

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМБІНОВАНОГО ЗУБКА: ТВЕРДИЙ СПЛАВ – СТАЛЬ

І.Г.Барило, Л.Д.Пітулей, Л.Я.Роп'як, І.Б.Копей, В.М.Білінський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,  
e-mail: kaftnm@iung.edu.ua

*Побудовано математичну модель процесу деформації комбінованого зубка: твердий сплав – сталь. Досліджено напружений стан комбінованих зубків і оцінено вплив товщини сталеві підкладки, а також модулів пружності матеріалів на залишкові технологічні напруження. Дано рекомендації з конструювання комбінованих зубків.*

Ключові слова: твердий сплав, комбінований зубок, сталь, технологічні напруження

*Построено математическую модель процесса деформации комбинированного зубка: твердый сплав – сталь. Исследовано напряженное состояние комбинированных зубков и оценено влияние толщины стальной подложки, а также модулей упругости материалов на остаточные технологические напряжения. Даны рекомендации по конструированию комбинированных зубков.*

Ключевые слова: твердый сплав, комбинированный зубок, сталь, технологические напряжения

*The mathematical model of the composite bit deformation process (blackor – steel) has been built. The stress state of composite bits has been investigated; there also has been estimated the impact of the steel pad thickness and modulus of elasticity of the materials on processing temper. The guidelines on composite bits have been provided.*

Keywords: blackor, combined bits, steel, technology stress

Для більш повного забезпечення України нафтою та газом необхідно збільшувати їх видобуток. Значна роль у вирішенні цього завдання належить породоруйнівному інструменту (шарошкостим буровим долотам, калібраторам і центраторам).

Твердосплавне оснащення для армування породоруйнівного інструменту отримують спіканням з подальшим паянням, механічним кріпленням або запресуванням в корпус інструмента. У руйнуванні гірської породи приймає участь тільки виступаюча над корпусом інструмента частина зубка. Таке використання твердосплавних матеріалів не можна визнати раціональним – приблизно на дві треті висоти зубки запресовуються в тіло інструмента, а регенерація і повторне використання відпрацьованих зубків, як правило, не здійснюється.

Досліджено напружений стан з'єднання: твердосплавний монолітний зубок – сталевий корпус шарошки [1, 2], однак у літературі практично відсутні дані про напружений стан у самому комбінованому зубку (КЗ): твердий сплав – сталь, що ускладнює конструювання оснащення породоруйнівного інструмента і його оптимізацію.

При використанні комбінованого оснащення (твердий сплав – сталь), сформованого механо-термічним формуванням [3] виникає проблема сумісності матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками. Вибір раціональних технологічних режимів механо-термічного формування КЗ повинен ґрунтуватися на даних про вплив основних технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики КЗ: міцність з'єднання сталі з твердим сплавом, зносостійкість робочої частини і вторинну міцність.

Крім того, в процесі експлуатації складних композитів з'являються напруження, які у поєднанні із залишковими можуть призвести до деформації, перенапруження, а іноді і до руйнування. Тому визначення величини і характеру розподілу залишкових напружень, обумовлених спіканням і наплавленням, має істотне значення.

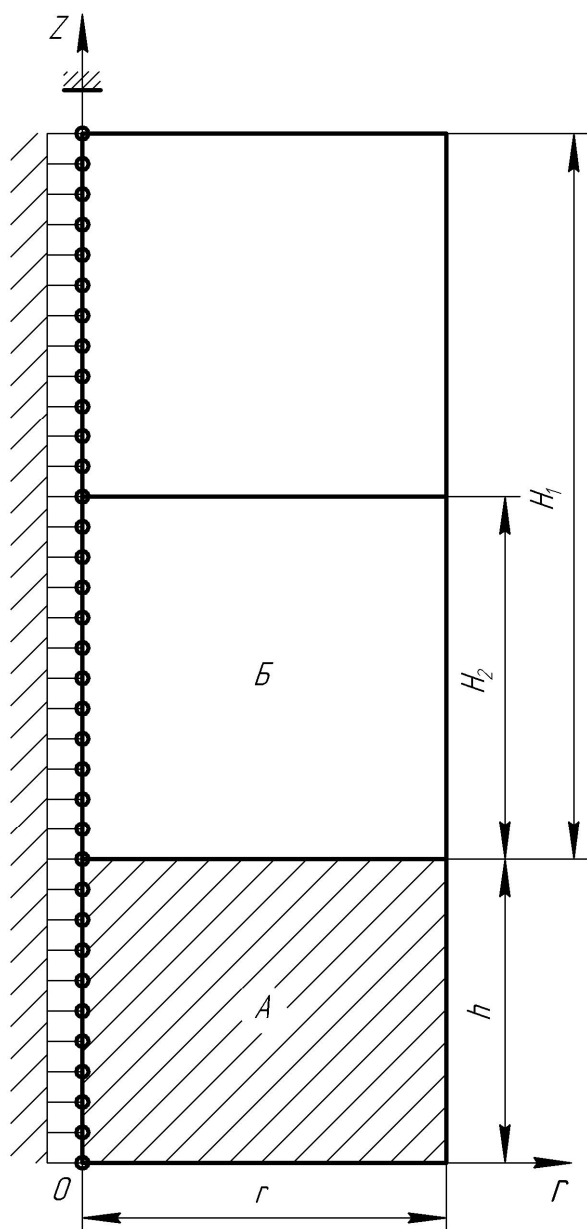
Метою даного дослідження є аналіз напруженого стану комбінованого зубка: твердий сплав – сталь і оцінка впливу товщини сталеві підкладки, а також модулів пружності матеріалів на залишкові технологічні напруження.

Для цього побудовано математичну модель процесу деформації КЗ.

Формування робочої частини КЗ із твердого сплаву відбувається за температури 1400-1450°C, коли кобальт знаходиться в стані текучості. В процесі охолодження пластичність кобальту знижується, а за температури менше 1000°C практично втрачається здатність до пластичної деформації, а також з'являються пружні деформації. Виходячи з цього розглядався процес охолодження КЗ за температури 1000°C до 20°C.

При побудові математичної моделі досліджуваного об'єкту вважали, що матеріали робочої частини КЗ (твердий сплав) і підкладки (сталь) абсолютно пружні, однорідні та ізотропні. Модулі пружності, коефіцієнти Пуассона і коефіцієнти температурного розширення матеріалів шарів приймали постійними, незалежними від температури. Задачу вирішували в пружній постановці. При формуванні умов теплового навантаження вважали, що виріб охолоджується рівномірно. Рішення задачі проводили методом скінчених елементів, реалізованому в розроблених ІНМ НАН України комплексі

програм «Термопружність» [4] на персональному комп'ютері. Геометричну схему досліджуваної моделі зображено на рис. 1.



*A – твердий сплав; B – сталь;  
r = 6 мм; h = 5 мм; H<sub>1</sub> = 12 мм; H<sub>2</sub> = 6 мм*

**Рисунок 1 – Геометрична схема моделі комбінованого зубка для розрахунку залишкових технологічних напружень**

Конструкція, що розраховується, має такі розміри: твердий сплав – циліндр діаметром 12 мм і товщиною 5 мм, підкладка зі сталі 45 – циліндр діаметром і висотою 12 мм. Внаслідок симетрії досліджували половину конструкції, яку апроксимували трикутною сіткою з числом вузлів 528 і елементів 980.

Розв’язання задачі здійснювалося за таких кінематичних умов:

$$\begin{matrix} U = 0 \\ V = 0 \end{matrix} \Big|_{z=r=0}; \quad \begin{matrix} U = 0 \\ \end{matrix} \Big|_{r=0} \quad \begin{matrix} 0 \leq z \leq H+h, \end{matrix}$$

де:  $U$  і  $V$  – переміщення відповідно по осях  $r$  і  $z$ ;  $H$  – висота сталевий підкладки;  $h$  – висота твердого сплаву.

Фізико-механічні характеристики матеріалів наведено в таблиці 1.

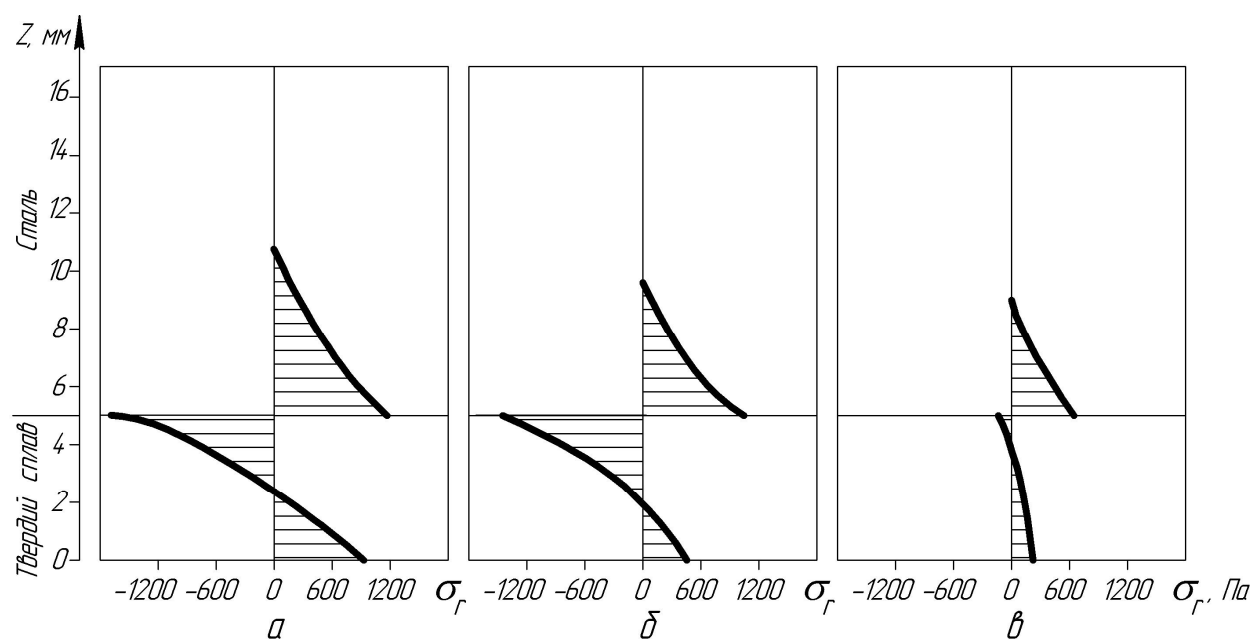
**Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики матеріалів**

Матеріал	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Коефіцієнт лінійного розширення $10^{-6}, K^{-1}$
Сталь 45	206	0,28	12,3
Твердий сплав BK10	574	0,22	5,2

У процесі охолодження КЗ від температури спікання до кімнатної температури відбувається пружна деформація внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення шарів та їх модулів пружності (див. табл.). Оскільки коефіцієнт лінійного розширення для сталі більший, ніж для твердого сплаву в 2,3-2,5 рази, то усадка сталевий шару буде більш значною, що за умови зв'язку між шарами призведе до згину КЗ і виникнення залишкових напружень. Рівень і нерівномірність розподілу залишкових напружень буде визначатися відношенням модулів пружності шарів, їх товщиною і різницею коефіцієнтів термічного розширення.

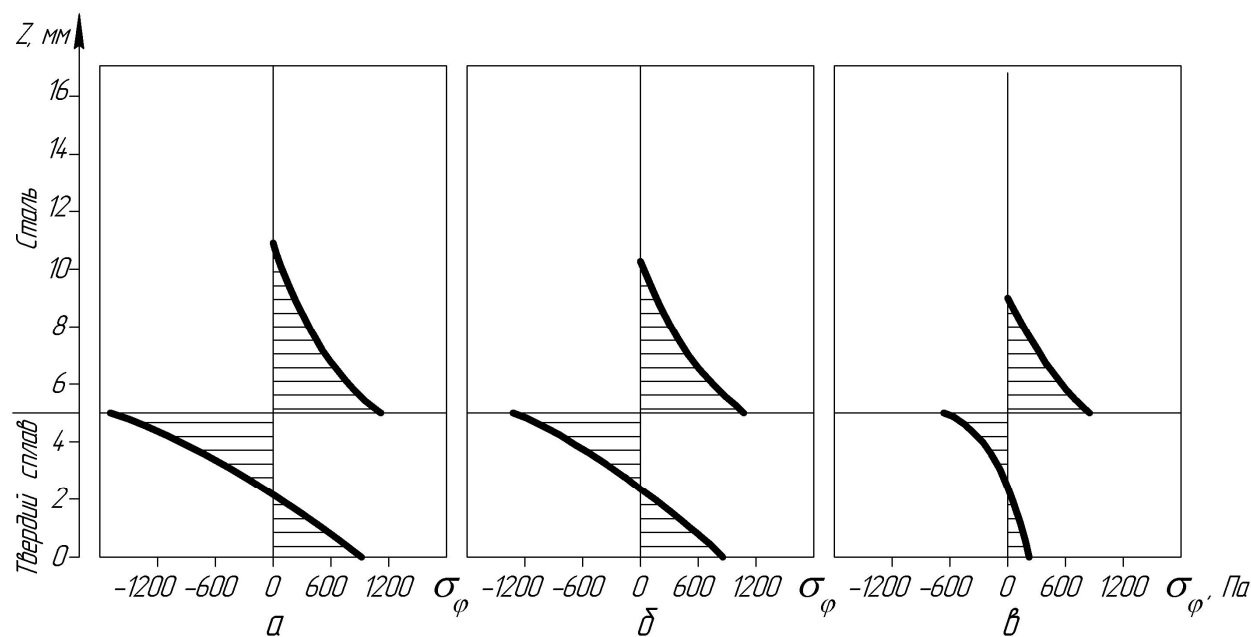
На рис. 2-5 зображено епюри розрахованих значень зміни напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$ ,  $\sigma_z$  і  $\tau_{rz}$  (циліндрична система координат) по товщині КЗ в різних перетинах для моделі процесу деформування КЗ при охолодженні від температури спікання до кімнатної. В цьому випадку радіальні  $\sigma_r$  і тангенціальні  $\sigma_\varphi$  є головними напруженнями і за абсолютною величиною (див. рис. 2-4) їх значення перевищують всі інші, тому під час розгляду напруженого стану КЗ зосереджували основну увагу на їх аналізі. Як видно з рис. 2 і 3, характер епюр напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\varphi$  аналогічні. Розподіл напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\varphi$  за товщиною КЗ свідчить, що сталевий шар перебуває в стані розтягу. Зона дії розтягуючих напружень розповсюджується для  $\sigma_r$  і  $\sigma_\varphi$  до половини товщини сталевий шару в напрямку від лінії розділу матеріалів. Максимальні розтягуючі напруження діють в центрі сталевий шару вздовж осі симетрії КЗ на межі з твердим сплавом і рівні для прийнятої розрахункової моделі  $\sigma_r = 1170$  Па,  $\sigma_\varphi = 1180$  Па.

З віддаленням від осі симетрії КЗ розтягуючі напруження спадають і на бічній поверхні за  $r = 5,9$  мм сягають:  $\sigma_r = 610$  Па і  $\sigma_\varphi = 850$  Па (рис. 2, в; 3, в). З віддаленням від лінії з'єднання матеріалів і осі симетрії  $\sigma_r$  і  $\sigma_\varphi$  також зменшуються і за  $r = 5,9$  м та  $z = 9$  мм дорівнюють нулеві.



а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 3$  мм; в)  $r = 5,9$  мм;  $0 \leq z \leq 17$  мм

Рисунок 2 – Розподіл напружень  $\sigma_r$  за товщиною КЗ при  $E_{mc} = 574$  ГПа в різних перерізах



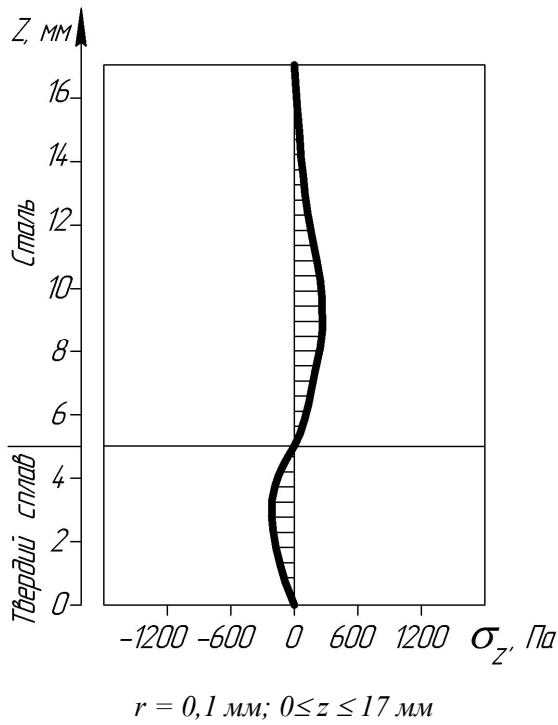
а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 3$  мм; в)  $r = 5,9$  мм;  $0 \leq z \leq 17$  мм

Рисунок 3 – Розподіл напружень  $\sigma_\phi$  за товщиною КЗ при  $E_{mc} = 574$  ГПа в різних перерізах

На межі розділу матеріалів: твердий сплав – сталь відбувається різкий стрибок напружень і зміна знаку  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$ . Шар твердого сплаву, судячи з розподілу головних напружень, перебуває в стані кругового згину, оскільки поблизу межі розділу напруження стиску  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$  досягають максимуму 1700 Па вздовж осі симетрії при  $r = 0,1$  мм, а на вільній поверхні при  $z = 0$   $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$ , вже змінюють знак на протилежний, і досягають значення 900 Па.

Круговий згин пластини у поєднанні з умовою єдності переміщень вздовж межі розділу фаз матеріалів призводить до виникнення великих дотичних напружень уздовж межі розділу, абсолютне значення яких зростає при наближенні  $r$  до 6 мм (рис. 4, 5). З віддаленням від межі розділу до вільних країв (торців) КЗ напруження  $\tau_{rz}$  зменшуються до нуля.

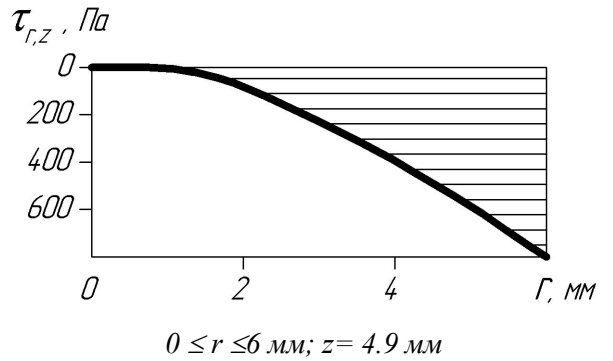
Напруження  $\sigma_z$  (рис. 4) на межі розділу фаз змінюють знак і досягають максимальних значень з різними знаками в шарі твердого сплаву і сталі, і з віддаленням від лінії розділу зменшуються до нуля.



**Рисунок 4 – Розподіл напружень  $\sigma_z$  за товщиною КЗ при  $E_{mc} = 574 \text{ ГПа}$  в перерізі**

Деяка частина твердого сплаву товщиною 2,5 мм поблизу межі розділу (рис. 2; 3) перебуває в стисненому стані. Водночас решта кількості об'єму твердого сплаву перебуває в менш сприятливих умовах, оскільки залишкові напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$  в ньому вже розтягуючі. Розтягуючі напруження в твердосплавному шарі можна усунути шляхом зменшення його товщини або технологічними способами.

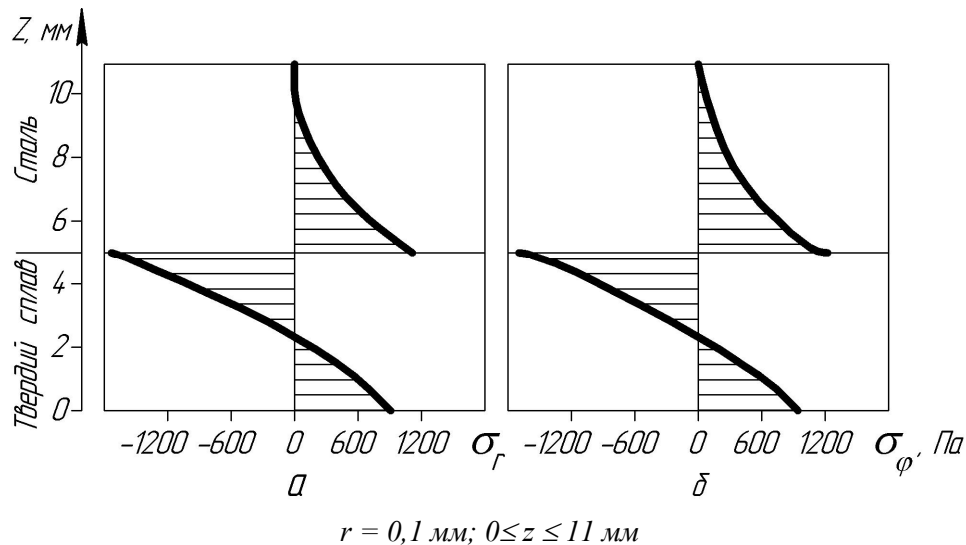
Як відомо [5], наявність залишкових напружень стиску в поверхневому шарі деталі підвищує її довговічність. З цією метою були проведені спеціальні дослідження.



**Рисунок 5 – Розподіл напружень  $\tau_{rz}$  за радіусом КЗ в твердому сплаві при  $E_{mc} = 574 \text{ ГПа}$**

На рис. 6 зображені епюри зміни розрахункових напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$  в найнебезпечнішому перетині (по осі симетрії) при товщині сталевому шару 6 мм. Як видно з рис. 6, розподіл і рівень залишкових напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$  при зменшенні товщини сталевому шару до  $H_2 = 6 \text{ мм}$  (при постійних решті чинників) практично не змінюються. Оскільки залишкові напруження не розповсюджуються по висоті шару сталі більш, ніж на 6 мм від лінії розділу, то решта частина сталі не приймає участі в процесі деформування конструкції. Отже, зняття шару сталі до цієї товщини практично не впливає на величину залишкових напружень та їх розподіл.

Зі зменшенням модуля пружності твердого сплаву від 574 ГПа (див. рис. 2; 3) до 370 ГПа (див. рис. 7) розтягуючі напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_\phi$  на поверхні твердого сплаву знижуються пропорційно зміні модуля пружності. Збільшується об'єм твердого сплаву, що знаходиться під дією напружень стиску. Отже, за нижчого модуля пружності твердого сплаву залишкові напру-



**Рисунок 6 – Розподіл напружень  $\sigma_r$  (а) і  $\sigma_\phi$  (б) при зменшенні сталевому шару до  $H_2 = 6 \text{ мм}$  при  $E_{mc} = 574 \text{ ГПа}$**

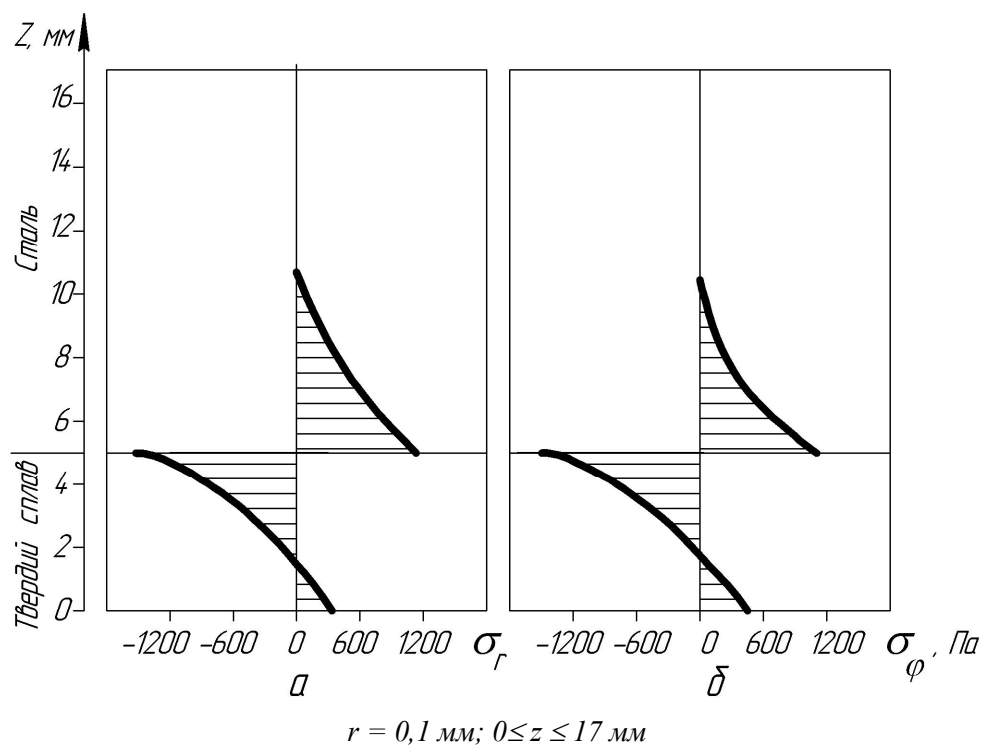


Рисунок 7 – Розподіл напружень  $\sigma_r$  (а) і  $\sigma_\phi$  (б) при  $E_{mc} = 370 \text{ ГПа}$

ження будуть сприятливо впливати на конструкційну міцність КЗ.

На підставі аналізу напруженого стану КЗ можна зробити такі висновки.

1. Висота сталеві основи понад 6 мм не впливає на напружений стан КЗ.

2. Для створення КЗ краще використовувати висококобальтові тверді сплави з меншим модулем пружності і великим коефіцієнтом лінійного розширення.

4 Цыбенко А.С. Комплекс программ для исследования термонапряженного состояния элементов конструкций / А.С. Цыбенко, Н.Г. Ващенко, Н.Г. Гришук // XV научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций: Тезисы докладов (Киев, 28-30 мая 1980 г.). – К.: Наукова думка. 1980. – С. 90.

5. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М.Г. Лошак. – К.: Наукова думка, 1977. – 147 с.

### Література

1 Григоренко С.І. Теоретичні передумови підвищення міцності з'єднання зубок – шарошка / С.І. Григоренко, О.С. Кодак, Л.Д. Пітулей // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1997. – № 34. – С. 83-85.

2 Корнута В.А. Моделирование напружено-деформованого стану з'єднання «корпус (шарошка) – твердосплавна вставка» контактом двох гладких циліндрів / В.А. Корнута, Т.М. Даляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 1(30). – С. 48-53.

3 Теоретические предпосылки создания комбинированного зубка методом механо-термического формирования. / Э.С. Гинзбург, И.Г. Барило, Л.А. Резник и др. // Повышение эффективности технологических процессов газонефтяной и газовой промышленности путем обеспечения долговечности оборудования и инструмента: Труды МИНГ, вып. 202. – М.: МИНГ им. И.М. Губкина, 1987. – С.25-37.

Стаття поступила в редакційну колегію  
06.08.09

Рекомендована до друку професором  
Петриною Ю.Д.