

Міністерство освіти і науки України

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт «Інфра-структура залізничного транспорту (рухомий склад залізниць та тяга поїздів, транспортні споруди, залізнична колія)»

Шифр «Чавун»

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

НА ТЕМУ:

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОЛІНЧАСТОГО  
ВАЛУ ДИЗЕЛЯ

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1 Матеріали валів дизеля, їх знос і методи зміцнення .....	4
2 Методики і матеріал дослідження .....	12
3 Підвищення довговічності виробів з ВЧКГ термічною обробкою та поверхневим пластичним деформуванням.....	17
3.1 Дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості ВЧКГ.....	17
3.2 Дослідження впливу індукційного гартування та алмазного вигладжування на структуру і властивості поверхневого шару ВЧКГ .....	21
Висновки.....	30
Список літератури.....	31

## ВСТУП

Одним з основних завдань вітчизняного машинобудування є підвищення якості машин при одночасному зниженні їх собівартості. Вирішення цієї проблеми може бути забезпечено застосуванням нових і вдосконаленням існуючих технологій.

Високоміцний чавун з кулястим графітом все більше використовується в автотракторобудуванні, тепловозобудуванні і загальному машинобудуванні замість литої та кованої сталі [1]. Багато деталей, які виготовлені з високоміцного чавуну, працюють в умовах тертя і зношування. Знос призводить до втрати первісної геометричної форми, розмірів і довговічності виробу та всієї конструкції в цілому.

Зносостійкість деталей машин багато в чому визначається властивостями поверхневих шарів і структурою металевої основи матеріалу, які формуються в процесі їх виробництва. Високоміцні чавуни мають: високу твердість і міцність у поєднанні з достатньою пластичністю і ударною в'язкістю. ВЧКГ має широкий діапазон експлуатаційних властивостей, який створюється термічною обробкою та легуванням. Розширення застосування високоміцного чавуну для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя і зношування, до певної міри стримується труднощами забезпечення високого рівня зносостійкості і параметрів якості їх поверхневих шарів.

Тому питання підвищення довговічності чавунного колінчастого валу дизеля шляхом оптимізації режимів об'ємної термічної обробки та поверхневого зміцнення індукційним гартуванням у поєднанні з алмазним вигладжуванням є актуальним.

# 1 МАТЕРІАЛИ ВАЛІВ, ЇХ ЗНОС І МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ

Практика свідчить, що при інших рівних умовах тривалість роботи тепловоза в значному ступені залежить від зносостійкості і міцності основних деталей двигуна [2].

Однією з головних причин поступових відмов є досягнення максимально можливого рівня зносу найбільш відповідальних деталей. Знос і пошкодження робочої поверхні деталей із різних вузлів тепловоза лімітують роботу всієї машини в цілому.

Найбільш відповідальною деталлю дизеля є колінчастий вал (рис. 1.1).

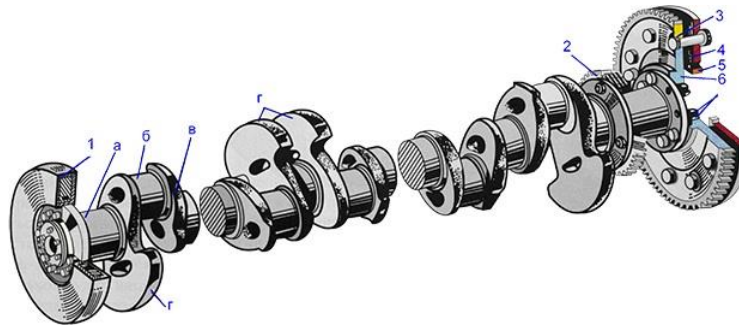


Рисунок 1.1 – Колінчастий вал дизеля

Колінчастий вал через шатуни сприймає зусилля від поршня і передає їх у вигляді крутного моменту ротору тягового генератора і допоміжним агрегатам. Колінчастий вал сприймає періодично дію сил тиску газів, сил інерції, а також крутний і згинальні моменти, викликані дією цих сил. Тобто колінчастий вал працює в умовах циклічних ударних навантажень, а опорні поверхні вала і шатунні шийки працюють в умовах тертя і зношування. Виходячи з умов роботи вал повинен мати наступні властивості – серцевина валу повинна мати достатню міцність та ударну в'язкість, а поверхні, які працюють в умовах зносу, високу зносостійкість. Зношування опорних і шатунних шийок лімітує роботу колінчастого валу. Тому дослідження процесів зношування валу і способів підвищення його зносостійкості – це актуальні питання.

Колінчастий вал працює в замкненому масляному середовищі, куди потрапляють продукти зносу. Ці продукти зносу надалі виконують роль абразивних частинок. Зношування контактних поверхонь валу можна класифікувати як контактне абразивне (згідно класифікації абразивного зношування деталей сільськогосподарських машин Тененбаума М.М. [3]).

Зносостійкість має дуже складну залежність від величини і співвідношення твердості матеріалу і ударної в'язкості. Для підвищення зносостійкості необхідно підвищувати твердість тих поверхонь валу, які працюють в умовах тертя. Серцевина валу має бути достатньо в'язкою, щоб чинити опір циклічним згинаючим навантаженням, крученню.

Колінчасті вали виготовляють куванням або штампуванням із сталей 45, 45Х, 45Г2, 50Г, а важконавантажені вали дизелів – з легованих сталей 40ХНМА, 18ХНВА [4, 5]. Також колінчасті вали виготовляють з високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ).

Литі колінчаті вали мають наступні переваги в порівнянні з кованими: зниження витрат металу, скорочення числа операцій при механічній обробці, можливість надання оптимальних форм щодо розподілу металу і підвищення втомної міцності. Литі колінчасті вали з чавуну мають кращу здатність гасіння крутильних коливань. Литі чавунні вали мають меншу міцністю (особливо на вигин), ніж штаповані сталеві. Тому у чавунних валів збільшують діаметри шатунних і корінних шийок, товщину щік і радіуси жолобників. Чавунні колінчасті вали виготовляють повноопорними. Шийки чавунних валів мають високу зносостійкість, що дозволяє застосовувати підшипники із свинцевистої бронзи. Маса обробленого литого колінчастого вала на 10-15 % менше маси кованого сталевого.

В наступний час високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ) має дуже широкий спектр використання (рис. 1.2). З нього виготовляють колінчасті і розподільні вали, блоки циліндрів, кронштейни ресор, картери заднього моста, диференціала і подільника, шатуни, гальмівні барабани, диски зчеплення, маховики, вихлопні колектори, кришки підшипників, маточини, зубчасті колеса, поршні, поршневі кільця, корпуси турбін, сервоциліндри, кулаки заднього моста, поворотні

шкворні, водила планетарного механізму кінцевої передачі, корпусу передньої осі, важелі поворотного кулака та ін. [5-7]. Головна перевага ВЧКГ полягає в тому, що він виявляє оригінальну сукупність властивостей: міцність, яку можна порівняти з сучасними легованими термозміцненими сталями і одночасно технологічні та службові властивості як у сучасних сірих чавунів.



Рисунок 1.2 – Номенклатура виробів з ВЧКГ

Маркування та властивості ВЧКГ нормуються ДСТУ 3925-99 «Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки» [8]. Відомо, що чавуни з кулястим графітом навіть в литому стані можуть мати високі характеристики міцності аж до марки ВЧ 700-2. Однак для отримання чавунів більш високих марок необхідні їх додаткове легування або зміцнювальна термічна обробка.

Недолік чавунів найбільш високих марок полягає в їх невисокій пластичності і в'язкості. Цей недолік усувається шляхом забезпечення бейнітної, бейнітно-аустенітної або аустенітно-феритної структури металевої основи (матриці) чавунів. Доцільно також отримання чавунів з комплексною бейнітно-аустенітно-феритною структурою. Поєднання високих механічних властивостей, включаючи підвищені значення пластичності і ударної в'язкості, у ВЧКГ отримують шляхом використання раціонального хімічного складу і способу термічної обробки.

Термообробку проводять також з метою покращення оброблюваності, зняти внутрішніх напружень, зміни структури і т.д. У тих випадках, коли термообробка

утруднена (складні і масивні виливки), застосовують легування чавунів. Спільне використання легування та термічної обробки забезпечує найвищі показники механічних властивостей. У ряді випадків може бути проведено два види термічної обробки: перший – попередній – для покращення оброблюваності виливків, другий – кінцевий після механічної обробки – з метою отримання заданих механічних властивостей деталі. [9]. Основні види термічної обробки, що застосовуються для чавунів з кулястим графітом: високотемпературний графітизуючий відпал, нормалізація з міжкритичного (МКІ) і надкритичного інтервалу (НКІ), низькотемпературний феритизуючий відпал, гартування, відпуск, ізотермічне гартування, поверхневе гартування, термоциклічна обробка та ін. [10, 11, 12].

Високоміцний чавун в литому стані має ферито-перлітну структуру, розвинену ліквідацію всіх елементів, які входять до його складу (кремнія, марганця, фосфора). Найбільший вплив на структуру чавуну має ліквідація кремнія.

Підвищення зносостійкості досягають різними способами: зміцнення термічними методами (об'ємна термічна обробка, поверхневе гартування); зміцнення хіміко-термічними методами (цементация, азотування, хромування та ін.); зміцнення фізичними і фізико-хімічними методами (наплавлення, лазерна обробка, електроіскрова, іонно-плазмова); зміцнення методами пластичної деформації; зміцнююча механічна обробка на білий шар та ін. [13-16]

В сільському господарстві використовують навішуване обладнання (лемехи та культиватори), які працюють в умовах абразивного зношування. Для підвищення зносостійкості їх виготовляють замість сталі з високоміцного чавуну, який піддають ізотермічному гартуванню (нагрівання до 890 °С, ізотермічна витримка при 350 °С) для отримання бейнітної структури [16]. Спостерігається суттєве збільшення зносостійкості зразків з ВЧКГ у порівнянні із сталевими.

Підвищення зносостійкості ВЧКГ досягають азотуванням [17]. Отримати суцільний азотований шар на чавуні можливо тільки, коли графітні включення не утворюють суцільний шар. Високоміцний міцний не потребує для азотованих виробів спеціального легування. Азотований шар на високоміцному чавуні характе-

ризується підвищеною пластичністю. Недоліком цього методу є велика тривалість, невелика товщина зміцненого шару, екологічна шкідливість процесу [17].

Досить перспективним є використання при поверхневому зміцненні чавунних деталей висококонцентрованих джерел енергії – лазерного променя і плазмового струменя [18-20]. Недоліком цих методів зміцнення є висока вартість і невисока продуктивність процесу.

В роботі [21] зміцнення робочої поверхні деталі виконували дискретно у вигляді макролегованих ділянок, що істотно відрізняються від основного матеріалу як за механічними властивостями, так і за хімічним складом.

У процесі багатьох технологічних операцій зміцнення і обробки вуглецевих, легованих гартованих сталей виникають специфічні структури, відомі в літературі під назвою «білих шарів». Ці структури можуть формуватися при механічній обробці деталей машин: точінні, фрезеруванні, шліфуванні; електромеханічній; фрикційно-зміцнюючій обробці та ін. [22-24].

У промисловості для поверхневого зміцнення виробів використовують швидкісне індукційне нагрівання їх струмами високої частоти (СВЧ) [25, 26]. Цей вид поверхневого зміцнення дає можливість набувати високих механічних властивостей в поверхневому шарі (завдяки утворенню дрібнозернистої структури, стискуючих напружень) при збереженні м'якої і в'язкої серцевини.

При поверхневому індукційному гартуванні використовують спеціальні пристрої – індуктори. Для нагрівання виріб 1, як показано на рис. 1.3 [26], поміщують в електромагнітне поле індуктора 2, який в найпростішому випадку містить один виток тонкої мідної трубки.

Змінний струм високої частоти генерує пульсуюче магнітне поле. В результаті явища індукції в поверхневому шарі деталі виникають вихрові струми Фуко. За законом Джоуля-Ленца при проходженні струму в провіднику виділяється теплота, яка сприяє нагріву виробу, який знаходиться в індукторі 2.



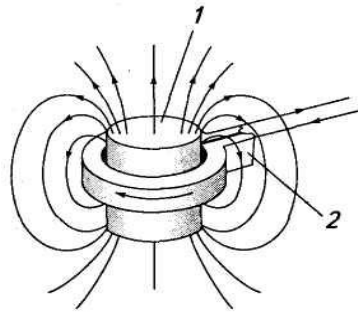


Рисунок 1.3 – Індуктор і його магнітне поле

Розподіл змінного струму за перерізом деталі нерівномірний. Щільність струму на поверхні значно більше, ніж в середині виробу (так званий поверхневий ефект). У поверхневому шарі виділяється близько 90 % теплоти, тому тільки поверхневий шар нагрівається до температур, вище за точку  $A_{c3}$ . Цей шар називають глибиною проникнення струму в метал, що впливає на товщину зміцненого шару тієї частини виробу, яка нагрівається і загартовується.

Глибина проникнення струму в метал, тобто глибина нагріву поверхневого шару, при постійних інших показниках (питома потужність, час нагріву, температура поверхні) визначається виразом [27]

$$\delta = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ см} \quad (1.1)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір металу, Ом·м;

$\mu$  – відносна магнітна проникність;

$f$  – частота струму, Гц.

Глибиною проникнення вважається рівень, у якому сила струму падає до рівня 37 %. У поверхневому шарі металу товщиною, що дорівнює глибині проникнення, виділяється 90 % потужності індукційного нагрівання. Зі зниженням частоти поля глибина проникнення збільшується.

Вибір товщини зміцненого шару зумовлюється експлуатаційними вимогами до деталей. Якщо деталь працює лише в умовах зношування, товщина загартованого шару зазвичай не перевищує 3 мм, а якщо виріб піддається ще і контактному наван-

таженню, то товщина зміцненого шару збільшується до 8-10 мм. Як правило, шар ефективного зміцнення в межах 3-5 мм для багатьох деталей трактора, виходячи з умов максимально дозведеного їх зносу, є достатнім.

Охолодження поверхні виробу після його нагріву СВЧ найчастіше здійснюється за допомогою душового пристрою, який вмонтовується разом з індуктором. В якості охолоджувача при гартуванні вуглецевих сталей застосовують воду, водяні розчини кухонної солі, а для виробів з легованих сталей – масло.

Температура нагріву поверхні при індукційному гартуванні дорівнює 980-1050°C, тобто трохи вище, ніж у разі об'ємного гартування. Це пов'язано з тим, що через високу швидкість нагріву (500 °C/с порівняно з 30 °C/с при нагріві в печах) ускладнюється розчинення карбідів і гомогенізація аустеніту, тому виріб перегрівають. Але це не призводить до укрупнення зерна аустеніту, внаслідок того, що швидкість нагрівання велика, а витримка при високій температурі відсутня.

Після гартування СВЧ вироби на поверхні мають структуру дрібногочастого мартенситу, а структура серцевини залишається незмінною. Твердість поверхневого шару знаходиться в межах 50-62 HRC залежно від хімічного складу.

Для зниження внутрішніх напружень при збереженні високої твердості після поверхневого гартування деталі піддають низькому відпуску (150-200 °C) або самовідпуску.

В роботі [28] індукційне гартування використовували для підвищення твердості і зносостійкості фрикційного клина вагонного возика, який виготовляють із сірого чавуну марки СЧ18.

Індукційне гартування виробів з ВЧКГ дозволяє підвищити опір зношуванню, механічні властивості поверхневого шару. До цих пір цей вид поверхневого зміцнення не знайшов дуже широкого застосування для ВЧКГ. Таке положення пояснюється тим, що вміст фериту у виливках може коливатися від 5 до 80 %, а кількість глобулів графіту – від 10...20 до 90...100 мм<sup>2</sup> і більше. У зв'язку з цим для кожної відливки необхідно вибирати індивідуальний режим гартування – швидкість нагріву і температуру [29]. Висока швидкість і температура нагріву може призводити до появи тріщин.

Завдяки перевагам, що має індукційне гартування, цей метод може бути ефективним для підвищення зносостійкості поверхонь тертя колінчастого валу.

Експлуатаційні властивості деталей машин в значній мірі залежать від якості їх поверхні, яка визначається сукупністю характеристик: шорсткість поверхні, фізико-механічний стан, мікроструктура металу поверхневого шару і рівень залишкових напружень. Змінювати ці характеристики можна обробкою поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке ефективно застосовувати на фінішних операціях технологічного процесу при виготовленні або відновленні деталей машин. В процесі ППД відбувається зменшення мікронерівностей і зміна їх форми, подрібнення зерен і виникнення текстури, підвищується густина дислокацій, виникає наклеп, утворюються стискаючі напруження, що в результаті сприяє підвищенню зносостійкості та довговічності [30]. Наклеп поверхні може здійснюватися дробострумінною обробкою, обкаткою роликком або спеціальним інструментом, алмазним вигладжуванням [31-32].

На основі аналізу літературних даних була визначена мета та завдання досліджень. Метою даної роботи було підвищення довговічності колінчастого валу за рахунок оптимізації об'ємної термічної обробки та поверхневого зміцнення.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- вивчення умов роботи колінчастого валу;
- аналіз матеріалів і методів підвищення зносостійкості валів;
- визначення об'ємної термічної обробки ВЧКГ, що дозволяє отримувати високий комплекс механічних властивостей за перерізом деталі;
- вибір способу поверхневого зміцнення;
- дослідження впливу алмазного вигладжування на якість поверхневого шару;
- дослідження впливу термічної обробкою, поверхневого зміцнення та поверхневого пластичного деформування на довговічність виробу з ВЧКГ.

## 2 МЕТОДИКИ І МАТЕРІАЛ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення досліджень був вибраний високоміцний чавун хімічного складу: 3,3-3,8 % C; 2,4-3,2 % Si;  $C+1/3 Si = 4,25-4,35$  %; 0,004-0,007 % S; 0,5-0,9% Mn; 0,045-0,008 % P; 0,05-0,1 % Cr; 0,1-0,15 % Ni; 0,04-0,09 % Mg, який широко використовується в промисловості. Для дослідження хімічного складу чавуну використовували спектральний аналіз стружки на спектрометрі МФС-6, вміст вуглецю визначали хімічним шляхом за допомогою газоаналізатора АН-29.

Високоміцний чавун має глобулярний графіт, який досить рівномірно розподілений за перерізом відливки. Розміри графітних включень коливаються в межах 20-100 мкм, але основна маса (60 %) графітних включень мають розміри 30-60 мкм. Щільність графітних включень – 80-90 мм<sup>2</sup>.

В литому стані чавун характеризується розвиненою ліквіацією практично всіх хімічних елементів: кремній схильний до значної зворотної ліквіації, марганець і фосфор – до прямої. При середньому вмісті в металі 2,6 % кремнію в колографітних об'ємах його кількість досягає 3,6 % [1].

Дослідження проводилися на чавунних зразках діаметром 60 мм, довжиною 100 мм, що отримані з однієї плавки. Дослідження структури проводилися на оптичному мікроскопі МІМ-8. Кількісну оцінку фазового складу чавунів з перліто-феритною структурою виконували за допомогою лінійного методу Розівалія [33]. Співвідношення площі фаз на плоскому шліфі легко встановлювалося за відрізком прямої лінії, величина відрізків вимірювалася за допомогою масштабної лінійки. Сума довжин відрізків, що припадає на кожен складову структури, пропорційна площі, що зайнята цією структурною складовою

$$S_n = S - S_\phi, \%, \quad (2.1)$$

де  $S_n$  – площа, зайнята перлітом;

$S_\phi$  – площа, зайнята феритом.

Відносна площа, зайнята перлітом

$$S_n = \frac{L_n}{L}, \%, \quad (2.2)$$

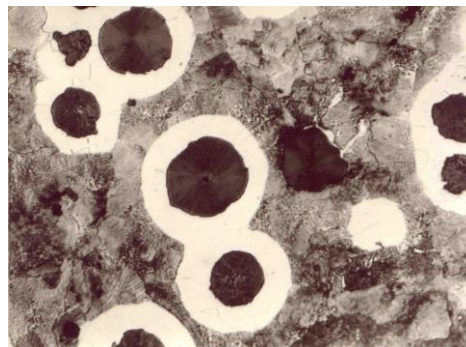
де  $L_n$  – довжина ділянок відрізків, що припадає на перліт;

$L$  – загальна довжина відрізків.

Щоб підвищити точність вимірювань достатньо провести десять відрізків на мікрофотографії [33].

Для дослідження структури чавунів використовували травлення реактивом: 4% азотної кислоти, інше – етиловий спирт [33]. Виявлення внутрішньокристалічної ліквідації кремнію в чавуні виконували травленням пікратом натрію. Для цього шліф поміщали в нагрітий до 60 °С розчин на 40 хв [33].

В литому стані ВЧКГ має структуру крупнопластинчастого перліту, фериту у вигляді облямівки навкруги включень графіту і кулястого графіту (рис. 2.1).



збільшення  $\times 340$

Рисунок 2.1 – Мікроструктура досліджуваного чавуну в литому стані, травлення 4% азотною кислотою

У литому стані ВЧКГ характеризується недостатньо високими показниками міцності і пластичності.

Для зміни властивостей застосовується термічна обробка, мета якої не тільки змінити структуру, але і вирівняти хімічну неоднорідність. Для досліджуваних чавунів були обрані найбільш економічні режими термічної обробки – нормалізація з міжкритичного інтервалу (МКІ) та нормалізація з надкритичного інтервалу (НДІ) температур (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Стан та термічна обробка ВЧКГ

Умовний номер чавуну	Стан чавуну	Структура чавуну	Твердість чавуну, HBW
1	Литий стан	Крупнопластинчастий перліт (55 %)+ ферит у вигляді облямівки навкруги КГ+ КГ	210-220
2	Нормалізація з МКІ: нагрів до 860 °С, витримка 1,5 години, охолодження в струмені повітря	Пластинчастий перліт (85 %)+ ферит+КГ	275-285
3	Нормалізація з НКІ: нагрів до 890 °С, витримка 1,5 години, охолодження в струмені повітря	Пластинчастий (сорбіто-подібний) перліт (85 %)+ферит+КГ	310-320

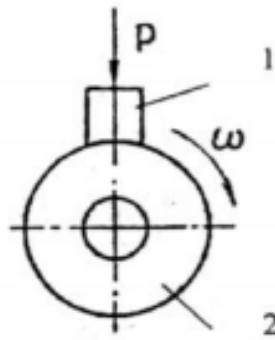
Макротвердість вимірювали за методом Брінелля на твердомірі моделі UIT HBW-1.

Для дослідження показника ударної в'язкості КС використовували маятниковий копер моделі JB-300В. Ударну в'язкість визначали на зразках розміром 10×10 мм без надрізу.

Для вимірювання мікротвердості використовували мікротвердомір ПМТ-3. Дослідження мікротвердості проводилися за загальноприйнятою методикою за ГОСТ 9450-76. Мікротвердість вимірювали з навантаженням 50 г. Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою комплексу, що був розроблений на кафедрі ХНАДУ ТМтаМ, з високою точністю на базі мікротвердоміра ПМТ-3 і персонального комп'ютера [34].

Гартування проводили високочастотним ламповим генератором ВЧГ 6-60/0,4 з робочою частотою 440 кГц в одновитковому індукторі. Охолодження здійснювали водою із спреєра. Після гартування проводили низький відпуск при температурі 160 °С протягом 1 години.

Для випробувань на тертя та зношування використовували схему «ролик-колодка» (рис. 2.2) на машині тертя СМЦ-2, яка відтворює роботу реальних деталей.



1 – колодка, 2 – ролик

Рисунок 2.2 – Схема тертя на машині тертя СМЦ-2

Ролик у всіх випадках виготовляли із сталі 45 після гартування та низького відпуску, а колодки – з високоміцного чавуну у литому стані і після термічної обробки та із сталі 45. Колодки із сталі 45 піддавали індукційному гартуванню та низькому відпуску і отримали твердість 60-62 HRC. Ролики виготовляли із загартованої сталі 45 для того, щоб пришвидчити процес зносних випробувань. В якості середовища використовували масло індустриальне 20. Швидкість ковзання контртіл – 1,0 м/с. Площа контакту зв'язаних пар тертя – 2 см<sup>2</sup>, питоме навантаження – 1 МПа.

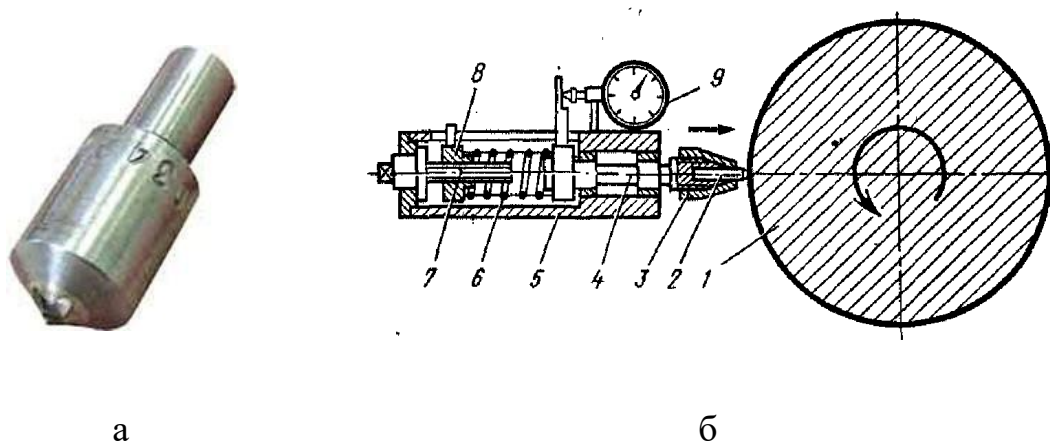
Кожне випробування виконували таким чином, що спочатку протягом 0,5 години здійснювалося прироблення в масляному середовищі без додатку навантаження. Після прироблення додавалося робоче навантаження.

Зразки перед їх установкою на стенд (на машину тертя) ретельно очищувалися від оксидів, забруднень, промивалися в бензині і просушувалися.

Величина зносу контртіл – ролика і колодки – визначали ваговим методом з точністю до 0,1 міліграма. Кожне випробування проводили на протязі 10 годин та повторювали два рази. Ролики для випробувань на тертя і зношування виготовляли діаметром 40 мм і товщиною 10 мм.

Для алмазного вигладжування ВЧКГ застосовувалися сферичні вигладжувачі (індентори) (рис. 2.3, а) із синтетичних алмазів АСПК з радіусом сфери  $R_{сф}=1,5$  мм, встановлені в державці (пружинній оправці) (рис. 2.3, б), яку закріп-

лювали в різцетримачі супорта токарно-гвинторізного верстата 1К62. В якості мастила використовувалося масло індустріальне марки І-20А.



а – алмазний вигладжувач, б – державка: 1 – вал; 2 – алмазний вигладжувач; 3 – цанговий патрон; 4 – оправлення; 5 – пружина; 7 – гвинт для регулювання; 8 – упорна гайка; 9 – індикатор

Рисунок 2.3 – Схема алмазного вигладжування

Зусилля притискання алмазного вигладжувача до вала регулювали гвинтом і контролювали індикатором. Перед вигладжуванням поверхню валу змащували маслом індустріальним марки І-20 і притискали алмазний вигладжувач з певним зусиллям.

Шорсткість обробленої поверхні оцінювали на портативному вимірювачі шорсткості TR200 за середнім арифметичним абсолютних значень відхилень профілю Ra в межах базової довжини  $l=2,5$  мм. Вимірювач приєднували до комп'ютера і записували профілограми оброблених поверхонь.



## 3 ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВИРОБІВ З ВЧКГ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ ТА ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

### 3.1 Дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості ВЧКГ

Аналіз роботи валу показав, що він повинен мати достатню міцність та ударну в'язкість за перерізом, щоб опиратися знакозмінним навантаженням, і високу твердість опорних поверхонь, щоб опиратися зносу. Тому були проведені дослідження впливу різних видів об'ємної термічної обробки ВЧКГ на його структуру та механічні властивості з урахуванням наступного поверхневого зміцнення індукційним гартуванням. На відміну від пічного нагріву при використанні СВЧ структура металевої основи високоміцного чавуну, що сформувалася в процесі індукційного гартування, в повній мірі залежить від вихідної структури чавуну.

Для створення необхідної структури поверхневого шару ВЧКГ в процесі індукційного гартування необхідно застосовувати таку термічну обробку, яка забезпечує всебічну підготовку деталі до подальшого гартування: розкладання первинних або евтектичних карбідів, якщо вони утворилися в процесі первинної кристалізації; зменшення ступеня ліквідації всіх елементів, що входять до складу чавуну, особливо кремнію; забезпечення перлітизації металевої основи, що потрібно для необхідного насичення вуглецем аустеніту, який утворюється при нагріванні [14, 35].

Високоміцний чавун з кулястим графітом в литому стані відноситься до неоднорідних матеріалів: тверда металева матриця пронизана м'якими включеннями графіту різних розмірів; нерівномірний розподіл фериту, який зосереджений, в основному, в колографітній зоні; ліквідація хімічних елементів, в основному кремнію.

Структурна і хімічна неоднорідність впливають на властивості чавуну. У литому стані чавун має низькі показники міцності, твердості і пластичності (210-220 HBW). Структурну і хімічну неоднорідність чавуну, співвідношення структурних складових можна змінювати термічною обробкою, регулюючи температуру

нагріву, час витримки, швидкість охолодження, кількість переходів через критичні точки [10]. На основі літературних даних були обрані найбільш економічні види термічної обробки – нормалізація з міжкритичного та надкритичного інтервалу температур [14].

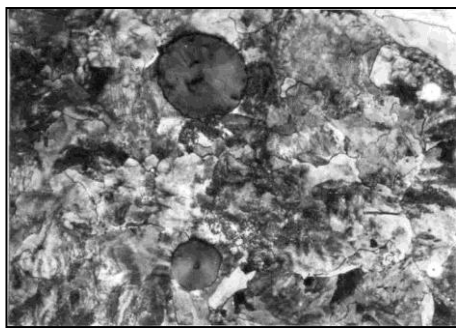
Для попередження утворення тріщин при гартуванні СВЧ необхідно, щоб в структурі матриці збереглася деяка (20-25 %) кількість фериту. Структурно-вільний ферит не повинен залягати у вигляді масивної облямівки навколо включень графіту, як це властиво литій структурі. Такий насичений кремнієм феррит не здатний в умовах прискореного нагріву до формоутворення стабільного аустеніту, що містить достатню кількість вуглецю. У зв'язку з цим виділення фериту при нормалізації має відбуватися під час охолодження з температури нагріву, коли він буде утворювати дрібні, розірвані ділянки. Отже, витримка при нагріванні під нормалізацію повинна бачити досить тривалою для завершення  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення і розчинення графіту. Надмірна витримка здатна привести до посилення ліквідації фосфору, який дифундує до границь зерен і окрихчує їх. Для індукційного гартування це неприпустимо, так як саме на границях зерен будуть утворюватися тріщини. Таким чином, витримка при нагріванні під нормалізацію не повинна перевищувати 1,5-2 г.

Зародки аустеніту при індукційному нагріві феритного чавуну утворюються на границі феррит - графіт через більш інтенсивне тепловиділення за рахунок локального збільшення щільності струму. Утворення аустеніту супроводжується насиченням його вуглецем. Тому лімітуючим фактором в даному випадку виступає дифузія вуглецю. При обробці перлітного чавуну велике значення має дисперсність феритокарбідної суміші і повної аустенізації, а насичення аустеніту вуглецем досягається незалежно від швидкості нагріву. На вибір параметрів нагріву феритного чавуну впливають температура, швидкість нагріву і середня відстань між глобулями графіту. Феритний чавун необхідно нагрівати з малими швидкостями, які важко забезпечити при високочастотному нагріві. Цим і пояснюються невдачі використання високоміцного чавуну з феритною матрицею.

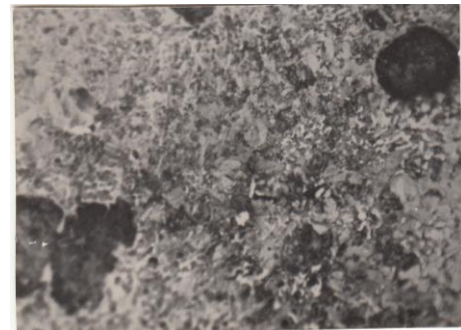
Дослідження проводилися на чавунах, які піддавали нормалізації з надкритичного та міжкритичного інтервалу температур, що дозволило отримати різну ступінь хімічної неоднорідності, дисперсності перліто-феритної структури і різну кількість фериту в структурі.

Нормалізацію з надкритичного інтервалу температур проводили за режимом: нагрів вище  $A_{c1}^K$  ( $890\text{ }^\circ\text{C}$ ), витримка протягом 1 години, охолодження в потоці повітря (рис. 3.1). При цьому зберігається досить значна ступінь неоднорідності, в тому числі за кремнієм.

Мікроструктура чавуну – сорбітоподібний перліт (95 %)+ферит (рис. 3.1, а).



а



б

збільшення  $\times 350$

Рисунок 3.1 – Мікроструктура високоміцного чавуну після нормалізації з НКІ (а) і з МКІ (б)

Для цього чавуну характерна висока міцність, твердість і невисокий рівень ударної в'язкості: 310-320 HBW,  $KC=10-15\text{ Дж/см}^2$ . Така термічна обробка забезпечує всебічну підготовку деталі до подальшого поверхневого гартування, однак не забезпечує достатнього рівня ударної в'язкості.

Термічна обробка з міжкритичного інтервалу  $A_{c1}^n - A_{c1}^k$  більш суттєво впливає на хімічну та структурну неоднорідність чавуну. В рівновазі в цьому інтервалі температур знаходяться три фази – аустеніт, ферит і графіт.

Перерозподіл вуглецю починається в умовах температури нижче  $A_{c1}^n$ . У зв'язку з тим, що розчинність вуглецю у фериті із зростанням температури практично не підвищується і вміст кремнію достатньо великий, то вільний вуглець, що утворюється при розпаді

цементиту, спрямовується до графіту. Відбувається процес звільнення від вуглецю металеві матриці основи і зростання включень графіту. Відбувається сфероїдизація цементиту і його розпад. Між цементитними пластинками збільшується відстань і вуглець відводиться до графітних включень. При температурах, близьких до точки  $A_{c_1}''$ , відбувається найактивніший розпад цементиту.

Коли температура досягає  $A_{c_1}''$  перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  перш за все починається в ділянках перліту, які мають знижений вміст кремнію і підвищений вуглецю. З часом аустенізація розповсюджується на феритні ділянки. Однак оскільки вміст кремнію в окремих зернах  $\alpha$ -фази відрізняється, температура початку  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення буде відрізнятися. Таким чином при нагріві в міжкритичний інтервал одночасно співіснують області аустеніту, графіту і фериту з підвищеним вмістом кремнію.

Із збільшенням витримки йдуть процеси насичення вуглецем аустеніту, що утворився, і перерозподіл кремнію. У зв'язку з тим, що розчинність кремнію у фериті значно більша, ніж в аустеніті, у процесі розвитку  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення кремній відтісняється від границі  $\gamma$ -фази у ферит, який ще зберігся. Так як під час переходу через  $A_{c_1}''$  утворюється велика кількість зародків аустеніту, в результаті структура буде мати відносно дрібні ділянки, що чергуються, з підвищеним і зниженим вмістом кремнію. Таким чином, неоднорідність за кремнієм вирівнюється. Чим більше формується зародків аустеніту, тим тонше ця неоднорідність.

Кінцева структура, що формується при обробці з МКІ, визначатиметься умовами охолодження. Охолодження фіксує в залежності від його швидкості на місці ділянок аустеніту різні продукти розпаду – від мартенситу (при охолодженні зі швидкістю більше критичної) до фериту (при повільному охолодженні). Нормалізація з МКІ представляє найбільший інтерес, тому що дозволяє отримати ферито-перлітну (сорбітну) структуру матриці з досить тонкою неоднорідністю за кремнієм та досить високий комплекс механічних властивостей – достатній рівень міцності, пластичності та ударної в'язкості.

Нормалізація з міжкритичного інтервалу (МКІ) проводилася за режимом: нагрів до 860 °С, витримка 1,5 години, охолодження в струмені повітря. Структура чавуну – пластинчастий (сорбітоподібний) перліт (85 %)+ферит (рис. 3.1, б). Мікроструктура, що утворюється при термічній обробці з МКІ, характеризується дуже тонкою неоднорідністю за кремнієм, вуглецем та іншими елементами.

Такі особливості структури дозволяють отримати оптимальний комплекс властивостей – трохи нижчу твердість, але більш високий рівень ударної в'язкості: 275-285 НВW, КС=50 Дж/см<sup>2</sup>.

Нормалізація створює необхідний комплекс властивостей за перерізом валу. Проте вона не забезпечує високої твердості і зносостійкості поверхневого шару.

### 3.2 Дослідження впливу індукційного гартування та алмазного вигладжування на структуру і властивості поверхневого шару ВЧКГ

Таким чином, оптимальні результати після індукційного гартування можуть бути отримані лише при використанні чавуну з певною вихідною структурою, у тому числі необхідних вмісту фериту, кількості включень графіту в одиниці об'єму (на 1 мм<sup>2</sup>) з урахуванням оптимальних параметрів нагріву СВЧ [29]. Ці фактори можна представити у вигляді функцій:  $НВW = f_1(n, V_n, t_n)$ ,  $\delta = f_2(n, V_n, t_n)$ , де НВW – твердість на поверхні загартованого шару;  $\delta$  – глибина загартованого шару, мм;  $n$  – кількість глобулів графіту на 1 мм<sup>2</sup>;  $V_n$  – швидкість нагріву, °С/с;  $t_n$  – температура нагріву, °С. Параметри нагріву під гартування СВЧ в першу чергу залежать від кількості графітних включень. У кожному конкретному випадку остаточний вибір параметрів гартування та вихідного чавуну повинні ґрунтуватися на результатах експериментальних досліджень.

Кожній прийнятій швидкості нагріву відповідає своя температура, при досягненні якої структура загартованого шару чавуну буде повністю мартенситною. Необхідна температура, в свою чергу, залежить від кількості глобулів графіту, тобто від середньої відстані між ними.

Зокрема, при температурі нагріву 930 °С така структура поверхневого шару забезпечується тільки при кількості включень графіту не менше 70-80 на 1 мм<sup>2</sup> і швидкості нагріву, що не перевищує 50 °С/с. Збільшення температури дозволяє підвищувати швидкість нагріву і використовувати чавуни з меншою кількістю графітних включень. При одній і тій же кількості включень твердість на поверхні загартованого шару повністю мартенситної структури буде тим більше, чим менше глибина проникнення струму. У свою чергу на глибину загартованого шару впливають кількість включень графіту, температура і швидкість нагріву.

Режим високочастотного гартування призводить до утворення в поверхневому загартованому шарі дрібнодисперсного мартенситу з високою твердістю і міцністю при збереженні властивостей серцевини. З метою зняття внутрішніх напружень після гартування СВЧ всі деталі з високоміцного чавуну піддають обов'язковому низькому відпуску (160-200 °С). В результаті в поверхневому шарі утворюються стискаючі залишкові напруження, що сприятливо впливає на експлуатаційні властивості чавунних деталей.

Режим поверхневого гартування вибирали за номограмою (рис. 3.2) [14].

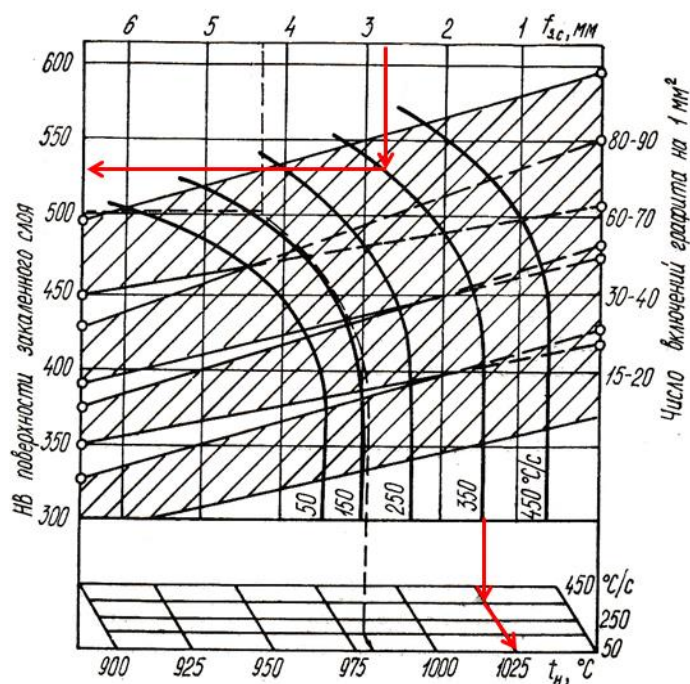


Рисунок 3.2 – Номограма для вибору параметрів нагріву високоміцного чавуну при індукційному гартуванні

Для отримання глибини зміцненого шару 2,8 мм твердістю близько 520-530 HBW, кількості глобулів графіту – 80-90 шт на 1 мм<sup>2</sup> згідно з номограмою режим індукційного гартування: кінцева температура нагрівання 1025 °С, швидкість нагріву – 350 °С/с. Частота струму – 440 кГц, час нагріву – 5 с.

На нормалізованих чавунах після гартування отримали необхідну глибину загартованого шару (рис. 3.2), оскільки наявність перліту забезпечила в умовах прискореного нагріву утворення аустеніту, що містить достатню кількість вуглецю.

Після гартування проводили низький відпуск при температурі 160 °С на проязі 1 години для зняття внутрішніх напружень.

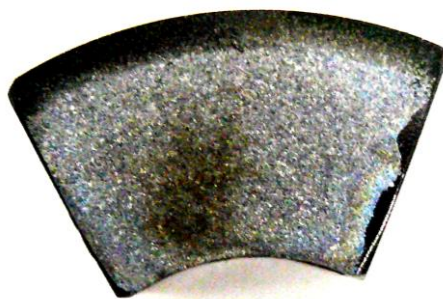
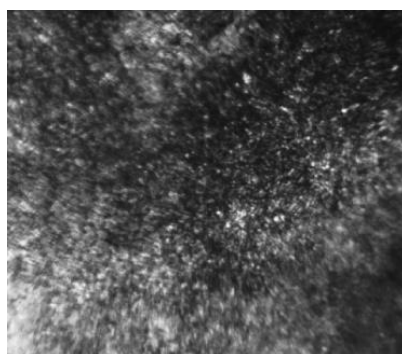


Рисунок 3.2 – Макроструктура зразка з ВЧКГ після нормалізації та індукційного гартування

Мікроструктура поверхневого шару – дрібнодисперсний мартенсит відпуску, твердість поверхневого шару чавуну після нормалізації з надкритичних температур – 50 HRC (520-530 HBW), з міжкритичних – 49 HRC (510-515 HBW) (рис. 3.3).



збільшення  $\times 350$

Рисунок 3.3 – Мікроструктура поверхневого шару високоміцного чавуну після індукційного гартування

Результати вимірювання мікротвердості (середні значення) зразка після нормалізації з МКІ та індукційного гартування за глибиною наведені на рис. 3.4.

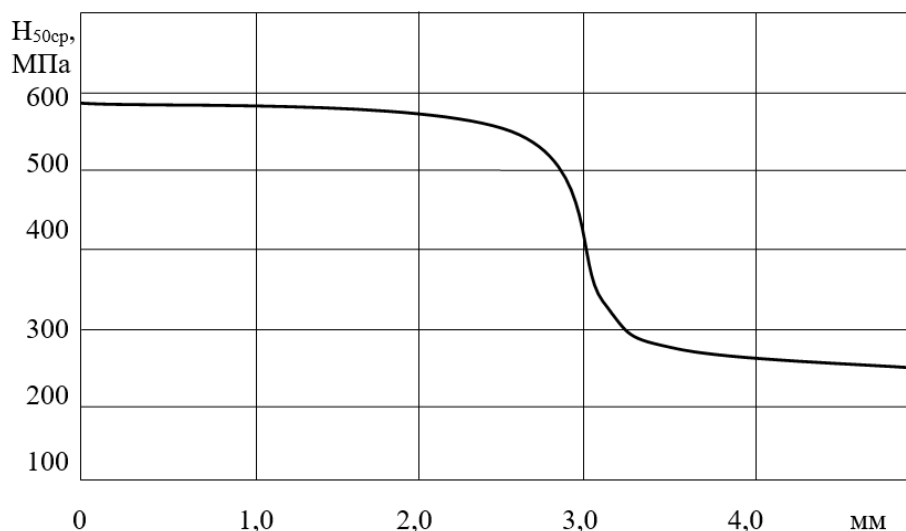


Рисунок 3.4 – Розподіл середньої мікротвердості за глибиною після нормалізації з МКІ та індукційного гартування

Мікротвердість вимірювали через 0,2 мм на глибину 5 мм. Середні значення розраховували за результатами трьох вимірювань. Спостерігається збільшення мікротвердості поверхневого шару більше, ніж в 2,3 рази відносно мікротвердості серцевини.

Опорні поверхні валу мають низьку шорсткість поверхні, працюють в умовах інтенсивного зносу. Для підвищення якості цих поверхонь було запропоноване алмазне вигладжування.

Алмазне вигладжування здійснюється ковзаючим по поверхні деталі інструментом з робочою частиною у вигляді випуклої криволінійної поверхні. В результаті змінання мікронерівностей різко знижується шорсткість поверхні і зміцнюється поверхневий шар металу. У порівнянні з іншими видами пластичного деформування алмазне вигладжування має істотні переваги, зумовлені фізико-механічними властивостями алмаза. Його відрізняє висока продуктивність і стійкість інструменту-вигладжувача [36].

Внаслідок типової для всіх чавунів неоднорідності структури, наявності вільного графіту алмазне вигладжування чавуну має ряд особливостей. Так, контак-



тування індентора з оброблюваною поверхнею супроводжується змінними режимами ковзання при деформації різних за твердістю ділянок графіту і металу основи, хоча в цілому характери залежностей таких показників якості поверхневого шару як шорсткість і мікротвердість, від основних технологічних параметрів аналогічні як для вигладжування чавунів, так і для обробки середньовуглецевих сталей.

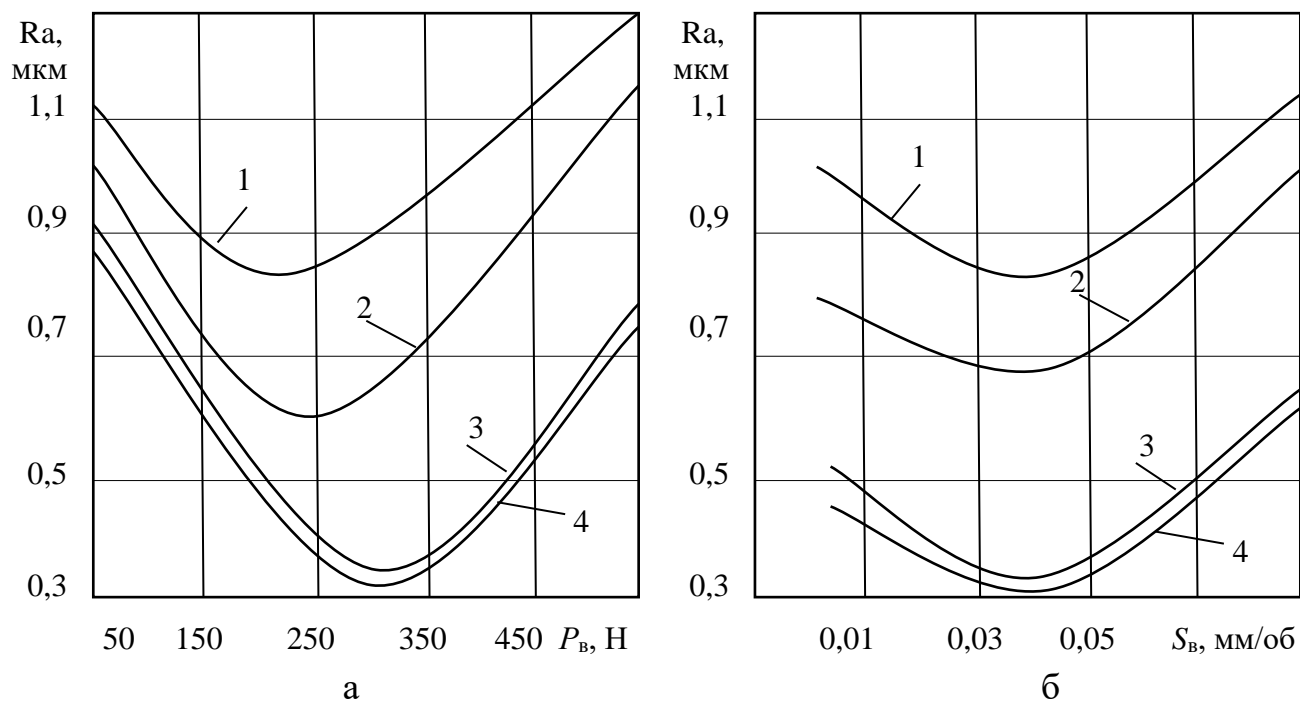
Алмазне вигладжування – це кінцева обробка виробу к ВЧКГ. Спочатку чавунні деталі в литому стані обробляли точінням гексанітом-Р для отримання шорсткості поверхні 0,8-0,9 мкм. Потім піддавали термічній обробці: нормалізації з МКІ (1), нормалізації з НКІ (2), нормалізації з МКІ та індукційному гартуванню (3), нормалізації з НКІ та індукційному гартуванню (4). Потім деталі піддавали чистовому точінню різцем із вставкою з надтвердого інструментального матеріалу на основі нітриду бору марки К10Д за режимом:  $S=0,07$  мм/об,  $t=0,1$  мм,  $V=6,0$  м/с. Після точіння проводили дослідження впливу основних параметрів вигладжування – зусилля вигладжування та подачі індентора – на шорсткість обробленої поверхні (рис. 3.5). Інтервали варіювання змінних факторів були обрані на основі літературних даних і аналізу технологічного процесу обробки.

Зусилля вигладжування  $P_v$  має найбільш істотний вплив на ступінь шорсткості поверхності; найменша висота досягається при зусиллях 250-300 Н в разі обробки високоміцного чавуну з мартенситною структурою вихідної металевої матриці (рис. 3.5, а). Якщо вигладжування виконується із зусиллям меншим 150 Н, то інструмент контактує з оброблюваною поверхнею по вершинах нерівностей, опорна площа яких мала, а також має місце неповне згладжування нерівностей. При  $P_v > 300$  Н, очевидно, збільшуються пластичні спотворення, виникає надзміцнення, з'являються мікротріщини поверхневого шару, що призводить до зростання висоти нерівностей і зниження стійкості інструменту.

Найменша шорсткість в процесі алмазного вигладжування досягається при подачах 0,03-0,05 мм/об для всіх досліджуваних чавунів (рис. 3.5, б).

При подачах  $S_b < 0,03$  мм/об спостерігається пластичне спотворення мікропрофілю і перенаклеп поверхневого шару внаслідок великої кратності прикладання

навантаження, що призводить до зростання шорсткості. У разі  $S_B > 0,05$  мм/об зменшується ступінь пластичної деформації, зважаючи на малу кратність прикладання навантаження, і збільшується шорсткість. Отримані результати добре узгоджуються з даними робіт [29, 36].



а –  $V_B=100$  м/хв,  $S_B=0,04$  мм/об,  $i = 1$ ; б –  $V_B=100$  м/хв;  $P_B=250$  Н,  $i = 1$

Рисунок 3.5 – Вплив зусилля вигладжування (а) і подачі (б) на шорсткість обробленої поверхні високоміцного чавуну, який піддавали термічній обробці за різними режимами

Найнижчу шорсткість (0,3 мкм) отримали для чавуну, який піддавали нормалізації з НКІ з індукційним гартуванням, що мав найбільшу твердість поверхневого шару. Для чавуну після нормалізації з МКІ та індукційного гартування отримали шорсткість 0,32 мкм. Отримана шорсткість відповідає вимогам креслення на вал. Низькі значення шорсткості, зміна форми профілю нерівностей і структури в поверхневому шарі, збільшення твердості забезпечать підвищення зносостійкості і довговічності виробу.

За допомогою вимірювача шорсткості записували профілограми поверхні чавунної деталі, яку після нормалізації з МКІ та індукційного гартування піддавали точінню (рис. 3.6, а) і точінню з алмазним вигладжуванням (рис. 3.6, б).

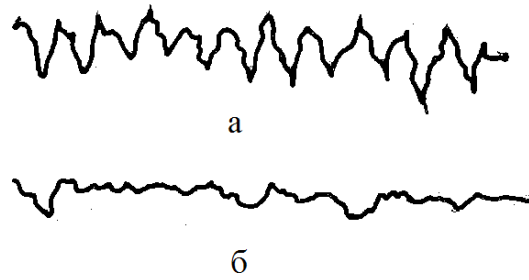


Рисунок 3.6 – Профілограма поверхні деталі з високоміцного чавуну

Аналіз профілю обробленої двома методами поверхні дозволив зробити висновок, що вигладжування зкруглює нерівності, тим самим збільшуючи площу опорної поверхні. Відповідальні деталі машин, які працюють в умовах тертя і зношування, при значних контактних навантаженнях повинні мати велику площу опорної поверхні. Це пов'язано з тим, що контакт деталей машин відбувається за реальними, шорсткими поверхнями. Якщо поверхні мають гострі високі нерівності (малу фактичну площу контакту), то в процесі тертя відбувається їх активне руйнування, інтенсивно зростає знос на ділянці припрацювання. При збільшенні площі контакту інтенсивність зносу на ділянці припрацювання зменшується. З огляду на профілограму поверхні після алмазного вигладжування та опираючись на відомості з літературних джерел можна припустити, що ця деталь буде в процесі експлуатації зношуватися менш інтенсивно, ніж та, яку обробляли тільки точінням після гартування СВЧ.

У роботі досліджувався вплив поверхневого зміцнення (алмазне вигладжували виконували на оптимальних режимах) і відповідно мікроструктури чавуну на його зносостійкість (табл. 3.2). Для зразків після поверхневого зміцнення наведена твердість зміцненого шару.

Найвищу зносостійкість має чавун, який піддавали нормалізації з надкритичного інтервалу температур та індукційному гартуванню, низькому відпуску і алмазному вигладжуванню. По-перше, цей чавун до гартування мав найвищу твердість. По-друге, індукційне гартування створює дрібнозеренну структуру, для

якої характерними є напруження стиску. Додаткове зміцнення та нерівності із сприятливою формою забезпечується алмазним вигладжуванням.

Трохи інтенсивніше зношується чавун після нормалізації з міжкритичного інтервалу температур та індукційного гартування і алмазного вигладжування. Значно інтенсивніше зношуються чавуни після нормалізації і в литому стані. Таким чином зносостійкість чавуну для заданих умов зростає із збільшенням твердості поверхневого шару деталі. Зносостійкість сталі 45 після індукційного гартування суттєво нижче, ніж чавуну після нормалізації за різними режимами та індукційного гартування і алмазного вигладжування не дивлячись на її більш високу твердість. Це пояснюється наявністю у чавуну власного змащення – графітних включень.

Таблиця 3.2 – Результати випробувань на зносостійкість чавуну в литому стані та після термічної обробки і поверхневого зміцнення

Стан чавуну і вид термічної обробки	Твердість, HRC	Твердість, HBW	Сумарний знос в міліграмах за 140 год випробувань
1. Литий стан		210-220	0,0972
2. Нормалізація з надкритичного інтервалу температур	32-33	310-320	0,00803
3. Нормалізація з міжкритичного інтервалу температур, індукційне гартування і алмазне вигладжування	49	510-515	0,00782
4. Нормалізація з надкритичного інтервалу температур, індукційне гартування і алмазне вигладжування	50	520-530	0,00757
5. Сталь 45 після індукційного гартування	60-62	682-724	0,0181

Таким чином на основі проведених досліджень можна рекомендувати в якості оптимального режиму термічної обробки ВЧКГ, який забезпечує поєднання

достатньої твердості та зносостійкості поверхневого шару і в'язкості серцевини, наступний: нормалізація з міжкритичного інтервалу, поверхневе гартування та низький відпуск, алмазне вигладжування. Механічні властивості серцевини, які отримують за цим режимом: 275-285 HBW, КС=50 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 3.7).

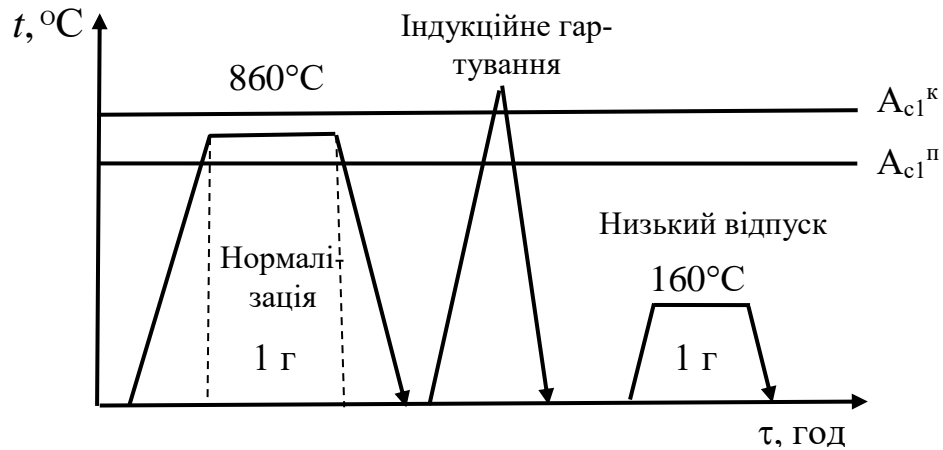


Рисунок 3.7 – Технологія об'ємної та поверхневої термічної обробки валу

Запропонована технологія об'ємної термічної обробки та поверхневого зміцнення індукційним гартуванням і алмазним вигладжуванням дозволяє не тільки підвищити довговічність валу привода, що підтверджується високим рівнем зносостійкості, а й у поєднанні з підвищеною ударною в'язкістю забезпечити необхідний рівень надійності деталі і виробу в цілому.

## ВИСНОВКИ

1) Для забезпечення опору знакозмінним ударним навантаженням згину і кручення вал повинен мати достатню ударну в'язкість, а для забезпечення опору тертю та зношуванню опорні поверхні повинні мати високу твердість і зносостійкість.

2) Високоміцний чавун з кулястим графітом відрізняється високою технологічністю (хорошими ливарними властивостями), економічністю, високим комплексом властивостей після різних режимів термічної обробки, добре працює в умовах тертя, тому його раціональновикористовувати для виготовлення валу складної форми.

3) Отримання необхідного комплексу механічних властивостей за перерізом, які забезпечують здатність валу працювати в умовах знакозмінних ударних навантажень, рекомендовано проведенням нормалізації з міжкритичного інтервалу, яка створює досить тонку хімічну (за кремнієм) та структурну неоднорідність (утворюється сорбітоподібний перліт).

4) Для підвищення твердості і зносостійкості поверхонь, що зношуються, запропоновано проводити індукційне гартування, яке дозволяє отримувати високий рівень твердості, залишкові стискуючі напруження і відрізняється високою продуктивністю та екологічністю.

5) Для отримання необхідної якості поверхневого шару опорних поверхонь запропоновано після індукційного гартування проводити алмазне вигладжування, яке забезпечує низькі значення шорсткості та зкруглення нерівностей, що сприяє підвищенню зносостійкості і довговічності виробу в цілому.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров Н. Н. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом – перспективный конструкционный материал XXI века. *Арматуростроение*. №2(53). 2008. С. 72-74.
2. Сиротенко И. В., Гогричани Г. В. Проблемы повреждаемости силовых и теплонапряженных узлов тепловозных дизелей. Аналитический обзор. *Вестник ВНИИЖТ*. Т. 76. № 2. С. 101– 109.
3. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М. : Машиностроение, 1976. 271с.
4. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Пономаренко І. В., Бондаренко С. І. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості / за ред. проф. С. С. Дяченко. Х. : ХНАДУ, 2016. 348 с.
5. Бубликов В. Б. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом – уникальный конструкционный материал современного машиностроения. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2014. №2(36). С. 44-47.
6. Новиков А. А., Дробышевский П. С., Тюрин С. А., Чумак Д. С. Механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна марки ВЧТГ. *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2018. № 1. С. 61-69.
7. Путятин Л. И., Тимофеева Л. А. Особенности применения отливок из высокопрочного чугуна. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. №145. С. 150-153.
8. ДСТУ 3925-99 «Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки».
9. Полухин М. С. Разработка и использование чугунов с шаровидным графитом с повышенными механическими и триботехническими свойствами : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Брянск, 2009. – 148 с.
10. Чугун: Справочное издание / Под. ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. М. : Металлургия, 1991. 576 с.
11. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л. : Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1989. 255 с.

12. Неижко И. Г. Термическая обработка чугуна / И. Г. Неижко. – К.: Наукова думка, 1992. – 208 с.

13. Покровский А. И., Дудецкая Л. Р. Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колёс. *Литьё и металлургия*. 2015. №2(79). С. 126-134.

14. Солнцев Л. А., Зайденберг А. М., Малый А. Ф. Получение чугунов повышенной прочности. Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. 152с.

15. Kornienko E. N., Panov A. G., Hal'fin D. F. Prespektivy proizvodstva otlivok iz ChShG austenito-beinitnogo klassa [Prospects for producing castings from cast iron with globular graphite of the austenite-bainite class]. *Liteischik Rossiii – Russian Foundryman*, 2004, no. 6, pp. 11 – 16.

16. Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М. Технология производства деталей из бейнитного чугуна с шаровидным графитом для почвообрабатывающей сельхоз техники. *Обработка материалов давлением*. 2017. №1(44). С. 210-216.

17. Куриан Й., Бидлень Ю. Микроструктура азотированного легированного чугуна с шаровидным графитом. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1987. №5. С. 56-57.

18. Самогутин С. С., Малинок Л. С., Самогутина Ю. С. Влияние способа упрочнения на твердость и трещиностойкость высокопрочного чугуна. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2002. Вип. №12. С. 45-48.

19. Сравнительные исследования микроструктуры высокопрочного чугуна после лазерной и плазменной обработки / В. И. Гуринович, В. С. Голубев, А. И. Покровский, И. А. Романчук, Н. Ф. Соловей. *Литьё и металлургия*. 2012. №2(65). С. 134-138.

20. Самогутин С. С., Ляшенко Б. А., Самогутина Ю. С. Анализ напряженного состояния поверхностного упрочненного слоя при плазменной обработке чугуна с шаровидным графитом. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2008. Вип. №18. С. 77-81.



21. Посвятенко Э. К., Литвин С. Н., Гончаров В. Г. Повышение ресурса работы цилиндропоршневой группы газовых двигателей. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2014. №1. С. 48-51.
22. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. Киев: Наук. Думка, 1988. 240 с.
23. Аскинази В. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
24. Путятин Л. И., Лалазарова Н. А. Упрочнение высокопрочного чугуна в процессе комплексной механической обработки. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов*. Харьков: Национальн. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», 2008. Вып. №5 (56). С.121-125.
25. Головин Г. Ф., Замятин В. В. Высокочастотная термическая обработка: *Вопросы металловедения и технологии*. Л. : Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1990. 239 с.
26. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М. : Машиностроение, 1972. 288 с.
27. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л. : Энергия, 1984. 264 с.
28. Щукин В. Г., Марусин В. В. Упрочнение фрикционного клина вагонной тележки. *Обработка металлов*. 2015. №2(67). С. 17-23.
29. Яковлев Ф. И. О превращениях при индукционном нагреве перлитного и ферритного чугуна с шаровидным графитом. *МиТОМ*. 1987. №6. С. 2-5.
30. Полевой С. Н., Евдокимов В. Д. Упрочнение металлов: справочник. М. : Машиностроение, 1986. 320 с.
31. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
32. Торбило В. М. Алмазное выглаживание. М. : Машиностроение, 1972. 105 с.

33. Матеріалознавство : підручник / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков. Х. : Вид-во ХНАДУ, 2007. 440 с.

34. Мощенок В. И., Лалазарова Н. О., Тимченко О. Н. Измерение микротвёрдости с наноточностью. *Вестник ХНАДУ*. 2008. Вып. 42. С. 83-85.

35. Влияние термической обработки на структуру и свойства экономнолегированного высокопрочного чугуна / А. Н. Крутилин, Н. И. Бестужев, В. А. Стефанович, М. И. Курбатов. *Литьё и металлургия*. 2008. №1(45). С. 102-108.

36. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.