задана сила притискання випробувального зразка до контактної поверхні контргтіла створюється наважкою 4.

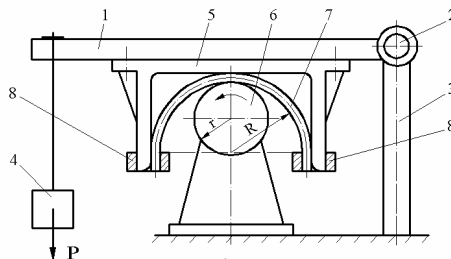


Рис. 5 – Пристрій для випробування впливу попереднього напруження на зношування матеріалу зразків

Пристрій працює таким чином: зразок-еталон 7 U - подібної форми вільно вставляються в скобу 6 і кріпляться до скоби двома фіксаторами 8 в межах прямолінійних ділянок. Надігнутий зразок пружно догинається, а перегнутий - розгинається між стінками скоби до набуття U - подібної форми радіусом кривизни  $R$  з паралельними прямими ділянками і в напруженому таким чином стані так само кріпляться до скоби двома фіксаторами 8. Скоба нерухомо кріпляється до важеля 1 і вставлений зразок притискається до контргтіла заданою силою  $P$  наважки 4. За певної частоти обертання контргтіла 6 протягом заданого часу відбувається тертя контактних поверхонь..

Проведені лабораторні випробування даного способу і пристрою для дослідження зношування зразків, виготовлених з каліброваного дроту діаметром 6 мм холодноотягнутої сталі 14X17H2. Комплект 3-х зразків довжиною 275 мм згинали радіусом кривизни  $R = 85$  мм так, щоб вони набули остаточної форми, як показано на рис. 4. Зразок-еталон вільно вставляли в скобу 5 показаного пристрою, а інші додатково пружно згинали (рис. 4, б) або розгинали (рис. 4, в) радіусом кривизни  $R$  і в напруженому стані закріплювали в скобі 5 фіксаторами 8. Випробування проводили на доопрацьованій багатофункціональній установці [17] за умови притискання зразка силою 15 Н, швидкості ковзання 1 м/с і шляху тертя 65 м при змащуванні поверхні контргтіла радіусом  $r = 30$  мм мастилом ШРБ-4 (ТУ 33. УССР 201143-77). Після кожного випробування знімали скобу 5 з важеля 1 і в напруженому стані вимірювали розміри еліпсоподібної плями зношування з точністю 0,01мм штангенциркулем Electronic digital caliper. Усередненні результати вимірювання 3-х комплектів зразків представлені в таблиці, а плями зношування показані на рис. 6.

Таблиця

#### Розміри еліпсоподібної плями зношування випробувальних зразків

Вид зразка	Більша вісь еліпса, мм	Менша вісь еліпса, мм	Площа, мм <sup>2</sup>
Зразок-еталон А (рис. 4, а)	13,20	2,97	29,4
Додатково зігнутий Б (рис. 4, б)	9,55	2,85	20,4
Пружно розігнутий В (рис. 4, в)	14,65	3,80	41,7

Показано, що площа еліпсоподібної плями зношування контактної поверхні попереднього напруженого зразка за рахунок створення стискальних напружень за інших однакових умов не більше 70 % площі плями зношування поверхні ненапруженого зразка-еталона., а при наявності розтягувальних напружень пляма зношування перевищує знос зразка-еталона майже в 1,5 рази.

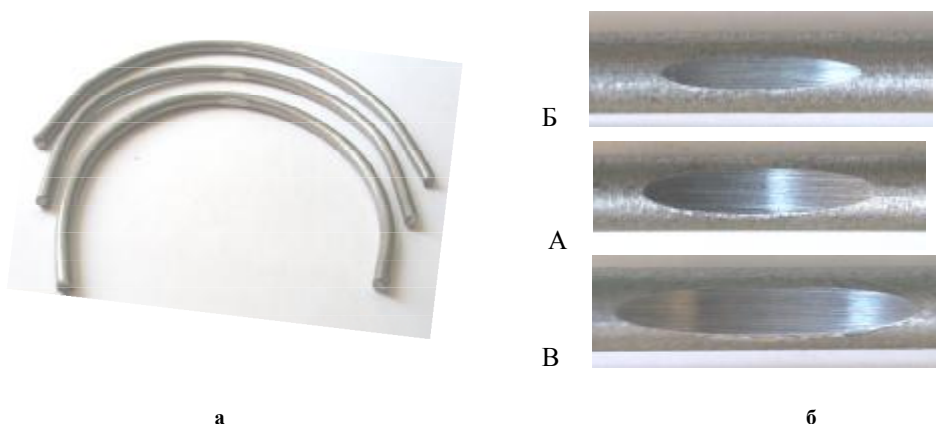


Рис. 6 – Випробувані зразки (а) і плями (б) зношування їх контактної поверхні

В результаті проведених випробувань також встановлено величину пружного відновлення форми зразків після виймання їх зі скоби 5. Кут між прямолінійним ділянками додатково зігнутого зразка (рис. 4, б) зменшується приблизно до  $110^\circ$ , а пружно розігнутого – збільшується до  $70^\circ$ . Величина пружинення як додатково зігнутих так і розігнутих (рис. 4, в) зразків знаходиться в межах  $10^\circ$ . За величиною пружинення можна визначити рівень попередньо створених напружень в зразках.

За умови проведених випробувань (рис. 7) однобічне пружинення  $\Phi = 5^\circ$  наближено призводить до пружного горизонтального переміщення точки С прикладання стискальної сили  $P$  на відстань  $\Delta x = R \cdot \operatorname{tg} 5^\circ = 8,5 \times 0,08 = 0,68$  см.

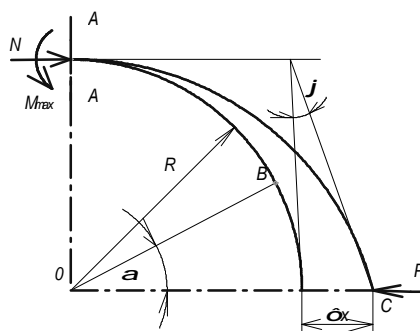


Рис. 7 – До розрахунку попередньо створених напружень зразка

З іншого боку за відомими формулами [1] розрахунку зусиль і переміщень згинання круглого стрижня в будь-якому січенні (точка B) визначається за формулою:

$$\Delta x = \frac{PR^2}{EI} \left( \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4} \right),$$

де  $P$  – горизонтальна сила згинання стрижня;

$R$  – радіус кривизни стрижня;

$\alpha$  – кут нахилу сили згинання до нормалі лінії кривизни стрижня;

$E = 2,1 \cdot 10^6$  кГ/см<sup>2</sup> – модуль пружності сталі;

$I = 0,05d^4 = 0,0065$  см<sup>4</sup> – статичний момент інерції січення зразка діаметром  $d = 0,6$  см.

При  $R = 8,5$  см,  $\alpha = \pi/2$ :

$$\Delta x = \frac{P \cdot 8,5^2}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,0065} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\sin 2\pi}{4} \right) = 0,004 P$$

або  $0,68 = 0,04 P$ , звідки  $P = 170$  Н.



В серединному січенні  $A - A$  зразка діють сила  $N = P \cdot \sin \alpha = 170 \cdot \sin \pi/2 = 170$  Н і максимальний згинальний момент  $M = PR \cdot \sin \alpha = 170 \cdot 8,5 \cdot \sin \pi/2 = 1145$  Н·см.

Максимальні напруження в серединному січенні зразка:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{F} + \frac{M}{W},$$

де  $F = \pi d^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,6^2 / 4 = 0,28$  см<sup>2</sup> – площа поперечного січення зразка;

$W = 0,1 d^3 = 0,1 \cdot 0,6^3 = 0,02$  см<sup>3</sup> – момент опору поперечного січення зразка.

Максимальні попередньо створені стискальні (рис. 4, б) або розтягувальні (рис. 4, в) напруження в серединному січенні даних зразків:

$$\sigma_{\max} = \frac{17}{0,28} + \frac{114,5}{0,02} = 5785,7 \text{ кг/см}^2 \approx 586 \text{ МПа.}$$

## Висновки

Представлена методика створення і розрахунку попереднього напруженого стану зразків, конструкція пристрою і результати випробування впливу напружень стискання і розтягування зразків на зношування контактної поверхні тертя за однакових інших умов. Показано, що при наявності стискальних напружень в межах 600 МПа знос зразків зі сталі 14X17H2 зменшується до 30 %, а такі ж напруження розтягування збільшують знос контактної поверхні майже у 1,5 рази.

## Література

1. Рудицын М.Н. и др. Справочное пособие по сопротивлению материалов. Под общ. ред. М.Н. Рудицына. Минск: Высшая школа, 1970. – 630 с.
2. Трахтенберг Б.Ф., Векслин И.И. Методика расчета и конструктивные особенности скрепленного инструмента для холодной объемной штамповки. Руководящие материалы. Куйбышев, 1969.
3. Холодная объемная штамповка. Справочник. Под ред. Г.А.Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Трахтенберг Б.Ф. Стойкость штампов и пути её повышения. Куйбышевское книжное издательство, 1964.
5. Патент США № 3 691. 816, кл. 72-467, 1972.
6. Авторское свидетельство СССР № 676375, кл. В 21 J 13/02. Матрица для объемной штамповки. Вельбой В.П. Оpubл.30.07.79 Бюл. № 28.
7. Колотов М.А. и др. Упругость и прочность цилиндрических тел. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 526 с.
8. Вельбой В.Ф., Ганаго О.А., Ситников Е.И. Исследование напряженно-деформированного состояния при штамповке в закрытых штампах // Сб. научных трудов № 89 Челябинского политехнического института. Челябинск, 1971. – С. 123 – 128.
9. Ганаго О.А., Вельбой В.Ф. Расчет на прочность осесимметричных штампов // В сб.: Совершенствование кузнечно-штамповочного производства. – Л.: Машиностроение, 1971. – С. 176 – 184.
10. Ганаго О.А. Вельбой В.Ф. Основы расчета на прочность осесимметричных штампов холодной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 5. – С. 1-5.
11. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С.Д. Пономарёва. Том II. – М.: Машгиз, 1958. – 654 с.
12. Вельбой В.П. Эффективность функций Крылова для расчета напружено-деформованного стану товстостінних циліндрів // Проблеми трибології. – 2006. – № 1. – С. 173 -183.
13. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
14. Кузнецов Е.А., Гороховский Г.А. Фрикционное взаимодействие шероховатых тел с позиции механики твердого тела / Трение и износ. – Т.1, №4. – 1980. – С. 638-649.
15. Комплекс машин и методики определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжения / Э.Т. Мамыкин, М.К. Коваль, А.И. Юга и др. / Порошковая металлургия. – 1973. – №1. – С. 67-72
16. Методы испытаний на трение и износ: Справ. Изд. // Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбаков – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 152 с..
17. Вельбой В.П., Кузьменко А.Г., Диха О.В., Диха М.О. Багатофункціональна лабораторна установка для дослідження трибологічних властивостей конструкційних і мастильних матеріалів // Проблеми трибології. – 2008. – №1. С. 94-98.