Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 669.14.018.2:622.24.051.004.6
DOI: 10.31471/1993-9868-2019-1(31)-72-82

АНАЛІЗ ПРИЧИН РАПТОВИХ РУЙНУВАНЬ ШАРОШОК ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ ЗІ ВСТАВНИМ ПОРОДОРУЙНІВНИМ ОСНАЩЕННЯМ

*[1]Р. С. Яким, [2]Д. Ю. Петрина**

[1]Дрогобицький державний педагогічний університет імені І. Франка;
82100, м. Дрогобич, вул. І. Франка, 24, тел. (03244) 10474,
e-mail: jakym.r@online.ua

[2]ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,
e-mail: pepperiko@ukr.net

Тришарошкові бурові долота зі вставним породоруйнівним оснащенням призначені для спорудження свердловин у міцних гірських породах. До експлуатаційних показників доліт висувають комплекс жорстких вимог щодо зносостійкості та тріщиностійкості долотних сталей, конструкційної міцності деталей доліт, особливо шарошок. Наукова робота передбачає комплексний аналіз причин раптового виходу з ладу породоруйнівного інструменту, проведення досліджень усіх факторів, що впливають на роботоздатність та довговічність; та запропоновано варіанти вибору матеріалів та прокату для виготовлення шарошок доліт. Здійснено загальний аналіз руйнувань шарошок відпрацьованих тришарошкових бурових доліт, а також металографічні дослідження плавки сталі шарошок. Досліджувалися матеріали, з яких виготовляються долота, на вміст хімічних елементів та визначення фізико-механічних властивостей цих сталей. Встановлено, що причинами раптових відмов доліт через крихке руйнування шарошок є невідповідність плавки сталі вимогам щодо показників міцності, пластичності та технологічних – прогартовуванню. Виявлено, що середнє значення процентного вмісту хімічних елементів у тілі досліджуваної шарошки не виходить за границі допустимого відхилення. Аналізом фізико-механічних та технологічних показників досліджуваної плавки сталі встановлено підвищені значення міцності та прогартовування, понижені показники пластичності, ударної в'язкості. Аналізом хімічного складу плавки сталі не виявлено значного розсіювання процентного вмісту хімічних елементів. Ліквації та подібних ефектів не виявлено. Встановлено, що такі технічні умови допускають занадто широке розсіювання та факультативні значення неметалевих включень, а також не регламентують обмеження щодо наявності шкідливих домішок, які різко підвищують прогартовування, твердість та інші показники, що погіршують експлуатаційні показники шарошок. Запропоновано відмовитися від використання наявного прокату, а також розробити та впровадити більш обґрунтований нормативний документ, за яким має постачатися прокат зі сталі для виготовлення деталей тришарошкових бурових доліт.

Ключові слова: крихке руйнування, прокат, тришарошкові бурові долота, хімічний склад сталі, фізико-механічні характеристики сталі.

Трехшарошечные буровые долота со вставным породоразрушающим оснащением предназначены для сооружения скважин в твердых горных породах. К эксплуатационным показателям долот выдвигают комплекс жестких требований по износостойкости и трещиностойкости долотных сталей, конструкционной прочности деталей долот, особенно шарошек. Научная работа предполагает комплексный анализ причин внезапного выхода из строя породоразрушающего инструмента, проведение исследований всех факторов, влияющих на работоспособность и долговечность; предложены варианты выбора материалов и проката для изготовления шарошек долот. Проведен общий анализ разрушений шарошек отработанных трехшарошечных буровых долот, а также металлографические исследования плавки стали шарошек. Исследованы материалы, из которых изготавливаются долота, на содержание химических элементов и определены физико-механические свойства этих сталей. Установлено, что причинами внезапных отказов долот из-за хрупкого разрушения шарошек является несоответствие плавки стали требованиям по показателям прочности, пластичности по технологическим показателям прокалки. Обнаружено, что среднее значение процентного содержания химических элементов в теле исследуемой шарошки не выходит за границы допустимого отклонения. Путем анализа физико-механических и технологических показателей исследуемой плавки стали установлены повышенные значения прочности и прокалки, низкие показатели пластичности и ударной вязкости. В результате анализа химического состава плавки стали не обнаружено значительного рассеивания процентного содержания химических элементов, ликвации и подобных эффектов. Установлено, что такие технические условия допускают слишком широкое рассеивание и факультативные значение неметаллических включений, а также не регламентируют ограничения относительно наличия вредных примесей, которые резко повышают прокалку, твердость и другие показатели, ухудшающие эксплуатационные показатели шарошек. Предложено отказаться от использования существующего проката в пользу разработки и внедрения более обоснованного нормативного документа, по которому должен поставляться прокат из стали для изготовления деталей трехшарошечных буровых долот.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, прокат, трехшарошечные буровые долота, химический состав стали, физико-механические характеристики стали.

Tricone drill bits with plug-in rock-cutting equipment are intended for the construction of wells in hard rocks. To the operational performance of bits, stringent requirements for wear resistance and crack resistance of bit steel, structural strength of parts of bits, and especially cones, are put forward. The scientific work involves a comprehensive analysis of the causes of the sudden failure of the rock-cutting tool, research of all factors affecting the performance and durability, and the options for selecting materials and rolled products for the manufacture of roller cone bits are proposed. A general analysis of the destruction of the cutters of spent tricone drill bits, as well as metallographic studies of the heat of steel, have been carried out. The materials from which bits are made have been investigated for the content of chemical elements and the determination of the physicomechanical properties of these steels. It is established that the causes of sudden failures of bits through the brittle destruction of cones are the inconsistency of smelting steel requirements for strength, ductility and technological – quenching. It has been found that the average value of the percentage of chemical elements in the body of the tested cone does not go beyond the limits of tolerance. By analyzing the physicomechanical and technological indicators of the studied steel smelting, increased values of strength and quenching have been established, and the ductility and impact toughness values have been reduced. The analysis of the chemical composition of steel melting did not reveal a significant dispersion of the percentage of chemical elements. Segregations and similar effects were not detected. It is established that such technical conditions allow too wide dispersion and optional value of non-metallic inclusions, and also do not regulate the presence of harmful impurities, which dramatically increase the quenching, hardness and other indicators that worsen the performance of cones. It is proposed to abandon the use of existing rolled stock and to develop and introduce a more reasonable regulatory document according to which rolled steel should be supplied for the manufacture of parts of tricone drilling bits.

Key words: brittle fracture, rolled stock, tricone drill bits, chemical composition of steel, physical and mechanical characteristics of steel

Вступ. Тришарошкові бурові долота зі вставним породоруйнівним оснащенням призначені для спорудження свердловин у твердих гірських породах. Умови роботи таких доліт на вибої є надзвичайно складними. Тому до експлуатаційних показників доліт висувають комплекс жорстких вимог щодо зносостійкості та тріщиностійкості долотних сталей, конструкційної міцності деталей доліт, і, особливо, шарошок. Не зважаючи на значний досвід вітчизняного долотобудування (який ґрунтується на досягненнях провідних фірм, що спеціалізуються на виготовленні тришарошкових бурових доліт), частими є відмови бурових доліт через крихке руйнування тіла шарошок. Відтак, дослідження, спрямовані на аналіз причин та пошук способів попередження раптових руйнувань шарошок тришарошкових бурових доліт, є актуальними і мають важливе практичне значення не тільки для підвищення якості й конкурентоздатності вітчизняних доліт, а й підвищення ефективності буріння.

а) *б)* *в)*

а – загальний знос вінців, сколювання вершин окремих твердосплавних зубків, тріщини у напрямку від торця до вершини шарошки, а також між вінцями, з оголенням тіл кочення замкового підшипника (*прохід* 7 п. м.),
б – загальний знос вінців, сколювання окремих вершин твердосплавних зубків, відколювання майже половини тіла шарошки (*прохід* 26 п. м.),
в – загальний знос породоруйнівного оснащення, сколювання вершин шарошок (*прохід* 130 п. м.)

Рисунок 1 – Загальний вигляд шарошок відпрацьованих бурових доліт 244,5 ОК-ПГВ-D26

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Долота, виготовлені компаніями "Сміт", "Рід", "Сек'юріті" та ін., мають стабільно вищі експлуатаційні показники порівняно з вітчизняними аналогами. Навіть ті вітчизняні долота, які виготовляються за ліцензіями з дотриманням світових стандартів якості API, не мають сталих показників: у партіях виявляються долота з різким відхиленням від експлуатаційних показників. З іншої сторони, за результатами аналізу встановлено [1 – 4], що зазвичай причиною цього є неправильний підхід до поставки на долотне виробництво сталі та проблеми в технології її зміцнення. Мова йде про незадовільні показники долотних сталей як за хімічним складом, так і за фізико-механічними й технологічними показниками у стані поставки. Також існує низка дискусійних питань щодо раціональності параметрів термічних технологічних процесів. Для вирішення цієї проблеми в [4 – 8] обґрунтовано критерії щодо вибору сталей та їх зміцнення. Однак, в дослідженнях [9, 10] показано, що проблема крихкого руйнування шарошок потребує подальшого вивчення, особливо шарошок з вставним породоруйнівним оснащенням. Дані відпрацювання доліт з такими шарошками також неоднозначні.

Мета та завдання. Основною метою дослідження є встановлення причин виходу з ладу тришарошкових доліт з вставним породоруйнівним оснащенням. Для цього передбачається визначити розкид даних хімічного складу сталей, що застосовуються на вітчизняному виробництві доліт, їх мікроструктуру та відмінності у фізико-механічних характеристиках. Важливим аспектом у дослідженні передбачається визначення якості плавки сталі за показником міцності DI та спроба в умовах виробництва знизити значення цього показника. На основі проведених досліджень передбачається запропонувати варіанти виходу з виниклої проблеми та запропонувати нормативний документ, за яким має постачатися прокат зі сталі для виготовлення деталей тришарошкових бурових доліт.

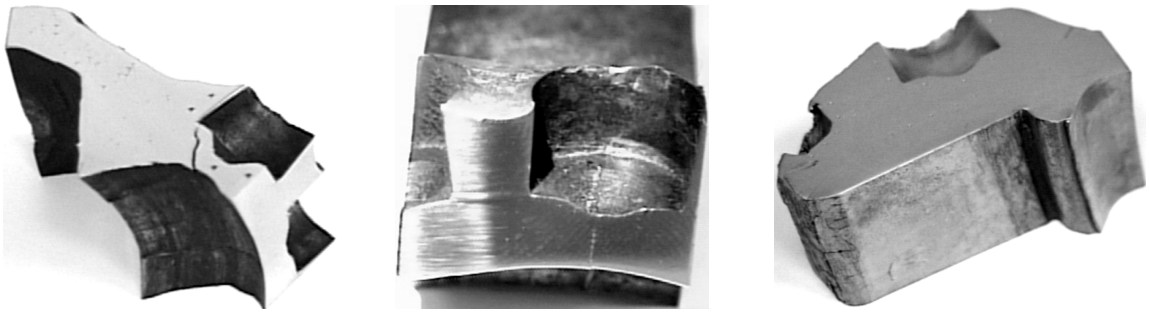
Висвітлення основного матеріалу дослідження. Аналізували характер відпрацювання тришарошкових бурових доліт 244,5 ОК-ПГВ на верстатах СБШ 250МНА32 в умовах кар'єру ВАТ «ПГЗК». Встановлено, що основними причинами виходу з ладу доліт є знос тіла шарошок з наступним обривом вершин після проходження 150 – 160 п. м. Замірами тиску на долоті встановлено, що перепад становить 0,9–1,0 кгс/см^2, що недостатньо для ефективної експлуатації доліт. Це може призводити до перегріву опори й подальшим передчасним виходом з ладу, а також недостатньою якістю очищення вибою. На окремих долотах виявлено тріщини корпусу шарошок, що спричинили їхню раптову відмову. Зокрема одне долото вже після 7 п. м. відмовило через катастрофічне руйнування шарошок. Це поставило задачу ґрунтовного вивчення причин та пошук шляхів запобігання таким раптовим руйнуванням шарошок доліт.

Здійснено загальний аналіз руйнувань шарошок відпрацьованого тришарошкового буро-

а *б*

а – зовнішня, породоруйнівна частина шарошки № 1,
б – внутрішня, опорна частина шарошки № 3

Рисунок 2 – Зовнішній вигляд зруйнованих шарошок, підданих аналізам



а *б* *в*

а, б – на темплеті шарошки № 2 в ділянці бігової доріжки замкового підшипника та отвору під вставний твердосплавний зубок,
в – на темплеті шарошки № 3, розташовані впоперек бігової доріжки великого роликового підшипника та в ділянці торця

Рисунок 3 – Типові тріщини, виявлені на темплетах шарошок

вого долота 244,5 ОК-ПГВ-D26, а також металографічні дослідження плавки сталі шарошок цього долота.

Загальним оглядом породоруйнівної робочої частини шарошок виявлено викришування захисного цементованого шару та пластичну деформацію нецементованих вінців шарошки. Окремі твердосплавні зубки мають сколену й притуплену абразивним зносом вершину (рис. 2, *а*). Такий характер пошкоджень свідчить про те, що породоруйнівне оснащення працювало на вибої зі значною присутністю фрагментів металу. На фоні загальних пошкоджень фіксуються розколювання та різні за величиною тріщини. Виявлено пошкодження та руйнування, типові для всіх шарошок. Наприклад, на зруйнованій шарошці № 1 зафіксовано магістральну тріщину, яка пролягає від поверхні бігової доріжки замкового підшипника кочення аж до поверхні ділянки між вінцями (рис. 2, *а*). Подальший ріст цієї тріщини мав би спричинити відколювання вершини шарошки. Найбільші руйнування в ділянках цементованого упорного торця зафіксовані на шарошці № 3 (рис. 2, *б*). Тут, на тлі зруйнованого цементованого шару, виявлено радіальні тріщини глибиною 1 – 1,5 мм. Також тут зафіксовано магістральні тріщини, розміщені впоперек бігової доріжки великого роликового підшипника.

Також виявлено тріщини, які заглиблюються на різну глибину в серцевину шарошки. Однак, в осерді шарошки тріщиноподібних дефектів не виявлено. Зафіксовано тріщини, які розташовані в ділянці отворів під вставні твердосплавні зубки (рис. 3, *а*, *б*). У одному випадку тріщина не доходить до дна отвору (рис. 3, *а*), у іншому – маємо наскрізну тріщину, яка йде від бігової доріжки замкового підшипника до дна отвору (рис. 3, *б*).

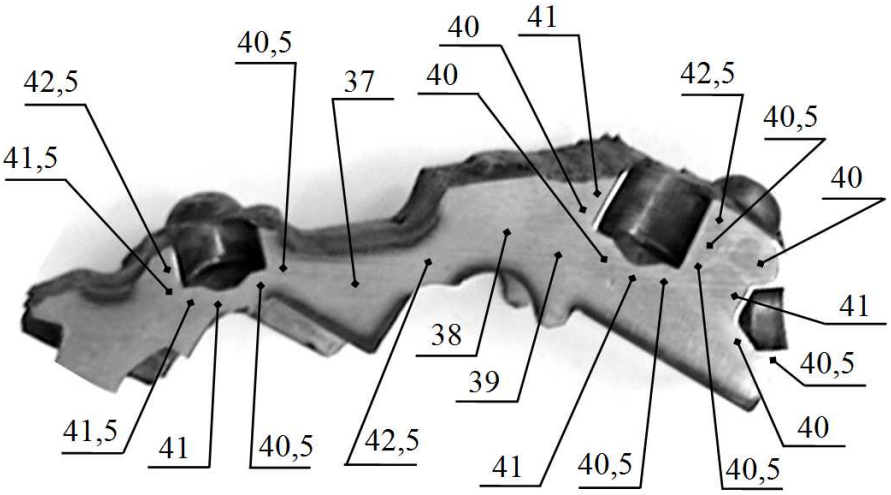


Рисунок 4 – Характерний розподіл значень твердості (за шкалою HRC), встановлений на темплеті досліджуваної шарошки № 1

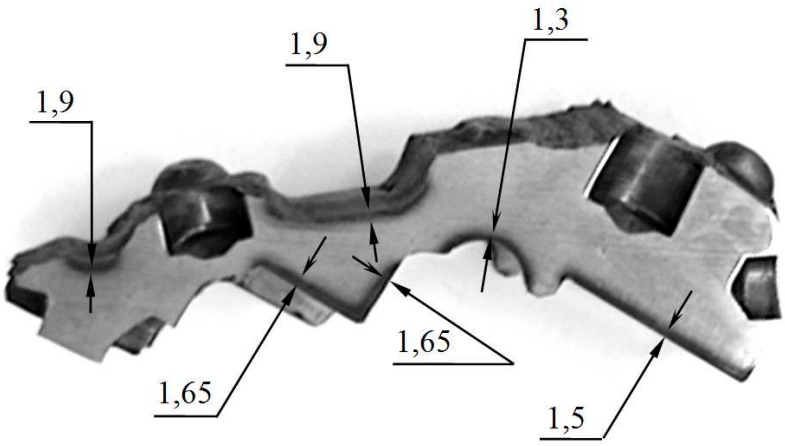


Рисунок 5 – Типові значення товщини цементованого шару (мм), встановлені на темплеті досліджуваної шарошки № 1

На темплетах з шарошки № 2 та № 3 виявлено тріщини в ділянці торця шарошки й поверхні бігової доріжки великого роликового підшипника (рис. 3, *в*).

Макроаналіз здійснювали на спеціально підготовлених темплетах шарошок за стандартною методикою (ГОСТ 10243-62). Досліджувана поверхня темплета шліфувалася й полірувалася, а потім піддавалася травленню 50% розчином соляної кислоти за температури 80°С протягом 40 хв.

Аналізом травлених макрошліфів на темплетах шарошки № 1 не виявлено пористості, точкової неоднорідності та ліквацийних дефектів. Травленням виявлено орієнтацію волокон вздовж осі шарошки, що відповідає вимогам існуючої технології виготовлення кованки (заготовки під шарошки).

Здійснений аналіз розподілу твердості та глибини цементованого шару. Зокрема, твердість на поверхні цементованого шару для шарошки № 1 була у межах HRC 60 – 62, № 2 – HRC 58 – 59,5, № 3 – HRC 59,5 – 60,5. На рис. 4 подано встановлені значення твердості для різних ділянок в осьовому перерізі шарошки № 1. Для інших шарошок отримували подібний розподіл твердості.

Аналіз характеру розподілу значень товщини цементованого шару також виявив типову неоднорідну картину. Зокрема, на рис. 5 подано значення товщини й вигляд цементованих шарів у осьовому перерізі шарошки № 1. Тут на внутрішніх опорних поверхнях маємо товщини довжиною від 1,3 до 1,65 мм. На шарошці № 2 товщини в межах від 1,2 до 1,4 мм, а на шарошці № 3 – від 1,4 до 1,9 мм. Зауважимо, що діюча система вимог щодо якості ХТО шарошок доліт регламентує товщину цементованого шару в границях 1,6-1,9 мм, за умов дотримання однорідності розподілу.

Хімічний склад сталі 14ХН3МА-В шарошок, а також дані щодо відповідності діючим вимогам подано в табл. 1.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 14ХН3МА-В шарошок

Хімічні елементи	Хімічний склад шарошок*, %			Дані вхідного заводського контролю**	Вимоги згідно з ТУ14-550-51-2004	Вимоги згідно з ASTM A 304-78 (сталь 4813Н)	Допустимі відхилення між даними спектрального й хімічного аналізів на одному зразку
	№ 1	№ 2	№ 3				
C	0,13	0,13	0,14	0,15	0,11 – 0,15	0,11 – 0,15	0,017
Cr	1,42	1,40	1,41	1,41	1,35 – 1,55	1,40 – 1,50	0,08
Ni	3,22	3,13	3,16	3,24	3,10 – 3,40	3,15 – 3,35	0,12
Mo	0,13	0,12	0,12	0,13	0,10 – 0,15	0,10 – 0,14	0,019
Mn	0,77	0,76	0,77	0,63	0,60 – 0,80	0,65 – 0,75	0,04
Cu	0,16	0,15	0,16	–	≤ 0,25	≤ 0,25	0,023
V	0,01	0,01	0,01	–	≤ 0,05	–	0,005
Si	0,32	0,31	0,31	0,22	0,20 – 0,35	0,20 – 0,26	0,03
S	0,006	0,006	0,008	0,011	≤ 0,015	≤ 0,005	0,003
P	0,006	0,005	0,005	0,011	≤ 0,015	≤ 0,010	0,003

*дані отримані спектральним аналізом,
**дані отримані хімічним аналізом згідно з ГОСТ 18895-97

Зафіксовані відмінності у визначених значеннях Si%, Mn%, S%, P%, типові для плавок сталі 14ХН3МА-В, виготовлених згідно з ТУ14-550-51-2004.

Додатково здійснено перевірку хімічного складу сталі шарошки на наявність ліквації хімічних елементів. Для цього спеціально підготовили темплет (рис. 6) з шарошки №1, на якому здійснили забір металу для аналізу. Результати аналізу подані в табл. 2.

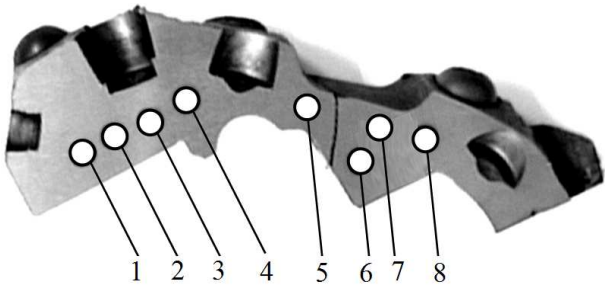


Рисунок 6 – Загальний вигляд темплета шарошки (включає ділянку тріщини між вінцями) з ділянками забору сталі для аналізу

Середнє значення процентного вмісту хімічних елементів в тілі досліджуваної шарошки не виходить за границі допустимого відхилення. Однак, спостерігається деяке розсіювання значень процентного вмісту хімічних елементів, яке особливо помітне для C, Ni, Mo, Cu, Al, Si, але це не свідчить про наявність ліквації в плавці сталі досліджуваної шарошки №1, а також не виходить за регламентовані ГОСТ 18895-97 границі допустимих похибок аналізу. Подібну картину спостерігали при аналізі сталі темплетів з шарошок №2 та №3.

Аналізом встановлено ступінь забрудненості сталі неметалевими включеннями. При цьому застосовано метод А згідно з ASTM E45-97. Зокрема, на сталі шарошки № 1 виявлені неметалеві включення типів A_T, D_T, D_{YT}, всі по 1б, решта (A_{YT}, B_T, B_{YT}, C_T, C_{YT}) – не виявлені. Зауважимо, що 1б. для D_{YT} – це гранично допустиме значення (відповідно до вимог ASTM E45-97). На сталі шарошки № 2 виявлені неметалеві включення типів A_T, D_T, по 0,5б., D_{YT} – 1б всі решта (A_{YT}, B_T, B_{YT}, C_T, C_{YT}) не виявлені. На сталі шарошки № 3 виявлені неметалеві включення типів B_T, D_{YT} по 1б, D_T – 0,5б, всі решта (A_T, A_{YT}, B_{YT}, C_T, C_{YT}) не виявлені.

Загалом, у всіх шарошках маємо рівень наявності неметалевих включень, який відповідає існуючим вимогам ASTM E45-97.

Розміри аустенітного зерна встановлювали способом цементації й порівняння величини сітки вторинного цементиту на стандартних зразках та еталонними зображеннями з відповідною шкалою згідно з методикою ГОСТ 5639-82. Зразки насичували вуглецем при температурі 930±10°С протягом 8 год. У результаті для досліджуваних шарошок величина зерна відповідала 7 балам.

Аналізом також встановлено, що досліджувана плавка сталі 14ХН3МА-В має завищені показники міцності. Також є вищими значення показників прогартовування (табл. 3).

Таблиця 2 – Хімічний склад сталі 14ХН3МА-В у різних ділянках шарошки №1

Хімічні елементи	Хімічний склад в ділянках забору проби на темплеті шарошки, %								$\bar{X}$	s	Вимоги згідно з ТУ14-550-51-2004
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8			
C	0,144	0,140	0,142	0,143	0,140	0,140	0,139	0,136	0,141	$2,563\times10^{-3}$	0,11 – 0,15
Cr	1,48	1,48	1,48	1,47	1,47	1,47	1,47	1,46	1,473	$7,091\times10^{-3}$	1,35 – 1,55
Ni	3,23	3,21	3,19	3,19	3,20	3,19	3,19	3,20	3,20	0,014	3,10 – 3,40
Mo	0,130	0,130	0,132	0,130	0,133	0,135	0,131	0,130	0,131	$1,89\times10^{-3}$	0,10 – 0,15
Mn	0,72	0,73	0,71	0,72	0,72	0,71	0,72	0,71	0,717	$7,091\times10^{-3}$	0,60 – 0,80
Cu	0,201	0,200	0,196	0,199	0,200	0,199	0,197	0,198	0,199	$1,69\times10^{-3}$	$\leq 0,25$
Al	0,012	0,011	0,013	0,011	0,010	0,013	0,011	0,013	0,012	$1,195\times10^{-3}$	–
V	0,017	0,018	0,018	0.018	0,019	0,018	0,017	0,018	0,018	$6,547\times10^{-4}$	$\leq 0,05$
Si	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27	0,276	$5,182\times10^{-3}$	0,20 – 0,35
S	0,005	0,006	0,007	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,0058	$7,071\times10^{-4}$	$\leq 0,015$
P	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008	0,008	0,0084	$5,175\times10^{-4}$	$\leq 0,015$

Таблиця 3 – Технологічні та фізико-механічні показники досліджуваної плавки сталі 14ХН3МА-В

Показник		Значення показника	
		встановлене	регламентоване діючими вимогами
Прогартовування, HRC на глибині	6,5 мм	44 – 46	39 – 45
	20 мм	38 – 41	34 – 40
	30 мм	37 – 40	29 – 39
Границя витривалості σ_B, МПа		1325 – 1345	≥ 1000
Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа		1000 – 1015	≥ 900
Відносне звуження ψ, %		49 – 51	≥ 50
Відносне видовження δ, %		11 – 12	≥ 11
Ударна в'язкість *KCU*, Дж/см^2		10 – 11,5	≥ 11

Мікроструктуру сталі шарошок вивчали на спеціально підготовлених темплетах згідно з методиками та рекомендаціями, регламентованими ГОСТ 8233-56 та РД 26-02-68/85. Після шліфування й полірування досліджувані поверхні травили 4% спиртовим розчином азотної кислоти.

Аналізом мікроструктури виявлено, що цементований шар на шарошці № 1 мав структуру мартенситу 2-3 б, залишковий аустеніт 1-2 б, карбіди 1-2 б. Мікроструктура серцевини – сорбіт з дрібними включеннями фериту.

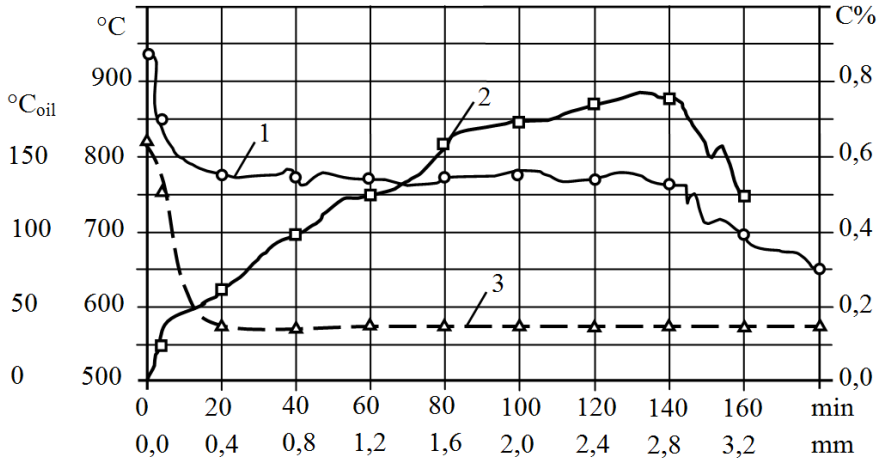
Феритно-перлітну смугастість у мікроструктурі серцевини не виявлено.

Отже, зафіксовані тріщини мають однаковий крихкий характер. Як правило, тріщини беруть початок з поверхні та зупиняються в ділянках з пониженою твердістю. Тріщини орієнтуються у осьовому напрямку шарошки (за напрямком волокон). Руйнування відколюванням вершини шарошки спричинене утворенням магістральної тріщини, що бере початок з бігової доріжки замкового кулькового підшипника і виходить на зовнішню поверхню шарошки в ділянці між вінцями, де є цементований шар. Відтак, руйнування відбувається по небезпечному перерізі, де наявна ділянка, чутлива до утворення тріщин.

Аналізом фізико-механічних та технологічних показників досліджуваної плавки сталі встановлено підвищені значення міцності та прогартовування, понижені показники пластичності, ударної в'язкості.

Аналізом хімічного складу плавки сталі не виявлено значного розсіювання процентного вмісту хімічних елементів. Ліквації та подібних ефектів також не виявлено.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online



1 – температура середовища печі (°C); 2 – концентрація вуглецю в середовищі печі (%$C_П$); 3 – концентрація вуглецю, показник моделі процесу для попередження зневуглечення цементованого шару (%$C_М$)

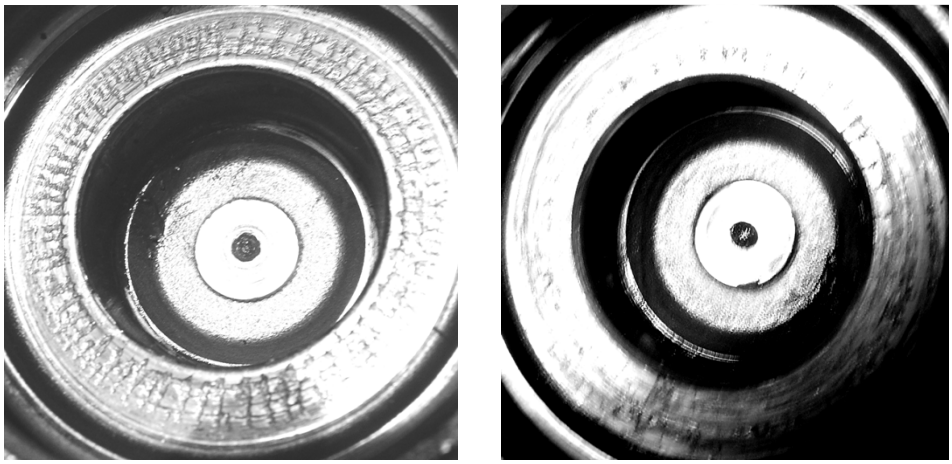
Рисунок 7 – Модель (точкові маркери) та зафіксовані параметри процесу другого гартування (криві) шарошок зі сталі 14ХН3МА-В досліджуваної плавки

Оцінка хімічного складу з позиції критерію міцності DI виявила, що плавка сталі 14ХН3МА-В дає деяке розсіювання значень міцності (на шарошці: № 1 – DI=4,0; № 2 – DI=3,75; № 3 – DI=4,17), які мають верхню допустиму границю для такої сталі. Для порівняння згідно з ASTM A255 та SPECIFICATION 9313 Steel показник має мати значення DI=3,5±0,5.

Нерівномірність товщини цементованого шару може пояснюватися проблемами механічного оброблення, які виникають через виникнення деформацій та викривлення, набуті під час ХТО [11]. До того ж сталь на вхідному заводському контролі давала максимально допустимі значення як за показниками прогартовування, так і за значеннями твердості після гартування. Одним із традиційних варіантів виходу з такої ситуації є встановлення раціональних параметрів термообробки цементованих шарошок.

Виходили з того, що твердість відповідальних поверхонь шарошок імпортних доліт є в межах HRC 60 – 65 [4], і таку твердість можна отримати збільшенням температури, за якої виконують гартування, або ж зниженням температури, за якої здійснюють низький відпуск після другого гартування. Перший спосіб надто дорогий, вимагає додаткових затрат енергії, спричинює непрогнозовану деформацію й спотворення геометрії деталей, швидке спрацювання устаткування печей. Другий є більш раціональним. Отже, здійснення низького відпуску за температури 180°C забезпечує твердість HRC 56 – 57, що задовольняє регламентовані діючими вимогами щодо значень твердості шарошок [4]. Однак аналізом характеру відпрацювання доліт встановлено, що за таких значень твердості спостерігається інтенсивне зношування вінців шарошки й оголення вставних твердосплавних зубків. З іншого боку, підвищення твердості до HRC 63 забезпечуючи високу зносостійкість підвищується чутливість сталі до утворення тріщиноподібних дефектів, через що фіксуються випадки крихкого сколювання фрагментів шарошок чи катастрофічне руйнування тіла шарошки. Зважаючи на це, здійснено порівняльні стендові випробовування двох секцій доліт з шарошками, термооброблеими за двома варіантами параметрів низького відпуску після цементації й повторного гартування (рис. 7). Шарошки секції № I термооброблені з кінцевим відпуском за температури 180 °C, що дала твердість на цементованому упорному торці HRC 56 – 57. Мікроструктура цементованого шару: мартенсит 2 б, залишковий аустеніт кл. 2 а, карбіди 2 – 3 к., осердя – тростосорбіт. Шарошки секції № II включали кінцевий відпуск за температури 165 °C, при цьому твердість на цементованому упорному торці була в межах HRC 59 – 63. Мікроструктура цементованого шару: мартенсит 2 б, залишковий аустеніт кл. 2 а, карбіди 3 – 4 к., осердя – тростосорбіт. Тобто показники щодо твердості та мікроструктури зміцнених шарошок відповідають діючим на долотних підприємствах вимогам.

У обох випадках цементований шар мав такий розподіл концентрації вуглецю: 0,88 – 0,90 % С на поверхні, 0,35 – 0,40 % С на ефективній глибині, 0,25 – 0,26 % С в осерді.



а *б*

а – виготовлена за серійною технологією (шарошка секції № I),
б – виготовлена за експериментальною технологією (шарошка секції № II)

Рисунок 8 – Загальний вигляд відпрацьованих поверхонь цементованого упорного торця досліджуваних в стендових умовах шарошок

Секції піддавали стендовим випробовуванням. Для цього підготовлено дві секції долота з шарошками, виготовленими за стандартною технологією і термобробленими за двома порівнюваними варіантами. Шарошки виконали без вставних породоруйнівних зубків. Досліджувані секції доліт припрацьовували протягом 1 год. зі ступеневим збільшенням навантаження до 8 т на секцію. Металевий стіл з вибоєм обертався зі сталим значенням кількості обертів, рівним 78 об/хв. Після 26 год. роботи, через підклинювання й проковзування шарошок, навантаження на секції зменшили, і до кінця експерименту вони працювали за навантаження 2 т.

Загалом секції відпрацювали 69 год (рис. 8). Шарошка секції № I виявила меншу зносостійкість проти шарошки секції № II. У обох шарошках на цементованому упорному торці виявлено радіальні тріщини, що переходять в основний метал на глибину до 3 мм. Також цементований шар упорного торця у обох шарошках мав практично однаковий характер зносу. Відмінності полягали у тому, що на упорному торці шарошки секції № I фіксувалися дещо більші й глибші ділянки відшарування цементованого шару. Аналізом виявлено, що на секції № II практично у 2 рази меша глибина зносу. Цементований упорний торець шарошки секції № I зносився на глибину до 0,43 мм, а на шарошці секції № 2 – до 0,22 мм.

У обох досліджуваних шарошках осьові підшипники ковзання "п'ята – підп'ятник" працювали однаково, про що свідчить характер зносу їхніх поверхонь (наприклад, поверхні підп'ятників у шарошках зображені на рис. 8).

Вимірюваннями встановлено такі значення твердості на відпрацьованих цементованих упорних торцях: шарошка секції № I – HRC 35 – 38, № II – HRC 39 – 44. Зауважимо, що в реальних умовах буріння зношування й руйнування спряжених поверхонь є на порядок вищими через вплив гідро-абразивного й агресивного робочого середовища, а також значних навантажень. І якщо порівнювати отримані дані стендових випробовувань, то очевидна перевага застосування низького відпуску за температури 165°С. З іншої сторони, якщо у виробництво завантажується сталь з підвищеною схильністю до тріщиноутворення, то таке значення температури низького відпуску не забезпечить належних експлуатаційних показників. Тому для таких сталей ефективним буде відпуск за температури 180±5°С. Також, необхідним є коригування розподілу твердості та концентрації вуглецю в зміцнених поверхнях шарошок, а також внесення змін у технологію виготовлення заготовок для зменшення чутливості до утворення тріщин.

Обговорення результатів досліджень. Встановлено, що причинами раптових відмов доліт через крихке руйнування шарошок є невідповідність плавки сталі 14ХН3МА-В вимогам щодо показників міцності, пластичності та технологічних – прогартовування. Аналізом хімічного складу не виявлено принципових відхилень від нормативних значень процентного вмісту хімічних елементів. Проте, зафіксовано розсіювання значень процентного вмісту C, Ni, Mo, Cu, Al, Si, а також неоднорідний розподіл значень твердості по перерізу вздовж

осі шарошки (вздовж волокон). Найбільше насторожує той факт, що в ділянках небезпечного перерізу шарошок (зона, яка переходить від бігової доріжки замкового підшипника до поверхні шарошки, розташованої між вінцями, а також у ділянці вершини шарошки), фіксували завищені значення твердості серцевини HRC 41 – 42,5. Одночасно в суміжних ділянках темплетів шарошок встановлені значення твердості на рівні HRC 37 – 38. Така неоднорідність, звісно, не може бути показником для твердження щодо основної причини крихкого руйнування, однак може прийматися до уваги при прийнятті рішення (в умовах заводського контролю) щодо доцільності застосування такої плавки сталі чи коригування параметрів термообробки. Ще одним важливим аспектом досліджуваної проблеми є оцінка плавки сталі за показником міцності DI та спроба в умовах виробництва знизити значення цього показника. Застосування додаткових технологічних операцій у виготовленні кованки під шарошку веде до різких перевитрат енергії й ресурсів і, головне, як показала практика, не завжди гарантує надійне забезпечення зниження чутливості плавки сталі до утворення тріщин. У окремих випадках, коригуючи параметри другого гартування, після цементації та низького відпуску можливо дещо знизити твердість та підвищити опірність шарошок до утворення крихких тріщин. Однак, повністю й гарантовано позбутись цього негативного явища в умовах реального виробництва сьогодні неможливо.

Висновок

Обґрунтовано, що для виготовлення деталей тришарошкових бурових доліт (особливо шарошок) недоцільно застосувати прокат зі сталі 14ХН3МА-В, що постачаються на долотні підприємства згідно з ТУ14-550-51-2004. Такі технічні умови допускають занадто широке розсіювання та факультативні значення неметалевих включень, а також не регламентують обмеження щодо наявності шкідливих домішок (крім фосфору і сірки), які, різко підвищуючи прогартовуваність, твердість та інші показники, погіршують експлуатаційні показники шарошок. До того ж в умовах заводських лабораторій такі відхилення хімічного складу й чистоти сталі виявляти неможливо. Вбачається два варіанти виходу з виниклої проблеми. Перший – відмовитися від такого прокату і замовляти сталь, виготовлену за стандартами ASTM A 304-78, яка гарантує необхідну якість (це підтверджується як міжнародною практикою, так і результатами двадцятилітньої давності, коли в умовах Дрогобицького долотного заводу широко застосовувались долотні сталі, виготовлені за аналогом цього стандарту – сталі електрошлакового переплаву з підвищеними вимогами до якості хімічного складу. Другий варіант передбачає розробку та впровадження більш обґрунтованого нормативного документа, за яким має постачатися прокат зі сталі для виготовлення деталей тришарошкових бурових доліт.

Надалі перспективним є обґрунтування параметрів та вимог щодо хімічного складу, чистоти, а також формулювання регламентованих технологічних показників долотних сталей, які необхідно постачати на долотне виробництво у вигляді прокату.

Література

1. Ищук А. Г. Сравнительное исследование металлургического качества сталей буровых шарошечных долот отечественного и зарубежного производства: дис. … канд. техн. наук: 05.02.01. Самара, 2005. 241 с.

2. Пугачева Т. М. Анализ причин аварийного разрушения шарошечных буровых долот *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* 2006. № 40. С. 194-197.

3. Пугачева Т. М., Клименко А. В. Анализ механических свойств стали 14ХН3МА разных производителей. *Высокие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием* (Самара, 17-20 ноября 2010 г.) / Фед. агентство по образованию Гос-е уч-е выс-го проф. об-я Самарский гос. техн. ун-т. [Електронный ресурс]. Самара: СамГТУ, 2010. Режим доступа к материалам: http://www.konferencia-isap.narod.ru/index.html

4. Яким Р. С., Петрина Ю. Д. Теорія і практика забезпечення якості та експлуатаційних показників цементованих деталей шарошкових бурових доліт : монографія. Івано-Франківськ : Видавництво ІФНТУНГ, 2011. 189 с.

5. Elevated temperature toughness and fatigue testing of steels for geothermal Applications: Final Report: BNL Contract № 492267-S, Number of registration: October, 1981, TR 81-97 / R. A. Cutler, E. C. Goodman, R. R. Hendricks (Terra Tek, Inc.), W. C. Leslie (University of Michigan) – [Submitted to: Brookhaven National Laboratory, Attn: Dr. Daniel Van Rooyen]. – New York: Terratek, 1981. 140 p. (University research park, Salt lake City, Utah).

6. Жидовцев Н. А., Кершенбаум В. Я., Гинзбург Э. С. и др. Долговечность шарошечных долот. М. : Недра, 1992. 272 с.

7. Петрина Ю. Д. Розробка науково-прикладних основ підвищення довговічності бурових доліт шляхом раціонального використання матеріалів : дис. ... докт. техн. наук: 05.15.07. Івано-Франківськ, 1996. 356 с.

8. IADC dull grading system for roller bits / [Hughes Christensen Company]. USA. 1996. 16 p.

9. Яким Р.С., Петрина Ю.Д., Пасинович Т.Б., Колодій А.Ю. Підвищення тріщиностійкості шарошок тришарошкових бурових доліт. *Машинознавство*. 2010. № 1-2. С. 26 30.

10. Yakym R.S., Petryna D.Yu. Increase of durability of tree-cone rock bit cutters. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. vol. 4. No 2. P. 49-53.

11. Яким Р. С., Петрина Ю. Д., Яким І. С. Забезпечення якісних конструкторських показників цементованих шарошок тришарошкових бурових доліт вдосконаленням технології їх виготовлення. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2014. № 1 (50). С. 33 – 43.

References

1. Ishchuk A. G. Sravnitelnoe issledovanie metallurgicheskogo kachestva stalej burovyh sharoshechnyh dolot otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva: dis. … kand. tehn. nauk: 05.02.01. Samara, 2005. 241 p.

2. Pugacheva T. M. Analiz prichin avarijnogo razrusheniya sharoshechnyh burovyh dolot. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki*. 2006. No 40. P. 194-197.

3. Pugacheva T. M., Klimenko A. V. Analiz mehanicheskih svojstv stali 14HN3MA raznyh proizvoditelej. *Vysokie tehnologii v mashinostroenii: materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj internet-konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Samara, 17-20 noyabrya 2010 g.) / Fed. agentstvo po obrazovaniyu Gos-e uch-e vys-go prof. ob-ya Samarskij gos. tehn un-t. [Elektronnyj resurs]. Samara: SamGTU, 2010. Rezhim dostupa k materialam: http://www.konferencia-isap.narod.ru/index.html

4. Yakim R. S., Petrina Yu. D. Teoriya i praktika zabezpechennya yakosti ta ekspluatacijnih pokaznikiv cementovanih detalej sharoshkovih burovih dolit : monografiya. Ivano-Frankivsk : Vidavnictvo IFNTUNG, 2011. 189 p.

5. Elevated temperature toughness and fatigue testing of steels for geothermal Applications: Final Report: BNL Contract № 492267-S, Number of registration: October, 1981, TR 81-97 / R. A. Cutler, E. C. Goodman, R. R. Hendricks (Terra Tek, Inc.), W. C. Leslie (University of Michigan) – [Submitted to: Brookhaven National Laboratory, Attn: Dr. Daniel Van Rooyen]. – New York: Terratek, 1981. 140 p. (University research park, Salt lake City, Utah).

6. Zhidovcev N. A., Kershenbaum V. Ya., Ginzburg E. S. i dr. Dolgovechnost sharoshechnyh dolot. M. : Nedra, 1992. 272 p.

7. Petrina Yu. D. Rozrobka naukovo-prikladnih osnov pidvishennya dovgovichnosti burovih dolit shlyahom racionalnogo vikoristannya materialiv : dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.15.07. Ivano-Frankivsk, 1996. 356 p.

8. IADC dull grading system for roller bits / [Hughes Christensen Company]. USA. 1996. 16 r.

9. Yakym R.S., Petryna Yu.D., Pasynovych T.B., Kolodij A.Yu. Pidvyshchennya trishchynostijkosti sharoshok trysharoshkovyh burovyh dolit. *Mashinoznavstvo*. 2010. No 1-2. P. 26 30.

10. Yakym R.S., Petryna D.Yu. Increase of durability of tree-cone rock bit cutters. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. vol. 4. No 2. P. 49-53.

11. Yakym R. S., Petryna Yu. D., Yakym I. S. Zabezpechennya yakisnyh konstruktorskyh pokaznykiv cementovanyh sharoshok trysharoshkovyh burovyh dolit vdoskonalennyam tehnologiyi yih vygotovlennya. *Rozvidka ta rozrobka naftovyh i gazovyh rodovyshch*. 2014. No 1 (50). P. 33 – 43.