

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Я.В. Солоничний, В.М. Вакалюк, Ю.М. Лях, Д.Ю. Журавльов

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42195,
e-mail: public@nimg.edu.ua

Високопродуктивний породоруйнівний інструмент виготовляється з конструкційних матеріалів, яким притаманна значні твердість та пластичність. Такі властивості мають двофазні композиційні матеріали, які отримують при застосуванні обертових ливарних форм. Під час заливання в обертову ливарну форму, в струмину розплавленого металу засипають твердосплавні гранули. Завдяки відцентровим силам вони переміщуються в розплавленій металевій матриці до зовнішньої робочої поверхні деталі. При її охолодженні від температури кристалізації металу до кімнатних в об'ємі отриманого виробу внаслідок різниці термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів в'язкої матриці та гранул арміатора із значною твердістю виникає напружено-деформований стан. В даній роботі проведено дослідження особливостей напружено-деформованого стану композиційних матеріалів та розроблено метод розрахунку механічних напружень системи „металозв'язка – сферична гранула арміатора”.

Ключові слова: напружено-деформований стан, породоруйнівний інструмент, композиційний матеріал, бурові долота, шарошка бурового долота

Высокопродуктивный породоразрушающий инструмент изготавливается из конструкционных материалов высокой твердости и значительной пластичности. Такими свойствами владеют двухфазные композиционные материалы, получаемые при помощи оборотных литейных форм. При заливке в оборотную литейную форму, в струю расплавленного металла засыпают твердосплавные гранулы. Под воздействием центробежных сил они движутся в расплавленной металлической матрице по направлению к внешней рабочей поверхности детали. При охлаждении последней до комнатной температуры по причине различия термических коэффициентов линейного расширения материалов вязкой матрицы и гранул арматора со значительной твердостью в объеме полученного изделия возникают напряженно-деформированное состояние. В данной работе проведено исследование особенностей напряженно деформированного состояния композиционных материалов и разработан метод расчета механических напряжений системы „металосвязка – сферическая гранула арматора”.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, породоразрушающий инструмент, композиционный материал, буровое долото, шарошка бурового долота

High productive rock cutting tools is made of structural materials, which the inherent hardness and much plasticity. These properties have a two-phase composite materials, which are obtained by using circulating molds. In a stream of molten metal that poured into the back mold, poured carbide granules. Due to centrifugal forces, they move into the molten metal matrix to the outer surface of the working parts. When it is cooled from the crystallization temperature of the metal to the room in the volume of the resulting product having the stress strain state due to the difference of thermal linear expansion coefficients of materials of a viscous matrix and granules armitora with considerable firmness. In this paper we study the features of stress strain state of composite materials and developed a method for calculating the mechanical stresses of the system "metalosvyazka - spherical granules armitora.

Keywords: stress-strain state, rock cutting tools, composite material, drill bit, cutter drill bit

Від якості породоруйнівного інструменту залежать основні техніко-економічні показники буріння нафтогазових свердловин. Використовується породоруйнівний інструмент різних конструктивних виконань: долота ріжучо-сколюючого, дроблячо-сколюючого та ріжучо-стираючого типів.

Питаннями покращення ефективності породоруйнівного інструменту, а саме бурових доліт, займалися і тепер займаються багато науковців і висококваліфікованих спеціалістів [4, 5]. Підходи до вирішення проблеми вдосконалення бурових доліт є різноманітні в т. ч. оснащення робочих поверхонь твердими вставками з різноманітними способами кріплення – холодна та гаряча посадка, використання проміжних тіл, імпульсне зварювання, паяння, віброзапресування, заплавлення, литво із закріпленням зубців та інші [6]. Кожен із підходів

має ряд позитивних та негативних чинників. Тому є доцільним пропонувати і інші напрямки досліджень, які в подальшому могли б дати позитивний ефект.

Породоруйнівний інструмент, який використовується для руйнування гірських порід земної кори, у процесі будівництва (буріння) свердловин, повинен поєднувати в собі високу твердість, що забезпечить достатню зносостійкість в абразивному середовищі, та пластичність, яка запобігатиме появі тріщин та руйнуванню складових частин інструменту при ударах і великих змінних навантаженнях. Однофазних конструкційних матеріалів з поєднанням таких властивостей практично не існує. Якщо матеріал достатньо твердий, то він, як правило, є крихким і навпаки – пластичні матеріали є досить м'якими. Тому для високопродуктивного породоруйнівного інструмента доцільно ви-

користувати двофазні композиційні матеріали, компоненти якого володіють вищезгаданими експлуатаційними характеристиками.

Суть одного із таких методів отримання робочих частин бурового інструменту із композиційного матеріалу полягає в наступному. Ливарну форму обертають із необхідною кутовою швидкістю відносно осі її симетрії. При цьому в струмину розплавленого металу, який заливають в обертову ливарну форму, засипають твердосплавні гранули. Оскільки їх густина значно більша від густини металу, то завдяки відцентровим силам твердосплавні гранули переміщуються в розплавленій металевій матриці до зовнішньої поверхні деталі. При її охолодженні від температури кристалізації металу до кімнатних температур через різницю термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів матриці та твердосплавних гранул в об'ємі отриманого виробу виникає напружено-деформований стан. Дослідження особливостей напружено-деформованого стану композиційних матеріалів, отриманих вказаним технологічним методом, має велике практичне значення і є метою даної роботи.

Для проведення теоретичного аналізу напружено-деформованого стану в композиційних матеріалах слід прийняти деякі припущення, які не порушують адекватності математичної моделі процесу виникнення напружень:

- а) армуючі твердосплавні гранули мають форму кульок заданого радіуса;
- б) відстані між сусідніми гранулами великими в порівнянні з розмірами гранул;
- в) за будь-якої температури радіуси сферичних порожнин у матеріалі матриці відповідають радіусам армуючих гранул, тобто існує ідеальна адгезія між межуючими поверхнями компонентів композиційного матеріалу;
- г) модулі Юнга, коефіцієнти Пуассона і термічні коефіцієнти лінійного розширення складових компонентів не залежить від температури в широкому діапазоні.

Прийняті припущення є повністю реальними і практично не спотворюють умов виникнення напруженого стану в армованій зоні.

Відомо [1, 2], що нормальне σ_H і тангенціальне σ_T напруження в сферичних оболонках описуються співвідношеннями

$$\sigma_H = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} - (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{r^3 (r_2^3 - r_1^3)}; \quad (1)$$

$$\sigma_T = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_1^3 - r_2^3} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{2r^3 (r_2^3 - r_1^3)}, \quad (2)$$

де: r_1 – внутрішній радіус оболонки; r_2 – зовнішній радіус оболонки; p_1 – внутрішній тиск; p_2 – зовнішній тиск; r – відстань від центра оболонки.

Напруження в суцільній кулі (сфері) можна визначити із співвідношень (1) і (2) за умови $r_1=0$:

$$\sigma_H = \sigma_T = -p_2. \quad (3)$$

Вирази напружень в сферичній порожнині можна отримати із (1) і (2) за умови $r_2 \gg r_1$; $p_2=0$; $r > r_2$:

$$\sigma_H = -p_1 \frac{r_1^3}{r^3}, \quad (4)$$

$$\sigma_T = \frac{p_1 r_1^3}{2 r^3}. \quad (5)$$

В кулеподібних тілах деформація під час усебічного стискання чи розтягу спрямована завжди радіально і є функцією тільки відстані r від центра гранули [1].

Згідно узагальненого закону Гука [1, 2] відносна деформація для гранули:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta r}{r} = \frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p + \alpha_1 \Delta T, \quad (6)$$

де: E_1 , μ_1 , α_1 – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу гранули відповідно; p – тиск на межі розділу гранули і металозв'язки (рис. 1). Член $\alpha_1 \Delta T$ описує внесок у деформацію гранули зниження температури на величину ΔT при охолодженні композиційного матеріалу від температури кристалізації металозв'язки до температури навколишнього середовища. Знак цього члена визначається тим, що підвищення температури системи обумовлює збільшення радіальних розмірів гранули.

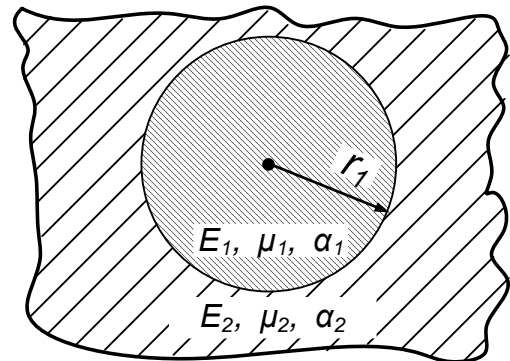


Рисунок 1 – Гранула армітора в металевій матриці

Відносна деформація металозв'язки в зоні контакту з гранулою:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta r}{r} = -\frac{\mu_2 + 1}{E_2} p - \alpha_2 \Delta T, \quad (7)$$

де E_2 , μ_2 , α_2 – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу матриці відповідно (рис. 1). Знак доданку $\alpha_2 \Delta T$ в цьому випадку визначений тією обставиною, що із збільшенням температури системи радіальні розміри порожнини збільшуються, що еквівалентно зменшенню радіальних розмірів матеріалу металозв'язки:

$$\Delta r_1 = -\Delta r_2. \quad (8)$$

Використовуючи граничну умову (8) для гранули і металозв'язки, із співвідношень (6) і (7) можна отримати:

$$\frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p + \alpha_1 \Delta T = \frac{\mu_2 + 1}{E_2} p + \alpha_2 \Delta T, \quad (9)$$

звідки значення межового тиску:

$$p = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)}. \quad (10)$$

Напруження в гранулі, згідно (3) і (10):

$$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)}. \quad (11)$$

Нормальне напруження в металозв'язці, згідно (1), (4), (10):

$$\sigma_{H2} = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)} \frac{r_1^3}{r^3}. \quad (12)$$

Тангенціальне напруження в металозв'язці, на основі співвідношень (5) і (10):

$$\sigma_{T2} = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)} \frac{r_1^3}{2r^3}. \quad (13)$$

Для металів коефіцієнт Пуассона $\mu \approx 0,25$, тобто $\mu < 0,5$. Згідно формул (11), (12) і (13) тип напружено-деформованого стану системи „гранула-металозв'язка” визначається різницею термічних коефіцієнтів лінійного розширення компонентів композиційного матеріалу. Якщо, наприклад, термічний коефіцієнт лінійного розширення металозв'язки менший від аналогічного коефіцієнта гранули ($\alpha_2 - \alpha_1 > 0$), то напруження в гранулі та нормальне напруження в металозв'язці набувають додатніх значень, тобто гранула перебуває в стані усебічного розтягу, металозв'язка розтягнута в радіальному напрямі, а тангенціальне напруження в металозв'язці набуває від'ємних значень.

За відомими значеннями [3] модуля Юнга E , коефіцієнта Пуассона μ , термічного коефіцієнта лінійного розширення α металозв'язки зі сталі 70X5Г9ФТМ та гранули карбіду вольфраму WC радіусом $r_1 = 1 \text{ мм}$ при зміні температури $\Delta T = -1400 \text{ К}$ даного композиційного матеріалу, яка рівна різниці кінцевої температури композиційного матеріалу (температури навколишнього середовища) і початкової температури (температури кристалізації даної сталі), на рис. 2 представлені результати розрахунку механічних напружень.

Згідно з проведеними розрахунками напруження в гранулі $\sigma_1 = -3,87 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Нормальне напруження в сталі приймає максимальне значення на межі контакту металозв'язки і гранули ($\sigma_{H2} = \sigma_1$). Але вже на відстані $r = 2 \text{ мм}$ від центру твердосплавної гранули нормальне напруження в сталі рівне $0,483 \cdot 10^9 \text{ Па}$, тобто у 8 разів менше, ніж на межі контакту компонентів композиційного матеріалу (рис. 2, крива 1). Оскільки нормальне напруження приймає від'ємні значення, то гранула карбіду вольфраму перебуває в стані усебічного стискання, а металозв'язка стиснута в радіальному напрямі. Тангенціальне напруження в сталі на межі контакту з карбідом вольфраму становить $1,93 \cdot 10^9 \text{ Па}$. При збільшенні ж відстані від центру гранули до 2 мм тангенціальне напруження в металозв'язці

спадає до $0,242 \cdot 10^9 \text{ Па}$ (рис. 2, крива 2). Такий характер напружено-деформованого стану даного композиційного матеріалу обумовлений тим, що термічний коефіцієнт лінійного розширення сталі ($\alpha_2 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) значно більший від термічного коефіцієнта лінійного розширення карбіду вольфраму ($\alpha_1 = 3,84 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) [3].

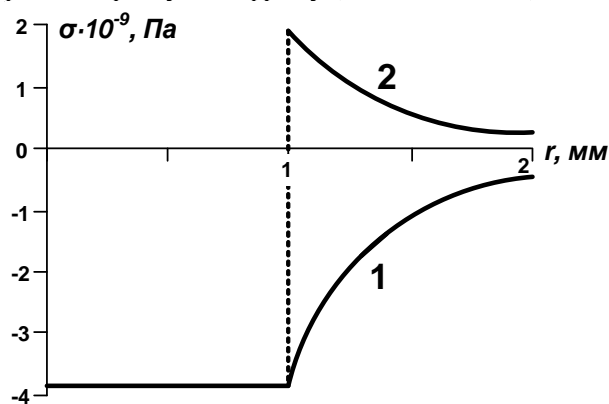


Рисунок 2 – Нормальне (1) і тангенціальне (2) напруження композиційного матеріалу

Розглянуті матеріали в даній статті можуть бути використані або враховані при подальших дослідженнях та створеннях елементів доліт з композиційних матеріалів.

Під час проведення експериментальних досліджень буде проведено правильність проведення теоретичних досліджень.

Література

- 1 Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с.
- 2 Посацький С.Л. Опір матеріалів / С.Л. Посацький. – Львів, 1983. – 403 с.
- 3 Таблицы физических величин: справочник под. ред. Кикоина И.К. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- 4 Крилов К.А. Повышение эффективности и долговечности буровых долот / К.А. Крилов, О.А. Стрельцова. – М.: Недра, 1983. – 206 с.
- 5 Шарошечные долота. Международный транслятор-справочник; под научн. ред. В.Я. Кершенбаума, А.В. Торгашова // Международная инженерная энциклопедия. – М., 2000 – 245 с. – Серия "Нефтяная техника и технология".
- 6 Корнута В.А. Вдосконалення твердосплавного озброєння шарошок на основі аналізу роботи з'єднань з натягом / В.А. Корнута, О.Т. Драганчук // Нафтогазова енергетика – 2009. – №1 (10). – С. 5-15.

Стаття надійшла до редакційної колегії
15.06.11

Рекомендована до друку професором
Б.В. Конєсєм