

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ КОНСТРУКТОРСЬКИХ ПОКАЗНИКІВ ЦЕМЕНТОВАНИХ ЦАПФ ЛАП ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ НА ЕТАПАХ ПІДГОТОВКИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

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

<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 цапф лап тришарошкових бурових доліт. Дослідження проводились в умовах реального виробництва бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, комплексним застосуванням експериментальних лабораторних та натурних випробовувань. Встановлено взаємозв'язок між фізико-механічними, технологічними показниками долотних сталей 19ХГНМА-В і 21ХГНМА-В та рівнем забезпечення точності конструкторських параметрів цапф лап сформованих на етапах їхнього механічного оброблення. Досліджено характер деформації за критерієм виникнення биття бігових доріжок цапф лап залежно від фізико-механічних і технологічних показників долотних сталей. Встановлено емпіричне рівняння регресії, що дозволяє прогнозувати величину биття цапф лап за концентрацією вуглецю та молибдену в плавці долотної сталі. Сталь 21ХГНМА-В проти сталі 19ХГНМА-В після хіміко-термічної обробки (цементациї) дає удвічі менші значення биття бігових доріжок цапф лап. Аналізом прогартовування та розподілів твердості й концентрації вуглецю в цементованих і загартованих цапфах лап встановлено, що сталь 21ХГНМА-В порівняно зі сталлю 19ХГНМА-В краще забезпечує вимоги до контактної витривалості, тому її рекомендується застосовувати для виготовлення лап бурових доліт.

Ключові слова: цементация, долотна сталь, деформація, биття, цапфа лапи.

Целью исследования является решение проблемы обеспечения качественных показателей цементованных цапф лап трехшарошечных буровых долот. Исследования проводились в условиях реального производства буровых долот, при математическом планировании экспериментов, комплексным использованием экспериментальных лабораторных и натуральных испытаний. Установлена взаимосвязь между физико-механическими и технологическими показателями долотных сталей 19ХГНМА-В и 21ХГНМА-В и уровнем обеспечения точности конструкторских параметров цапф лап, сформированных на этапах их механической обработки. Исследован характер деформации по критерию возникновения биения беговых дорожек цапф лап в зависимости от физико-механических и технологических показателей долотных сталей. Установлено эмпирическое уравнение регрессии, которое позволяет прогнозировать величину биения цапф лап по концентрации углерода и молибдена в плавке долотной стали. Сталь 21ХГНМА-В по сравнению со сталью 19ХГНМА-В после химико-термической обработки (цементации) дает в два раза меньшие значения биения беговых дорожек цапф лап. Анализом прокаливания и распределения твердости, и концентрации углерода в цементованных и закаленных цапфах лап установлено, что сталь 21ХГНМА-В по сравнению со сталью 19ХГНМА-В лучше обеспечивает требования к контактной выносливости, поэтому ее рекомендуется использовать для изготовления лап буровых долот.

Ключевые слова: цементация, долотная сталь, деформация, биение, цапфа лапы.

The aim of the study is to solve the problem connected with provision of qualitative parameters of the carburized three-cone drill bit arm pins. The studies were carried out under conditions of drill bits real production with the help of mathematical planning of experiments and complex utilization of experimental laboratory and natural tests. The interconnection between the physical-mechanical technological parameters of 19ХГНМА-В and 21ХГНМА-В drill bit steels and provision of accuracy of the arm pins design parameters developed at the stages of their mechanical treatment was determined. The nature of deformation on the basis of the criterion of run-out formation of arm pins races depending on physical-mechanical and technological parameters of the drill bit steels was studied. The empirical equation of regression that allows to predict the arm pins run-out value according to the concentration of carbon and molybdenum in the drill bit steel melting was defined. 21ХГНМА-В steel, when compared with 19ХГНМА-В steel, after chemical-thermal treatment (carburizing), gives half as large values of arm pins races. The analysis of hardenability, hardness distribution, and carbon concentration in the carburized and hardened arm pins was used to determine that 21ХГНМА-В steel, when compared with 19ХГНМА-В steel, better meets the requirements for contact durability. As a result, 21ХГНМА-В steel is recommended to be used for manufacturing of drill bit arm pins.

Keywords: carburizing, drill bit steel, deformation, run-out, arm pin.

**Вступ.** Опори кочення тришарошкових бурових доліт працюють в складних умовах контактного навантаження. Тому до їхніх спряжених елементів висувається комплекс строгих вимог. Це, у свою чергу, ставить перед долото-

будуванням комплексну наукоємну задачу з вдосконалення існуючої технології виготовлення тришарошкових бурових доліт та підвищення їхньої якості до рівня світових стандартів.

Аналізом причин відмов тришарошкових бурових доліт встановлено, що основною причиною низьких експлуатаційних показників є недопрацювання опор (у окремих випадках більше 75% у партії доліт). Зокрема, через те що бігові доріжки цапфи лапи зазнають локального навантаження в нижній ділянці. Тут утворюються перші пошкодження, пінтинги, які швидко прогресують у розмірах. Результатом цього є руйнування відповідальних поверхонь елементів опори. Це веде до порушень робочого режиму роботи підшипників, зростання величини зазорів у секції долота, перекосів шарошки відносно осі цапфи. Тому вибір сталей для лап доліт, технології виготовлення заготовок, точності механічного оброблення, а також технології зміцнення є комплексною проблемою в долобудуванні.

У технологічному процесі виготовлення деталей доліт найбільш складними є механічне оброблення та хіміко-термічна обробка (ХТО). Причому ХТО змінює якісні конструкторські параметри елементів опор кочення, які були отримані при механічному обробленні цапф лап і порожнин шарошок. Якщо для шарошок бурових доліт встановлено характер деформації залежно від фізико-механічних і технологічних показників долотних сталей та параметрів термічних технологічних обробок [1], то для цапф лап такі дослідження ще не здійснювалися. Оскільки до забезпечення точності конструкторських параметрів цапф лап висувають такі самі високі вимоги як і до шарошок, то дослідження орієнтовані на заповнення окресленої прогаліни є актуальними для долобудування та мають вагоме практичне значення із вдосконалення існуючої технології виготовлення тришарошкових бурових доліт.

За останні роки у підвищенні ефективності існуючих конструкцій цапф лап тришарошкових бурових доліт сформувалися основні підходи до пошуку оптимальних марок сталей та методів їхньої обробки й зміцнення. Основною метою таких підходів є підвищення міцності і твердості цементованого шару, а також міцності серцевини для того, щоб виключити можливість виникнення пластичної деформації під зміцненим шаром. Також важливо щоби зміцнена долотна сталь забезпечувала високу трицистійкість елементів цапфи лапи в умовах експлуатації долота на вибої. З іншої сторони, хімічний склад сталі повинен відповідати вимогам економії цінних легуючих елементів та забезпечувати високі технологічні показники (оброблюваність лезовим інструментом, зварюваність та ін.). У зв'язку з цим, переважаюча кількість досліджень присвячена вивченню цементованих сталей хромонікелевого складу [2-5]. Як результат, у долобудуванні масово застосовують для виготовлення лап секційних тришарошкових бурових доліт сталі: 20ХН3А, 14ХН3МА, 19ХГНМА, 20ХГНМА, 22ХГНМА. Зауважимо, що за існуючої технології цементування кількість вуглецю в поверхневих шарах таких сталей приблизно вирівнюється. Проте різний вміст легуючих елементів дає різні показ-

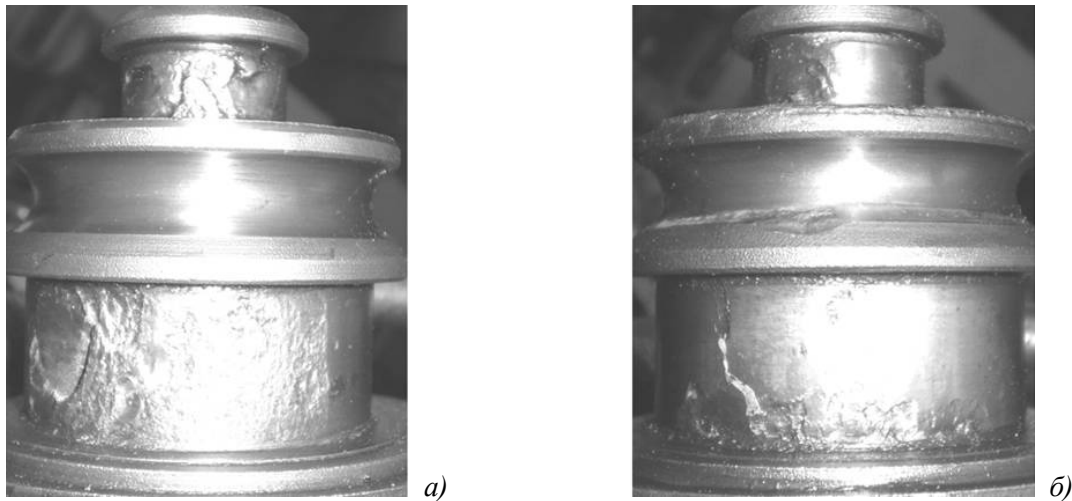
ники щодо прогартовування та, відповідно, специфічні особливості характеру зміни показників міцності та пластичності в поверхневих зміцнених шарах відносно серцевини. Зокрема, надлишок легуючих елементів, які у відомій мірі, є гетерогенними частинками в металевій матриці, спричинює різке зниження контактної витривалості елементів опор.

Встановлено [5-7], що сталь 20ХН3А, володіючи більшими значеннями показників міцності, має меншу в'язкість за статичних та динамічних навантаженнях проти сталі 14ХН3МА. Крім цього, сталь 20ХН3А не забезпечує стабільність прогартовування зі збільшенням розмірів перерізу. У свою чергу, практика застосування на долотних заводах сталі 14ХН3МА для виготовлення лап доліт виявила її непридатність для цього через підвищену схильність до деформації та викривлень під час термообробок. Тому були здійснені комплексні дослідження з пошуку нових, комплексно легованих сталей для лап доліт, які б задовольняли не тільки вимоги щодо міцності, пластичності, прогартовування та зварюваності ще й забезпечували низьку схильність до деформації та викривлень під час термообробок.

У результаті комплексного аналізу залежностей між структурою, механічними властивостями та експлуатаційними показниками в [6] запропонована і апробована у виробництві сталь 20ХГМ-Ш зі зниженням вмістом нікелю. Ця сталь проти хромонікелевих сталей забезпечує високі показники міцності та контактної витривалості. Зокрема, встановлено, що сталь 14ХН3МА та сталь 20ХГМ-Ш володіють практично однаковими механічними властивостями. Тим не менше, характер руйнування зразків виготовлених зі сталі 20ХГМ-Ш виявив їхню високу чутливість до різного роду концентраторів напружень. Ця сталь проти сталі 14ХН3МА має дещо вищі значення міцності та нижчі показники пластичності. Тому сталь 20ХГМ-Ш досить добре зарекомендувала себе при виготовленні лап бурових доліт великих типорозмірів.

Світова практика виготовлення лап секційних тришарошкових доліт характеризується застосуванням особливо високоякісних комплексно легованих сталей зі зниженням вмістом нікелю [2, 4, 8, 9]. Відтак, за аналогом до кращих долотних сталей, що застосовують провідні виробники тришарошкових бурових доліт, як „Hughes Christensen Co.”, „Smith International Inc.”, „Reed Tool Co.”, „Security DBS Dresser Industries Inc.”, „Varel Manufacturing Co.”, у вітчизняному долобудуванні застосовується сталь 19ХГНМА (аналог сталі AISI 8720H).

З досліджень [5, 7] та ін., в яких встановлено вплив хімічного складу, фізико-механічних показників на експлуатаційні показники деталей доліт зі сталей типу 19ХГНМА-В впливає необхідність покращення фізико-механічних властивостей сталі 19ХГНМА. У цьому напрямку вбачається перспективність збільшення вмісту вуглецю і молібдену. Відомо [10], що



*а – цапфа лапи, виготовлена зі сталі 19ХГНМА-В,  
б – цапфа лапи, виготовлена зі сталі 20ХН3А-В*

**Рисунок 1 – Загальний вигляд руйнувань елементів цапф лап тришарошкових бурових доліт типорозміру 250,8 мм, які відпрацювали у стендових умовах 27 год**

при концентрації молібдену до 0,5%, він не бере участі в карбідоутворенні і, залишаючись в твердому розчині (аустеніті), значно підвищує прогартування цементованого шару та міцність серцевини. Так, після термообробки сталі 21ХГНМА за режимом: 1-е гартування  $890 \pm 10^\circ\text{C}$  в оливі; 2-е гартування  $840 \pm 10^\circ\text{C}$  в оливі; відпуск  $185 \pm 15^\circ\text{C}$  в повітрі, вона набуває практично однакових зі сталлю 19ХГНМА-В фізико-механічних властивостей [5]. Також у цих сталях є типова мікроструктура. Однак сталь 21ХГНМА забезпечує вищу міцність серцевини, зокрема на цій сталі можна отримати твердість в серцевині цапф лап HRC34-40, у той час, як на сталі 19ХГНМА-В отримують HRC18-40.

Порівнюючи експлуатаційні показники долотної сталі з високим вмістом нікелю (сталь 20ХН3А-В) та комплексно легованої з пониженням вмістом нікелю (сталь 19ХГНМА-В), то маємо практично однаковий характер руйнування елементів опор. Водночас сталь 20ХН3А-В дає вищі показники міцності і контактної витривалості проти сталі 19ХГНМА-В (рис. 1). Тим не менше сталь 19ХГНМА-В є значно дешевшою та більш технологічною у операціях термообробки метою яких є досягнення високих показників твердості.

Вивчення проблеми забезпечення якості цементованих деталей доліт свідчить, що в умовах масового виготовлення бурових доліт неможливо добитися сталого рівня довговічності елементів опор по критерію контактної витривалості та тріщиностійкості. Основною причиною цього є відсутність стабільності основних фізико-механічних показників плавки цих сталей у стані поставки на долотне виробництво. Тому існує необхідність ще на стадії вхідного заводського контролю встановити придатність тієї чи іншої плавки сталі для виготовлення деталей долота на заданому рівні якості.

Практика хіміко-термічної обробки деталей доліт свідчить, що максимальна деформація

цапфи лапи фіксується після цементації. Наприклад встановлено [3], що діаметр цапфи лапи зі сталі 20ХН3А-Ш після цементації може збільшитися на 0,12 мм, або зменшитися діаметр бігових доріжок на 0,08 мм. При цьому велика роликів доріжка цапфи лапи може набутти конусність до 0,2 мм. У цапфах зі сталі 14ХН3МА-Ш окрім зазначених змін розмірів автори [3] спостерігали значні викривлення відносно осі цапфи. Такі особливості втрати точності конструкторських параметрів сформованих на технологічних операціях до цементації деталей ведуть до різкого зниження працездатності опори. З метою зменшення значень деформацій цапф лап, за аналогом до зарубіжного досвіду, були спроби застосувати сталі 20ХГНМА-Ш і 22ХГНМА-Ш. У дослідній партії цапф лап з таких сталей автори [3] отримали суттєве зменшення відхилень від конструкторських розмірів бігових доріжок (зміна діаметра бігових доріжок при термообробці не перевищувала 0,07 мм, а конусність – 0,025 мм). Тим не менше, сьогодні у долотобудуванні сталі електрошлакового переплаву практично не застосовують через їхню високу вартість, натомість поширені вакуумовані сталі 19ХГНМА-В та 21ХГНМА-В. Хімічний склад прокату таких сталей згідно існуючих технічних умов допускає широкі межі розсіювання значень концентрації легуючих елементів. Відтак різні плавки долотних сталей подекуди дають різко відмінні фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні показники деталей доліт. Зауважимо, що окрім досліджень здійснених в [5, 7] практично відсутні конкретні рекомендації щодо застосування сталей 19ХГНМА-В, 21ХГНМА-В та подібним їм за хімічним складом для виготовлення лап бурових доліт. Що ж стосується схильності таких сталей до деформації після цементації, то такі оцінки, як правило здійснюються у заводських умовах ситуаційно – залежно від виявлення браку. Однією з причин такого становища є те, що загалом долотні сталі типу

19ХГНМА-В дають менш відчутну деформацію та відхилення конструкторських розмірів цапф лап порівняно зі сталлю 14ХНЗМА-В, з якої виготовляють шарошки доліт. Тим не менше, на операціях механічного оброблення цапф лап час від часу фіксуються проблеми передчасної відмови та руйнування різального інструменту (твердосплавних пластин різців для токарного оброблення). Аналізом встановлено, що після термообробки лап з різних плавок сталі виникає необхідність коригування значень припусків на механічне оброблення. У окремих випадках необхідно збільшувати кількість проходів інструменту. Аналізом фізико-механічних показників у перерізах бігових доріжок цапф лап в яких було збільшено кількість проходів інструменту виявлено, що товщина цементованого шару є неоднакова. У одному місці фіксували значення товщини яке відповідає існуючим вимогам, у інших – цементований шар має недопустимо малу товщину. Такий стан речей спричинює випадки виникнення бракованої продукції. З іншої сторони, сучасний підхід до забезпечення якості тришарошкових бурових доліт на основних стадіях їхнього життєвого циклу вимагає встановлення чітких критеріїв для якісної підготовки виробництва та проектування технологічних процесів виготовлення бурових доліт.

Виходячи з вище викладеного, метою даного дослідження є вирішення проблеми забезпечення якісних конструкторських показників на етапах підготовки технологічних операцій зміцнення цапф лап тришарошкових бурових доліт. Відтак поставлено задачу встановити взаємозв'язок між фізико-механічними, технологічними показниками долотних сталей та рівнем забезпечення точності конструкторських параметрів цапф лап сформованих на етапах їхнього механічного оброблення.

**Матеріали і методика експерименту.** Дослідження проводились в умовах реального виробництва тришарошкових бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, статистичної обробки отриманих даних, комплексним застосуванням стандартних експериментальних лабораторних та натурних випробувань.

Технологічний процес виготовлення цапф лап включає виготовлення заготовки – кованки. На цих перших операціях закладаються основні параметри технологічного спадку. Технологічний процес формоутворення опорних поверхонь цапф лап включає токарне механічне оброблення до здійснення якого висувається комплекс жорстких вимог. Ці вимоги стосуються точності дотримання операційних розмірів, зведення до мінімуму конусності та овальності роликів бігових доріжок, уникнення спотворення профілю бігової доріжки замкового кулькового підшипника кочення та ін. [11]. З цієї метою вивчали вплив ХТО на відхилення від номінальних розмірів роликів бігових доріжок цапф лап різних типорозмірів бурових доліт. Зокрема вимірюванням були піддані пар-

тії (в кожній 30 шт.) цапф лап бурових доліт діаметром 215,9мм; 224,5мм; 250,8мм; 295,3мм; 393,7мм.

**Результати досліджень.** На першому етапі досліджень встановлено характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок цапф лап відносно осі цапфи. Для цього вимірювали биття бігових доріжок до і після ХТО.

Отже, результати вимірювання конструкторських елементів цапф лап бурових доліт подано в табл. 1-5. Зафіксовані відхилення вимагають додаткових затрат на механічне оброблення. Тут оброблення точінням необхідно вести не за один, а за 2, а у деяких випадках у 3 проходи.

Отримані дані свідчать, що для великої роликів та замкової кулькової бігових доріжок цапф лап секційних бурових доліт досліджуваних типорозмірів значення биття є практично на однаковому рівні. Оцінка розсіювання значень розмірів для цих елементів цапфи має такий подібний характер. Децю підвищені значення биття малої бігової доріжки та їхнє розсіювання пояснюються характером технології механічного оброблення цапф лап, а саме тим, що тут застосовується так звана безцентрова технологія (лапа фіксується у спеціальному пристрої, який дозволяє з одного установу виконувати механічне оброблення усіх елементів цапфи лапи) [11].

Порівнюючи значення биття бігових доріжок до ХТО та після ХТО бачимо (табл. 1-5), що термообробка спричинює їхнє збільшення у середньому до 0,06-0,07мм (цапфи доліт типорозмірів 215,9мм; 224,5мм; 250,8мм). Для цапф доліт типорозмірів 295,3мм; 393,7мм отримано збільшення биття бігових доріжок у середньому

**Таблиця 1 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 19ХГНМА-В) тришарошкових бурових доліт діаметром 215,9 мм**

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,040	0,100
	Биття – max, мм	0,120	0,180
	$\bar{x}$ , мм	0,080	0,140
	s	0,0094	0,012
КБД	Биття – min, мм	0,040	0,100
	Биття – max, мм	0,120	0,190
	$\bar{x}$ , мм	0,090	0,150
	s	0,011	0,013
МБД	Биття – min, мм	0,050	0,100
	Биття – max, мм	0,140	0,200
	$\bar{x}$ , мм	0,100	0,170
	s	0,012	0,012

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

**Таблиця 2 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 19ХГНМА-В) тришарошкових бурових доліт діаметром 224,5 мм**

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,020	0,070
	Биття – max, мм	0,120	0,190
	$\bar{x}$ , мм	0,091	0,112
	s	0,011	0,014
КБД	Биття – min, мм	0,030	0,090
	Биття – max, мм	0,100	0,210
	$\bar{x}$ , мм	0,092	0,143
	s	0,011	0,016
МБД	Биття – min, мм	0,070	0,120
	Биття – max, мм	0,160	0,230
	$\bar{x}$ , мм	0,115	0,175
	s	0,012	0,015

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

**Таблиця 3 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 19ХГНМА-В) тришарошкових бурових доліт діаметром 250,8 мм**

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,030	0,130
	Биття – max, мм	0,120	0,200
	$\bar{x}$ , мм	0,102	0,163
	s	0,011	0,011
КБД	Биття – min, мм	0,050	0,130
	Биття – max, мм	0,160	0,210
	$\bar{x}$ , мм	0,110	0,173
	s	0,011	0,011
МБД	Биття – min, мм	0,080	0,130
	Биття – max, мм	0,118	0,240
	$\bar{x}$ , мм	0,122	0,195
	s	0,012	0,013

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

до 0,102-0,129 мм. Загалом, для цапф лап зі сталі 19ХГНМА-В, можна допустити, що зі збільшенням їхніх габаритів зростає величина биття.

Для порівняння здійснено вимірювання биття бігових доріжок на цапфах лап виготовлених зі сталі 21ХГНМА-В (табл. 6, 7). Механічне оброблення таких цапф виконувалося у центрах.

Аналізом виявлено, що механічне оброблення в центрах дає менші значення биття, а

сталь 21ХГНМА-В забезпечує низьку схильність до биття бігових доріжок після їхньої ХТО  
**Таблиця 4 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 19ХГНМА-В) тришарошкових бурових доліт діаметром 295,3 мм**

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,060	0,160
	Биття – max, мм	0,140	0,270
	$\bar{x}$ , мм	0,125	0,227
	s	0,011	0,015
КБД	Биття – min, мм	0,070	0,170
	Биття – max, мм	0,170	0,280
	$\bar{x}$ , мм	0,129	0,233
	s	0,012	0,015
МБД	Биття – min, мм	0,100	0,200
	Биття – max, мм	0,200	0,310
	$\bar{x}$ , мм	0,143	0,272
	s	0,013	0,016

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

**Таблиця 5 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 19ХГНМА-В) тришарошкових бурових доліт діаметром 393,7 мм**

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,080	0,180
	Биття – max, мм	0,170	0,290
	$\bar{x}$ , мм	0,131	0,242
	s	0,0110	0,014
КБД	Биття – min, мм	0,090	0,200
	Биття – max, мм	0,190	0,300
	$\bar{x}$ , мм	0,135	0,255
	s	0,012	0,014
МБД	Биття – min, мм	0,110	0,220
	Биття – max, мм	0,240	0,330
	$\bar{x}$ , мм	0,165	0,293
	s	0,014	0,013

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

(табл. 6, 7). Зокрема, для цапф доліт типорозмірів 295,3 мм; 393,7 мм отримано збільшення биття бігових доріжок у середньому до 0,04-0,07мм. Відтак, сталь 21ХГНМА-В проти сталі 19ХГНМА-В дає в 2,1 разів менші значення биття бігових доріжок цапф лап доліт типорозмірів 295,3 мм; 393,7 мм.

На другому етапі досліджень вивчали вплив концентрації вуглецю і молібдену в плавках долотних сталей на їхню схильність до

утворення биття бігових доріжок цапф лап. З цієї метою вивчено характер прогартування, Таблиця 6 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 21ХГНМА-В) тришаршкових бурових доліт діаметром 295,3 мм

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,000	0,030
	Биття – max, мм	0,060	0,170
	$\bar{x}$ , мм	0,030	0,070
	s	0,0063	0,012
КБД	Биття – min, мм	0,000	0,040
	Биття – max, мм	0,070	0,180
	$\bar{x}$ , мм	0,035	0,080
	s	0,0069	0,013
МБД	Биття – min, мм	0,000	0,060
	Биття – max, мм	0,090	0,210
	$\bar{x}$ , мм	0,045	0,110
	s	0,0078	0,014

воді. Результати встановлення прогартування досліджуваних плавок сталей подано на рис. 2.

Таблиця 7 – Характер зміни величини биття поверхонь бігових доріжок на цапфах лап (сталь 21ХГНМА-В) тришаршкових бурових доліт діаметром 393,7 мм

Конструктивний елемент цапфи лапи	Показник	Значення показників	
		до ХТО	після ХТО
ВБД	Биття – min, мм	0,000	0,050
	Биття – max, мм	0,080	0,200
	$\bar{x}$ , мм	0,040	0,090
	s	0,0079	0,013
КБД	Биття – min, мм	0,000	0,060
	Биття – max, мм	0,090	0,200
	$\bar{x}$ , мм	0,045	0,100
	s	0,0083	0,013
	Биття – min, мм	0,000	0,090
	Биття – max, мм	0,110	0,220
	$\bar{x}$ , мм	0,055	0,125
	s	0,0096	0,014

Таблиця 8 – Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь	Процентний вміст хімічних елементів, %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	W	Al	P	S
19ХГНМА-В	0,18	0,21	0,84	0,45	0,57	0,25	0,17	0,05	0,01	0,02	0,012	0,006
21ХГНМА-В	0,22	0,26	0,90	0,51	0,52	0,44	0,16	0,03	0,01	0,03	0,011	0,003

Таблиця 9 – 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>
19ХГНМА-В	163	960	760	18	66	19,5
21ХГНМА-В	207	980	850	15	57	16,5

s – середньоквадратична похибка вимірювань.

розподіл твердості та концентрації вуглецю у ХТО у ділянці бігових доріжок цапф лап зі сталі 19ХГНМА-В та сталі 21ХГНМА-В.

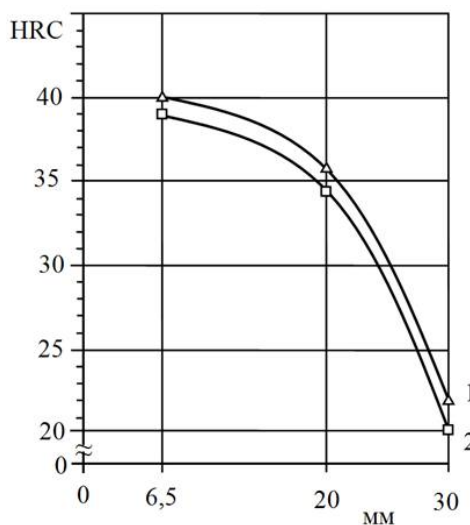
Хімічний склад досліджуваних сталей подано в табл. 8, а встановлені фізико-механічні показники в табл. 9.

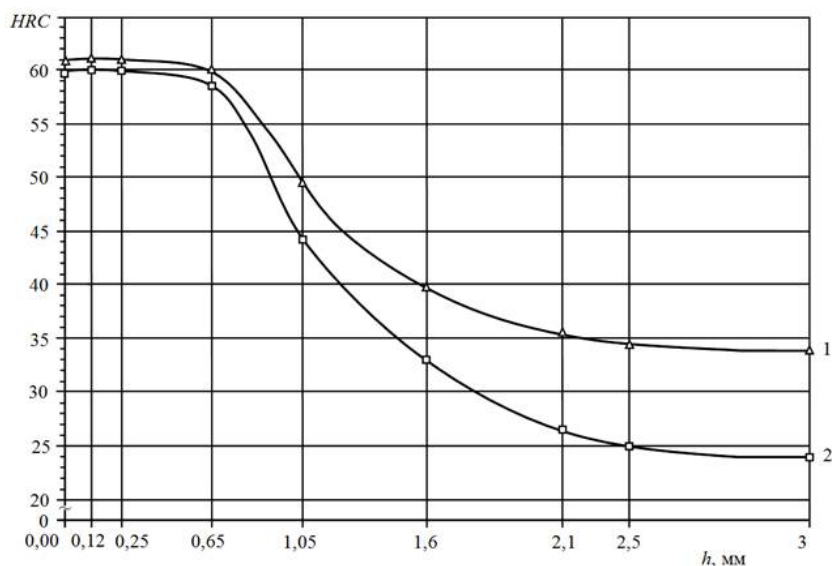
Для встановлення вихідних механічних показників скористалися прийнятою у долотобудуванні заводською технологією, згідно якої вирізані з прокату зразки піддавали термообробці: перше гартування з температури 890±10°C у оливу, друге гартування з температури 840±10°C у оливу, відпуск на повітрі з температури 185±15°C.

Для встановлення прогартування досліджуваних сталей застосували відомий метод торцевого гартування. З цієї метою циліндричні зразки з прокату піддавали нормалізації при температурі 900±20°C із охолодженням на повітрі та гартуванню з температури 840±20°C у

s	0,0096	0,014
---	--------	-------

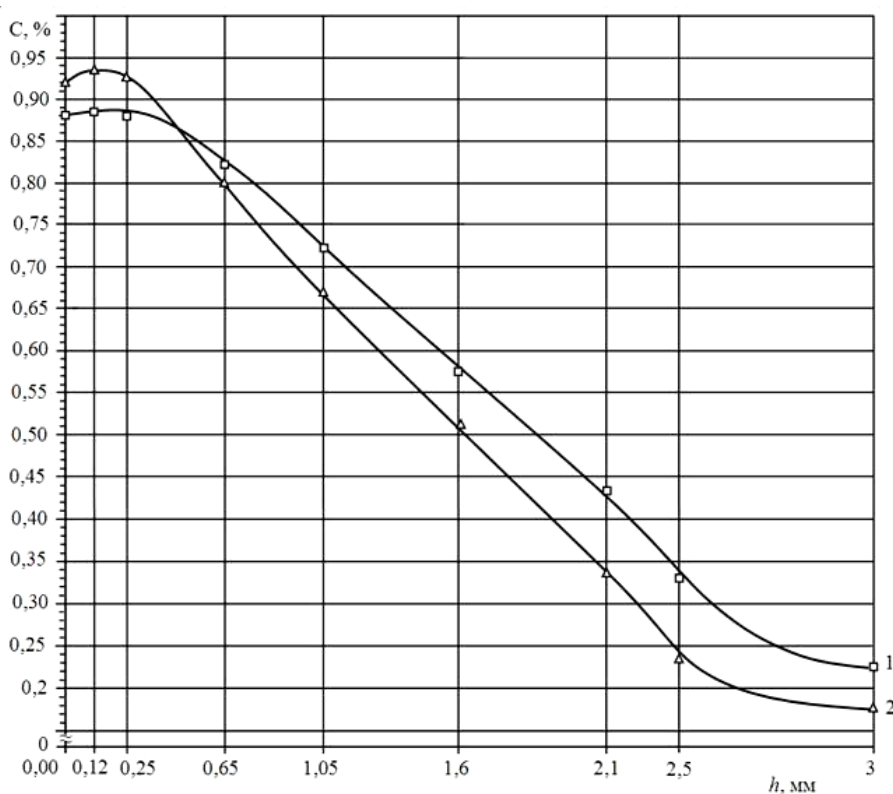
s – середньоквадратична похибка вимірювань.





1 – сталь 21ХГНМА-В,  
2 – сталь 19ХГНМА-В

Рисунок 3 – Розподіл значень твердості по глибині цементованого шару (до 2,1 мм) і в серцевині (3 мм) на досліджуваних сталях



1 – сталь 21ХГНМА-В,  
2 – сталь 19ХГНМА-В

Рисунок 4 – Розподіл значень концентрації вуглецю по глибині цементованого шару (до 2,1 мм) і в серцевині (3 мм) на досліджуваних сталях

1 – сталь 21ХГНМА-В,  
2 – сталь 19ХГНМА-В

#### Рисунок 2 – Прогартовуваність досліджуваних сталей

В обох випадках для дослідних сталей 19ХГНМА-В та сталі 21ХГНМА-В прогартовування на відстані від торця 6,5 мм та 30 мм ма-

ють значну різницю (HRC18). Відомо, що величина об'ємних змін при гартуванні прямо пропорційна вмісту вуглецю в сталі і кількості утвореного мартенситу після гартування. При збільшенні прогартовування сталі деформація також зростає. Отже, такий перепад у значеннях твердості в перерізах термооброблених де-

Таблиця 10 – Матриця планування експерименту

№ досліджу <i>i</i>	Фактори			<i>B</i>				<i>S<sub>i</sub></i>
	<i>X<sub>0</sub></i>	<i>X<sub>1</sub></i>	<i>X<sub>2</sub></i>	Повтори досліджу, <i>y<sub>in</sub></i>			$\bar{y}_i$	
1	+	+	–	0,140	0,130	0,110	0,127	0,015
2	+	+	+	0,070	0,050	0,060	0,060	0,010
3	+	–	+	0,200	0,220	0,230	0,217	0,015
4	+	–	–	0,290	0,320	0,310	0,307	0,021

талей є найбільш імовірною причиною зростання їхніх деформацій та викривлень.

Здійснено стандартний аналіз досліджуваних сталей на спеціально підготовлених темп-летах цапф лап по показниках розподілу твердості (рис. 3) та концентрації вуглецю (рис. 4) від поверхні в серцевину великої бігової доріжки.

При практично однаковому характері отриманих кривих 1 і 2 розподілу твердості по глибині зміцненого шару (рис. 3) сталь 21ХГНМА-В дає більш плавну зміну показників проти сталі 19ХГНМА-В. Якщо на поверхні та в приповерхневих цементованих шарах значення твердості мало чим відрізняються (HRC1-2), то на глибині половини цементованого шару ця відмінність сягає HRC5. Також сталь 21ХГНМА-В порівняно зі сталлю 19ХГНМА-В забезпечує вищу на HRC7 твердість у перехідній зоні „цементований шар – серцевина”, а в серцевині – на HRC10.

Аналізом розподілу концентрації вуглецю (рис. 4) від поверхні в серцевину великої бігової доріжки виявлено такі відмінності. Сталь 21ХГНМА-В дає більш плавний перепад показників від поверхні до серцевини. На цій сталі зафіксовано меншу схильність до зниження концентрації вуглецю у поверхневих шарах. У характері кривих концентрації вуглецю для досліджуваних долотних сталей не зафіксовано різких перепадів значень, що свідчить про якісне здійснення ХТО.

Загалом, аналіз характеру кривих розподілу твердості та концентрації вуглецю у зміцнених бігових доріжках дозволяє, за критерієм контактної витривалості, прогнозувати вищі експлуатаційні показники цапф лап зі сталі 21ХГНМА-В.

Для встановлення взаємозв'язку між концентрацією вуглецю і молібдену в плавці долатної сталі та схильністю до утворення деформацій і викривлення (що виявляється зростанням биття поверхонь бігових доріжок відносно осі цапфи лапи) поверхні МБД цапф лап після їхньої ХТО, провели експериментальні дослідження. Зазначимо, що вибір МБД обумовлений встановленою вищою схильністю до утворення биття після ХТО.

Отже, досліджували вплив двох факторів: процентним вмістом вуглецю (позначили „*C*”) і молібдену (позначили „*M*”) в серцевині цапф лап на величину утвореного биття поверхні МБД цапф лап, яку позначали „*B*”.

Забезпечення відтворення експериментами всіх необхідних комбінацій з досліджуваних факторів був вибраний план повного двофакторного експерименту  $2^2$  [12].

Кодові значення факторів будуть відповідно  $X_1, X_2$ .

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

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

Граничні значення концентрації вуглецю  $C_{\max} = 0,23\%C$  і  $C_{\min} = 0,18\%C$ , а концентрації молібдену  $M_{\max} = 0,55\%Mo$  і  $M_{\min} = 0,2\%Mo$ .

Одержимо:

$$X_1 = 40C - 8,2, \quad (3)$$

$$X_2 = 5,714M - 2,143. \quad (4)$$

В якості відклику  $B$  виберемо емпіричне рівняння регресії у вигляді полінома першого порядку:

$$B = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2, \quad (5)$$

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

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

$$\bar{B} = b_0 + b_1 + b_2, \quad (6)$$

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 дослідів  $m = 3$ , необхідна кількість дослідних зразків  $mN = 12$ .

Середнє значення биття МБД цапфи лапи  $\bar{y}_i$  і середнє квадратичне відхилення  $S_i$  визначається за стандартними формулами [12].

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

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

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



Матриця плану експерименту, значення відклику, результати обчислень  $\bar{y}_i$  та  $S_i$  представлені в табл. 10.

За результатами досліджень оцінки коефіцієнтів функції відклику:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i = 0,178, \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} \bar{y}_i = -0,084, \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} \bar{y}_i = -0,039. \quad (11)$$

Оцінка функції відклику в кодованих значеннях факторів:

$$\hat{B} = 0,178 + 0,084X_1 + 0,039X_2. \quad (12)$$

Підставимо замість  $X_1$ ,  $X_2$  їхні значення (3, 4), отримаємо оцінку залежності середнього значення биття поверхні МБД цапфи лапи після ХТО від вмісту вуглецю і молібдену в плавці долатної сталі:

$$\hat{B} = 0,951 - 3,36C + 0,223M. \quad (13)$$

Статистичний аналіз результатів дослідження починається з перевірки однорідності дисперсій.

Критичне значення критерію Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = 0,344. \quad (14)$$

Так, як при довірчій ймовірності  $P_{\text{ДОВ}} = 0,95$  і числах вільності  $k_1 = m - 1 = 2$ ,  $k_2 = N = 4$  критичне значення критерію Кохрена –  $G_{\text{КР}} = 0,7679$ , що вибирається з [13], гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, оскільки  $G_{\text{КР}} > G$ .

Для перевірки адекватності моделі провели додатковий експеримент у центрі плану експерименту. Отже, випробувано три лапи у яких плавка долатної сталі мала:  $C = 0,21\%C$  та  $M = 0,38\%Mo$ . У результаті встановлено значення биття поверхонь МБД цапфи лапи: 0,015 мм, 0,017 мм, 0,016 мм. Відтак середнє значення биття і середнє квадратичне відхилення величини биття поверхонь МБД цапф лап, у додатковому досліді:

$$\bar{y}_D = 0,16, \quad S_D^2 = 0,01. \quad (15)$$

Для знаходження границь, в яких знаходиться істинна величина середнього значення биття поверхонь МБД цапф лап, визначалися верхня ( $B_{\max}$ ) і нижня ( $B_{\min}$ ) границі довірчого інтервалу:

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

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

де  $N = 3$  – число повторів додаткового досліді,

$t = 4,303$  – квантіль розподілу Стьюдента [13], який вибирається залежно від числа вільності  $k = N - 1 = 2$ .

$$B_{\max} = 0,185, \quad B_{\min} = 0,135. \quad (18)$$

Розрахована величина оцінки середнього значення биття у додатковому досліді:

$$\hat{B} = 0,161. \quad (19)$$

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

Для перевірки значимості коефіцієнтів в моделі обраховуємо дисперсію відтворення:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 = 2,5 \times 10^{-4}. \quad (20)$$

Дисперсія коефіцієнтів моделі:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{mN} = 2,083 \times 10^{-5}. \quad (21)$$

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

$$t_1 = \frac{|b_1|}{\sqrt{S_b^2}} = 18,405, \quad (22)$$

$$t_2 = \frac{|b_2|}{\sqrt{S_b^2}} = 8,545. \quad (24)$$

Для встановлення значимості коефіцієнтів моделі необхідно порівняти отримані значення з табличними. Табличне значення критерію Стьюдента  $t = 2,306$  – квантіль розподілу Стьюдента [13], який вибирається залежно від числа вільності  $k = (m - 1)N = (3 - 1)4 = 8$ , та довірчої ймовірності  $P_{\text{ДОВ}} = 0,95$ . 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 границях залишається в силі. Ця залежність (13) дає можливість розрахувати і прогнозувати утворення биття поверхонь цапф лап доліт на етапах вибору матеріалів та підготовки виробництва, при призначенні параметрів допусків на механічне оброблення цапф лап доліт.

За допомогою програмного продукту Mathcad була побудована модель залежності середнього значення утворення биття поверхонь МБД цапф лап доліт від досліджуваних факторів (рис. 5).

Зростання значень концентрації вуглецю та молібдену в заданих межах, позитивно впливає на зниження величини биття поверхні МБД цапф лап після ХТО (рис. 5). Відповідно отримане експериментальне підтвердження перспективності застосування сталі 21ХГНМА-В. Аналіз коефіцієнтів отриманої моделі показує, що вплив концентрації вуглецю в плавці сталі має приблизно в 6,1 разів більший вплив на виникнення биття цапф лап порівняно зі значен-

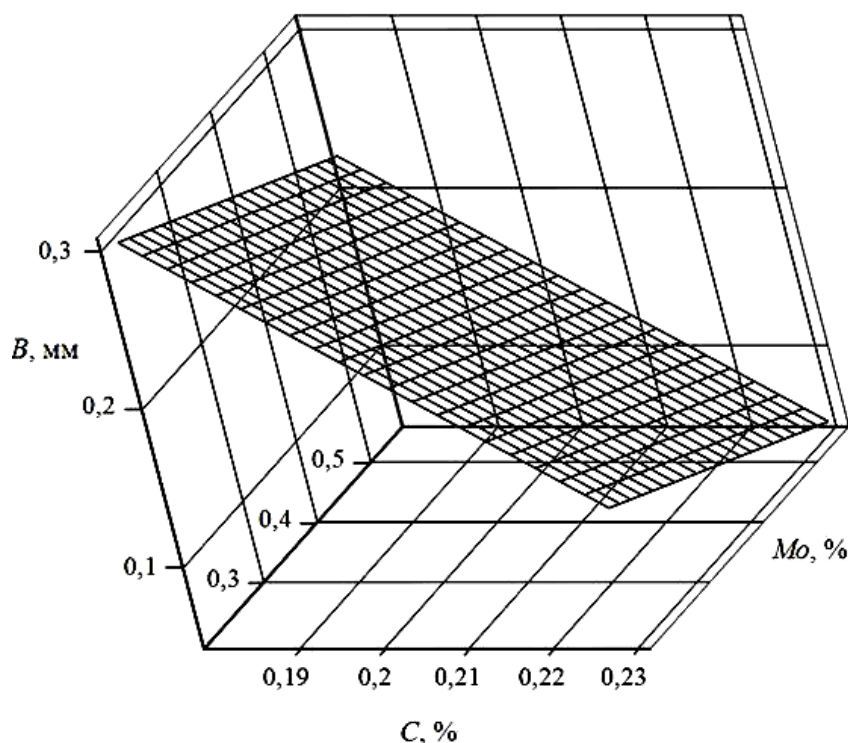


Рисунок 5 – Модель впливу вмісту вуглецю (%C) і молібдену (%Mo) в плавці долатної сталі на середнє значення биття поверхні МБД (B) цапф лап доліт після ХТО

нями концентрації молібдену. Тим не менше, при виборі плавок долатної сталі слід особливу увагу звертати на співвідношення між значеннями концентрації вуглецю та концентрації молібдену.

**Висновки.** Встановлено взаємозв'язок між фізико-механічними, технологічними показниками долатних сталей 19ХГНМА-В і 21ХГНМА-В та рівнем забезпечення точності конструкторських параметрів цапф лап сформованих на етапах їхнього механічного оброблення. Досліджено характер деформації по критерію утворення биття поверхонь бігових доріжок цапф лап бурових доліт залежно від фізико-механічних і технологічних показників долатних сталей. Встановлено емпіричне рівняння регресії, що дає змогу прогнозувати величину биття цапф лап за концентрацією вуглецю та молібдену в плавці долатної сталі. Отримані експериментальні дані свідчать, що зменшенню деформації сприяє оптимальне співвідношення між концентрацією вуглецю та молібдену в плавці долатної сталі. Встановлено, що хімічний склад сталі 21ХГНМА-В забезпечує низьку схильність до утворення деформацій, викривлень цапф лап після їхньої хіміко-термічної обробки (цементації). Сталь 21ХГНМА-В проти сталі 19ХГНМА-В дає в двічі менші значення биття бігових доріжок цапф лап, наприклад, для цапф лап бурових доліт типорозмірів 295,3мм; 393,7мм – биття менше у 2,1 рази. Аналізом прогартовування та розподілів твердості й концентрації вуглецю в цементованих і загартованих цапфах лап встановлено, що сталь 21ХГНМА-В порівняно зі сталлю 19ХГНМА-В

краще забезпечує вимоги до контактної витривалості, тому її рекомендується для виготовлення лап бурових доліт.

Створені нові шляхи підвищення якісних показників цементованих цапф лап тришаршкових бурових доліт апробовані в умовах реального виробництва і прийняті до подальшого вдосконалення якості й підвищення конкурентоздатності вітчизняних бурових доліт.

Надалі перспективним є встановлення оптимальних параметрів ХТО деталей доліт, які забезпечать заданий рівень точності конструкторських параметрів елементів опор на етапах кінцевого механічного оброблення лезовим інструментом. Це повинно підвищити якісні показники вітчизняних тришаршкових бурових доліт до світових стандартів.

#### Література

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

2 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).

3 Долговечность шарошечных долот / [Жидовцев Н. А., Кершенбаум В. Я., Гинзбург Э. С. и др.]. – М.: Недра, 1992. – 272 с.

4 Drilling Engineering Workbook: A Distributed Learning Course / Baker Hughes INTEQ]. – USA, Houston: Training & Development, 1995. – 410. (Confidential 80270H Rev. B. December 1995).

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

6 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. – 356с.

7 Ищук А. Г. Сравнительное исследование металлургического качества сталей буровых шарошечных долот отечественного и зарубежного производства: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.01 / Ищук Андрей Георгиевич. – Самара, 2005. – 241 с.

8 Масленников И. К. Буровой инструмент: справочник / Масленников И. К. – М.: Недра, 1989. – 430 с.

9 Буровой породоразрушающий инструмент: международная инженерная энциклопедия. (Международный транслятор-справочник) / [Барвинок В.А., Баталов С.П., Бикбулатов И.К. и др.]; под науч. ред. В. Я. Кершенбаума, А. В. Торгашова, А. Г. Мессера. – М.: Нефть и газ, – (Серия „Нефтегазовая техника и технология” т. 1). – Т. 1: Шарошечные долота. 2003. – 257 с.

10 Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справочник / [Белинский А. Л., Булгаков В. А., Горюшин В. В. и др.] под общ. ред. В. Д. Кальнера. – М.: Машиностроение, 1984. – 384с.

11 Яким Р. С. Науково-практичні основи технології виготовлення тришарошечних бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності: монографія / Р.С.Яким, Ю.Д.Петрина, І.С.Яким. – Івано-Франківськ: Видання ІФНТУНГ, 2011. – 384 с.

12 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. – 153с.

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

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.08.15*

*Рекомендована до друку  
професором Крилем Я.А.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Рудем В.Д.  
(Луцький національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*