

УДК 622.196.1:622.24.051

Р. Яким

Доцент, канд. техн. наук

Ю. Петрина

Професор, д-р техн. наук

Т. Пасинович

Аспірант

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ

А. Колодій

Інженер,
ВАТ «Дрогобицький
долотний завод»,
м. Дрогобич

ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ШАРОШОК ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ

Встановлено якісний взаємозв'язок між тріщиностійкістю при ударних навантаженнях шарошок зі сталі 14ХНЗМА-В і параметрами виготовлення заготовки й термічного оброблення шарошок. Науково обґрунтовані рекомендації щодо захисту від цементації окремих ділянок поверхні шарошки в небезпечних перерізах при хіміко-термічному обробленні. Високотемпературне термомеханічне оброблення заготовок перед штампуванням шарошок бурових доліт і правильний контур обматки для захисту від цементації дає можливість забезпечити вищу ударну в'язкість у небезпечних перерізах шарошки. Експлуатаційні відпрацювання експериментальної партії доліт з шарошками, виготовленими згідно із запропонованою технологією, показали вищу стійкість, що дає можливість використовувати форсовані режими буріння при збільшенні проходки на долото приблизно в 1,4 рази у порівнянні з серійними.

бурове долото, шарошка, цементація, тріщиностійкість, ударна в'язкість

Тришарошкові бурові долота, особливо ті, що призначені для розбурювання твердих і особливо твердих порід, працюють у надзвичайно важких умовах. Одним з найважливіших експлуатаційних показників долота є стійкість його шарошок до дії динамічних ударних навантажень. Відтак, дослідження, спрямовані на пошук резервів підвищення тріщиностійкості шарошок тришарошкових бурових доліт, є актуальними і мають важливе практичне значення для підвищення ефективності буріння.

Найвідомішим напрямом у пошуку шляхів підвищення тріщиностійкості шарошок бурових доліт є встановлення характеру взаємодії структури, фізико-механічних властивостей і показників, що характеризують процес руйнування. Основні засади цього підходу відображені в [1 — 6].

На основі аналізу випробовувань на удар, кочення і ковзання в [1] запропонований коефіцієнт W , який залежить від критеріїв: твердість (HRC), межа міцності (σ_B), відносне звуження (ψ). Виходячи з основних позицій

механіки руйнування зміцнених сталей встановлено зв'язок між температурою відпуску і роботою руйнування, що дає досить надійні можливості прогнозувати експлуатаційні показники долотних сталей.

На основі здійснених досліджень у цьому напрямі в [2] зроблено важливий висновок про механізм руйнування сталей 14ХНЗМА, 16ХНЗМА, цементованих при 1220 К і 1320 К. Було виявлено тріщини, які беруть початок у перехідній зоні. Це можна пояснити значним зростанням внутрішніх напружень, деформацій, спричинених впливом підвищених температур.

Отже, в цьому випадку руйнування матиме крихкий характер, тому, на наш погляд, оптимальним бачиться зменшення температур цементації та жорсткий контроль ендотермічного середовища, підвищення прогартованості сталі, зменшення схильності до деформації.

Також авторами [3] встановлена залежність в'язкості руйнування від ширини зони витяжки, однак останню не

можна визнати універсальним структурним чинником, що однозначно визначає тріщиностійкість.

Незважаючи на високі експлуатаційні показники шарошок, виготовлених з хромонікелевих сталей, що піддаються цементації, їх стійкість до ударно-абразивного впливу є недостатньою, особливо при роботі доліт у міцних породах на форсованих режимах буріння. Тому, виходячи з того, що зносостійкість цементованих сталей спостерігається тільки у межах насиченого шару, після руйнування якого зношування шарошки різко зростає, в [4, 5] запропоновано використовувати сталі, що володіють високим опором до ударних навантажень, наприклад, сталі, які не піддаються цементації. Проте сучасні шарошки і далі виготовляють зі сталей 14ХНЗМА, 20ХНЗА та їхніх аналогів, що піддаються цементації. Забезпечення високої тріщиностійкості шарошок традиційно здійснюють захистом від цементації зовнішньої поверхні в найтоншому перерізі [6]. При цьому твердість тіла шарошки у тонкому перерізі не більша HRC 44. З використанням сталей шлакового перепау для виготовлення шарошок цього було достатньо, щоб відпрацювання доліт було стабільним. Сьогодні, з широким використанням у долотобудуванні електросталей, що піддаються вакуумуванню, та широким розмахом як їхнього хімічного складу, так і фізико-механічних властивостей маємо часті випадки аварійного виходу з ладу бурових доліт. Цю проблему можна розв'язати за рахунок правильного вибору плавок сталей та коригування параметрів хіміко-термічного оброблення шарошок [7]. Проте, як показує практика, навіть ті плавки сталі 14ХНЗМА-В, які задовольняють технічні вимоги, не завжди забезпечують стабільну стійкість доліт до ударних експлуатаційних навантажень, відтак у небезпечному перерізі шарошки зазнають крихкого руйнування. На рис. 1 наведена партія тришарошкових бурових доліт, які вийшли з ладу при розбурюванні порід категорії міцності 16 — 19 одиниць за шкалою М. М. Протодьяконова. Разом з цим, проведені експерименти на втомну тріщиностійкість зразків зі сталі 14ХНЗМА, які пройшли цикл високотемпературного термомеханічного оброблення (ВТМО) показали приблизно у 2 рази вищу стійкість [8]. Також встановлено, що ВТМО зразків зі сталі 37ХНЗА сприяє зниженню чутливості до утво-



Рис. 1. Загальний вигляд руйнувань шарошок партії тришарошкових бурових доліт

рення і росту тріщин [9]. Оскільки хімічний склад і фізико-механічні властивості сталі 37ХНЗА дуже подібні до хімічного складу і фізико-механічних властивостей серцевини сталі 14ХНЗМА-В у ділянці переходу «серцевина — цементований шар», то можна сподіватися на позитивний вплив ВТМО на ударну в'язкість серцевини шарошок.

Штампування, яке виконують із заготовки, що має після ВТМО залишкову деформацію порядку 40 %, істотно не впливає на ефект, отриманий після ВТМО. Отже, можна припустити, що високотемпературна деформація заготовок перед штампуванням шарошок бурових доліт може позитивно вплинути на тріщиностійкість в умовах ударних навантажень.

Для перевірки висунутої гіпотези було поставлено завдання встановити зв'язок між тріщиностійкістю при ударних навантаженнях шарошок зі сталі 14ХНЗМА-В і параметрами виготовлення заготовки й термічного оброблення шарошок.

Відомо, що ударна в'язкість, будучи інтегральною характеристикою, складається з двох робіт:

$$KCU = K_3 + a_c^0,$$

де K_3 — робота, що затрачається на зародження тріщини; a_c^0 — робота, що затрачається на розповсюдження тріщини.

Складова роботи, яка затрачається на розповсюдження тріщини, чітко відображає надійність роботи металу в конструкції деталі [10].

Для випробовувань на ударну в'язкість використовували зразки 10×10 мм з радіусом концентратора при вершині $r=0,5$ мм. Такий вибір обумовлений технологічністю виконання зразків, а також тим, що хіміко-термічно оброблені шарошки завжди мають концентратори напружень, які полегшують стадію зародження тріщини. Виконання концентратора з гострішим радіусом не змінює характеру злому цементованих зразків, випробовуваних за допомогою маятникового копра на ударну в'язкість.

Заготовки з прокату для ВТМО нагрівали в камерній печі до температури 1453 ± 323 К, контроль температури здійснювали пірометром «Промінь М1». Під час ВТМО стежили, щоб температура заготовки була не меншою за 1073 К. ВТМО проводили на пневматичному кувальному молоті марки МА 4136, в якого маса падаючих частин становить 400 кг. Молот забезпечує 130 ударів за хвилину при енергії удару 11 кН·м. У загальному ступінь деформації зразків становив $\epsilon=40$ %. При виготовленні експериментальних поковок шарошок дотримувались вказаних для зразків температурних режимів і ступеня деформації. Хіміко-термічне оброблення зразків і шарошок здійснювали згідно з діючою на виробництві типовою технологією.

Для якісного оцінювання порівнюваних варіантів оброблення досліджували величину зерна серцевини зразків, яку визначали способом цементації. Для цього зразки нагрівали до температури 1163 К у щільно закритій посудині, наповненій свіжим карбюризатором. Після цементації на зразках з однієї сторони усували поверхневий шар на глибину 3 мм і виготовляли шліфи (рис. 2).



Рис. 2. Типовий зразок зі сталі 14ХНЗМА-В, що імітує поперечний переріз шарошки між вінцями і призначений для встановлення величини зерна

Для виявлення меж зерен шліф травили 5 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті. Встановлення середнього значення величини зерна здійснювали за методикою [11].

Отже, було виготовлено і випробувано на ударну в'язкість шість типів зразків. Отримані результати випробувань наведені у табл. 1. Загальний вигляд зломів випробуваних зразків подано на рис. 3. Отримані дані засвідчують позитивний вплив ВТМО на ударну в'язкість зразків, що були піддані як гартуванню, так і цементації.

З результатів видно, що стійкість до ударних навантажень зразків, підданих гартуванню з високим відпуском (№ 4), порівняно з цементованими (№ 6), є вищою приблизно в 2,6 рази. Цей факт може пояснювати високу схильність до крихкого руйнування шарошок у небезпечному перерізі — ділянці між вінцями, яка піддається цементації.

Слід зауважити, що твердість у цьому перерізі становить HRC 39 — 41, що свідчить про випадок наскрізного

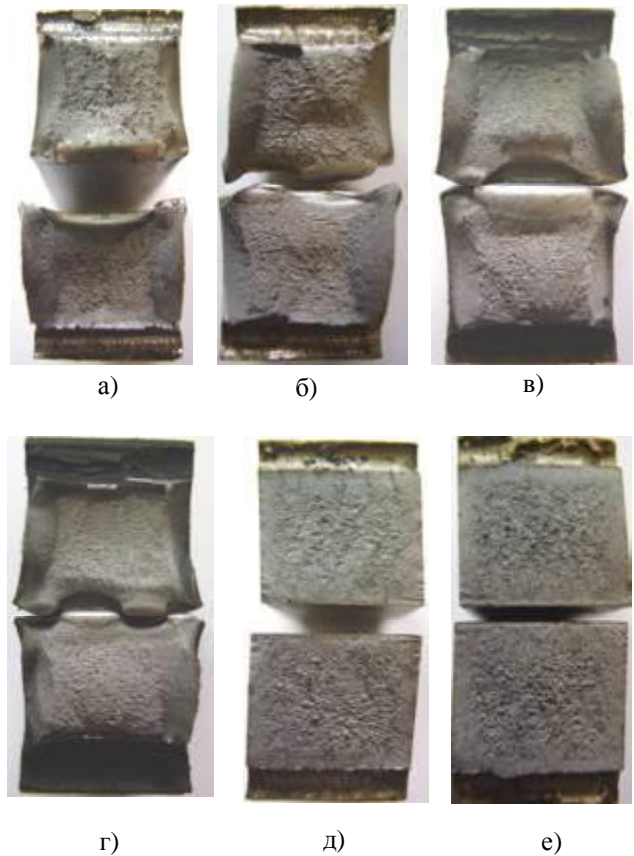


Рис. 3. Зломи зразків зі сталі 14ХНЗМА-В, випробуваних на ударну в'язкість відповідно до табл. 1: а — зразок з партії №1, б — зразок з партії №2, в — зразок з партії №3, г — зразок з партії №4, д — зразок з партії №5, е — зразок з партії №6

Таблиця 1

Вплив параметрів термооброблення сталі 14ХНЗМА-В на ударну в'язкість зразків

Номер партії зразків	Параметри термічного оброблення	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²
1	Вирізані з прокату пройшли: 1 – гартування 1173 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458К	14
2	Виготовлені з поковки (обтискання $\epsilon=40\%$)	17,8
3	Виготовлені з поковки (обтискання $\epsilon = 40\%$) і пройшли: 1 – гартування 1173 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458К	15,3
4	Виготовлені з поковки (обтискання $\epsilon=40\%$) і пройшли: 1 – гартування 1173 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458К	13,7
5	Вирізані з прокату пройшли: 1 – цементацію і гартування 1223 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458К	3,2
6	Виготовлені з поковки (обтискання $\epsilon=40\%$) і пройшли: 1 – цементацію і гартування 1223 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458К	5,1

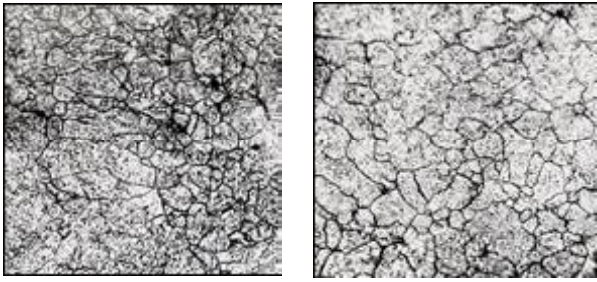
прогартування у місці перепаду перерізів різної величини. Як відомо, у таких випадках [12] у небезпечних перерізах є найбільша ймовірність утворення тріщин.

Оскільки схема контуру обмазки (захисту від цементації поверхонь шарошки) істотно впливає на експлуатаційні показники при бурінні, то важливим є внесення в неї змін. Такими змінами може бути нанесення двох вузьких смуг обмазки в небезпечній ділянці між вінцями №2 і №3. Це повинно підвищити ударну в'язкість у небезпечному перерізі за рахунок усунення суцільного цементованого шару, який володіє підвищеною схильністю до крихкого руйнування в умовах ударних навантажень.

Відомо, що величина зерна істотно впливає на характер руйнування та рівень міцності металів і сплавів [13]. Тому було досліджено характер зміни зерна сталі 14ХНЗМА-В у результаті ВТМО (рис. 4).

На зразках, вирізаних з прокату (у стані постачання), поряд з основною масою аустенітних зерен 7 балів присутні зерна 6 — 5 балів (рис. 4,а). Крім цього, тут спостерігається різнозернистість сталі.

На зразках, підданих ВТМО, виявлено, в основному, зерна аустеніту 7 балів, а також наявність окремих зерен аустеніту 8 і 6 балів (рис. 4,б). У цілому, тут зерна в середньому є меншими порівняно з величиною зерна на сталі в стані постачання.



а)

б)

Рис. 4. Мікроструктура зерен у зразках зі сталі 14ХНЗМА-В, що були оброблені за існуючою технологією (а) та зразки, піддані ВТМО перед хіміко-термічним обробленням (б) ($\times 500$)



а)

б)

Рис. 5. Загальний вигляд контурів протравлених цементацийних шарів на темплетях шарошок №1 бурового долота 244,5 ОК-ПГВ: а — суцільний цементацийний шар у небезпечному перерізі згідно з базовим варіантом обмазки; б — розірваний цементацийний шар у небезпечному перерізі згідно з експериментальним варіантом обмазки

У працях, присвячених впливу величини зерна на опір зародженню тріщини [14], показано, що зі зменшенням зерна збільшується робота розвитку тріщини, оскільки більшість процесів поглинання енергії зв'язана з межами між різноорієнтованими зернами. Це підтверджує отримані дані про позитивний вплив ВТМО зразків зі сталі 14ХНЗМА-В на їхню стійкість до ударних навантажень.

Для встановлення ефективності ВТМО і нової схеми обмазки шарошок (рис. 5) на ВАТ «Дрогобицький долотний завод» виготовили партію доліт (10 шт.).

З метою порівняння стійкості експериментальних доліт відпрацьовували в однакових умовах із серійними при розбурюванні порід категорії міцності 16 — 18 одиниць за шкалою М. М. Протодяконова.

Порівнювані долота відпрацьовували в реальних умовах при осьовому тиску на долото 8,11 МПа, частоті обертання 80 — 100 об/хв, тиску повітряно-водяної суміші 0,42 — 0,50 МПа.

Статистичний аналіз відпрацювання доліт дав змогу встановити середнє значення проходки для серійних (160,8 п/м) і експериментальних доліт (223,8 п/м). При

цьому середнє квадратичне відхилення вибірки для серійних доліт становить $S_1 = 241,954$, а для експериментальних $S_2 = 170,384$. Оцінювання отриманих результатів відпрацювань здійснювали відповідно до рекомендацій [15, 16]. Перевіряння мінімальних і максимальних значень кожної вибірки на аномальність показала, що всі результати відпрацювань вкладаються в межі статистичного розсіювання і є наслідками експлуатаційних властивостей доліт. Так, у серійній партії було виявлено, що половина доліт недопрацювала і вийшла з ладу через руйнування однієї з шарошок у ділянці небезпечного перерізу між вінцями №2 і №3. Для експериментальної партії характерне недопрацювання доліт через заклинювання опори.

Отже, істинне значення проходки, як випадкової величини, відповідно до вибраної довірчої імовірності $P = 0,95$ для серійних H_1 і експериментальних H_2 доліт, відповідно, шукали в межах:

$$\bar{x}_1 - t_a \frac{S_1}{\sqrt{n}} \leq H_1 \leq \bar{x}_1 + t_a \frac{S_1}{\sqrt{n}};$$

$$\bar{x}_2 - t_a \frac{S_2}{\sqrt{n}} \leq H_2 \leq \bar{x}_2 + t_a \frac{S_2}{\sqrt{n}},$$

де \bar{x}_1, \bar{x}_2 — середні значення вибірок проходок серійних і експериментальних доліт відповідно; S_1, S_2 — середні квадратичні відхилення вибірок проходок серійних і експериментальних доліт відповідно; t_a — коефіцієнт, який враховує неточність оцінки S і відповідає квантилю розподілу Стьюдента; n — кількість проходок (доліт у партії).

У нашому випадку відповідно до довірчої ймовірності $P = 0,95$ та кількості ступенів вільності $f = n - 1$ згідно з табл. V [17] коефіцієнт Стьюдента для випадкової величини проходки долота $t_a = 1,833$. Тоді після відповідних математичних дій отримали:

$$20,55 \leq H_1 \leq 301,05;$$

$$135,04 \leq H_2 \leq 332,56.$$

Відносна похибка отриманих середніх значень проходок серійних і експериментальних доліт становить:

$$\varepsilon_1 = \frac{t_a S_1}{\bar{x}_1 \sqrt{n}} 100\% = 87,219\%;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{t_a S_2}{\bar{x}_2 \sqrt{n}} 100\% = 44,13\%.$$

Отже, відносна похибка середніх значень проходки експериментальних доліт є приблизно в 1,976 разів меншою порівняно із серійними долотами.

Порівняння вибірок також здійснювали за допомогою критерію Фішера, який використовується для порівняння дисперсій вибірок:

$$F = \frac{S_{max}}{S_{min}} = \frac{S_2}{S_1} = 1,42.$$

Оскільки ступінь вільності в обох випадках рівний дев'яти і табличне значення критерію Фішера (згідно з

табл. VI [17]) для вибраної довірчої ймовірності отримали $F_T = 3,18$. Оскільки $F < F_T$, то відмінність між дисперсіями є статистично незначною.

Для порівняння розподілів значень проходок знаходили середнє квадратичне відхилення для обох вибірок:

$$S_{1,2}^2 = \frac{(n-1)S_1^2 + (n-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2},$$

де $n_1 = n_2 = n$, та перевіряли, чи справджується умова відмінності між середнім значенням проходок доліт:

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \geq t_\alpha S_{1,2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}},$$

де $t_\alpha = 1,734$ — критерій, вибраний відповідно до кількості ступенів вільності $f_1 + f_2 = 18$ для вибраної довірчої ймовірності з табл. V [17].

Отримали $73 < 162,275$. Оскільки умова не виконується, то відмінність між середнім значенням проходки серійних і експериментальних доліт є неістотною. Якщо експериментальні долота показали незначне збільшення проходки (на 73 п/м) порівняно з серійними, то відносна похибка проходки в експериментальних є приблизно в 1,976 рази меншою, що підтверджує більшу стабільність відпрацювання експериментальних доліт.

Висновок. Встановлено, що тріщиностійкість при ударних навантаженнях шарошок зі сталі 14ХНЗМА-В можна ефективно підвищити шляхом високотемпературного термомеханічного оброблення (ВТМО) заготовок перед штампуванням. Підвищення ударної в'язкості ВТМО обґрунтовується зменшенням величини зерна і підвищенням його однорідності. Захист від цементації в небезпечному перерізі поверхонь між вінцями №2 і №3 шарошки забезпечує підвищення ударної в'язкості, позитивно впливає на стійкість до ударних навантажень.

Експлуатаційні відпрацювання експериментальної партії доліт з шарошками, виготовленими згідно із запропонованою технологією, показали вищу стійкість, що дає підстави використовувати форсовані режими буріння при збільшенні проходки на долото приблизно в 1,4 рази порівняно з серійними.

Література

1. *Застосування* високоміцних сталей як конструкційного матеріалу деталей бурових доліт / С.І. Крижанівський, Ю.Д. Петрина, Т. В. Павленко [та ін.] // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1996. – Вип. 33. – С. 30 – 44.
2. *Петрина Ю.Д.* Критерії застосовності конструкційних сталей для виготовлення бурових доліт / Ю.Д. Петрина, О.В. Корнута, Т.В. Лукань // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – №2 (15). – 2005. – С. 54 – 58.
3. *Петрина Ю.Д.* Мікробудова зламів зразків, використаних для оцінки K_{Ic} високоміцних долотних сталей Ю. Д. Петрина, Т. В. Лукань, О. В. Корнута // Наук. вісник Нац. техн. ун-ту нафти і газу. – № 3 (12). – 2005. – С. 50 – 55.
4. *Петрина Ю.Д.* Розробка науково-прикладних основ підвищення довговічності бурових доліт шляхом раціонального

використання матеріалів: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.07. / Петрина Юрій Дмитрович. – Івано-Франківськ, 1996. – 356 с.

5. *Виноградов В.Н.* Ударно-абразивний знос бурових долот / Виноградов В. Н., Сорокин Г.М., Шрейбер Г.К. – М.: Недра, 1975. – 167 с.

6. *Адаменко В.Н.* О качестве буровых долот / В.Н. Адаменко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1968. – № 7. – С. 70 – 71.

7. *Яким Р.С.* Запобігання крихкому руйнуванню цементованих шарошок бурових доліт / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, Ю.В. Павловський // 36. наук. праць за матеріалами 4-ї Міжнародної конференції „Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 989 – 998.

8. *Петрина Ю. Д.* Теоретичні основи технологічного забезпечення довговічності відповідальних деталей обладнання нафтогазової промисловості / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, А.В. Швадчак // Машинознавство. – 2008. – №12(138). – С. 32 – 36.

9. *Яким Р. С.* Метод оцінки відпускну крихкості долотної сталі 37ХНЗА / Р.С. Яким, Л.Г. Петрина, Т.Б. Пасинович // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – №18. – С.82–85.

10. *Гудков А. А.* Трещиностойкость стали / Гудков А. А. – М.: Металлургия, 1989. – 376 с.

11. *Стали и сплавы.* Методы выявления и определения величины зерна. (СТ СЭВ 1957–79): ГОСТ 5639–89. – М.: Изд-во стандартов СССР, – 22 с.

12. *Малинкина Е.И.* Связь между прокаливаемостью и склонностью к образованию трещин / Е.И. Малинкина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – № 8. – С. 53 – 55.

13. *Hall L. R.* Influence of specimen design in plane strain fracture toughness testing. / L. R. Hall // Fracture Toughness Testing at Cryogenic Temperatures. – Philadelphia: ASTM STP 496. – 1971. – P. 46 – 60.

14. *Иванова В. С.* Разрушение металлов / Иванова В. С. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.

15. *Эйгелес Р.М.* Расчет и оптимизация процессов бурения скважин / Р. М. Эйгелес, Р. В. Стрекалова. – М.: Недра, 1977. – 200 с.

16. *Игнатов В.И.* Организация и проведение эксперимента в бурении / В.И. Игнатов. – М.: Недра, 1978. – 94 с.

17. *Смирнов Н. В.* Курс вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: 1969. – 511с.

Отримана 20.05.09

R. Yakym, Y. Petryna, T. Pasyvnych, A. Kolodyi

The increase of the crack resistance of three-cone rock bits cone

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

Quality interconnection between the crack resistance during the percussion loadings of the cones made of 14ХНЗМА-В steel and blank making parameters and cones heat treatment is determined. Recommendations concerning the defence from the cementation of the certain section of the cone surface in the dangerous cuts during the chemical and heat treatment are scientifically based. Aight-temperature heat machining of the blanks before the rock bits cones pressing and the right coating outline for the defence from the cementation allow to provide higher percussion tenacity in the dangerous cuts of the cone. Operational durability of the experimental lot of rock bits with the cones made according to the suggested technology showed higher resistance. At allows to use baring forced conditions in the case of a rock bit driving increase at least 1,4 times in comparison with the serial ones.