

УДК 621.74.046

І.О. Шуляр, С.Л. Борушак*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ
НА СТІЙКІСТЬ ПОРОДОРУЙНІВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДОЛІТ**

Розглядається проблема дослідження впливу на стійкість робочої частини бурових доліт способу отримання його породоруйнівних елементів. Досліджено породоруйнівні елементи виготовлені об'ємним армуванням у нерухомі форми, відцентровим армуванням у форми, що обертаються навколо однієї або двох осей. Встановлено вплив законів розподілу твердосплавних частинок на їх концентрацію в перехідній зоні. Встановлено показники абразивної, ударно-абразивної та ударно-втомної стійкості і їх залежності від технологічних параметрів виготовлення породоруйнівних елементів бурових доліт.

Ключові слова: породоруйнівний елемент, технологічні параметри, знос, ударно-абразивна, ударно-втомна стійкість.

И.О. Шуляр, С.Л. Борушак**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОЛОТ**

Рассматривается проблема исследования влияния на стойкость рабочей части буровых долот способа получения его породоразрушающих элементов. Исследованы породоразрушающие элементы изготовленные объемным армированием в неподвижные формы, центробежным армированием в формы, вращающиеся вокруг одной или двух осей. Установлено влияние законов распределения твердосплавных частиц на их концентрацию в переходной зоне. Установлены показатели абразивной, ударно-абразивной и ударно-усталостной стойкости и их зависимости от технологических параметров изготовления породоразрушающих элементов буровых долот.

Ключевые слова: породоразрушающий элемент, технологические параметры, износ, ударноабразивная, ударно-усталостная стойкость.

I. Shuliar, S. Boruchak**STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DURABILITY
OF ROCK-CUTTING ELEMENTS OF BITS**

The problem of research the effect on quality indicators of the working drill bits parts and the way of getting its cutters is discussed. It was investigated, the cutters are made with reinforcement elements in the fixed bulk form centrifugal reinforcement in the form of rotating around its vertical axis and shaped, rotating around two mutually perpendicular axes. The experiments were made using casting equipment. The dependence of the concentration of the solid alloy from the heating temperature and the speed of the mold as well as the number of slave carbide were explored. The effect of the laws of distribution of carbide particles on their concentration in the transition zone from the working to the shank of the cutter was established. Indicators of abrasive, shock - an abrasive and shock - the fatigue life and their dependence on the technological parameters of manufacturing cutters drill bits were set.

Keywords: rock-breaking element, process parameters, wear, shock – abrasion, impact - fatigue resistance.

Постановка проблеми. Продуктивність буріння нафтових і газових свердловин в значній мірі залежить від надійності, продуктивності і довговічності бурових шарошкових доліт. Залежно від типу долота функцію породоруйнівних елементів виконують зуби, виготовлені як одне ціле з шарошкою або зубці, що запресовуються у тіло шарошки.

Зазвичай у промисловості зуби шарошок, доліт, призначених для розбурювання м'яких і середньом'яких порід, отримують шляхом фрезерування западин між зубами на кованих заготовках шарошок або литвом заготовок шарошок в оболонкові форми чи кокіль [1]. Для надання зубам шарошок необхідної твердості і зносостійкості їхню робочу поверхню армують зернистим карбідом вольфраму методом індукційного [2–4] або газополуменевого наплавлення [5, 6]. Отримані таким чином зуби не забезпечують високих експлуатаційних характеристик доліт з тієї причини, що при зменшенні товщини армованого шару останній під впливом динамічних навантажень інтенсивно сколюється з поверхні зубів, що спричинює вихід з ладу бурового інструменту [7].

Шарошки доліт, призначених для буріння твердих порід, оснащують суцільними твердосплавними зубцями з голівкою сферичної або клиноподібної форми. Зубці виготовляють методом порошкової металургії з карбідів вольфраму та порошку металічного кобальту. Циліндричною частиною зубці запресовують у тіло шарошки, що має високу пластичність, і тільки поверхневий шар насичують вуглецем і цементують. В процесі роботи долота під дією знакозмінних динамічних навантажень зубці розтріскуються або розбивають отвір в тілі шарошки і випадають. В результаті не тільки шарошка втрачає свої експлуатаційні властивості, але й частинки

зруйнованих зубців на вибої призводять до пошкодження металевих частин долота [7].

Запропонована нами вдосконалена технологія виготовлення породоруйнівних елементів бурових та породоруйнюючих інструментів об'ємним армуванням в процесі відцентрового литва [8–10] забезпечує цим елементам комплексні експлуатаційні показники - високу твердість і зносостійкість робочої зони у поєднанні з пластичністю основи цих елементів. Вищезгадана технологія містить в собі операції ливарного виробництва, армування в процесі литва, термообробки, механічної обробки виливків з метою отримання потрібної точності і шорсткості і т.п. Водночас технологія об'ємного армування може бути застосована для отримання високих експлуатаційних характеристик не тільки бурових доліт, а також інших інструментів, що працюють в умовах значних динамічних і статичних навантажень в присутності абразивного середовища.

Саме тому виникла необхідність дослідження впливу способу отримання заготовки та його технологічних параметрів на показники стійкості робочої частини інструментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що основними показниками стійкості заготовок породоруйнівних елементів доліт, отриманих за технологією об'ємного армування в процесі відцентрового литва, є концентрація армуючих частинок в об'ємі армованої зони, конфігурація цієї зони та її розміщення в об'ємі виробу, ступінь легування металозв'язки елементами армуючих частинок. В кінцевому результаті перелічені характеристики визначають твердість зубів та зубців шарошок, їхню механічну міцність та стійкість до абразивного і ударно-абразивного спрацювання на вибої [1, 7]. Попередніми дослідженнями [11–14] було виявлено загальні закономірності процесу об'ємного армування в процесі відцентрового литва і залежності параметрів якості породоруйнюючих елементів доліт від основних параметрів згаданого процесу. Встановлено, що частота обертання ливарної форми та її температура, температура рідкого металу і маса армуючих частинок першочергово впливають на конфігурацію власне армованої зони в тілі вилівка. Розмір армуючих частинок першочергово визначає ступінь їх розчинення в рідкому металі і, відповідно, такі фізико – механічні властивості металічної матриці, як пластичність і твердість, а отже і здатність утримувати армуючі частинки в тілі інструменту. Розроблена нами технологія і устаткування для її реалізації дозволяють суттєво розширити можливості вже відомого методу відцентрового армування. Такими вдосконаленнями є можливість зміни положення осі обертання ливарної форми в процесі литва, регулювання швидкості та місця введення армуючих частинок в рідкий метал, можливість зміни кінематичних параметрів процесу [15–17]. Очевидно, що за допомогою вдосконаленої технології можна отримувати широкий спектр виробів для оснащення ними не тільки бурових доліт і породоруйнюючих інструментів, але й робочих елементів обладнання гірничозбагачувальної промисловості, яке призначене для подрібнення породи. Отже, детальне дослідження залежності стійкості від технологічних параметрів процесу виготовлення є запорукою ефективного застосування розробленої технології.

Постановка завдань. Метою даної роботи є дослідження впливу способу отримання заготовки, його технологічних параметрів та характеристик армованої зони на стійкість породоруйнюючих елементів бурових доліт. При цьому передбачається проведення експериментів з використанням розробленого нами ливарного обладнання, встановлення показників абразивної, ударно-абразивної та ударно-втомної стійкості робочої зони породоруйнюючих елементів доліт.

Викладення основного матеріалу. Нами досліджувались зубці шарошок бурових доліт, виготовлені способами:

- об'ємного армування виливків у нерухомих формах;
- відцентрового армування у формах, що обертаються навколо вертикальної осі;
- відцентрового армування у формах, що обертаються навколо двох взаємно перпендикулярних осей.

Експлуатаційні показники бурового інструменту, одержаного відцентровим армуванням, першочергово залежать від якості армованої зони. Комплексним показником якості армованої зони є концентрація твердого сплаву в ній.

Основні закономірності впливу параметрів розробленого процесу армування на концентрацію твердого сплаву реліт наступні. Переважаючий вплив на якість армування має температура нагрівання форми, маса і грануляція реліту.

Процес реалізується в неширокому інтервалі температур від 470К до 610К. Зниження температури форми до 293К супроводжується різким зниженням концентрації реліту до 35 – 40%, оскільки термічний цикл процесу армування дуже малий і кристалізація металу в армованій зоні відбувається дуже швидко. Підвищення нагрівання форми до 650К – 700К викликає швидке розчинення гранул реліту, тому його концентрація зменшується до 40 – 45 %, а сама армована

зона стає високолегованою із значним вмістом карбідів. Найбільшу концентрацію твердого сплаву до 62% досягається при використанні реліту грануляцією 1,0 мм, оскільки зменшення розмірів до 0,63 мм супроводжується їх швидким розчиненням, а збільшення до 1,6 мм викликає швидку кристалізацію металозв'язки (рис. 1,а).

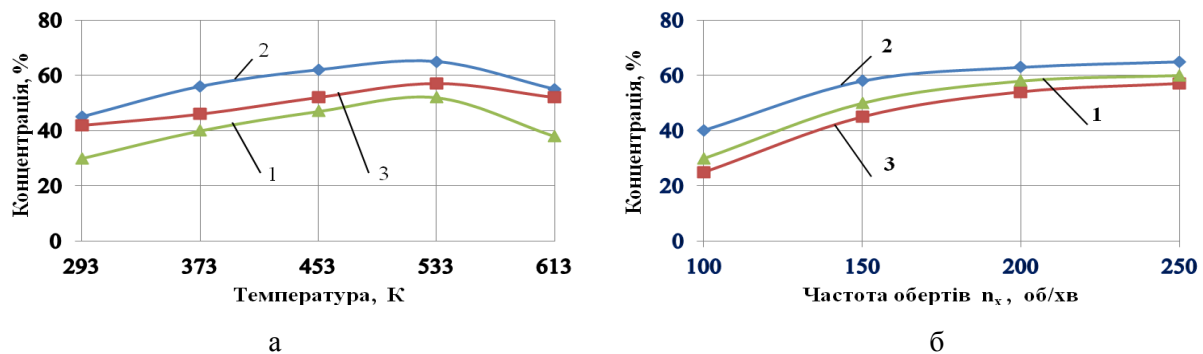


Рис. 1. Вплив температури нагрівання (а) та частоти обертання форми навколо горизонтальної осі (б) на концентрацію реліту в армованій зоні при різних його грануляціях: 1 - 0,63 мм; 2 - 1,0 мм; 3 - 1,6 мм

Співвідношення частот обертання ливарної форми суттєво впливає на конфігурацію одержаної армованої зони, тому дослідження проводилися при фіксованому оптимальному значенні частоти обертання відносно вертикальної осі (рис. 1,б). Це значення встановлено попередніми методичними експериментами. Характер впливу частоти обертання форми відносно горизонтальної осі суттєво залежить від грануляції використовуваного реліту. Максимальної концентрації твердого сплаву вдається досягнути при грануляції 1,0 мм. Легше управляти процесом при використанні гранул розміром 1,6 мм. Менш чутливий процес до зміни частоти обертання навколо горизонтальної осі для грануляції 0,63 мм, оскільки в цьому випадку переважає вплив в'язкості металу матриці, який кристалізується. Зниження частоти обертання менше 150 хв^{-1} призводить до значного зниження концентрації реліту в армованій зоні. Збільшення частоти обертання понад 300 хв^{-1} призводить до підвищення концентрації твердого сплаву і зменшення відсоткового вмісту металозв'язки. Із зменшенням частоти обертання форми відносно вертикальної осі нижче встановленого оптимуму, процес армування стає нестабільним і важкокерованим, а з її збільшенням понад 800 хв^{-1} практично неможливо одержати потрібну конфігурацію армованої зони в об'ємі вилівка, оскільки бокові сторони практично не армуються.

Зміна кількості введеного реліту при армуванні досить суттєво визначає його концентрацію в армованій зоні (рис. 2) хоча найбільшої концентрації досягається при грануляції 1.0 мм і дещо меншої – при 1,6 мм. Зменшення кількості введеного реліту знижує його концентрацію на 12 – 15 % з одночасним звуженням армованої зони, а збільшення кількості гранул понад встановлений оптимум супроводжується різким падінням концентрації на 25 – 40 % і збільшенням загального об'єму армування. Очевидним поясненням цьому є зменшення часу кристалізації металу в зоні армування і повільне проходження гранул до периферійних об'ємів вилівка.

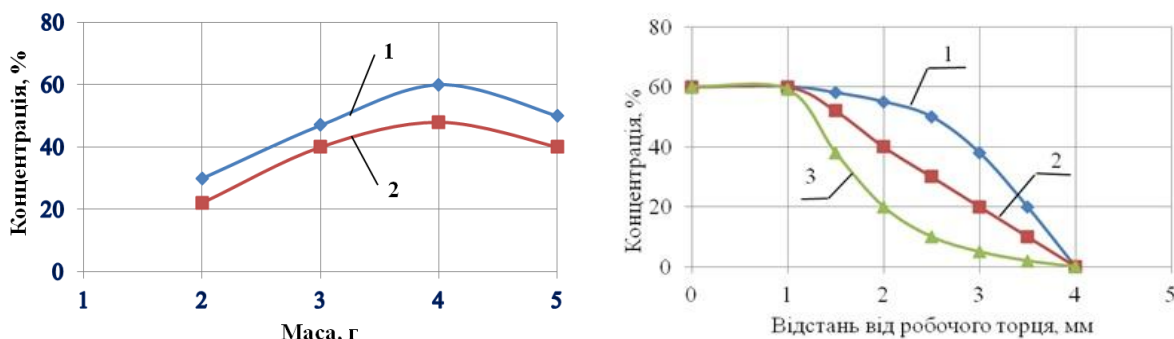


Рис. 2. Вплив маси введеного реліту на його концентрацію в армованій зоні при грануляції: 1 – 1,0 мм; 2 – 1,6

Рис. 3. Розподіл концентрації твердого сплаву в сталевій матриці вздовж осі зубка в напрямку від робочого торця до хвостової частини: 1 – за нелінійним законом зі спадаючим градієнтом; 2 – за лінійним законом; 3 – за нелінійним законом із зростаючим градієнтом

Змінюючи основні технологічні параметри можна досягнути розподілу концентрації армуючих частинок в армованій зоні, які б підлягали певним законам розподілу. Теоретично обґрунтовано, що концентрація армуючих частинок зменшується в напрямі від робочого торця до хвостової частини за: нелінійним законом із спадаючим градієнтом, лінійним законом, нелінійним законом із зростаючим градієнтом (рис. 3). На розподіл напружень в тілі зубця найліпше впливає розподіл концентрації армуючих частинок, який змінюється за нелінійним законом із спадаючим градієнтом.

Абразивне зношування визначає показники роботи породоруйнівних елементів і довговічність бурового долота в цілому. Дослідження абразивного зношування породоруйнівних елементів проводилися для комбінованих зубців по стандартних методиках в порівнянні із серійними, виготовленими із твердих сплавів ВК8-ВК і ВК11-ВК, які сьогодні використовуються на Дрогобицькому долотному заводі, а також з поверхнево-армованими зубцями.

Найперше ми дослідили залежність величини абразивного зношування від концентрації армованих частинок (рис. 4). Для зубців характерна лінійна залежність абразивного зношування від концентрації твердого сплаву і вона найменша при концентрації – 60 %. В подальшому для різних досліджень вибирали зразки з даною концентрацією. Залежність величини абразивного зношування зразків від вибраного шляху показана на рис. 5. Для зубків, одержаних різними способами, характерна лінійна залежність зношування в залежності від шляху тертя, але величина зношування і інтенсивність зношування для всіх способів різні.

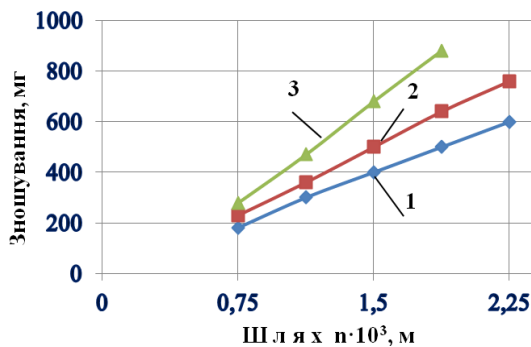


Рис. 4. Зношування зубців при різних концентраціях твердого сплаву: 1 – 60%; 2 – 50%; 3 – 40%

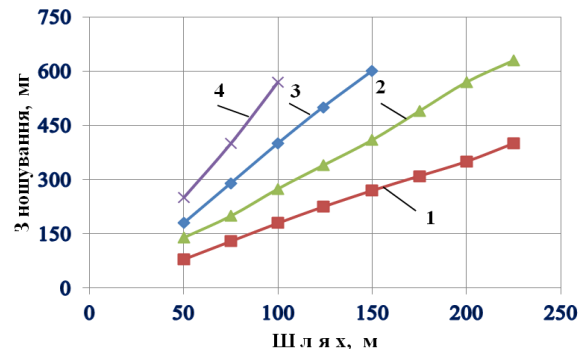


Рис. 5. Зношування зубців при терті по абразивному кругу: 1 - серійні з твердого сплаву ВК8-ВК; 2 - серійні з твердого сплаву ВК11-ВК; 3 – відцентрово армовані з двома взаємно перпендикулярними осями; 4 – поверхнево армовані

Одержані результати випробувань при абразивному зношуванні взаємозв'язані з даними, одержаними при вивченні впливу технологічних параметрів процесу армування на концентрацію твердого сплаву в армованій зоні. Залежність інтенсивності абразивного зношування від концентрацій зерен реліту різних фракцій, які вводяться при армуванні показана на рис. 6.

Збільшення концентрації більш м'якої фракції призводить до збільшення абразивного зношування за одиницю часу, а отже до зменшення стійкості до абразивного зношування. Дослідження свідчать, що вагове зношування за одиницю часу різко зменшується в середньому в 1,8 – 2 рази із збільшенням концентрації твердого сплаву в армованій зоні з 30 до 50–60 %.

Вибором оптимальної грануляції реліту можна підвищити управління якістю армування і, відповідно, інтенсивністю зношування зубців зміною температури нагрівання ливарної форми в межах інтервалу значень реалізації процесу армування (рис. 7). При нижніх значеннях вказаного інтервалу температур зміна грануляції реліту від 0,63 мм до 1,6 мм знижує інтенсивність зношування на 27 % переважно за рахунок підвищення концентрації зерен і зміни конфігурації армованої зони, оскільки скорочується термічний цикл процесу. Зменшення грануляції реліту з одночасним нагріванням форми до 650 К різко знижує стійкість зубців, що пов'язане з підвищеною розчинністю твердого сплаву і зменшенням середньої мікротвердості армованої зони. Правильний вибір грануляції реліту поєднанні з оптимальними значеннями температури нагрівання форми 540 – 550 К знижує інтенсивність зношування зразків на 40 % за рахунок високої концентрації твердого сплаву і

оптимальної мікроструктури металозв'язки.

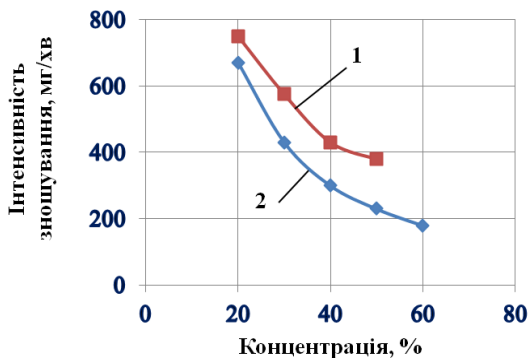


Рис. 6. Вплив концентрації твердого сплаву на величину інтенсивності абразивного зношування при грануляції: 1 - 0,63 мм; 2 - 1,0 мм

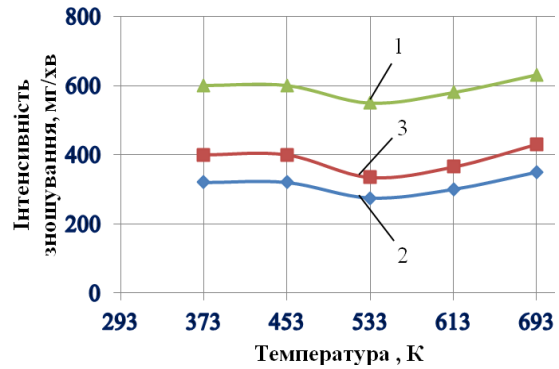


Рис. 7. Залежність інтенсивності абразивного зношування від температури нагрівання форми зубців, армованих релітом різної грануляції: 1 - 0,63 мм; 2 - 1,0 мм; 3 - 1,6 мм

Результати абразивного зношування поверхнево-армованих, композиційно-армованих і серійних тврдосплавних зубців наведені на рис. 8.

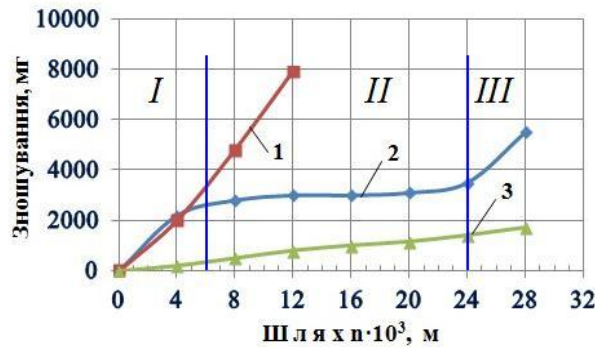


Рис. 8. Залежність абразивного зношування від пройденого шляху при терті: 1 — поверхнево-армовані; 2 - відцентрово армовані; 3 - серійні тврдосплавні

Абразивна стійкість відцентрово армованих породоруйнівних елементів в 2 – 5 разів вища, ніж поверхнево-армованих, але в 2 – 2,5 рази нижча стійкості серійних тврдосплавних зубців. Збільшення абразивної стійкості відцентрово армованих породоруйнівних елементів пояснюється більшою площею контакту армованої зони з абразивним кругом при зношуванні, яка в процесі випробувань збільшується, в той час, як у поверхнево-армованих породоруйнівних елементів залишається постійною.

Залежність абразивного зношування поверхнево-армованих зразків від пройденого шляху при терті носить лінійний характер, лінійний характер зношування і тврдосплавних зразків. Крива зношування відцентрово армованих зразків складається з трьох основних ділянок: I – припрацювання, яка утворюється при зношуванні послабленої і слабоармованої зони; II – основного зношування – при зношуванні армованої зони; III – катастрофічного зношування утворюється при зношуванні слабо легованої і основного металу зон.

Відомо, що твердий сплав, маючи підвищену твердість, а значить і абразивну стійкість погано витримує знакозмінні згинаючі ударні навантаження. А саме такий характер навантаження оснащення породоруйнівного інструменту. Це повністю підтверджено результатами проведених порівняльних випробувань тврдосплавного і відцентрово армованих породоруйнівних елементів при динамічному знакозмінному їх навантаженні, результати яких наведені нижче.

Результати проведених досліджень наведені на рис. 9. Найбільший вплив на ударно-абразивне зношування має грануляція використовуваного для армування реліту. Так стійкість до ударно-абразивного зношування зразків поверхнево-армованих релітом грануляцією 1,6 мм на 10–12 % нижча, ніж у відцентрово армованих цієї грануляцією релітом. Ударно-абразивна стійкість відцентрово армованих релітом грануляцією 1,0 мм на 40 – 45 % вища, ніж у зразків, армованих релітом грануляцією 1,6 мм, і на 8 – 10 % вища, ніж в поверхнево-армованих зразків грануляцією

1,0 мм і в три рази перевищує стійкість твердосплавних.

Дослідження залежності ударно-абразивного зношування від концентрації твердого сплаву в армованій зоні показує, що при підвищенні концентрації від 25 % до 60 % інтенсивність зношування зразків значно зменшується (рис. 10).

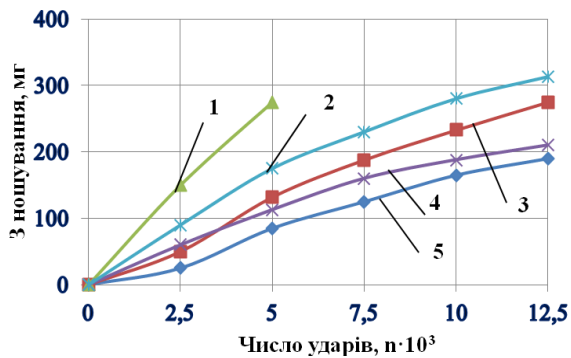


Рис. 9. Залежність ударно-абразивного зношування від числа ударів при енергії удару 10 Дж: 1 - серійні з твердого сплаву; 2 - поверхнево-армовані релітом грануляцією 1,6 мм; 3 - відцентрово армовані релітом грануляцією 1,6 мм; 4 - поверхнево-армовані релітом грануляцією 1,0 мм; 5 - відцентрово армовані релітом грануляцією 1,0 мм

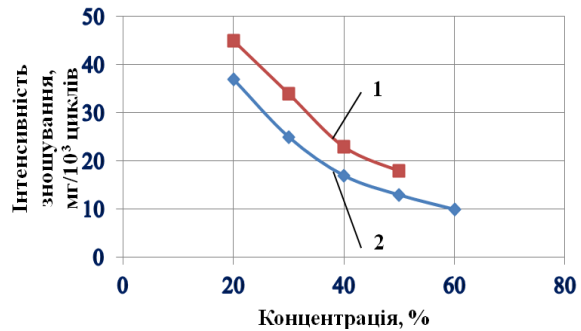


Рис. 10. Вплив концентрації твердого сплаву на ударно-абразивну стійкість при грануляції: 1 - 0,63 мм; 2-1,0 мм

Візуальне вивчення поверхні зношування показує менше сколювання реліту по границях зерен. Викришування зерен по периферійним ділянкам торців зустрічається рідко (рис. 11).

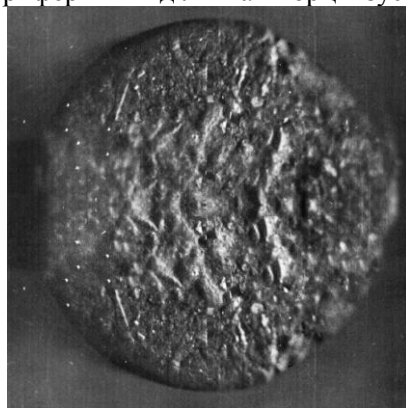


Рис. 11. Характер ударно-абразивного зношування армованої зони відцентрово армованого зразка

Результати ударно-втомних випробувань серійних твердосплавних, поверхнево-армованих і відцентрово армованих зубців представлені на рис. 12, а та рис. 12, б.

Основним видом руйнування твердосплавних зубців є втомне крихке руйнування, а саме сколювання і ламання зубців. Це пояснюється знакозмінним динамічним характером прикладання навантаження. Спостереження в процесі експериментів показали, що в твердосплавному зубці відбувається зародження тріщин найчастіше в місці концентрацій напружень, викликаних запресуванням (в місці входу зубця в корпус шарошки). Втомні тріщини в подальшому ведуть до сколювання твердого сплаву. При випробуваннях, сколювання твердосплавних зубців спостерігається на першій тисячі циклів (рис. 12, а), що веде до різкого вагового зношування, але виліт зубця при цьому зберігається незмінним. Збільшення циклів навантаження веде до різкого зменшення розміру твердосплавного зубця, після 2000 ударів розмірний знос доходить до катастрофічного (рис. 12, б) і робоча частина зубця повністю відколюється. В поверхнево-армованого зубця на еластичній основі знаходиться армований шар з підвищеною крихкістю, який в процесі випробувань відколюється.

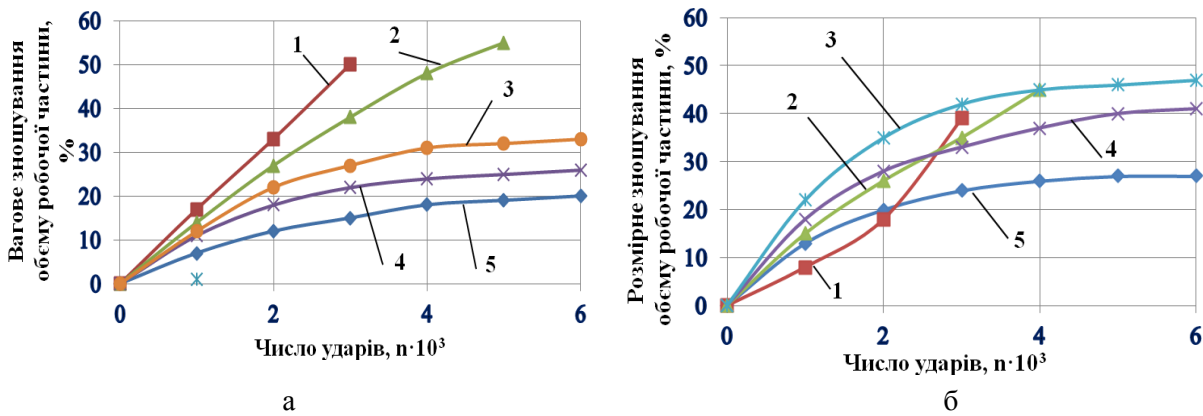


Рис. 12. Залежність ударно-втомного вагового (а) та розмірного (б) зносу від числа ударів зубців: 1 - тврдосплавний; 2 - поверхнево-армований; 3 - віброармований; 4 - відцентрово армований без ХТО; 5 - відцентрово армований з ХТО

Для відцентрово армованого не термообробленого породоруйнівного елемента в початковий момент випробувань характерне пластичне деформування поверхні зубця, а саме послаблення слабоармованої зони. Тому відбувається, в основному, розмірне зношування, а не вагове. З ростом числа циклів навантаження оголюється зона армування, проте, під дією навантажень вона переміщається всередину зубця, який продовжує пластично деформуватися. В зв'язку з цим, дещо збільшується вагове, однак, значно зростає розмірне зношування. Зношування породоруйнівного елемента відбувається із притупленням.

Дещо інший характер зношування відцентрово армованих породоруйнівних елементів, що пройшли хіміко-термічну обробку. В початковий момент випробувань відбувається зародження тріщин в цементованому шарі металу поверхні зубця. Із збільшенням циклів цементований шар сколюється, оголюючи армовану зону, при цьому значно росте вагове зношування, але виліт зубця зберігається, що стабілізує розмірне зношування. Зона армування, яка опинилася на поверхні не вдавлюється всередину зубця, зношування відбувається із загостренням. Після $4 \cdot 10^3$ циклів випробувань як вагове, так і розмірне зношування стабілізується і носить лінійний характер.

Проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що, втрачаючи в 2,5 рази на абразивній стійкості, відцентрово армовані породоруйнівні елементи виграють в 3 рази у тврдосплавних по втомній стійкості при знакозмінних динамічних навантаженнях.

Висновки. Таким чином у роботі запропоновано комплексну схему лабораторних досліджень, яка дозволяє оцінити ефективність застосування вдосконаленої технології об'ємного відцентрового армування для виготовлення зубців бурових доліт і дослідити вплив технологічних параметрів процесу на показники якості останніх.

Встановлено такий характер залежності показників стійкості зубців бурових доліт від технологічних параметрів процесу армування:

- зниження температури ливарної форми до 293К супроводжується різким зменшенням концентрації «реліту» до 35 – 40 %, підвищення температури форми до 650К – 700К призводить до інтенсивного розчинення гранул реліту, і зменшення його концентрації, а сама армована зона стає високолегованою із значним вмістом карбідів. Найбільшу концентрацію тврдого сплаву (до 62%) досягається при використанні реліту грануляцією 1,0 мм і температурі ливарної форми 550 К;

- абразивна стійкість відцентрово армованих виливків найбільш суттєво залежить від концентрації тврдого сплаву, а потім вже від структури металозв'язки – при зростанні концентрації тврдого сплаву до 60 % абразивна стійкість збільшується в 2 рази;

- збільшення грануляції тврдого сплаву від 0,63 мм до 1.0 мм веде до підвищення абразивної стійкості на 50 %;

- концентрацію тврдого сплаву в армованій зоні і, відповідно, стійкість зразків до різних видів зношування можна регулювати кількістю введеного тврдого сплаву.

Список використаних джерел:

1. Виноградов В. Н. / Абразивное изнашивание бурильного инструмента / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, В. А. Доценко. – М.: Недра, 1980. – 204 с.
2. Kirchaßner, M. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact [Text] /

- M.Kirchgaßner, E. Badisch, F. Franek // Wear. – 2008. – Vol. 265, Issue 5-6. – P. 772–779. doi: 10.1016/j.wear.2008.01.004
3. Hajihashemi, M. Physical, Mechanical, and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-WC Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition [Text] / M. Hajihashemi, M. Shamanian, G. Azimi // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2015. – Vol. 46, Issue 2. – P. 919–927. doi: 10.1007/s11663-014-0230-9
4. Семенов, О. М. Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошkových доліт [Текст] / О. М. Семенов, З. М. Одосій, В. В. Кустов // Проблеми міцності. – 2014. – № 4 (430). – С. 162–171.
5. Mahdipoor, M. S. HVOF sprayed coatings of nano-agglomerated tungsten-carbide/cobalt powders for water droplet erosion application [Text] / M. S Mahdipoor, F. Tarasi, C. Moreau, A. Dolatabadi, M. Medraj // Wear. – 2015. – Vol. 330-331. – P. 338–347. doi: 10.1016/j.wear.2015.02.034.
6. Berger, L.-M. Application of hardmetals as thermal spray coatings [Text] / L.-M.Berger // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.
7. Виноградов В. Н. / Ударно-абразивный износ буровых долот / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, Г. К. Шрейбер. – М.: Недра, 1975. – 166 с.
8. А.с. 685429 СССР, В22D 19/02. Способ армирования оливок / К. А. Крылов, Ю.Н. Бугай, В. А. Ясашин (СССР). – заявл. 24.04.78; опубл. 15.09.79; Бюл. №34.
9. А.с. 1001573 СССР, В22 D 19/02. Способ получения армированных оливок / Ю. Н. Бугай, Э. Б. Милевский, Р. Т. Карпик, И. О. Загайдук и др.(СССР).- заявл. 15.12.80; не подлежит опубл. в открытой печати.
10. Шуляр І.О. Відцентрове армування озброєння бурових інструментів / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем //IV міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 трав. 2012 р.: тези доп. – Чернігів, 2012. – С. 29.
11. Бугай Ю. Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю. Н. Бугай, И. В. Воробьев. - Львов: Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 208 с.
12. Бугай Ю.Н., Крылов К.А., Кацов К.Б. и др. Центробежное армирование металла для породоразрушающего инструмента. Академия наук СССР, XVIII сессия Научного Совета по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов». Слоистые и волокнистые металлические материалы. Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. – 1982. – С.28–30.
13. Борушак Б. О. Разработка технологического процесса центробежного армирования лопастных долот: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Богдан Онуфриевич Борушак. – Ивано-Франковск, 1993. – 187 с.
14. Ясашин В.А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра : автореф. дис. д-ра техн. наук / В.А.Ясашин – М., 2009. – 48с.
15. Шуляр І. О. Технологія і устаткування для отримання армованих виливків відцентровим литвом із змінним положенням осі обертання форми [Електронний ресурс] / І. О. Шуляр, Л. О. Борушак, В. Г. Панчук // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Краматорськ. – 2012. – № 2 (10Е). – С. 154–163.
16. Шуляр І. Дослідження руху твердих частинок у рідкому сплаві при відцентровому армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми / І. Шуляр, М. Маковійчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – Луцьк. - 2013. – № 40. – С. 321–330.
17. Пат. 72194 Україна, МПК В 22 D 13/02. Машина для відцентрового литва і армування виливків / І. О. Шуляр, Л. О. Борушак, С. Л. Борушак; и201200992: заявл. 31.01.12, опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2019