

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОЦІНКИ ФАКТИЧНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.Д. Миндюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506611,
e-mail: public@nung.edu.ua; tinlaven@gmail.com

Безпечна експлуатація нафтогазового обладнання залежить від фактичного стану металу. Проаналізовано особливості змін в мікроструктурі металу та відповідні їм зміни деяких структурночутливих властивостей матеріалів металоконструкцій у процесі експлуатації. Встановлено основні фізичні параметри, що найбільше реагують на зміни в мікроструктурі металу та які доцільно піддавати контролю в процесі експлуатації елементів обладнання та конструкцій. Наведено методика та перелік технічних засобів для експериментального дослідження можливості неруйнівного контролю фактичного стану металу конструкцій за результатами вимірювання їх фізичних параметрів. При цьому застосовувались методи та технічні засоби, що ґрунтуються на різних фізичних принципах.

Для визначення наявності і характеру взаємозв'язку між параметрами мікроструктури і вибраними фізичними характеристиками було проведено графічний та кореляційний аналіз. Нелінійний характер зв'язку між параметрами структури і фізичними параметрами свідчить про доцільність комплексного застосування вказаних фізичних параметрів.

За результатами регресійного аналізу встановлено оптимальний комплекс фізичних параметрів, що найкраще корелюють з вибраними параметрами мікроструктури.

Ключові слова : мікроструктура, співвідношення перліт/ферит, розмір зерна, неруйнівний контроль, фізико-механічні характеристики.

Безопасная эксплуатация нефтегазового оборудования зависит от фактического состояния металла. Проанализированы особенности изменений в микроструктуре металла и соответствующие им изменения некоторых структурночувствительных свойств материалов металлоконструкций в процессе эксплуатации. Установлены основные физические параметры, которые наиболее чувствительны к изменению в микроструктуре металла, и которые целесообразно поддавать контролю в процессе эксплуатации элементов оборудования и конструкций. Приведена методика и перечень технических средств для экспериментального исследования возможности неразрушающего контроля фактического состояния металла конструкций по результатам измерения их физических свойств. При этом применялись методы и технические средства, базирующиеся на разных физических принципах.

Для определения наличия и характера взаимосвязи между параметрами микроструктуры и выбранными физическими свойствами был проведен графический и корреляционный анализ. Нелинейный характер связи между параметрами структуры и физическими параметрами показал целесообразность комплексного применения указанных физических свойств.

По результатам регрессионного анализа установлен оптимальный комплекс физических параметров, которые наилучшим образом коррелируют с выбранными параметрами микроструктуры.

Ключевые слова: микроструктура, соотношение перлит/феррит, размер зерна, неразрушающий контроль, физико-механические характеристики.

The actual metal state makes a considerable impact on safe operation of the oil and gas equipment operation life. The features of the microstructure changes and some corresponding metal structure-sensitive properties changes during operation were analyzed in this paper. The basic physical parameters that are most responsive to microstructure changes and that should be subjected to control during the equipment elements and structures operation were identified. The techniques and technical means for the experimental study of the structures metal actual state nondestructive testing possibility on the basis of measurement of their physical parameters were presented. Furthermore, methods and technical means based on different physical principles are used.

The graphic and correlation analyses that showed a connection between the microstructure parameters and selected physical features were carried out to determine the presence and relationship type between them. The non-linear relationship type between the structure parameters and physical features showed the appropriateness of utilization of the physical parameters as a whole.

The optimal complex of physical parameters that are best correlated with the selected microstructure parameters was determined on the basis of the regression analysis results.

Keywords: microstructure, pearlite/ferrite ratio, grain size, nondestructive testing, physical and mechanical characteristics.

Вступ

Більшість вузлів та елементів устаткування та інструменту газових і нафтових промислів працюють у вкрай важких умовах, піддаючись

впливу значних знакозмінних і динамічних навантажень, інтенсивному абразивному зношуванню та корозії. Дуже важкі умови роботи устаткування та інструменту нафтової й газової промисловості призводять до передчасного

зношування і руйнування основних деталей цього устаткування.

Недостатня довговічність устаткування викликає необхідність знижувати навантаження на окремі вузли і деталі, збільшувати їх вагу і габарити, проводити додаткові витрати на виготовлення запасних деталей і ремонт устаткування.

Практика експлуатації нафтогазового обладнання [1] дає можливість виділити наступні головні причини накопичення дефектів і пошкоджень, що призводять до відмов устаткування з часом його експлуатації:

- наскрізні тріщини, руйнування і деформації елементів устаткування, що виникають при перевищенні допустимих напружень;
- механічне зношування, обумовлене тертям спряжених поверхонь;
- ерозійно-кавітаційні пошкодження, викликані дією потоку рідини або газу;
- деградація властивостей матеріалів з часом і під дією експлуатаційних чинників;
- корозія металів і сплавів, корозійно-механічні пошкодження, корозії, що виникають під впливом, напружень, тертя і тому подібне.

Питання оцінки фактичного технічного стану вузлів і елементів обладнання нафтових і газових промислів стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Ресурс безпечної експлуатації обладнання залежить також і від фактичного стану мікроструктури та фізико-механічних властивостей металу, що зазнають змін через вплив корозійно-активних середовищ, коливання температури, робочих навантажень та напружень.

Знос устаткування нафтогазової галузі і рівень аварійності вимагає удосконалення методів оцінки його технічного стану, а також системи обслуговування і ремонту, оскільки перехід від регламентованих за часом профілактичних та ремонтно-відновлювальних робіт до обслуговування устаткування за фактичним технічним станом дозволить підвищити його ресурс, надійність, скоротити витрати на ремонт і вимушених простоїв. Будучи дорогим заходом, система ремонту і обслуговування за технічним станом вимагає визначення найбільш пріоритетного устаткування, що вимагає підвищеного контролю.

З огляду на це забезпечення надійності та прогнозування технічного стану сталених елементів нафтогазового обладнання має надзвичайно велике практичне значення. Забезпечення безаварійної експлуатації обладнання можливе тільки на основі отримання й аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів конструкцій.

Тому особливо важливим науково-практичним завданням є всебічне вивчення мікроструктурних змін, що відбуваються в сталях нафтогазопромислового обладнання у процесі його тривалої експлуатації [2].

Вітчизняні та зарубіжні вчені за останні 50 років розвинули і постійно удосконалюють ме-

тоди, технології та засоби визначення фізико-механічних характеристик різних металевих матеріалів. При цьому порушувались питання аналізу причин та наслідків змін фізико-механічних характеристик матеріалів у ході експлуатації, однак вивчення їх обмежилось теоретичними і лабораторними дослідженнями.

Існуючі на сьогоднішній день методи не мають теоретичної бази для встановлення кількісних зв'язків параметрів мікроструктури із важливими фізичними чи механічними характеристиками. Практично всі залежності, які використовуються для контролю, мають емпіричний характер і часто дійсні тільки для однієї марки або типу матеріалу. Тому є необхідність у встановленні і вивченні ознак виражених мікроструктурних змін металевих матеріалів та розроблення методів і засобів для їх своєчасного виявлення.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Аналіз літературних даних свідчить, що одним із проявів граничних станів металоконструкцій з вуглецевих сталей, що працюють в інтервалі низьких температур, є так звана деградація механічних властивостей металу [5]. Зазвичай, це виражається в зниженні пластичності, часто фіксується пониження міцнісних характеристик. Зниження, наприклад, тріщиностійкості в низьковуглецевих і низьколегованих сталях може бути пов'язане як з сегрегацією домішок по межах феритних зерен, так і з утворенням карбідних фаз. Очевидно, що подібні явища - суть прояву загального механізму старіння. Старіння металів виражається в зміні механічних, фізичних і хімічних властивостей металів і сплавів у процесі експлуатації та допускає наявність деякої залишкової пластичної деформації. Нагрівання до температур 200 – 250 °С додатково інтенсифікує цей процес.

Основним методом вивчення мікроструктури металів є металографія [3]. При проведенні технічної діагностики діючого обладнання металографічні дослідження можуть виконуватися в польових умовах. Шліфи при цьому роблять без вирізування зразків безпосередньо з досліджуваної поверхні, а будову металу вивчають за допомогою переносних металографічних мікроскопів [4]. Застосування сучасних цифрових технологій дає змогу суттєво знизити трудомісткість металографічних досліджень і підвищити об'єктивність кількісних оцінок. Реєстрація зображення мікроструктури в металографічних мікроскопах при цьому здійснюється за допомогою цифрових фото- або відеокамер. Далі зображення вводиться в комп'ютер, де обробляється за допомогою спеціальної програми-аналізатора.

У ряді випадків для дослідження структури сталей доцільно застосовувати методи фрактографії [5], яка вивчає будову зламів. Вивчення будови зламів (фрактографія) проводиться візуально при невеликому збільшенні. Використовують також методи скануючої (на поверхнях

масивних зразків) і електронної мікроскопії. Фрактографічні дослідження дають можливість розуміти механізм руйнування.

Металографічні і фрактографічні дослідження дають змогу встановити природу окрихчування і зміни інших властивостей металу, оцінити безпеку подальшої експлуатації обладнання і вказати шляхи усунення несприятливого впливу експлуатаційних чинників. Однак, суттєвим недоліком наведених методів є необхідність у одержанні зразків для досліджень механічними методами, чи зразки є вже результатом руйнування, що призводить до порушення суцільності матеріалу і в експлуатаційних умовах є неприпустимим.

Для реалізації мікроструктурних досліджень більш доцільним в плані збереження цілісності матеріалу чи конструкції доцільно використовувати методи неруйнівного контролю з високою просторовою роздільною здатністю тих параметрів, які є найбільш чутливими до змін мікроструктури сталей. При цьому є можливість забезпечити широкий динамічний діапазон окремого методу, щоб виявляти малі зміни параметрів мікроструктури.

Можливість застосування фізичних методів для оцінювання мікроструктурного стану заснована на тому, що між зміною структурного стану металевих сплавів і зміною фізичних властивостей існує певний зв'язок. За зміною фізичних властивостей можна судити про зміну фазового складу сплавів і про протікання структурних перетворень. Методи вимірювання фізичних властивостей для оцінювання фазового складу сплавів, на відміну від класичних металографічних методів, відрізняються рядом переваг. Передусім фізичні властивості можна вимірювати та реєструвати безперервно і автоматично, у тому числі і при швидкозмінних зовнішніх чинниках: швидкому нагріву або охолодженню, дії зовнішнього середовища і т. п., тобто в умовах, коли металографічні методи не можуть бути застосовані. Зміна цих властивостей може характеризувати кінетику зміни фазового складу сплавів.

Враховуючи специфіку незворотних змін мікроструктури сталей елементів нафтогазового обладнання у ході їх тривалої експлуатації, більш доцільним в плані збереження цілісності металу використовувати для оцінки цих змін структурночутливі та фазочутливі фізичні властивості, зокрема: електричні, акустичні, гальваномагнітні, деякі магнітні властивості (наприклад, коерцитивна сила), внутрішнє тертя та намагніченість насичення [6].

Проведений аналіз застосовуваних фізичних методів контролю властивостей матеріалів свідчить, що жоден із відомих методів при їх індивідуальному застосуванні не дає змогу достовірно визначити кількісні характеристики мікроструктури, оскільки вони ґрунтуються на тісних кореляційних залежностях між вибраним інформативним параметром і, в основному, механічними характеристиками тільки для окремої марки сталі або груп сталей, і, тим самим, можуть не поширюватися на інший асор-

тимент сталей виробів. Багатопараметрові магнітні методи поширюються тільки на магнітні матеріали. Тому, з даної точки зору, перспективними та універсальними видаються комплексні методи [7]. Комплексні підходи дають змогу підійти до проблеми визначення кількісних параметрів мікроструктури більш ширше за рахунок того, що інший досліджуваний параметр перебиває певні обмеження попереднього, тим самим збільшуючи достовірність результатів контролю. При цьому можна застосувати інформативні параметри, що належать до різних типів фізичних полів (електричний, магнітний тепловий тощо).

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми та цілі подальших досліджень

Фазові перетворення в твердому стані відбуваються через утворення зародків критичного розміру і їх ріст. Необхідною умовою появи зародків нової фази є наявність теплових і концентраційних флуктуацій, термодинамічного фактора (різниці вільних енергій фаз) і забезпечення необхідного переохолодження або перегрівання. В той же час на фазові реакції в твердих тілах, окрім об'ємних і поверхневих ефектів зміни вільної енергії, чинять вплив: зміна пружної енергії кристалічної ґратки у зв'язку з появою нової фази, зміна дифузійної рухливості атомів, а також ступінчастий характер фазового перетворення. Слід зауважити, що потенційними місцями утворення зародків нової фази можуть бути границі зерен, двійників, дефекти «упакування», дислокації і т. п., оскільки проявляються зазначені вище термодинамічні концентраційні чинники, а також кінетичний фактор, пов'язаний з підвищеною швидкістю дифузії на дефектах кристалічної решітки.

Основними структурночутливими магнітними властивостями є магнітна проникність μ , коерцитивна сила H_c , залишкова індукція B_r .

Розглянемо властивості твердих розчинів. У твердих розчинах на базі феромагнітного металу спостерігається зниження намагніченості насичення, якщо розчинений діамагнітний метал.

Якщо гетерогенний сплав у стані впорядкування піддати пластичній деформації [8], то величина магнітного насичення знижується тим більше, чим більша ступінь деформування. Це пояснюється тим, що при наклепі відбувається порушення порядку в розташуванні атомів. У заздалегідь загартованих на неупорядкований твердий розчин сплавах магнітне насичення при наклепі майже не змінюється.

Намагніченість насичення твердих розчинів, як і чистих металів, не є структурночутливою властивістю і практично не залежить від наклепу (у відсутності впорядкування), величини зерна, кристалічного орієнтування і т. д. В твердих розчинах на базі феромагнітного металу спостерігається зниження намагніченості насичення, якщо в ньому розчинений діамагнітний матеріал.

Що стосується структурночутливих властивостей – передусім коерцитивної сили – гетерогенних сплавів, то вони залежать від величини і градієнта напружень, дисперсності фаз, ізольованості феромагнітних кристалів і інших чинників. У випадку гетерогенних сумішей значення H_B і H_C поводяться аналогічно – зростають із збільшенням кількості і міри дисперсності включень. Те ж відноситься і до спотворень просторових ґраток, що виникають при наклепі: H_B і H_C зростають разом з підвищенням міри наклепу.

Встановлено, що пластична холодна деформація (нижча за температуру рекристалізації) викликає спотворення просторової ґратки. Внутрішні напруження, обумовлені спотворенням ґратки, утруднюють процеси намагнічування і розмагнічування сталей і інших феромагнітних сплавів. Магнітна проникність μ при наклепі знижується тим сильніше, чим більша величина деформації; коерцитивна сила H_C , навпаки, зростає з підвищенням величини деформації. На рисунку 1 [9] показані відповідні емпіричні залежності для H_C і μ_{max} , отримані при випробуванні сталюого зразка із вмістом 0,07% С. Залишкова індукція поводить дещо своєрідно. При критичній величині деформації (близько 5 – 8%) вона різко падає, а при подальшому збільшенні наклепу поступово зростає.

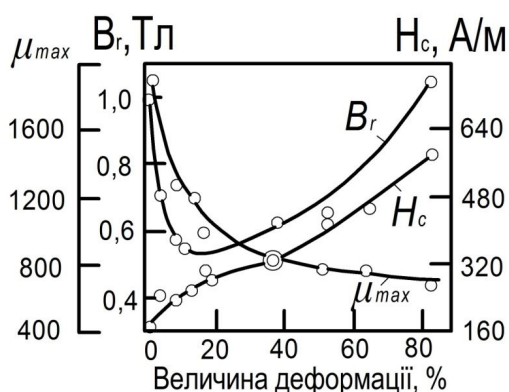


Рисунок 1 – Залежність магнітних властивостей сталюого зразка із вмістом 0,07% С від величини деформації при деформаційному наклепі

У тому ж напрямі, що і наклеп, впливає на магнітні властивості сталі подрібнення зерна (збільшення міжзернової поверхні). Чим дрібніше зерно фериту, тим більша коерцитивна сила і втрати на гістерезис, і тим менша магнітна проникність. Це пояснюється тим, що межі зерен також є чинником, що перешкоджають поширенню намагнічування. По границях зерен, на стику двох різноорієнтованих кристалітів, присутнє спотворення просторової ґратки.

Вивчення магнітної проникності (чи сприйнятливості) при старінні сталей свідчить, що вона загалом поводить обернено коерцитивній силі. Залишкова індукція, як правило, зростає.

При вивченні зміни *електричних* характеристик в залежності від мікроструктурного ста-

ну встановлено, що електропровідність металу твердих розчинів знижується навіть в тому випадку, коли в металі A з низькою електропровідністю розчиняється метал B з високою електропровідністю. При розміщенні в просторових ґратках розчинника A чужих атомів розчиненої речовини B електричне поле ґраток розчинника спотворюється і розсіювання електронів збільшується.

Підвищення електроопору при утворенні твердого розчину (легуванні) може бути досить значним. Спотворення ґраток є не єдиною причиною зростання електричного опору твердих розчинів. Значний вклад у величину питомого електричного опору сплавів вносять також міжзернові границі та області концентраційної неоднорідності.

При наклепі питомий електричний опір твердих розчинів підвищується, а при відпалі – знижується. Цікаво зауважити, що при відпалі дуже часто опір змінюється сильніше, ніж при наклепі.

Ще значніша зміна електричного опору спостерігається при деформаційному наклепі впорядкованих твердих розчинів. При наклепі порядок в розташуванні атомів внаслідок відносного переміщення площин ковзання і окремих атомних площин порушується. При цьому електричний опір підвищується на десятки, а іноді і на сто з лишнім відсотків. При значній деформації опір сплаву наближається до опору загартованого сплаву, що знаходиться в нерівноважному стані. Таким чином, вивчення електричного опору і зміни його при наклепі має велике значення при дослідженні твердих розчинів, що піддаються деформаційному старінню.

Наклеп сталі із вмістом від 0,1% до 0,3% С спочатку зменшує електричний опір, а потім його збільшує. Падіння визначається зростаючою орієнтованістю пластинчатого перліту, а підвищення – наклепу фериту. Воно тим більше, чим більше фериту, і зникає при високому вмісті вуглецю.

Зміною електроопору при пластичній деформації металів пояснюється виникнення термо-ЕРС між деформованим і недеформованим зразком, тобто величина термо-ЕРС в даному випадку повинна змінюватися аналогічно зміні електроопору, що і спостерігається при деформації вуглецевих сталей з пластинчастою структурою.

Вимірюванням електропровідності можна вивчати не лише внутрішні перетворення, що йдуть при термічних обробках, але також явища, що відбуваються при дисперсійному збільшенні твердості феритних і аустенітних сталей, що не зазнають алотропних перетворень. Двофазна система, що вийшла в результаті перетворень і розпаду первинної фази, може мати більший електричний опір, ніж початковий твердий розчин. Цей ефект може бути значним, якщо фаза, що виділяється, розташовується по границях зерен твердого розчину, що й зумовлюється збільшенням питомого електричного опору за рахунок додаткових границь між зер-

нами. У розглянутому випадку коерцитивна сила також реагує сумарно і на кількість надмірної фази, що виділилась з α -заліза, і на її дисперсність, тоді як електроопір, в основному, вказує на міру розпаду твердого розчину, тобто на кількісне співвідношення фаз в гетерогенній суміші [10].

Не зачіпаючи змін інших структурночутливих фізичних характеристик при деформації (наприклад, залишкову індукцію, магнітну проникність та ін.), слід зробити загальний висновок, що розміри, кількість і характер розподілу, а також орієнтація пластин цементиту грає істотну роль в зміні фізичних властивостей сталі при її деформації.

При наявності загальної аналогії між електропровідністю і теплопровідністю, остання змінюватиметься при зміні хімічного складу і фазового стану сплаву, в основному, за тими ж якісними закономірностями, що і електропровідність.

У безперервному ряді неупорядкованих твердих розчинів сплавів теплопровідність знижується тим більше, чим більше склад сплаву відрізняється від чистих компонентів. Тут, як і для електропровідності, теплопровідність компонентів різко знижується при введенні домішок навіть в порівняно невеликих кількостях. Подальше підвищення концентрації твердого розчину впливає на теплопровідність значно менше. У зв'язку із залежністю теплопровідності від хімічного складу, а також фазового та структурного стану сплаву, її вимірювання може бути використане, аналогічно до електропровідності, для дослідження фазових і структурних перетворень в сплавах. В окремих випадках вимірювання теплопровідності дає змогу одержати інформацію, яку неможливо отримати іншими методами.

Попередні теоретичні дослідження свідчать [8-10], що взаємозв'язок між фізичними та механічними характеристиками необхідно розглядати з точки зору їх структурної чутливості.

Механічні характеристики, такі як границя міцності та границя плинності найбільш поширених низьковуглецевих конструкційних сталей з ферито-перлітною структурою, можна визначити за розміром зерна та кількістю перліту. Властивості сталі залежать також від кількості, дисперсності розподілу карбідів, що змінюються в широких межах залежно від режимів термооброблення, тривалості експлуатації та ін. Перехід легуючих елементів з твердого розчину в карбіди, коагуляція карбідів і зосередження їх по границях зерен, а також зміна тонкої структури обумовлюють зміну механічних характеристик – зниження пластичності при незначній зміні границі міцності та твердості.

Таким чином, структурні складові та параметри, які визначають тип структури (феритна, дуплексна, аустенітна, мартенситна), відповідно визначають величину напруження тертя σ_0 , значення якого є приблизно однаковим в межах однотипних структур. Це пояснює те, що найбільш тісні кореляційні зв'язки між механічними та фізичними характеристиками існують

тільки в межах однотипних структур, в яких фазовий склад і тип структури однаковий, а змінюються лише кількісні чи розмірні співвідношення структурних складових.

Експериментальні дослідження щодо встановлення наявності та характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями основних вуглецевих конструкційних сталей феритного класу для нафтогазового обладнання

Виходячи з вищевказаного, для кількісної оцінки і характеру взаємозв'язку між мікроструктурою та фізичними параметрами вуглецевих сталей нафтогазового сортаменту було проведено комплекс експериментальних досліджень, що включав металографію, а також вимірювання структурночутливих фізичних параметрів, про які мова йшла вище, а саме: твердість, магнітні властивості (коерцитивна сила та індуктивний параметр), питомий електричний опір та теплопровідність.

Метою експериментальних досліджень було визначення оптимальної кількості інформативних параметрів серед запропонованих, які найтісніше корелюють із мікроструктурними змінами обраних сталей.

Відповідно до поставлених завдань і з метою забезпечення достовірності результатів досліджень, були проведені експериментальні дослідження, що передбачали виконання таких етапів:

- лабораторні вимірювання комплексу фізико-механічних параметрів, таких як: коерцитивна сила H_c , твердість HB , питомий електричний опір ρ , теплопровідна характеристика T (розраховується за виміряними значеннями кривих теплопереносу), магнітний індуктивний параметр I (визначається частотою електромагнітних коливань індуктивного перетворювача, що взаємодіє з об'єктом контролю), які є структурночутливими для феромагнітних сталей;

- металографічні дослідження зразків досліджуваних сталей з подальшим цифровим обробленням мікрофотографій структури для одержання кількісних параметрів мікроструктури: відношення відсоткових частин від загального об'єму структурних складових перліт/ферит (P/Fe) та середній діаметр зерна d з підвищеною достовірністю результатів.

Комплекс досліджень проводився на зразках доевтектоїдних вуглецевих та низьколегованих сталей, які використовують для нафтогазового обладнання, що працює в складних умовах циклічних навантажень, і схильні до деформаційного старіння. Марки досліджуваних сталей та область їх застосування наведено в таблиці 1.

Зразки матеріалів для досліджень були вирізані з елементів обладнання, що демонтувалися в ході виконання різних ремонтних заходів, з промислових трубопроводів аварійних запасів та експлуатованих, а також зразків листових прокатів з вказаних марок сталей в стані поставлення.

Таблиця 1 – Перелік досліджуваних конструкційних сталей

Марка сталі	Застосування	Нормативний документ, що регламентує властивості
Сталь 10пс	Перехідні муфти	ГОСТ 1050-88
Сталь 10	Рама верстата-гойдалки	ГОСТ 1050-88
Сталь 09Г2С	Стінки, днища резервуарів, стаціонарні покрівлі, плаваючі покрівлі резервуарів	ГОСТ 19281-89
Ст3пс	Зварні і штамповані рами, каркаси бурових веж, корпуси редукторів, станини бурових установок	ГОСТ 380-71
Ст4пс	Гаки кронблоку, шатун верстата-гойдалки	ГОСТ 380-71
Сталь 09Г2	Трубні елементи	ГОСТ 19281-89
Сталь 10Г2С1	Труба для трубопроводів	ГОСТ 19282-73
Сталь 40Г	Привідні та проміжні вали лебідок, шків талевого блока	ГОСТ 4543-71
Сталь 45	Муфти насосних штанг, стовбур і перевідник вертлюга, штоки насосів	ГОСТ 1050-81
Сталь 60Г	Гальмівний барабан та шків лебідки	ГОСТ 14959-79

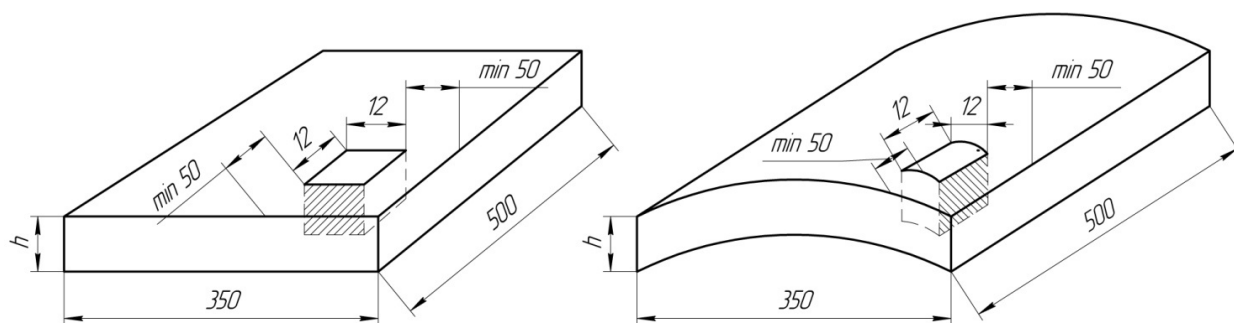


Рисунок 2 – Місця відбору зразків та їх розміри для металографічних досліджень

Важливо зазначити, що для визначення фізичних і механічних характеристик металу зразків використовувалися неруйнівні методи і засоби, які базуються на різних фізичних принципах.

Визначення фізичних і механічних параметрів відібраних зразків проводились з використанням таких технічних засобів:

- твердоміри динамічний типу ТД-32;
- твердомір контактнo-резонансний типу ТКР-35;
- експериментальна інформаційно-вимірювальна система для ІВС-І2 для вимірювання індуктивного параметру I ;
- структуроскоп КРМ-Ц-К2М для вимірювання значень коерцитивної сили H_c ;
- інформаційно-вимірювальна система ІВС ФМХ-1 з нагрівальним блоком для вимірювання умовної теплопровідної характеристики T ;
- мікроомметр БСЗ-010-2 зі спеціальним контактним механізмом для вимірювання значень питомого електричного опору.

Для зменшення впливу різних факторів (анізотропії матеріалу зразків, шорсткості поверхні та інших) на результати вимірювань кожен зразок був поділений на 6 зон. Зони контролю були зачищені від бруду і продуктів корозії. У кожній зоні були виконані десятикратні вимірювання всіма приладами, які були використані в ході досліджень. Вимірювання про-

водились в однакових лабораторних умовах при температурі $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$.

В процесі металографічних досліджень вибір місця вирізування зразків для виготовлення мікрошліфа проводився із урахуванням напрямку прокатування пластин і способу вирізування фрагментів металу. Зразки вирізалися на відстані не менше 50 мм (рисунок 2) від крайових зон, на яких мікроструктура металу могла бути порушеною в процесі вирізування пластин із об'єктів термічним чи механічним способом без охолодження.

Вирізування зразків проводилось на спеціальному верстаті для вирізування металографічних зразків (Q-80Z (УРМО-80А)), який забезпечує автоматичне підтримування заданої швидкості різання відрізним абразивним кругом і інтенсивне охолодження зразка в процесі різання охолоджуючою рідиною для запобігання спотворення мікроструктури металу в зоні різання.

Процес шліфування проводився на пристрої для шліфування та полірування металографічних зразків УШПО-1 з використанням шліфувального паперу з розміром зерна, що поступово зменшувався, і подачею охолоджуючої рідини для запобігання локального перегріву поверхні металу. Швидкість обертання диска пристрою $600 - 700 \text{ хв}^{-1}$.

Таблиця 2 – Результати вимірювання параметрів мікроструктури і вимірювання фізичних і механічних параметрів сталевих зразків

№ зр.	Марка сталі	\bar{D} , мкм	P/Fe	Твердість, НВ		H_c , А/см	I , ум.од.	T , ум.од.	ρ , нОм·м
				ТКР-35	ТД-32				
1	Сталь 10пс	58,89	0,2	141,5	135	2,26	1785,8	6,08	178
2	Сталь 10	62,24	0,16	114,9	114,3	1,53	1950,5	5,82	198
3	Сталь 09Г2С	9,62	0,35	122,2	116	1,82	1997,2	5,95	267
4	Ст.3пс	26,6	0,36	175,6	136,6	3,25	1853,5	4,557	329
5	Сталь 10 (Е)	31,54	0,4	123,2	138,3	1,43	2156,6	6,738	165
6	Сталь 60Г	71,01	8,79	290,7	249,6	8,55	1532,4	5,369	350
7	Ст.3пс (Е)	26,54	0,37	133,1	134,6	3,01	1629	5,87	141
8	ВСт.4пс	42,08	0,22	139,2	126,3	1,99	1975,3	5,849	172
9	Сталь 10 (Е)	16,89	0,14	160,6	134	3,19	1839,8	4,929	272
10	Сталь 10Г2С1 (Е)	35,12	0,34	184,2	149	3,92	1996,5	4,749	370
11	ВСт.4пс (Е)	23,59	0,13	114,8	118,6	2,24	1846,5	5,207	264
12	Сталь 09Г2С (Е)	13,6	0,36	168,7	151	3,8	1729,6	5,034	224
13	Сталь 40Г	62,61	5,13	215,2	187	5,61	1561,8	5,764	380
14	Сталь 45	56,14	5,91	234,8	198,3	5,3	1573,7	5,571	315
15	Сталь 09Г2 (Е)	16,67	0,52	127,8	188,3	2,89	1684,2	6,223	198
16	Сталь 09Г2	12,79	0,26	196,7	203	3,14	1895,5	5,709	385

Примітка. (Е) – сталь конструкції, що була в експлуатації.

Промиті і просушені зразки після шліфування піддавалися подальшому поліруванню на пристрої УРМО – 80 з використанням фетрового круга, змоченого суспензією дистильованої води і дрібнодисперсного порошку оксиду алюмінію. Швидкість обертання диска пристрою не перевищувала 600 хв⁻¹.

Підготовлені поверхні металографічних зразків для виявлення мікроструктури піддавалися хімічному травленню 5%-ним спиртовим розчином пікринової кислоти [11].

Мікрофотознімки одержувались металографічним мікроскопом ММО-1600АТ з допомогою цифрової камери КММ-5 для металографічного мікроскопа при збільшеннях 100, 200 і 400. Одержані зображення зберігалися в пам'яті ЕОМ для подальшого їх опрацювання.

Кількісні параметри структури, а саме: середні діаметри зерен, бали зерна, співвідношення між структурною складовою перліт і фазовою складовою ферит, визначалися з мікрофотографій за ГОСТ 5639 – 82 [12] з використанням програмного продукту ImageJ версії m1.45.

Виходячи з різних умов роботи металу по товщині стінки зразків, що були в експлуатації, дослідження їх мікроструктури проводилось пошарово, виділяючи шари, що примикають до зовнішньої і внутрішньої поверхонь зразка, а також шар, розташований в середній частині товщини стінки. Результати оцінки параметрів мікроструктури осереднювались за результатами вимірювань в 6-ти областях розміром 0,5 мм² видимої частини кожного мікрофотознімка кратністю 100^x.

Результати експериментальних досліджень на кожному зразку осереднювались і зводились в таблицю 2.

Аналіз результатів експериментальних досліджень

Для визначення наявності і характеру взаємозв'язку між параметрами мікроструктури і вибраними фізичними і механічними інформативними параметрами було проведено графічний та кореляційний аналіз.

Для встановлення наявності та характеру зв'язку між обраними характеристиками металу було проведено попарний кореляційний аналіз результатів спостережень параметрів мікроструктури M_q та інформативних фізичних параметрів F_j на наявність між ними кореляційної залежності за формулою

$$R = \frac{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n M_{q_i} \cdot F_{j_i} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n M_{q_i} \right) \left(\sum_{i=1}^n F_{j_i} \right) \right]}{\sigma_{M_q} \cdot \sigma_{F_j}}, \quad (1)$$

де R – коефіцієнт кореляції;
 M_q – відповідний параметр мікроструктури;

F_j – відповідний фізичний параметр;

σ_{M_q} та σ_{F_j} – стандартні відхилення відповідних величин;

n – кількість спостережень.

Значення коефіцієнтів кореляції між виміряними параметрами мікроструктури і фізичними властивостями наведені в таблиці 3.

Як свідчать результати досліджень, спостерігається позитивний процес кореляції між структурним співвідношенням перліт/ферит і твердістю, коерцитивною силою та умовним магнітним індуктивним параметром. Знак мінус в останньому випадку говорить про обернену залежність. Питомий електричний опір та теп-

Таблиця 3 – Коефіцієнти кореляцій між вимірними параметрами мікроструктури і фізико-механічними параметрами досліджуваних сталей

	НВ за ТКР-35	НВ за ТД-32	H_c , А/см	I , ум.од.	T , ум.од.	ρ , нОм·м
P/Fe	0,7771	0,7934	0,9033	-0,5782	-0,2311	0,3999
d , мкм	0,3135	0,3325	0,5018	-0,1917	-0,0504	-0,0313

лопровідна характеристики мають незначну кореляцію з фазо-структурним параметром через невисоку чутливість методів до структурних змін на мікрорівні і носять виражений інтегральний характер. Кореляція між вибраними фізичними властивостями і середнім розміром зерен є низькою, тому оцінювати фактичний стан металу досліджуваних марок сталей за розміром зерен при застосуванні цих властивостей в індивідуальному порядку є недоцільним.

На рисунках 3 і 4 зображено графіки залежностей фізичних і механічних параметрів від співвідношення перліт/ферит і середнього розміру зерен, відповідно, що найкраще корелюють між собою. Для відображення тенденції зміни взаємозв'язку на графіках зображено криві апроксимації.

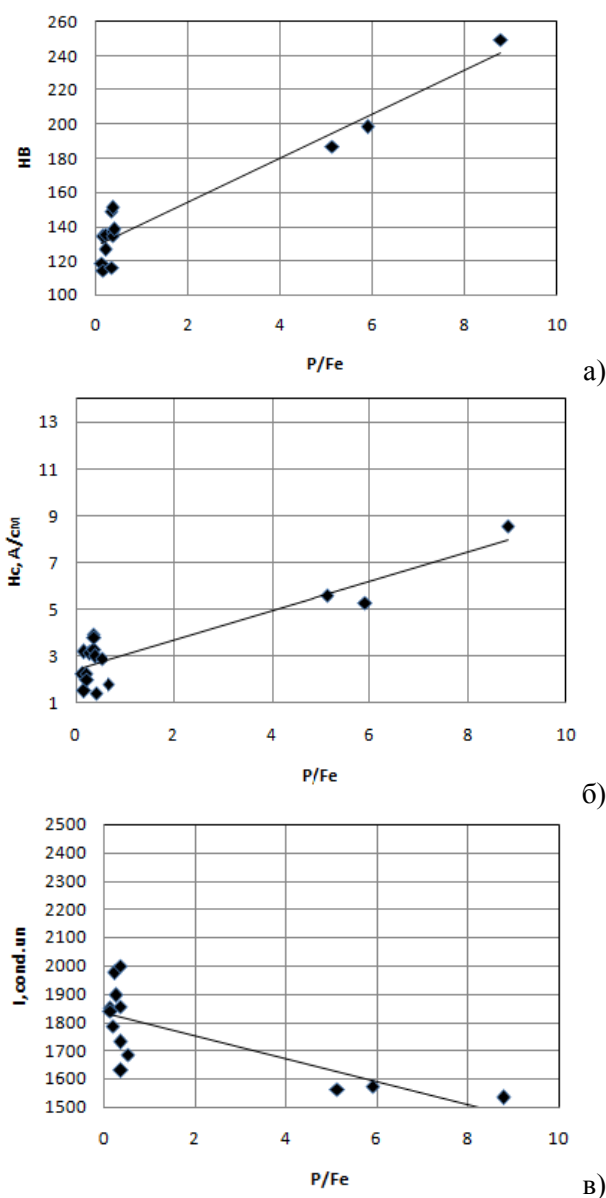


Рисунок 3 – Залежності фізичних і механічних параметрів від співвідношення P/Fe (перліт/ферит)

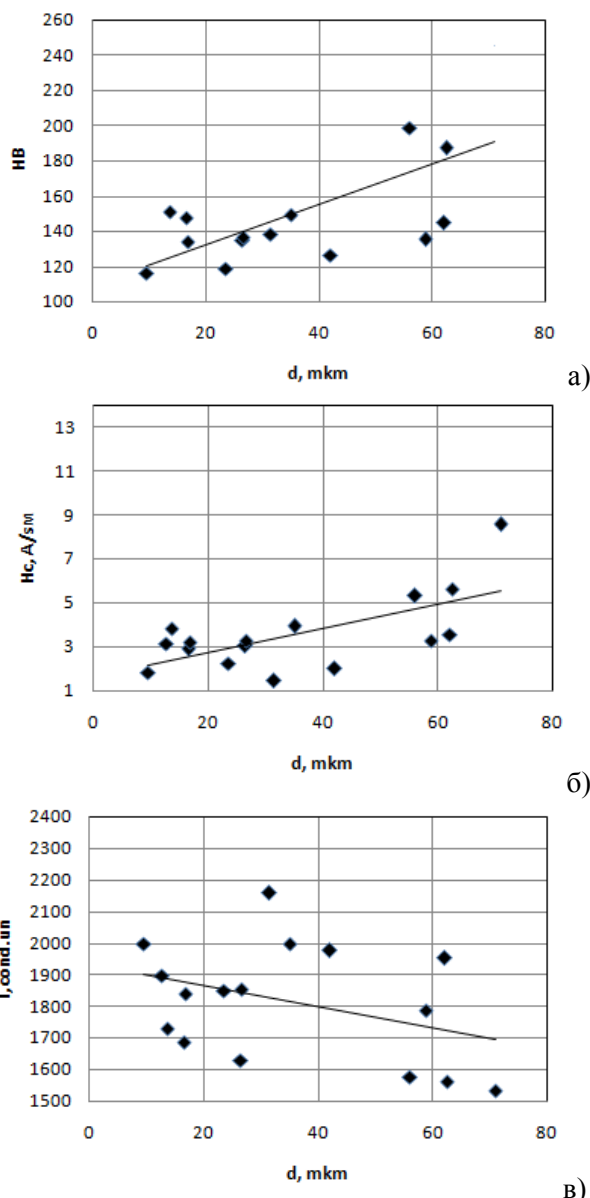


Рисунок 4 – Залежності фізичних і механічних параметрів від розміру зерна d

Результати досліджень щодо вибору параметрів фізичних методів контролю свідчать, що зміна співвідношення перліт/ферит впливає на зміну окремих фізичних властивостей матеріалів, а, особливо, – магнітних і електричних параметрів. Бал зерна в матеріалах конструкцій довготривалої експлуатації залишається практично незмінним і вносить незначний вплив на магнітні властивості металу.

Слід зауважити також, що характер зв'язку між параметрами структури і фізичними параметрами є нелінійним, що підтверджує доцільність використовувати їх в комплексі для вивчення властивостей металу. А тому метою подальших досліджень було визначення оптимальної комбінації вимірюваних параметрів (твердість, коерцитивна сила та магнітний параметр) із усіх визначених, які найкраще корелюють в комплексі з досліджуваними параметрами мікроструктури, з використанням кореляційно-регресійного аналізу.

Кореляційно-регресійний аналіз дав можливість встановити «тісність» зв'язку між двома або більше змінними. Кореляційний аналіз використовувався для визначення необхідності включення тих чи інших чинників до рівнянь регресії, а також щоб оцінити отримане рівняння регресії на відповідність виявленим зв'язкам.

На основі вимірюваних інформативних параметрів розраховувалась таблиця коефіцієнтів кореляції, а за ними визначали наявність та ступінь зв'язку між елементами відібраної множини інформативних параметрів та цільовим параметром. Додатні значення коефіцієнтів кореляції вказували на прямо-пропорційний зв'язок, тоді як від'ємні – на обернений.

Як правило, значення, що перебували в межах від 0,4 до 0,8 вказують не на відсутність зв'язку між досліджуваними характеристиками, а на його нелінійний характер.

Таким чином, результати кореляційного аналізу допомогли відкинути відразу інформативні параметри, що ніяким чином не пов'язані з цільовим та вказати на можливий нелінійний характер залежності.

При формуванні комплексних наборів даних слід керуватись правилом перебору всіх можливих варіантів, тобто в разі наявності 3-ох інформативних параметрів слід сформуванати 4 набори даних (3 набори з 2-ох параметрів та 1 набір з 3-ох параметрів), у випадку 4-ох параметрів – 11 наборів (6 наборів з 2-ох параметрів, 4 набори з 3-ох параметрів та 1 набір з 4-ох параметрів) і так далі.

На даному етапі досліджень для їх найбільш якісного виконання рекомендується використовувати пакет прикладного програмного забезпечення для обчислень. В даному випадку використано програмний пакет OriginPro SR1 b76.

Враховуючи рекомендації наведені вище були одержані рівняння лінійної регресії за значеннями попарних груп вхідних параметрів. Коефіцієнти лінійної регресії знаходились за методом найменших квадратів, рівняння лінійних регресій наведені в таблиці 4.

Як бачимо з таблиці 4, квадрат кореляції між групою аргументів та функцією (коефіцієнт детермінації – наближення цього значення до одиниці свідчить про краще моделювання) має найвищі значення при застосуванні у якості вимірюваних параметрів структурночутливих магнітних властивостей (коерцитивної сили та індуктивного параметру), що черговий раз підтверджує правильність вибору вказаних магнітних параметрів контролю. При оцінюванні середнього діаметру зерна більш достовірним буде результат з урахуванням трьох фізичних параметрів контролю (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), при визначенні співвідношення фаз достовірним результатом буде з комплексним врахуванням як трьох параметрів (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), так і комбінації значень коерцитивної сили та індуктивного параметру *I*.

Отже, є однозначна можливість оцінювати фактичний стан металу елементів нафтогазового обладнання в процесі їх експлуатації, яка виражатиметься у визначенні основних параметрів мікроструктури, за комплексом фізико-механічних параметрів. Експериментально визначено оптимальну кількість фізичних параметрів неруйнівної структуроскопії: твердість, коерцитивна сила і електромагнітний індуктивний параметр.

Хотілось би зауважити, що діагностика мікроструктурних змін, які виникають внаслідок деградації структури матеріалів металоконструкцій тривалої експлуатації, є передумовою для достовірної оцінки зміни фактичних механічних властивостей сталей (границі плинності, граници міцності, ударної в'язкості та ін.), значення яких використовують у сучасних методах розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій, що відпрацювали нормативний термін експлуатації.

Висновки

За результатами проведених досліджень щодо можливості оцінки фактичного стану металу конструкцій нафтогазового устаткування в процесі їх експлуатації можна зробити такі висновки:

1. Можливість застосування фізичних методів контролю для оцінки незворотних змін мікроструктури та деградації механічних характеристик базується на тому, що між зміною структурного стану металевих сплавів і зміною фізичних властивостей існує певний зв'язок.

2. Сучасний розвиток неруйнівних методів оцінки стану мікроструктури сталей спрямовано на розробку комплексних методів, які передбачають врахування декількох інформативних параметрів одночасно, що відносяться до різних типів полів.

3. Аналіз результатів проведених експериментальних досліджень із визначення параметрів мікроструктури та структурночутливих фізичних властивостей на сталених зразках визначених марок з використанням засобів конт-

Таблиця 4 – Рівняння лінійних регресій між вимірними параметрами досліджуваних сталей

Функція залежності	Рівняння лінійної регресії	Коефіцієнти регресії	Квадрат кореляції між групою аргументів та функцією, R
$P/Fe = f(Hc, HB, I)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_2 \cdot HB + a_3 \cdot I$	$a_0 = 1,63347$ $a_1 = 0,82631$ $a_2 = 0,00151$ $a_3 = 0,00177$	0,9193
$d = f(Hc, HB, I)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_2 \cdot HB + a_3 \cdot I$	$a_0 = 46,0722$ $a_1 = 6,52898$ $a_2 = -0,15238$ $a_3 = -0,00409$	0,5432
$P/Fe = f(Hc, HB)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_2 \cdot HB$	$a_0 = -2,27653$ $a_1 = 0,8958$ $a_2 = 0,00318$	0,90382
$P/Fe = f(Hc, I)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_3 \cdot I$	$a_0 = 1,83758$ $a_1 = 0,85134$ $a_3 = -0,00179$	0,91916
$P/Fe = f(HB, I)$	$Y = a_0 + a_2 \cdot HB + a_3 \cdot I$	$a_0 = 0,89606$ $a_2 = 0,03306$ $a_3 = -0,00269$	0,8195
$d = f(Hc, HB)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_2 \cdot HB$	$a_0 = 37,04222$ $a_1 = 6,68945$ $a_2 = -0,14853$	0,54093
$d = f(Hc, I)$	$Y = a_0 + a_1 \cdot Hc + a_3 \cdot I$	$a_0 = 25,48558$ $a_1 = 4,00385$ $a_3 = -0,00234$	0,50316
$d = f(HB, I)$	$Y = a_0 + a_2 \cdot HB + a_3 \cdot I$	$a_0 = 40,2456$ $a_2 = 0,09691$ $a_3 = -0,01134$	0,34328

ролю, що ґрунтуються на використанні різних фізичних принципів, свідчить, що застосування комплексу із трьох вимірюваних фізичних властивостей (твердість, коерцитивна сила та магнітний параметр) із усіх визначених в ході досліджень дає однозначну можливість виявляти зміни мікроструктурного стану сталей феритного класу, є передумовою для достовірної оцінки зміни фактичних механічних властивостей сталей та прогнозування їх деградації в процесі тривалої експлуатації.

4) Для практичної реалізації проведеної дослідної роботи необхідно в подальшому розробити методику, що регламентує порядок робіт, застосовуваних методів та засобів для опосередкованого визначення деградації мікроструктури матеріалів металокопункції за встановленим комплексом інформативних параметрів неруйнівного контролю.

Література

1 Справочник по нефтепромысловому оборудованию / Под. ред. Е.И. Бухаленко. – М.: Недра, 1983. – 233с.

2 Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наукова книга, 2003. – 235 с.

3 Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1977. – 647с.

4 Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств / В.В. Гриб. — М.: Изд-во ЦНИИ-ТЭнефтехим, 2002. – 302 с.

5 Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: учеб. пособие для вузов / Е.А. Богданов. – М.: Высш. школа, 2006. – 279 с.: ил.

6 Миндюк В.Д. Особенности деградации структуры материалов металокопункций долговременной эксплуатации та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі / В.Д. Миндюк, С.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 2 (28). – С.91-97.

7 Карпаш О.М. Комплексний метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металокопункцій / О.М. Карпаш, С.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – №5. – С.40-47

8 Бабич В.К. Деформационное старение стали. / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.

9 Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Липецкий. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

10 Honeycombe R.W. K. Steels. Microstructure and Properties / R.W. K. Honeycombe, N. K. D. N. Bhadeshia. – Elsevier Ltd, 2006. – 345 p.

11 Металловедение и термическая обработка стали: справ. изд.; 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. //Методы испытаний и исследования / Под ред. М.Л.Бернштейна, А.Г. Рахштадта – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

12 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: ГОСТ 5639 – 82. – [Срок введения в действие 1983 – 01 -01]. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 22 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
08.09.15*

*Рекомендована до друку
професором Карнашем М.О.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Тацаковичем Н.Л.
(ТОВ НВФ «Зонд», м. Івано-Франківськ)*