

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ЯКІСТЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБКІВ ШАРОШОК БУРОВИХ ДОЛІТ

*В статті розглянуто проблему отримання якісного композиційного матеріалу на металоматричній основі вставного зубка шарошок бурових доліт при відцентровому литві під дією магнітного поля. В роботі визначені технологічні фактори впливу на термічний цикл процесу формоутворення композиту. Обґрунтувавши тривалість необхідного часткового розчинення арматорів в розплаві матриці та визначивши діапазон їх оптимальних розмірів, можемо отримати конкурентоздатний зубок підвищеної довговічності, оскільки литі композиційні матеріали на сталій матриці мають для досягнення цієї мети ресурсні можливості.*

*Ключові слова: композиційний матеріал, зубок, шарошка, бурове долото.*

R.T. KARPYK, L.D. PITULEI

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

### THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROCESSES ON THE QUALITY OF FORMATION OF THE ROLLER BITS OF THE DRILLING BITS

*The article presents the issue of obtaining a high-quality composite material on the metallometric basis of a replaceable roller bit of the drilling bits (RBD) using centrifugal casting under the influence of a magnetic field. The work determines the technological factors of influence on the thermal cycle of the composite formation process. For determination of time of partial diffusive dissolution of armator in matrix fusion for the receipt of optimum physic-mechanical properties, in particular, analytically dependence of radius is got taking into account his location in a vertical and horizontal plane. In obedience to the offered analytical dependences the calculation limits of finding of radius are got taking into account his location in a vertical and horizontal plane. Probing influence of thermophysical processes on quality of shaping of composition material of teeth of RBD, certainly range of optimum sizes of armators in a steel matrix, which will provide their placing without spread between itself and necessary adhesive contact for partial dissolution of relit with the purpose of receipt of complex physic-mechanical properties, in particular, maximally possible maintenance of descriptions of durability of armator. Having justified the duration of the required partial dissolution of reinforcement devices in the melt of the matrix and determined the range of their optimal sizes, we can obtain a competitive bit of increased durability since cast composite materials on a metal-on-metal bundle have the resources to achieve this goal.*

*Studying the thermophysical processes of the composite material formation of the bit of the RBD will allow not only to effectively optimise the technological process of formation of the bits of the RBD but also improve its handling in terms of achieving the planned results.*

*Key words: composite material, bit, roller, drilling bit, thermophysical processes, formation.*

#### Вступ

Основний об'єм буріння свердловин різного призначення в нафтогазовидобувній галузі України здійснюється шарошковими буровими долотами (ШБД), робоча частина яких виготовляється з використанням дефіцитних твердих сплавів на основі вольфраму та кобальту. Зменшити використання твердих сплавів можна завдяки розробленню композиційного матеріалу різальної частини бурового інструменту з необхідними фізико-механічними властивостями. Перспективним напрямком забезпечення довговічності шарошок бурових доліт є виготовлення зубків шарошок із зносостійких литих матеріалів на сталій матриці, армованих твердим сплавом реліт під дією магнітного поля.

Розроблення теоретичних засад процесу формоутворення литого композиційного матеріалу зубка на сталій матриці, армованого релітом, відкриває нові потенційні можливості інтенсивного та керованого формування його структури з характеристиками, які в першу чергу залежать від умов подальшої експлуатації бурового інструменту.

Дослідження теплофізичних процесів формоутворення композиційного матеріалу зубка ШБД дозволять не тільки реально оптимізувати технологічний процес зубків ШБД, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів.

#### Основний розділ

Визначення оптимальних параметрів технологічного процесу виготовлення зубків шарошок бурового долота з композиційних матеріалів є неможливим без вивчення теплофізичних процесів, які відбуваються при формуванні виливка у керамічні форми під впливом магнітного поля. При цьому вагомим фактором отримання заготовки зубка ШБД з необхідними фізико-механічними властивостями композиту на металоматричній основі є термічний цикл процесу формоутворення, який визначається наступними основними параметрами:

- об'ємом і температурою залитого матричного металу;
- температурою попереднього підігрівання керамічної ливарної форми;
- співвідношенням геометричних розмірів ливарної оснастки;
- розмірами та кількістю введеного арматора (в даному випадку реліту);
- величиною магнітної індукції.

Вплив температури матричного металу при заливанні в ливарну форму залежатиме від кількості введеного арматора, яка є постійною величиною, та від типорозміру зубка ШБД, а також заданих його

функціональних характеристик.

Оптимальний термічний цикл технологічного процесу виготовлення композиційних зубків повинен забезпечити розчинність армітора в матриці на 14–18% [1]. На розчинність армітора в матриці впливає величина перегрівання розплаву, яка є постійною величиною для певного типорозміру зубка.

При введенні арміторів у матрицю слід врахувати механічні, теплові та фізико-хімічні фактори їх впливу на отримання необхідної структури композиційного матеріалу зубка ШБД [2, 3, 4].

Механічний вплив арміторів на рідку матрицю характеризується великою швидкістю відводу теплоти від матричного розплаву, внаслідок чого спостерігається його загальне переохолодження. При цьому армітори стають центрами кристалізації в об'ємі розплаву, що спонукає до зародження нових центрів кристалізації.

При тепловому впливі при введенні арміторів у рідку матрицю навколо них утворюється оболонка з матричного розплаву, плакуючи їх. Через певний період часу плакуюча оболонка під дією температури матричного розплаву розчиняється. По досягненню певного переохолодження плакуючої зони у ній утворюються центри кристалізації.

При дослідженні фізико-хімічних факторів впливу арміторів на отримання необхідної структури композиційного матеріалу зубків ШБД слід звернути увагу на їх модифікуючу дію в процесі кристалізації, адже процес легування обумовлений не тільки теплообміном, а також і масообміном. Як доведено в роботах [5, 6], тривалість окислення та часткового розчинення арміторів при температурах перегрівання нижче температури плавлення армітора визначається дифузійним розчиненням, тобто швидкість розчинення супроводжується процесом насичення цього шару домішками, концентрація яких відповідає температурі ліквідус розплаву.

Тривалість необхідного розчинення армітора в матричному розплаві для отримання необхідної структури композиційного матеріалу зубка визначається за формулою:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \tag{1}$$

Де  $\tau_1$  – час плакування армітора матричним розплавом;  
 $\tau_2$  – час розчинення плакуючої оболонки;  
 $\tau_3$  – час часткового дифузійного розчинення армітора [7].

При цьому були прийняті наступні припущення:

- армітор має сферичну форму;
- армітори рівномірно розподілені в об'ємі матриці;
- під час введення арміторів у матрицю тепловідвід через стінки ливарної форми відсутній.

Час плакування армітора та час розчинення плакуючої оболонки визначаються за емпіричними формулами [8].

Для визначення часу часткового дифузійного розчинення армітора в матричному розплаві для отримання оптимальних фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу зубка ШБД необхідно знати радіус армітора, оскільки:

$$\tau_3 = \frac{r\rho_a}{\alpha_c} \left( \frac{2,3C}{3} \lg \frac{T_3 - T_0}{T_3 - T_{co}} + \frac{2L}{T_3 - T} \right) \tag{2}$$

де  $r$  – радіус армітора;  
 $\rho_a$  – густина армітора;  
 $\alpha_c$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі;  
 – теплоємність армітора;  
 $T_3$  – температура заливання матричного розплаву;  
 – температура завершення кристалізації матричного розплаву;  
 $L$  – питома теплота часткового розплавлення армітора.

Застосування магнітного поля при реалізації технологічного процесу виготовлення зубків ШБД з композиційного матеріалу забезпечує рівномірний розподіл арміторів в розплаві матриці, впливаючи на їх переміщення в процесі кристалізації.

Оскільки для визначення часу часткового дифузійного розчинення армітора необхідно знати його радіус, скористаємось умовою його відносного руху в розплаві.

Розглянемо випадок, коли армітор знаходиться на поверхні стінки ливарної форми під впливом магнітного поля при відцентровому литві (рис. 1).

Врахуємо сили, які діють на армітор:

$$\sum X_i \Rightarrow -F - N + F_i \cos(\alpha + \beta) - F_r \sin(\beta - \alpha) = 0, \tag{3}$$

$$\sum Y_i \Rightarrow S + F_b - F_i \sin(\alpha + \beta) - F_r \cos(\beta - \alpha) = 0, \tag{4}$$

де  $F$  – сила тертя армітора по поверхні стінки ливарної форми;

$N$  – лобовий тиск розплаву на армітор;  
 $F_i$  – сила інерції розплаву;  
 $F_r$  – дотична складова сили магнітного поля;  
 $\alpha$  – кут конічної частини зубка;  
 $\beta$  – кут, який визначає положення армітора відносно осі ливарної форми;  
 $F$  – сила, що виштовхує;  
 $S$  – нормальна реакція поверхні форми.  
 Визначимо нормальну реакцію поверхні ливарної форми:

$$S = -F_b + F_i \sin(\alpha + \beta) + F_r \cos(\beta - \alpha). \quad (5)$$

Також визначимо силу тертя армітора по поверхні стінки ливарної форми:

$$F = f(F_i \sin(\alpha + \beta) - F_b + F_r(\beta - \alpha)), \quad (6)$$

оскільки

$$F = f \times S,$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя армітора по поверхні стінки ливарної форми.

Силу, що виштовхує запишемо у вигляді:

$$F_b = a \times N, \quad (7)$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності;

$N$  визначається за формулою:

$$N = 6\pi\gamma v r,$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості розплаву;

$v$  – середня колова швидкість розплаву, що омиває армітор;

$r$  – радіус армітора.

У свою чергу середня колова швидкість розплаву, що омиває армітор, визначається за формулою:

$$v = \omega R,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість розплаву;

$R$  – віддаль від осі обертання ливарної форми до армітора, який розташований на поверхні стінки ливарної форми.

Силу інерції запишемо у вигляді:

$$F_i = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_a - \rho) \frac{v^2}{R},$$

де  $\rho_a$  – густина армітора;

$\rho$  – густина матричного розплаву.

Використавши формули (2) та (5), визначимо радіус армітора, скориставшись умовою рівноваги сил:

$$\begin{aligned} & f[F_i \sin(\alpha + \beta) - F_b + F_r \cos(\beta - \alpha)] - N + F_i \cos(\alpha + \beta) - F_r(\beta - \alpha) - \\ & - \frac{4}{3} f \pi r^3 (\rho_a - \rho) \omega^2 R \sin(\alpha + \beta) + f F_r \cos(\beta - \alpha) + 6\pi a f \gamma \omega R_p r - \\ & - 6\pi \gamma \omega R_r + \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_a - \rho) \omega^2 R \cos(\alpha + \beta) - F_r \sin(\beta - \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (7) матиме вигляд:

$$r^3 + pr + q = 0, \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} p &= \frac{9(af - 1)}{2\omega(\rho_a - \rho)[\cos(\alpha + \beta) - f \sin(\alpha + \beta)]}, \\ q &= \frac{3[f \cos(\beta - \alpha) - \sin(\beta - \alpha)]NR - 1B^2(R - R)^2}{\omega^2 R(\rho_a - \rho)[\cos(\alpha + \beta) - f \sin(\alpha + \beta)]\rho}. \end{aligned}$$

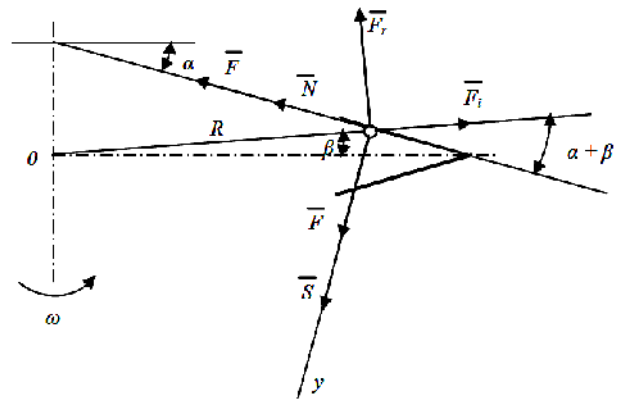


Рис. 1. Схема сил, діючих на армітор у матриці при відцентровому литві під впливом магнітного поля, у горизонтальній площині

$B$  – магнітна індукція;  
 $R$  – радіус ливарної форми.

Виходячи з оптимальних вихідних параметрів технологічного процесу виготовлення зубків ШБД коли виконується умова  $\frac{q^2}{4} + \frac{r^3}{27} > 0$  рівняння (8) має у розв’язку єдиний дійсний корінь:

$$r = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}} - \frac{q}{2}} + \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}} - \frac{q}{2}}.$$

Розглянемо випадок, коли армітор знаходиться на поверхні стінки ливарної форми при відцентровому литві під дією магнітного поля у вертикальній площині (рис. 2).

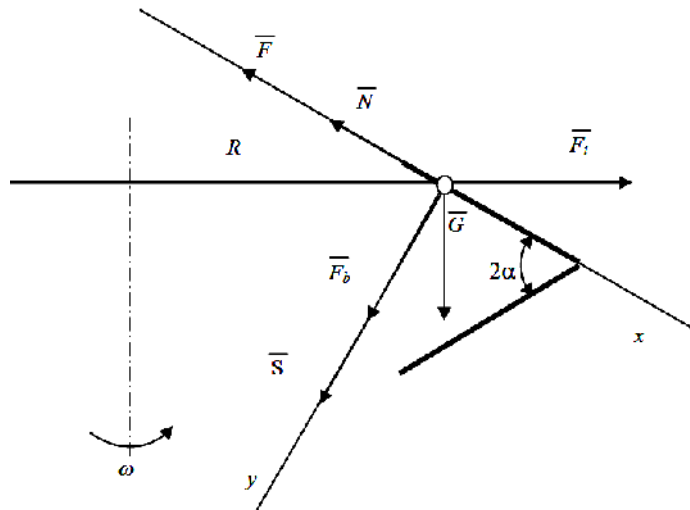


Рис. 2. Схема сил, діючих на армітор у матриці при відцентровому литві під впливом магнітного поля, у вертикальній площині

Рівняння рівноваги сил, діючих на армітор у розплаві під впливом магнітного поля, який знаходиться на поверхні конусоподібної стінки ливарної форми, матиме вигляд:

$$\sum X_i = 0 \Rightarrow -F - N + F_i \cos \alpha + G \sin \alpha = 0, \tag{10}$$

$$\sum Y_i = 0 \Rightarrow F_b + S + G \cos \alpha - F_i \sin \alpha = 0, \tag{11}$$

де  $G$  – сила тяжіння армітора ( $G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a q$ ).

З рівняння (10) визначимо нормальну реакцію поверхні ливарної форми:

$$S = F_i \sin \alpha - G \cos \alpha - F_b. \tag{12}$$

Сила тертя армітора по поверхні стінки ливарної форми має вигляд:

$$F = f(F_i \sin \alpha - G \cos \alpha - F_b). \tag{13}$$

Отже, рівняння рівноваги сил, діючих на армітор у розплаві матриці під впливом магнітного поля, який знаходиться на поверхні конусоподібної стінки ливарної форми, можна записати як:

$$-f(F_i \sin \alpha - G \cos \alpha - F_b) - N + F_i \cos \alpha + G \sin \alpha = 0, \tag{14}$$

$$-f \left[ \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_a - \rho) \omega^2 R \sin \alpha - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a \cos \alpha - 6\pi a \gamma \omega R r \right] -$$

$$-6\pi \gamma R r + \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_a - \rho) \omega^2 R \cos \alpha + \frac{4}{3} \pi q r^3 \rho_a \sin \alpha = 0. \tag{15}$$

Поділивши доданки у рівнянні (12) на  $2\pi r^3$  та зробивши перетворення, отримаємо:

$$\frac{2}{3} r^2 (\rho_a - \rho) \omega^2 R (\cos \alpha + f \sin \alpha) + \frac{2}{3} r^2 \rho_a q (f \cos \alpha + \sin \alpha) = 3\pi \gamma \omega R (1 - af). \tag{16}$$

Звідси

$$r = \sqrt{\frac{4,5\pi\gamma\omega(1-af)}{\omega^2(\rho_a - \rho)(\cos\alpha - f\sin\alpha) + \rho_a q(f\cos\alpha - \sin\alpha)}}$$

При значеннях густини армітора  $\rho_a = 16,3 \text{ г/см}^3$ ; густини матриці  $\rho_i = 7,1 \text{ г/см}^3$ ; коефіцієнту тертя  $f = 0,05$ , в діапазоні температур солідуса-ліквідуса та при оптимальних параметрах технологічного процесу (частоті обертання ливарної форми  $n = 400 - 500 \text{ об/хв}$ , радіусі ливарної форми  $R_o = 0,12 - 0,18 \text{ м}$ , магнітній індукції  $B = 0,06 \text{ Тл}$ , згідно розрахунків радіус армітора коливається в межах  $0,85 - 1,8 \text{ м}$ .

### Висновки

Дослідивши вплив теплофізичних процесів на якість формоутворення композиційного матеріалу зубків ШБД, визначено діапазон оптимальних розмірів арміторів у сталій матриці, який забезпечить їх розміщення без дотикання між собою та необхідну адгезійну взаємодію для часткового розчинення реліту з метою отримання комплексу фізико-механічних властивостей, зокрема, максимально можливого збереження характеристик міцності армітора.

Аналізуючи, якими параметрами технологічного процесу формоутворення композиційного зубка можна оптимізувати структуру матеріалу робочої частини зубка ШБД, досягнемо послідовної реалізації сучасного наукового підходу «від властивостей матеріалу до властивостей конструкції».

### Література

1. Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. – Львов : Выща ШК., Изд-во при Львов. университете, 1989. – 208 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
3. Рабинович Б.В. Литейные свойства сплавов / Б.В. Рабинович, В.М. Волков. – К. : ИПЛ АН УССР, 1972. – 305 с.
4. Пітулей Л.Д. Дослідження отримання оптимальної структури віброармованої зони зубків шарошок бурових доліт / Л.Д. Пітулей, Р.Т. Карпик // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1(221). – С. 33–35.
5. Панасюк А.Д. Физико-химические основы контактного взаимодействия в системе тугоплавное соединение - жидкий металл / А.Д. Панасюк // Неорганические материалы. – 1979. – Т. 15 (4). – С. 569–573.
6. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов / Э.М. Гольдфарб. – М. : Metallurgizdat, 1967. – 440 с.
7. Кривуша Ю.В. Некоторые вопросы электромагнитного воздействия на тонкую структуру отливок / Ю.В. Кривуша, А.Э. Микельсон, И.А. Повх // Магнитная гидродинамика. – 1974. – № 2. – С. 116–120.
8. Шарыпов Л.З. Исследование кинетики растворения релита в стали 20ХН3А / Л.З. Шарыпов, В.В. Хлынов, В.И. Ишымов // Технология и оборудование сварочных процессов. – 1970. – № 76. – С. 135–140.

### References

1. Bugaj Y.N., Vorobjov I.V. Centrobezhno-armirovannyj' porodorazrushayushij burovoj instrument. L'vov: Vyshha Shk, 1989, 208 p.
2. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. Teploobmen i trenie v turbulentnom pograničnom sloe. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 320 p.
3. Rabinovich B.V., Volkov V.M. Litejnye svojstva splavov, Kiev, IPL AN USSR, 1972, 305 p.
4. Pitulei L.D., Karpuk R.T. Doslidzhennia otrimannia optimalnoi struktury vibroarmovanoi zony zubkiv sharoshok burovjkh dolit, *Herald of Khmelnytskyi National University*, 2015, No.1(221), pp.33-35.
5. Panasiuk A.D. Fiziko-ximicheskie osnovy' kontaktnogo vzaimodejstviya v sisteme tugoplavkoe soedinenie - zhidkij metall, *Neorganicheskie materialy'*, 1979, Vol.15, No. 4, pp. 569- 573.
6. Gol'dfarb E.M. Teplotexnika metallurgicheskix processov. Moscow, Metallurgizdat, 1967, 440 p.
7. Krivusha Yu.V., Mikel'son A.E., Povh I.A. Nekotory'e voprosy' e'lektromagnitnogo vozdeystviya na tonkuyu strukturu otlivok, *Magnitnaya gidrodinamika*, 1974, No. 2, pp. 116-120.
8. Shary'pov L.Z., Xly'nov V.V., Ishy'mov V.I. Issledovanie kinetiki rastvoreniya relita v stali 20ХN3А, *Tehnologiya i oborudovanie svarochny'x processov*, 1970, No. 76, pp.135–140.

Рецензія/Peer review : 26.04.2018 р.

Надрукована/Printed : 12.05.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Панчук В.Г.