

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ КОНСТРУКТОРСЬКИХ ПОКАЗНИКІВ ЦЕМЕНТОВАНИХ ШАРОШОК ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ ВДОСКОНАЛЕННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

<sup>1</sup>Р.С. Яким, <sup>2</sup>Ю.Д.Петрина, <sup>2</sup>І.С.Яким

<sup>1</sup>Дрогобицький державний педагогічний університет ім. Івана Франка;  
82100, м. Дрогобич, вул. І.Франка, 24, тел. 0679070484, e-mail: Jakym.r@online.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,  
e-mail: public@nuing.edu.ua

*Дослідження має на меті вирішення проблеми забезпечення якісних показників цементованих шарошок тришарошкових бурових доліт. Дослідження проводились в умовах реального виробництва бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, комплексним застосуванням експериментальних лабораторних та натурних випробовувань. Досліджено характер деформації шарошок бурових доліт залежно від фізико-механічних і технологічних показників долотних сталей та параметрів термічних технологічних обробок. Теоретично і експериментально обґрунтовано розроблені шляхи у вдосконаленні технології виготовлення шарошок, що мінімізує їх деформацію. З цієї метою сформульовані вимоги до технології виготовлення заготовок для шарошок доліт. Розв'язано задачу встановленими вимогами до параметрів прогартування долотних сталей що схильні до деформації при термообробках, а також вдосконаленням параметрів операцій термічного зміцнення деталей бурових доліт.*

Ключові слова: цементация, долотна сталь, деформація, прогартування

*Целью исследования есть решение проблемы обеспечения качественных показателей цементованных шарошек трехшарошечных буровых долот. Исследования осуществляли в условиях реального производства буровых долот, при математическом планировании экспериментов, комплексным использованием экспериментальных лабораторных и натурных испытаний. Исследован характер деформации шарошек буровых долот в зависимости от физико-механических и технологических показателей долотных сталей и параметров термических технологических обработок. Теоретически и экспериментально обоснованы разработанные пути совершенствования технологии изготовления шарошек, что минимизирует их деформацию. С этой целью сформулированы требования к технологии изготовления заготовок для шарошек долот. Решено задачу установленными требованиями к параметрам прокаливания долотных сталей, которые склонны к деформации при термообработках, а также совершенствованием параметров операций термического упрочнения деталей буровых долот.*

Ключевые слова: цементация, долотная сталь, деформация, прокаливание

*The aim of this study is to solve the problem of increase of qualitative characteristics of carburized cones of three-cone drilling bits. The study was carried out in the conditions of real drilling bits production under mathematical planning of experiments, and complex utilization of experimental laboratory and field operating tests. The deformation nature of the drilling bit cones depending on physical-and-mechanical and process characteristics of the bit steels and thermal treatment parameters was examined. The developed approaches to cone manufacturing method improvement that minimizes their deformation was grounded both theoretically and experimentally. With this purpose there are some requirement made to the manufacturing method of billets for cone drilling bits. The problem is solved by the set requirements to the parameters of calcined bit steels that can deform when being thermally treated and also by improvement of parameters of the drilling bit details heat strengthening processes.*

Key words: carburization, drilling bit steel, deformation, calcination

Досягнення високих експлуатаційних показників тришарошкових бурових доліт неможливе без підвищення вимог до якості матеріалів і їх зміцнення, вдосконалення технології долотобудування. Для таких доліт застосовують високоміцні долотні сталі, які піддаються складній хімікотермічній обробці, а технологічний процес їх виготовлення є одним з найскладніших в нафтогазовому машинобудуванні. Хіміко-термічна обробка (ХТО) долотних сталей є доволі складним технологічним процесом, що вимагає враховувати цілий комплекс вимог для забезпечення якості деталей доліт [1]. Тим не менше, застосування існуючої технології, яка включає повторні нагріви після цементації веде

до непрогнозованого виникнення деформацій та викривлень шарошки і цапфи лапи. Все це нівелює якісні конструкторські параметри отримані як на попередніх, так і на наступних (викінчувальних) операціях механічного оброблення.

Як відомо, є два види деформації деталей, що піддаються цементації. У першому випадку це відбувається внаслідок зміни питомого об'єму сталі при фазових перетвореннях. У другому – деформація деталей виникає через утворення напружень при неоднаковому і нерівномірному фазовому перетворенні різних зон об'єму деталі. Перший вид деформації є немінучий і його попередити неможливо, його мо-

жна хіба врахувати при призначенні допусків і припусків у проектуванні технологічних операцій. Другий вид деформації можна зменшити, знижуючи величину внутрішніх напружень і зменшення їх нерівномірність у об'ємі деталі при її термообробці. [2-4].

Відомо, що досить ефективним методом зниження деформацій при ХТО є застосування безпосереднього гартування з підстуджуванням замість гартування з подвійного нагріву. Ще більшого ефекту можна досягнути при ступеневому гартуванні в гарячій оливі (150-200°C) та фіксації деталей в пресах, а також жорсткому контролю вуглецевого потенціалу [2]. Зауважимо, що більшість подібних рекомендацій добре себе зарекомендували при виготовленні деталей типу шестерень. Порівняно з ними лапи і шарошки доліт мають на порядок вищу складність, містять ділянки що не підлягають цементації. Деталі доліт неможливо фіксувати, при їх складанні в цементацийні ящики, як це можливо здійснити для деталей типу шестерень. Тому в долотобудуванні намітився специфічний напрямок у вдосконаленні технології ХТО.

За існуючою заводською технологією, ХТО шарошок бурових доліт, температура підстуджування деталей після цементації складає  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  [1]. Зауважимо, що згідно даних [3] підстуджування до температури 820-840°C не змінює параметр решітки аустеніту, тобто відсутнє виділення із аустеніту вуглецю у вигляді карбідів. Одночасно таке підстуджування значно знижує теплові напруження через зменшення градієнта температур при охолодженні. Також деформація і викривлення деталей доліт суттєво зростає у міру забрудненості та перевищення терміну придатності оливи в якій здійснюється охолодження термооброблених шарошок і лап доліт. Таким чином на розглядуваній стадії ХТО є нереалізовані резерви зменшення деформації. З іншої сторони відчувається брак чітких даних про взаємозв'язок між фізико-механічними, технологічними показниками долотних сталей та параметрами технологічного процесу виготовлення деталей доліт. Зокрема немає чітких вимог до параметрів прогартування долотних сталей.

Виходячи з вище викладеного, ціллі даного дослідження є вирішення проблеми забезпечення якісних показників цементованих деталей тришарошкових бурових доліт. Відтак поставлено задачу розкрити взаємозв'язок між фізико-механічними та технологічними показниками долотних сталей, параметрами технологічного процесу виготовлення та якісними конструкторськими показниками порожнин шарошок бурових доліт.

Дослідження проводились в умовах реального виробництва шарошкових бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, статистичної обробки отриманих даних, комплексним застосуванням стандартних експериментальних лабораторних та натурних випробувань.

Порівнюючи вплив різних видів технологічних обробок на деформацію деталей, встановлено [2-4], що найбільша деформація виникає після цементації. Зазначимо, що практично всі автори вказують на дуже суттєвий вплив виготовлення заготовки, а саме виготовлення поковки. Якість уковки і температурний режим можуть спричинити негативний технологічний спадок який різко проявляється у деформації та викривленні деталей складного перерізу при їх цементації.

Встановлено [5], що на поковках шарошок із сталі 14ХН3МА зберігається смугастість в мікроструктурі. Така структура дає розсіювання мікротвердості, що погіршує експлуатаційні показники деталей доліт.

Відомо, що попередній відпал (нагрів не вище  $760^\circ\text{C}$ , витримка 45-60хв) перед гартуванням цементованих деталей з хромонікелевих сталей дає на робочій поверхні зміцнений шар з дрібнодисперсними карбідами, які рівномірно розподілені по об'єму [6]. Також розроблені параметри ступінчатого режиму ізотермічного відпалу [3]: нагрів до  $920-950^\circ\text{C}$ , охолодження до  $650^\circ\text{C}$ , витримка 3-4 год і охолодження до кімнатної температури на повітрі. При малій товщині цементованого шару, наприклад до 1,3мм, така термообробка дає мінімальні значення деформації.

Сформульовано вимоги до комплексного вдосконалення технології виготовлення бурових доліт [7] однак при механічному обробленні порожнин шарошок доліт виявляються проблеми спричинені значними відхиленнями розмірів від регламентованих конструкторсько-технологічною документацією. Зокрема, встановлено, що зниження точності конструкторських параметрів бігових доріжок дає зростання значень деформацій і викривлень деталей після ХТО. Це спричинює труднощі при механічному обробленні порожнин шарошок доліт.

Розточування шарошок слід здійснювати з жорстким дотриманням операційних розмірів, звести до мінімуму конусність та овальність роликів бігових доріжок. З цією метою вивчали вплив ХТО на відхилення від номінальних розмірів порожнин шарошок (сталь 14ХН3МА) різних типорозмірів бурових доліт. Зокрема вимірюванням були піддані партії (в кожній 30 шт.) шарошок бурових доліт діаметром 224,5; 444,5; 490.

Отже, результати вимірювання конструкторських елементів шарошок долота типу 224,5 ОК подано в табл. 1. Зафіксовані відхилення вимагають додаткових затрат на механічне оброблення. Тут оброблення точінням на VSC-250 необхідно вести не за один, а за 2 проходи. Відтак час на операцію механічного оброблення порожнини однієї такої шарошки збільшується до 12,06хв. аналогічну картину спостерігали і для шарошок бурових доліт типу 250,8 ТКЗ.

Шарошки долота типу 393,7 М вимагали призначення збільшення припуску на механічне оброблення кулькової бігової доріжки замкового підшипника кочення. Це вимагає об-

Таблиця 1 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнини шарошок бурових доліт типу 224,5 ОК

Конструктивний елемент порожнин шарошок	Показник відхилення	Значення показників		
		Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3
КБД	min, мм	+0,92	+0,90	+0,90
	max, мм	+1,00	+1,10	+1,20
	$\bar{x}$ , мм	+0,952	+0,988	+1,045
	s	0,017	0,043	0,066
ВБД	min, мм	+0,54	+0,45	+0,48
	max, мм	+0,95	+1,20	+1,00
	$\bar{x}$ , мм	+0,79	+0,759	+0,75
	s	0,094	0,18	0,125
МБД	min, мм	+0,30	+0,35	+0,30
	max, мм	+0,70	+0,65	+0,85
	$\bar{x}$ , мм	+0,488	+0,525	+0,625
	s	0,083	0,066	0,12
Зміщення торця шарошки відносно осі КБД	min, мм	+0,12	+0,12	+0,10
	max, мм	+0,13	+0,15	+0,18
	$\bar{x}$ , мм	+0,125	+0,133	+0,138
	s	0,03	0,008	0,018

s – середньоквадратична похибка вимірювань

Таблиця 2 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнини шарошок (заготовка яких виготовлена способом литва) бурових доліт типу 444,5 МСЗ

Конструктивний елемент порожнин шарошок	Показник відхилення	Значення показників		
		Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3
КБД	min, мм	+1,15	+0,80	+1,15
	max, мм	+1,30	+1,20	+1,20
	$\bar{x}$ , мм	+1,212	+0,988	+1,188
	s	0,031	0,088	0,013
ВБД	min, мм	+0,70	+0,75	+0,80
	max, мм	+1,30	+1,27	+1,25
	$\bar{x}$ , мм	+1,05	+1,10	+1,058
	s	0,132	0,121	0,11
МБД	min, мм	+0,60	+0,62	+0,50
	max, мм	+0,75	+0,70	+0,80
	$\bar{x}$ , мм	+0,667	+0,672	+0,65
	s	0,031	0,019	0,065
Зміщення торця шарошки відносно осі КБД	min, мм	+0,40	+0,38	+0,30
	max, мм	+0,60	+0,50	+0,40
	$\bar{x}$ , мм	+0,468	+0,438	+0,357
	s	0,045	0,052	0,022

s – середньоквадратична похибка вимірювань

робляти цей елемент у три проходи. У цілому, час на операцію механічного оброблення порожнини однієї такої шарошки збільшується до 37,5хв.

Відхилення розмірів порожнини шарошки для доліт типу 444,5 МСЗ подано в табл. 2., а для доліт типу 444,5 МЗ в табл. 3.

Тут також зафіксовано збільшення деформацій особливо по розмірах кулькової та великої роликової бігової доріжки. З отриманих да-

них впливає також те, що чим складніший контур перерізу шарошок вздовж їх осі тим більше проявляються деформації і викривлення.

Припуск на механічне оброблення великої бігової доріжки роликового підшипника кочення шарошок доліт діаметром 444,5 збільшується і час на оброблення цієї поверхні зріс на 15 хв. У цілому час на операцію механічного оброблення порожнини однієї шарошки типу 444,5 М збільшується до 32,35хв, а для шарош-

Таблиця 3 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнини шарошок (заготовка яких виготовлена способом литва) бурових доліт типу 444,5 МЗ

Конструктивний елемент порожнин шарошок	Показник відхилення	Значення показників		
		Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3
КБД	min, мм	+0,75	+0,70	+0,60
	max, мм	+0,90	+0,85	+0,81
	$\bar{x}$ , мм	+0,817	+0,767	+0,703
	s	0,044	0,044	0,061
ВБД	min, мм	+0,80	+0,80	+0,70
	max, мм	+1,10	+1,00	+1,10
	$\bar{x}$ , мм	+0,967	+0,867	+0,90
	s	0,088	0,067	0,10
МБД	min, мм	+0,55	+0,55	+0,55
	max, мм	+0,70	+0,60	+0,75
	$\bar{x}$ , мм	+0,488	+0,583	+0,633
	s	0,058	0,017	0,06
Зміщення торця шарошки відносно осі КБД	min, мм	+0,42	+0,40	+0,35
	max, мм	+0,69	+0,52	+0,46
	$\bar{x}$ , мм	+0,515	+0,455	+0,39
	s	0,061	0,032	0,026

s – середньоквадратична похибка вимірювань

Таблиця 4 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнини шарошок бурових доліт типу РТБ 490 С (заготовка яких виготовлена способом литва)

Конструктивний елемент порожнин шарошок	Показник відхилення	Значення показників		
		Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3
МБД	min, мм	+0,75	+0,75	+0,80
	max, мм	+1,00	+1,20	+1,10
	$\bar{x}$ , мм	+0,913	+0,938	+0,963
	s	0,055	0,103	0,063
КБД	min, мм	+0,90	+0,80	+0,75
	max, мм	+1,35	+1,70	+1,30
	$\bar{x}$ , мм	+1,138	+1,30	+1,137
	s	0,111	0,196	0,131
ВБД	конусність	0,20-0,4	0,25-0,50	0,30-0,4
	овальність	0,15-0,25	0,20-0,30	0,1-0,20
	min, мм	+0,80	+1,00	+0,90
	max, мм	+0,90	+1,25	+1,10
	$\bar{x}$ , мм	+0,875	+1,087	+1,00
	s	0,048	0,059	0,041

s – середньоквадратична похибка вимірювань

ки долота типу 444,5 МСЗ час збільшується до 50 хв.

Механічне оброблення порожнини шарошки долота типу РТБ 490 С також необхідно здійснювати за 2 проходи, відтак час на цю операцію збільшується до 54,04хв. Припуск на механічне оброблення необхідно призначати відповідно до відхилень які подано в табл. 4.

Для більш точного встановлення параметрів деформацій і викривлень порожнин шарошок досліджено партію шарошок типу 444,5 М. Вимірювання проводили згідно схеми, що по-

дана на рис. 1. Зафіксовані відхилення розмірів подано в табл. 5.

Вивчення взаємозв'язку між конструкторськими параметрами шарошок та їх схильністю до деформацій показав наступне. Для доліт діаметром 224,5, у яких шарошки виконуються під вставне породоруйнівне оснащення, максимальне відхилення розмірів фіксували на шарошках №3. В шарошках з фрезерованим породоруйнівним оснащенням максимальні відхилення виявлено в шарошках №1 та №2. У всіх шарошках максимальні відхилення розмірів

Таблиця 5 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнини шарошок бурових доліт типу 444,5 М

Елемент конструкції відповідно до схеми рис. 1	Значення припуску			
	Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3	
ВБД	$B_1$	+0,24	-0,12	-0,18
	$\Gamma_1$	+0,79	+0,51	-0,08
	$B_2$	-0,03	+0,95	+0,72
	$\Gamma_2$	+0,44	+0,35	+0,78
МБД	$B_1$	+0,86	+0,95	+0,80
	$\Gamma_1$	+1,20	+0,76	+0,76
	$B_2$	+0,93	+1,15	+0,81
	$\Gamma_2$	+0,85	+0,78	+0,80
КБД	$B_1$	+0,88	+1,05	+1,00
	$\Gamma_1$	+1,15	+0,81	+0,64
	$B_2$	+1,00	+0,87	+0,88
	$\Gamma_2$	+0,90	+0,95	+0,75
Зміщення КБД, мм	$B$	+0,30	-0,08	+0,10
	$\Gamma$	0,00	+0,20	-0,05

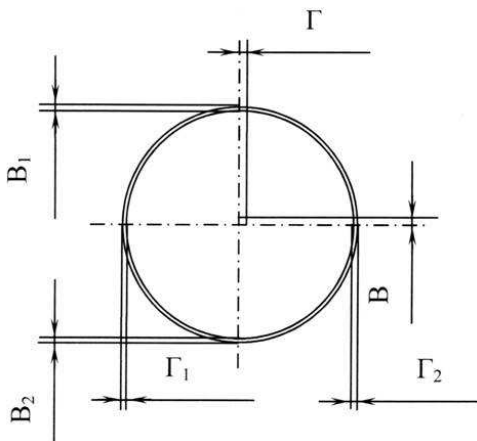


Рисунок 1 – Схема обмірювання бігових доріжок порожнин шарошок бурових доліт

зафіксовано на великій роликовій біговій доріжці (ВБД) та на кульковій біговій доріжці (КБД). Зауважимо, що ВБД сприймає найбільші навантаження в процесі роботи долота і визначає вантажність опори секції долота, а КБД є частиною замкового підшипника, який визначає роботу всіх роликових рядів опори долота. А це означає, що до технології механічного оброблення цих відповідальних елементів опори повинні висуватись підвищені вимоги. Повинні забезпечуватись висока однорідність фізико-механічних показників зміцнених шарів, стала товщина цементованих шарів тощо. Критеріями якості загартованих шарів КБД та ВБД є висока тріщиностійкість та контактна витривалість.

Аналізом відхилень від номінальних розмірів у різних точках перерізу бігових доріжок згідно рис. 1 встановлено (табл. 5), що після операції механічного оброблення зміцнений шар буде мати неоднорідну товщину. У окремих місцях товщина цементованого шару може зменшуватись до 0,1-0,3мм. Відтак виникають

ділянки бігових доріжок з різко пониженою концентрацією вуглецю й твердістю, що різко знижує контактну витривалість опор доліт.

Шліфування порожнин шарошок із значними відхиленнями розмірів від номінальних спричинює утворення припалів, мікротріщин на бігових доріжках. У ділянці бігової доріжки КБД шарошки виникають небезпечні перерізи. Неоднаковість товщини загартованого шару, мікротріщини в ньому (рис. 2) призводить до розколювання тіла шарошок ще на першій годині роботи долота на вибої.

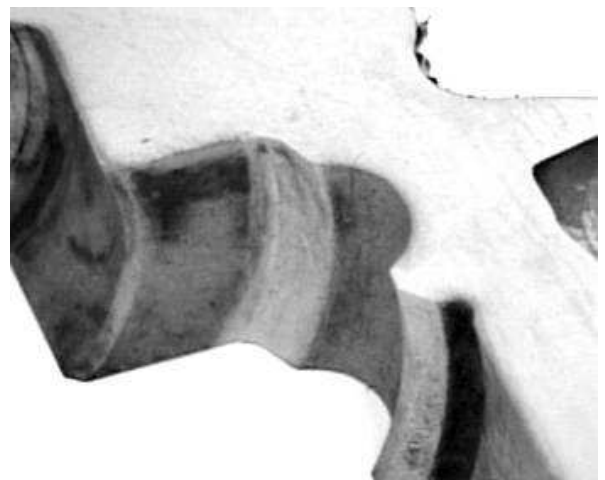


Рисунок 2 – Загальний вигляд темплету шарошки з тріщиною на глибину 2,1 мм вздовж цементованої кулькової бігової доріжки (товщина цементованого шару 1,3-1,6мм)

Токарне оброблення порожнин шарошок також супроводжується проблеми через збільшення вібрацій, зниження стійкості токарних різців. За таких умов важко досягти високої якості конструкторських показників бігових доріжок. Це також різко знижує довговічність опор доліт.

Таблиця 6 – Відхилення розмірів від номінальних розмірів бігових доріжок порожнин шарошок (заготовка яких виготовлена способом литва) бурових доліт типу 224,5 Т

Конструктивний елемент порожнин шарошок	Показник відхилення	Значення показників		
		Шарошка №1	Шарошка №2	Шарошка №3
КБД	min, мм	+0,85	+1,00	+0,75
	max, мм	+1,92	+1,45	+1,30
	$\bar{x}$ , мм	+1,468	+1,213	+1,012
	s	0,246	0,101	0,12
ВБД	min, мм	+1,54	+1,35	+1,48
	max, мм	+2,15	+2,20	+1,90
	$\bar{x}$ , мм	+0,1,873	+1,763	+1,67
	s	0,132	0,184	0,106
МБД	min, мм	+0,65	+0,55	+0,55
	max, мм	+1,15	+1,12	+1,00
	$\bar{x}$ , мм	+0,873	+0,805	+0,712
	s	0,105	0,118	0,101
Зміщення торця шарошки відносно осі КБД	min, мм	+0,2	+0,20	+0,23
	max, мм	+0,30	+0,32	+0,35
	$\bar{x}$ , мм	+0,242	+0,263	+0,285
	s	0,022	0,025	0,026

s – середньоквадратична похибка вимірювань

Таблиця 7 – Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь	Процентний вміст хімічних елементів, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	P	S
20ХН3А	0,21	0,31	0,45	0,84	3,05	0,06	0,19	0,01	0,03	0,015	0,015
14ХН3МА	0,13	0,27	0,64	1,25	3,23	0,11	0,20	0,02	0,02	0,015	0,015

Таблиця 8 – Фізико-механічні показники досліджуваних сталей

Сталь	Твердість у стані поставки, НВ	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
20ХН3А	240	1030	932	10	45	12
14ХН3МА	265	980	882	12	50	11

Вивчення впливу способу виготовлення заготовки шарошки показало, що заготовки з литої сталі проти поковок дають більші значення відхилень розмірів. Вимірюваннями встановлено, що відхилення від номінальних для литих шарошок збільшуються майже в 2 рази (табл. 6). Зокрема, шарошки доліт типу 244,5 Т виготовлені литвом вимагали збільшення кількості проходів при шліфуванні порожнини після ХТО до 3 разів.

Відомо, що величина об'ємних змін при гартуванні прямо пропорційна вмісту вуглецю в сталі і кількості утвореного мартенситу після гартування. При збільшенні прогартування сталі деформація також зростає. В [4] описано різке підвищення деформацій шестерень виготовлених зі сталей що володіли підвищеною прогартуваністю. Тому висунуті рекомендації щодо контролю сталі по цьому параметру. Стосовно долотних сталей та деталей доліт такі дані відсутні. Відтак, другий етап досліджень присвячено вивченню впливу фізико-механі-

чних показників та прогартування долотних сталей на деформацію і викривлення шарошок доліт.

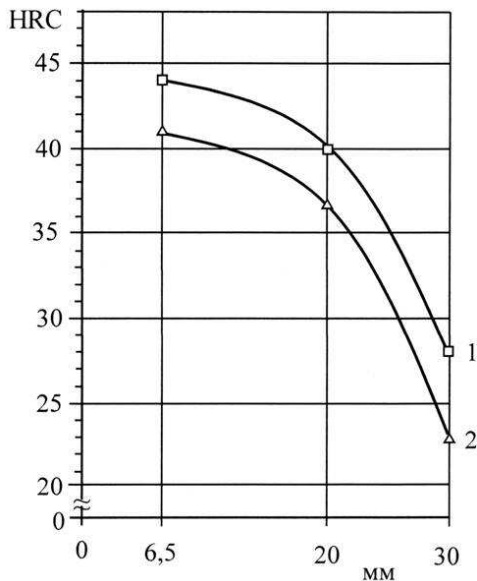
Досліджували сталі хімічний склад яких подано в табл. 7, а фізико-механічні показники в табл. 8.

Перша партія шарошок (94 шт) доліт типу 224,5 ОК була виготовлена зі сталі 14ХН3МА. Після гарячого об'ємного кування і охолодження на повітрі заготовки шарошок проходили нормалізацію від температури 880-900°C з охолодженням на повітрі та високим відпуском при 680°C з охолодженням разом з пічкою до 550°C, потім на повітрі. У результаті отримували повну фазову перекристалізацію сталі, і як наслідок – відновлення величини зерна перегрітої сталі поковки, підвищення однорідності та дрібнозернистості структури. Це також покращує технологічні показники сталі поковки.

Друга партія шарошок (25 шт) була виготовлена зі сталі 20ХН3А. Згідно заводських параметрів провели виготовлення поковок. Далі

заготовки пройшли чорнове обточування. Заготовки піддавали проміжному високому відпуску при температурі 650°C на двох перших етапах і 580°C на останньому. Температура підстигнення після цементації дорівнювала  $830 \pm 10^\circ\text{C}$ .

Досліджувані сталі випробували на прогартування, результати яких подано на рис. 3. В обох випадках для дослідних сталей 20ХН3А і 14ХН3МА прогартування на відстані від торця 6,5 мм та 30 мм мають значну різницю (HRC16 і HRC18 відповідно для сталей 20ХН3А і 14ХН3МА). Такий перепад твердості у перерізі термооброблених деталей є найбільш імовірною причиною зростання їх деформацій і викривлень.



1 – Сталь 20ХН3А, 2 – Сталь 14ХН3МА

Рисунок 3 – Прогартуваність досліджуваних сталей

Перед ХТО в 4-х шарошках з 10-ти (перша партія), при їх обмірюванні, зафіксовано конусність великої роликівної бігової доріжки у межах від 0,03 до 0,07 мм. У другій партії шарошок конусність роликівної бігової доріжки зафіксована у межах від 0,02 до 0,03 мм. Це свідчить про недостатню жорсткість вимог до технологічної операції чорнового точіння порожнини шарошки.

Згідно серійної технології середнє значення величини конусності ВБД шарошки з першої партії після цементації з високого відпуску дорівнювало 0,076 мм, у другій партії – 0,119 мм.

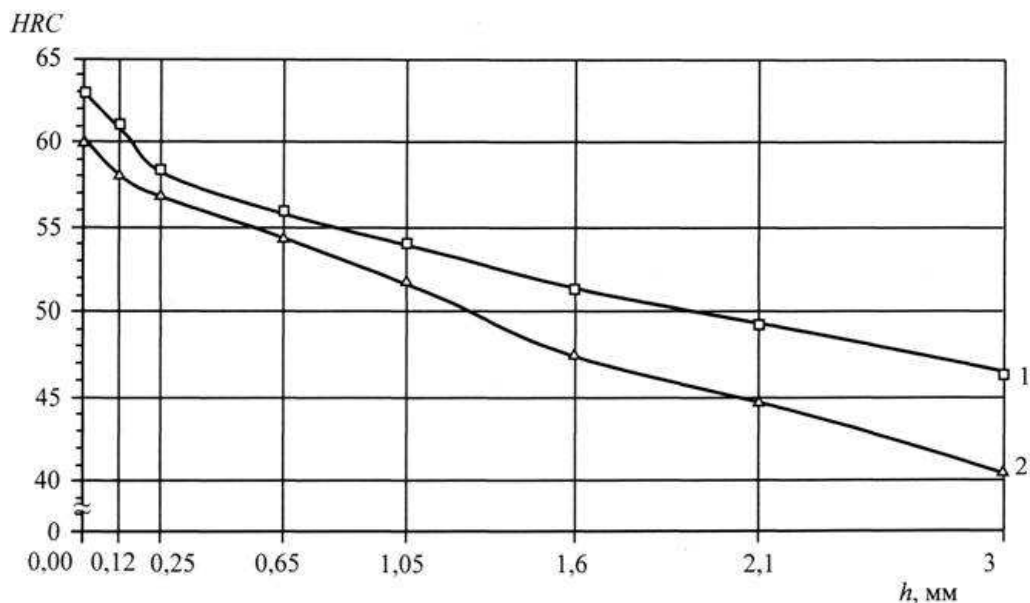
Здійснено стандартний аналіз досліджуваних сталей на спеціально підготовлених темплетях шарошок по показниках розподілу твердості (рис. 4) та концентрації вуглецю (рис. 5) від поверхні в серцевину великої бігової доріжки. Встановлено деяку відмінність у величині значень при практично однаковому характері отриманих кривих 1 і 2 (рис. 4, 5), що підтверджує якість ХТО.

Після повної ХТО конусність роликівної бігової доріжки шарошки з першої партії шарошок дорівнювала 0,08 мм, у другій партії – 0,136 мм.

Згідно експериментальної технології середнє значення величини конусності роликівної бігової доріжки шарошок з першої партії після цементації в високого відпуску дорівнювало 0,012 мм, у другій партії – 0,029 мм.

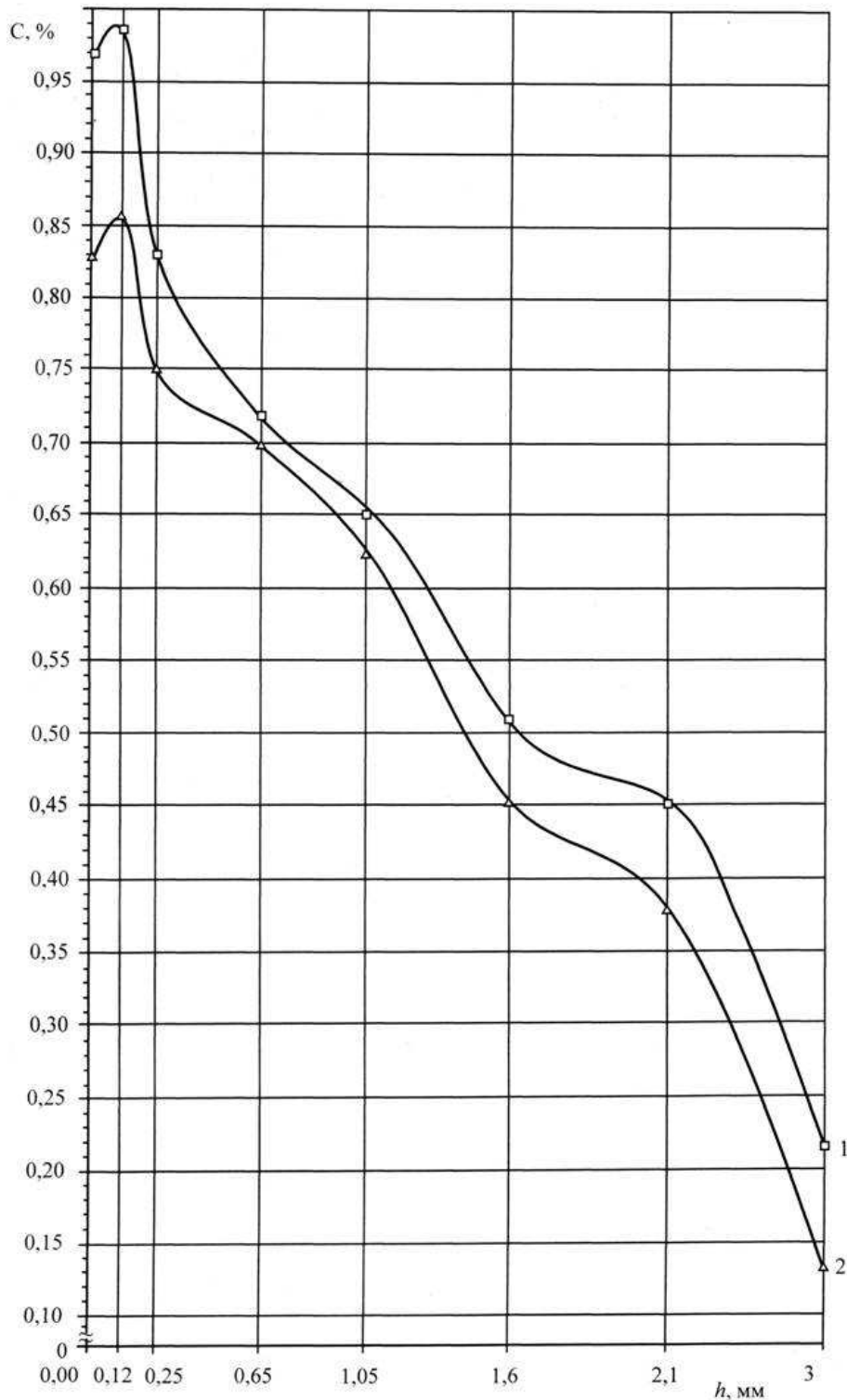
Після повної ХТО конусність роликівної бігової доріжки шарошки з першої партії дорівнювала 0,038 мм, у другій партії – 0,052 мм.

Ці дані показують, що деформації є менші після проведення операції високотемпературного відпуску для зняття внутрішніх напружень після чорнового розточування порожнини шарошки. Ця операція порівняно з попередньою термічною обробкою шарошок (нормалізація +



1 – Сталь 20ХН3А, 2 – Сталь 14ХН3МА

Рисунок 4 – Розподіл твердості від поверхні в серцевину після цементації і гартування на великій бігівій доріжці шарошки



1 – Сталь 20ХНЗА, 2 – Сталь 14ХНЗМА

Рисунок 5 – Пошарова концентрація вуглецю на великій біговій доріжці шарошок

відпуск) забезпечує зменшення деформацій шарошок після повної ХТО в 2-2,5 рази. Такі результати добре узгоджуються з даними робіт [2, 3].

Для встановлення взаємозв'язку між прогартовуваністю долатної сталі й концентрацією вуглецю в серцевині шарошки та схильністю до утворення конусності на ВБД шарошок провели експериментальні дослідження.

Отже, досліджували вплив двох факторів: прогартовування сталі (різниця між твердістю в точках на відстані від поверхні 6,5 мм та 30 мм), позначили „Л” і процентним вмістом вуглецю в серцевині шарошок, який позначили „С” на величину утвореної конусності великої бігової доріжки шарошок, позначали „К”.

Забезпечення відтворення експериментами всіх необхідних комбінацій з досліджуваних



Таблиця 9 – Матриця планування експерименту

№ досліджу $i$	Фактори			$K$				$S_i$
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	Повтори досліджу, $y_{in}$			$\bar{y}_i$	
1	+	+	-	0,120	0,125	0,130	0,125	$5,0 \times 10^{-3}$
2	+	+	+	0,185	0,190	0,200	0,192	$7,6 \times 10^{-3}$
3	+	-	+	0,028	0,032	0,029	0,030	$2,1 \times 10^{-3}$
4	+	-	-	0,060	0,068	0,070	0,066	$5,3 \times 10^{-3}$

факторів був вибраний план повного двофакторного експерименту  $2^2$  [8].

Кодові значення факторів будуть відповідно  $X_1$ ,  $X_2$ .

$$X_1 = \frac{P - 0,5(P_{max} + P_{min})}{0,5(P_{max} - P_{min})}, \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{C - 0,5(C_{max} + C_{min})}{0,5(C_{max} - C_{min})}. \quad (2)$$

Граничні значення прогартовування сталі  $P_{max} = HRC15$  і  $P_{min} = HRC5$ , а концентрації вуглецю  $C_{max} = 0,2\%C$  і  $C_{min} = 0,13\%C$ .

Одержимо:

$$X_1 = 0,2P - 2, \quad (3)$$

$$X_2 = 28,571C - 4,714. \quad (4)$$

Як відклик  $D$  виберемо емпіричне рівняння регресії у вигляді полінома першого порядку:

$$K = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2, \quad (5)$$

де  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коефіцієнти функції.

Відповідно оцінку функції відклику (емпіричного рівняння регресії) шукається у вигляді:

$$\hat{K} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2, \quad (6)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – оцінки коефіцієнтів  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ .

Згідно плану експерименту було проведено  $N = 4$  дослідів, з числом повторів кожного досліджу  $m = 3$ , необхідна кількість дослідних зразків  $mN = 12$ .

Середнє значення напрацювання  $\bar{y}_i$  і середнє квадратичне відхилення  $S_i$  визначається за стандартними формулами [8]:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 y_{in}, \quad (7)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sum_{n=1}^3 y_{in}^2 - \frac{\left( \sum_{n=1}^3 y_{in} \right)^2}{3} \right)}, \quad (8)$$

де  $y_{in}$  – потокове значення величини конусності ВБД.

Матриця плану експерименту, значення відклику, представлені в табл. 9.

За результатами досліджень оцінки коефіцієнтів функції відклику:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i = 0,103, \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} \bar{y}_i = 0,055, \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} \bar{y}_i = 0,008. \quad (11)$$

Оцінка функції відклику в кодованих значеннях факторів:

$$\hat{K} = 0,103 + 0,055 X_1 + 0,008 X_2. \quad (12)$$

Підставимо замість  $X_1$ ,  $X_2$  їхні значення (3, 4), отримаємо оцінку залежності середнього значення конусності ВБД шарошки після ХТО від прогартовування і вмісту вуглецю в долотній сталі шарошок:

$$\hat{K} = -0,045 + 0,011P + 0,229C. \quad (13)$$

Статистичний аналіз результатів дослідження починається з перевірки однорідності дисперсій.

Критичне значення критерію Кохрена:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = 0,501. \quad (14)$$

Оскільки при довірчій ймовірності  $P_{ДОВ} = 0,95$  і числах вільності  $k_1 = m - 1 = 2$ ,  $k_2 = N = 4$  критичне значення критерію Кохрена –  $G_{KP} = 0,7679$ , що вибирається з [9], гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, оскільки  $G_{KP} > G$ .

Для перевірки адекватності моделі провели додатковий експеримент у центрі плану експерименту. Отже випробували три шарошки у яких сталь мала:  $P = HRC10$  та  $C = 0,16\%C$ . У результаті встановлені значення конусності на ВБД: 0,039 мм, 0,045 мм, 0,041 мм, відтак середнє значення рівне і середнє квадратичне відхилення значення конусності ВБД шарошок, у додатковому досліді:

$$\bar{y}_D = 0,042, \quad S_D^2 = 3,1 \times 10^{-3}. \quad (15)$$

Для знаходження границь, в яких знаходиться істинна величина середнього значення конусності ВБД шарошок визначалися верхня

( $K_{max}$ ) і нижня ( $K_{min}$ ) границі довірчого інтервалу:

$$K_{max} = \bar{y}_D + t \frac{S_D}{\sqrt{N}}, \quad (16)$$

$$K_{min} = \bar{y}_D - t \frac{S_D}{\sqrt{N}}, \quad (17)$$

де  $N=3$  – число повторів додаткового дослідження,  $t=4,303$  – квантиль розподілу Стьюдента [9], який вибирається залежно від числа вільності  $k = N - 1 = 2$ .

$$K_{max} = 0,11, \quad K_{min} = 0,094. \quad (18)$$

Розрахована величина оцінки середнього значення напрацювання додаткового дослідження:

$$\hat{K} = 0,102. \quad (19)$$

Розрахована величина (19) знаходиться в межах довірчого інтервалу (18), що є основним для прийняття гіпотези про адекватність моделі.

Для перевірки значимості коефіцієнтів в моделі обраховується дисперсію відтворення:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 = 2,892 \times 10^{-5}. \quad (20)$$

Дисперсія коефіцієнтів моделі:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{mN} = 2,41 \times 10^{-6}. \quad (21)$$

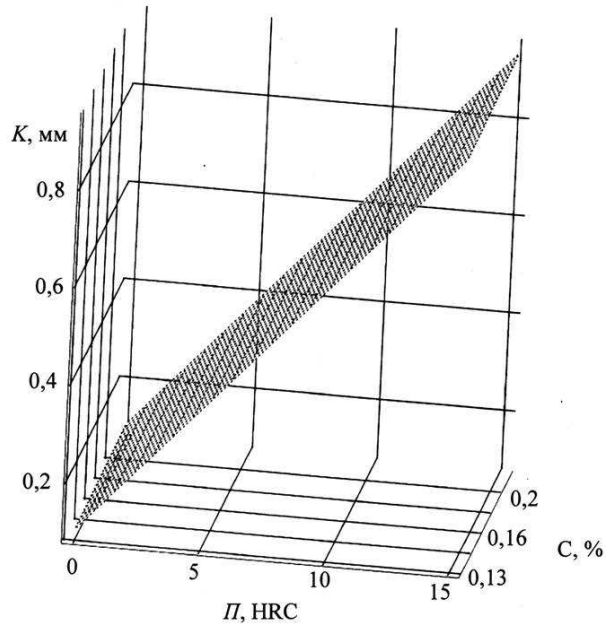
Експериментальні значення критерію Стьюдента  $t_1$ ,  $t_2$  для коефіцієнтів  $b_1$ ,  $b_2$ , відповідно рівні:

$$t_1 = \frac{|b_1|}{\sqrt{S_b^2}} = 35,484, \quad (22)$$

$$t_2 = \frac{|b_2|}{\sqrt{S_b^2}} = 5,161. \quad (24)$$

Для встановлення значимості коефіцієнтів моделі необхідно порівняти отримані значення з табличними. Табличне значення критерію Стьюдента  $t = 2,306$  – квантиль розподілу Стьюдента [9], який вибирається залежно від числа вільності  $k = (m - 1)N = (3 - 1)4 = 8$ , та довірчої ймовірності  $P_{ДОВ} = 0,95$ . Оскільки табличне значення критерію Стьюдента менше за експериментальні значення цього критерію (22, 24) то можна твердити, що всі коефіцієнти моделі значимі. Отже, визначена залежність у визначених межах залишається в силі. Ця залежність (13) дає можливість розрахувати і прогнозувати утворення конусності ВБД шарошок доліт на етапах вибору матеріалів та підготовки виробництва, при призначенні параметрів допусків на механічне оброблення порожнин шарошок.

За допомогою програмного продукту Mathcad була побудована модель залежності середнього значення утворення конусності на ВБД шарошок від досліджуваних факторів (рис. 6).



**Рисунок 6 – Модель впливу прогартовування ( $L$ ) та вмісту вуглецю в серцевині шарошки ( $\%C$ ) на середнє значення конусності ВБД ( $K$ ) шарошок після ХТО**

Зокрема, при зростанні значень досліджуваних факторів в заданих межах, спостерігалося різке збільшення величини конусності ВБД шарошок після ХТО (рис. 6). При цьому показник прогартовування має приблизно в 6,7 разів більший вплив на виникнення конусності ВБД шарошок порівняно з показником вмісту вуглецю в серцевині сталі шарошки.

Отримані експериментальні дані показують, що зменшенню деформації сприяє:

Застосування сталей що дають мінімальний перепад значень концентрації вуглецю між поверхневими шарами цементованого шару і серцевиною. Зокрема вищий вміст вуглецю в сталі 20ХН3А порівняно зі сталлю 14ХН3МА (21%С проти 13%С) забезпечує такі вимоги.

Перспективним є введення вхідного заводського контролю за показником прогартовування, а саме – різниці між твердістю на відстані від торця 6,5мм та на відстані від торця 30мм. При цьому пропонується встановити допустиме значення такої різниці не більшим HRC10.

Проведення нормалізації і високого відпуску замість ізотермічного відпалу при виготовленні заготовок. Обмеження температури нагріву заготовок під шарошку і завершення гарячої пластичної деформації при температурах нижче температур рекристалізації аустенітного зерна (<1100°C).

Жорсткий контроль температури підстуджування після цементації, яка повинна дорівнювати  $830 \pm 10^\circ\text{C}$ . Температури підстуджування рівні  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  за умов експериментальних досліджень виявилися не оптимальними.

Заготовки з плавок сталей через які виникають підвищені відхилення розмірів від номінальних слід піддавати проміжній термічній обробці після їх чорнового токарного оброб-

лення (рекристалізаційний відпал, або високий відпуск).

Перспективним є впровадження точіння у розмір перед ХТО звівши до мінімуму фінішні механічні операції після термообробки.

У цілому, можна передбачати, що поєднання всіх вище перерахованих заходів забезпечить сталість деформації і викривлень шарошок в межах до 0,10-0,12мм навіть при несприятливому різкому перепаді розподілу вуглецю та твердості у загартованому перерізі бігових діржок шарошок бурових доліт.

### Висновки

У результаті досліджено характер деформації шарошок бурових доліт залежно від фізико-механічних і технологічних показників долотних сталей та параметрів термічних технологічних обробок. Теоретично і експериментально обґрунтовано розроблені шляхи у вдосконаленні технології виготовлення бурових доліт, що мінімізує деформацію шарошок. З цією метою сформульовані вимоги до технології виготовлення заготовок для шарошок доліт. Для таких заготовок рекомендується нагрів до 1100°C і завершення гарячої пластичної деформації при температурах нижче температур рекристалізації аустенітного зерна. Заготовки піддають нормалізації і високому відпуску. Також встановлені вимогами до параметрів прогартовування долотних сталей, що схильні до деформації: різниця між твердістю на відстані від торця 6,5мм та на відстані від торця 30мм не повинна перевищувати HRC10. Рекомендується застосовувати плавки долотних сталей котрі дають мінімальний перепад значень концентрації вуглецю між поверхневими шарами загартованого цементованого шару і серцевиною. При ХТО слід ретельно дотримуватись температури підстуджування після цементації, яка повинна бути рівною 830±10°C. У випадках виявлення схильності плавки долотної сталі до виникнення деформацій шарошок слід заготовки після чорнового точіння піддавати рекристалізаційному відпалу, або високому відпуску.

Створені нові шляхи підвищення якісних показників цементованих шарошок тришарошкових бурових доліт апробовані в умовах реального виробництва і прийняті до подальшого вдосконалення якості й підвищення конкурентоздатності доліт.

Надалі перспективним є розробка нових технологій для підвищення точності конструкторських параметрів та забезпечення сприятливого технологічного спадку на етапах механічного оброблення деталей бурових доліт. Це повинно підвищити якісні експлуатаційні показники вітчизняних тришарошкових бурових доліт, їх конкурентоздатність на світовому ринку бурової техніки.

### Література

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

2 Термическая обработка в машиностроении: справочник / [А.В. Арендарчук, А.А. Астафьев, Ю.А. Башнин и др.] ; под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

3 Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей / В.С. Сагарадзе. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.

4 Козловский И.С. Химико-термическая обработка шестерен / И.С. Козловский. – М.: Машиностроение, 1970. – 230 с.

5 Вдовин А.А. Исследование структуры и твердости штамповки шарошки из стали 14ХНЗМА / А.А. Вдовин, Т.М. Пугачева // Тезисы докладов XXXIII Самарской областной студенческой научной конференции. Ч.1. Общественные, естественные и технические науки (18-28 апреля 2007 г. Самара) / Министерство культуры и молодежной политики Самарской области; ГУ агентство по реализации молодежной политики; Совет ректоров вузов Самарской области; Самарский областной совет по научной работе студентов. – Самара: ЗАО „Издательский дом Федоров”, 2007. – С. 147 – 148.

6 Желиховская Э.Н. Отжиг с целью оптимизации распределения, размеров и формы карбидной фазы в цементированном слое / Э.Н. Желиховская, А.С. Заваров, С.В. Грачев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 6. – С. 24 – 26.

7 Яким Р.С. Прогресивні підходи у вдосконаленні технології виготовлення тришарошкових бурових доліт / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // 11-тий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: праці. (Львів 25-27 травня 2013 р.) / М-во освіти і науки України, Нац. ун-т „Львівська політехніка” [та ін.]. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2013. – С. 175 – 176.

8 Петрина Ю.Д. Основи наукових досліджень для інженерів: навч. посіб. для вищих технічних закладів освіти / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 153 с.

9 Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 464 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
15.01.14*

*Рекомендована до друку  
професором Крилем Я.А.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Гевком Б.М.  
(Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль)*