

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Оптимізація технології виробництва пружин електровозів за рахунок впровадження у виробничий процес неруйнівного контролю структурного стану металу з використанням магнітного структурного аналізу»: 75 с., 8 табл., 32 рис., 14 джерел.

ПРУЖИННІ СТАЛІ, ГАРТУВАННЯ, ВІДПУСК, МАРТЕНСИТ, ЗАЛИШКОВИЙ АУСТЕНИТ, ТРООСТИТ, ТВЕРДІСТЬ, КОЕРЦИТИВНА СИЛА, АПРОКСИМАЦІЯ.

Об'єкт дослідження – структурні перетворення в загартованій пружинній сталі 60C2XA під час її відпуску.

Мета магістерської роботи – оптимізація технології виробництва пружин за рахунок впровадження у виробничий процес методики оцінювання структурного стану металу по його магнітних характеристиках.

Методи дослідження – методи математичної статистики: апроксимація та регресійний аналіз; методи вимірювання твердості; оптична мікроскопія; випробування на залишкову деформацію; вимірювання коерцитивної сили.

У першому розділі проаналізовано вплив структури пружин на їхні механічні властивості. Обрано матеріали для досліджень. Обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

У другому розділі наведено методику досліджень.

У третьому розділі досліджено вплив температури відпуску на структурні перетворення в загартованій пружинній сталі 60C2XA, а також на її механічні властивості.

У четвертому розділі встановлено взаємозв'язок між твердістю по Роквелу та коерцитивною силою сталі 60C2XA, відпущеною при температурах від 100 до 600°C після гартування у маслі.

У п'ятому розділі досліджено основні дефекти структури пружин із сталі 60C2XA.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП.....	5
1 Аналіз впливу структури пружин на їхні властивості	6
1.1 Класифікація та умови робіт пружин.....	6
1.2 Пружинні сталі.....	8
1.3 Методи виробництва циліндричних пружин.....	15
2 Матеріали, задачі і методи дослідження.....	22
3 Дослідження властивостей і структури пружин електровоза зі сталі 60С2ХА.....	29
3.1 Випробування пружин на залишкову деформацію.....	29
3.2 Дослідження якості термічної обробки пружин.....	34
4 Дослідження впливу температури відпуску на структурні перетворення методом магнітного аналізу.....	41
4.1 Магнітний аналіз для контролю властивостей і структури.....	41
4.2 Визначення коерцитивної сили та твердості сталі залежно від температури відпуску.....	43
4.3 Знаходження функціональної залежності коерцитивної сили від твердості.....	49
4.4 Структурні перетворення при відпуску.....	61
5 Дослідження причин руйнування пружин.....	65
Висновки.....	74
Перелік джерел посилання.....	75

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

H – мікротвердість, МПа.

HB – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

δ – відносне подовження, %.

σ_m – межа текучості, МПа.

σ_δ – межа міцності, МПа.

$\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості, МПа.

σ_{-1} – границя втоми, МПа.

ψ – відносне звуження, %.

μ – коефіцієнт Пуасона.

H_c – коерцитивна сила.

f – деформація пружини при стисненні на гідравлічному пресі.

ВСТУП

Контроль якості являє собою найбільш масову технологічну операцію у будь-якому виробничому циклі. У зв'язку з тим, що вимоги до надійності нової техніки постійно підвищуються, у сучасному машинобудуванні спостерігається неухильне зростання трудомісткості контрольних операцій. За таких умов процеси неруйнівного контролю стають однією з найважливіших складових гнучких автоматизованих виробництв.

Останнім часом спостерігається тенденція до більш широкого впровадження методів неруйнівного контролю структури термооброблених виробів, виготовлених з конструкційних сталей. До таких методів, власне, належить і магнітний структурний аналіз. Магнітний структурний аналіз базується на існуванні кореляції між магнітними та механічними характеристиками конструкційних матеріалів. Така кореляція може виникати за умови, коли фазові та структурні перетворення, що протікають у конструкційному матеріалі, водночас змінюють його магнітні властивості. Основною магнітною характеристикою, що вимірюється при магнітному структурному аналізі, є коерцитивна сила.

Станом на сьогодні слід констатувати відсутність будь-якої єдиної теорії магнітного структурного аналізу, внаслідок чого виникає необхідність пошуку кореляції між магнітними та механічними властивостями конструкційних матеріалів для кожного окремого матеріалу, а іноді і для кожної окремої деталі. Навіть якщо про наявність кореляції між магнітними та механічними властивостями відомо з літературних джерел, цю кореляцію необхідно перевіряти у конкретних виробничих умовах, враховуючи матеріал та технологію виробництва тієї чи іншої деталі.

1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ПРУЖИН НА ЇХНІ ВЛАСТИВОСТІ

1.1 Класифікація та умови роботи пружин

Особливості роботи пружин полягають в тому, що при значних змінних та статичних навантаженнях в них не припустима залишкова деформація. Тому вироби повинні володіти високими показниками опору пластичним деформаціям (оцінюється границею пружності) та границі витривалості при достатніх пластичності та опору крихкому руйнуванню, мати підвищену релаксаційну стійкість (оцінюється опором релаксації напружень, що полягає в зниженні робочих напружень в виробі при заданій пружній деформації).

При знакозмінних навантаженнях групи дислокацій в площинах ковзання рухаються то в одному, то в іншому напрямку, при цьому підвищується ймовірність накопичення значної кількості дислокацій на обмеженій ділянці. Якщо число дислокацій, що зібралися біля перешкоди, досить велике, в матеріалі може виникнути тріщина. Накопичення дислокацій представляє собою локальне зміцнення матеріалу, утворення тріщини знімає це зміцнення; при наступних циклах в тій же площині ковзання зрушення відбувається безперешкодно, нові дислокації як би стікають в тріщину, яка за рахунок цього зростає [1].

Мікроскопічні дослідження показують, що втомна тріщина, як правило, проходить крізь тіло кристалічного зерна; по межах зерен вона може пройти тільки випадково, на деякій частині свого шляху. Металографічні та рентгенографічні дослідження показують, що циклічні навантаження не викликають у металі будь-яких структурних змін, але в окремих кристалічних зернах спостерігається невелика пластична деформація, яка не відрізняється принципово від пластичної деформації при статичному навантаженні. Незначні пластичні деформації в окремих, найбільш несприятливо розташованих зернах існують і при статичних навантаженнях тоді, коли напруження значно нижче границі текучості або границі пружності. Дійсно, границя пружності завжди визначається умовно і знаходження істинної границі, при якій з'являються перші пластичні деформації, практично неможливо [1-3].

Втомне руйнування спостерігається майже завжди при неоднорідному напруженому стані, при вигині або при розтягуванні виробу, що має концентратор напруги. У тому місці, де напруга є найбільшою, зазвичай на поверхні, виникає тріщина, яка поступово поширюється вглиб. Незважаючи на наявність тріщини, виріб ще не втрачає несучої здатності і може витримати кілька тисяч і навіть мільйонів циклів. Коли тріщини досягають достатньої глибини і напруження в незруйнованій частині перетину, яка сприймає все навантаження, виявляється настільки великим, що матеріал не може їх витримати і відбувається раптовий злам [3].

Виті циліндричні пружини класифікуються залежно від навантаження, яке вони сприймають, або за конструктивними особливостями.

За видом навантаження розрізняють [1, 2]: пружини стиснення; пружини розтягування; пружини крутіння; пружини, що здатні сприймати комбіновані навантаження (рис. 1.1).

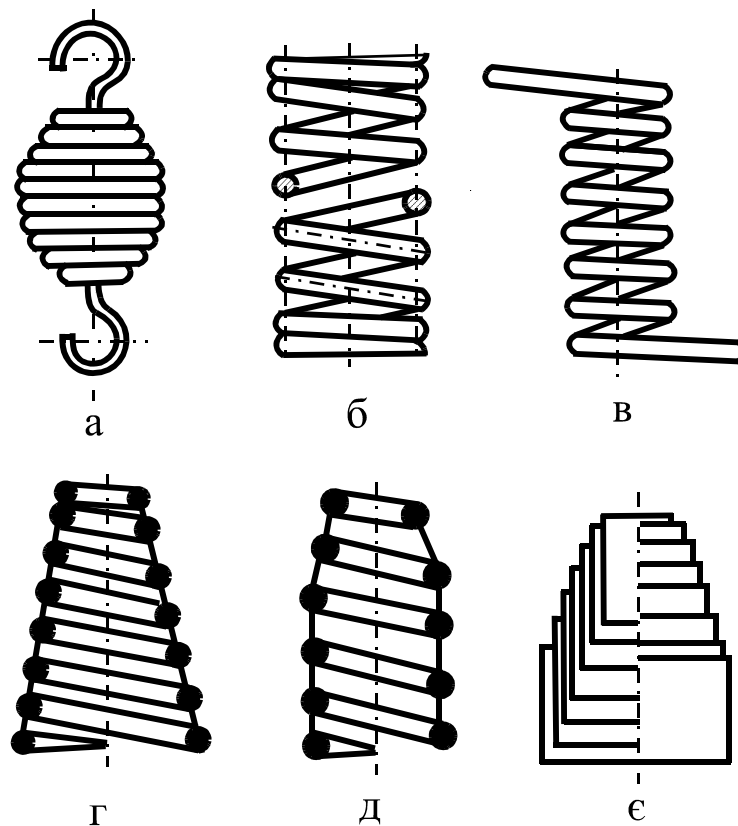


Рисунок 1.1 – Виті пружини (циліндричні розтягування – а; стиснення – б; крутіння – в; фасонні стиснення – г - є)

1.2 Пружинні сталі

Основними матеріалами для пружин є високоміцний спеціальний дрід 1, 2 та 3 класів діаметром 0,2 - 5 мм, а також сталі: вуглецеві і леговані: марганцовисті, кремністі, кремніймарганцовисті, кремнійхромисті, вольфрамокремністі, хромомарганцовисті, нікельхромисті, нікелькремністі та інші [1].

Пружинні сталі залежно від умов роботи розділяють на дві групи: сталі, які призначені для роботи у звичайних середовищах і для роботи при підвищених температурах і в умовах корозії (рис. 1.2).

Для виготовлення циліндричних гвинтових пружин різного призначення застосовують вуглецеві якісні сталі (65, 70), якісні ресорно - пружинні сталі та високоякісні сталі (У8А - У12А). Зі збільшенням вмісту вуглецю в цих сталях (від 0,65 до 1,2 %) зростають межі пружності та текучості внаслідок підвищення ступеня фазового наклепу і збільшення кількості карбідної фази, яка створює перешкоди для просування дислокацій. Зазначені високі показники міцності одержують термічною обробкою – гартуванням з відпуском або ізотермічним гартуванням.

Для пружин холодної навивки з діаметром прутка 8 мм широко застосовують вуглецевий дрід холодного протягування, який піддається спеціальній термічній обробці – патентуванню – і наступному волочінню.

Патентований вуглецевий дрід відрізняється високою міцністю, достатньо високою пластичністю і добре зміцнюється методами поверхневого пластичного деформування. Його високі механічні властивості пов'язані з фазовим перетворенням переохолодженого аустеніту при патентуванні з утворенням сорбітної структури, а також наклепом високого ступеня у результаті пластичної деформації при волочінні (деформаційний наклеп).

Для підвищення показників міцності і технологічних властивостей пружинної сталі широко застосовують легування її марганцем, кремнієм, хромом, вольфрамом, молібденом і ванадієм. Застосування легуючих елементів забезпечує зниження температури гартування та одержання значного фазового наклепу при меншому вмісті вуглецю, ніж у вуглецевій сталі, що сприяє збереженню більшої пластичності.

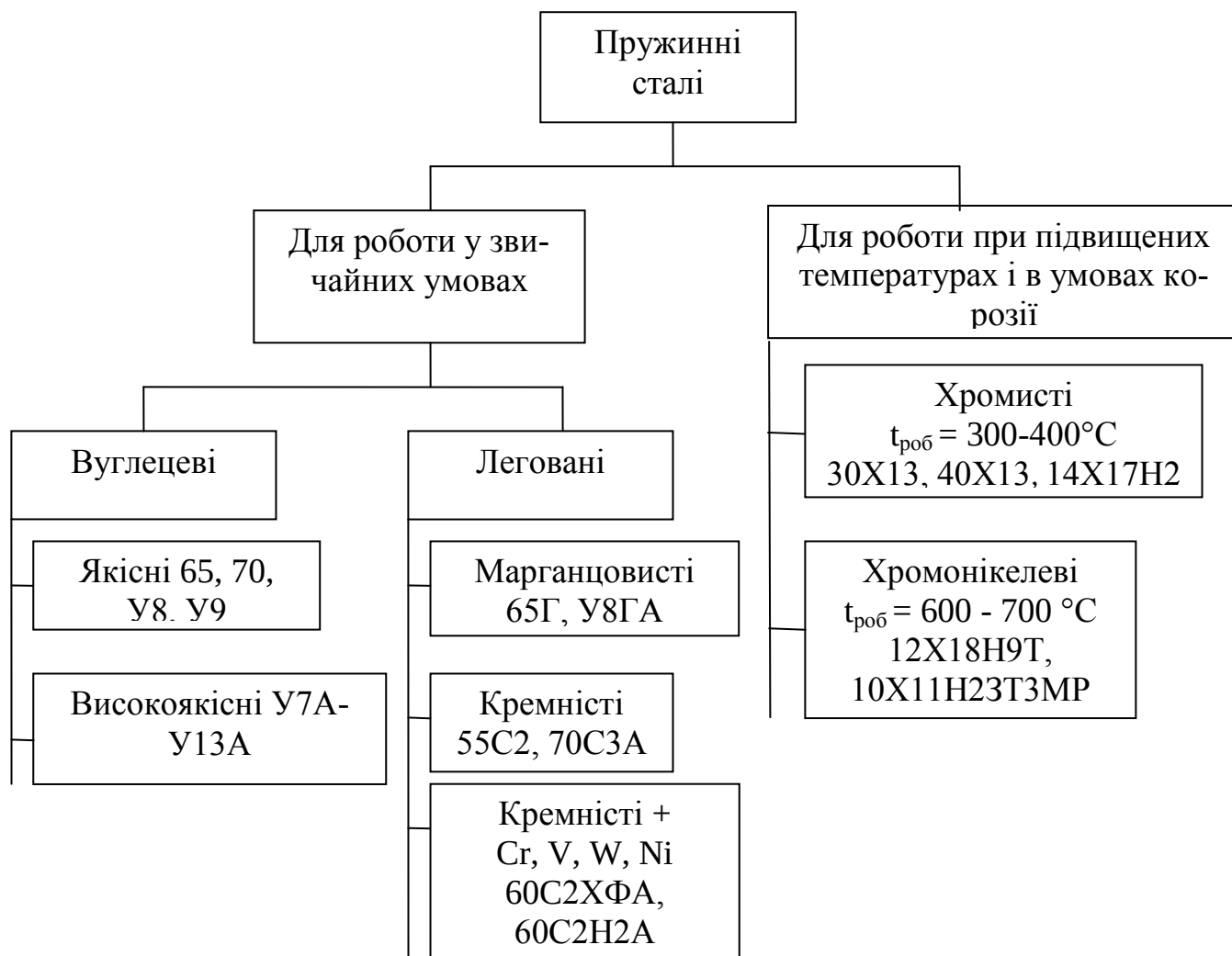


Рисунок 1.2 – Класифікація пружинних сталей [5]

Леговані сталі, особливо сталі, що містять карбідоутворюючі елементи, мають меншу схильність до релаксації напруг. Леговані пружинні сталі у порівнянні із вуглецевими сталями мають кращі технологічні властивості: кращу прожарюваність, допускають меншу швидкість охолодження при звичайному гартуванні та ізотермічному гартуванні деталей великого перетину, мають меншу чутливість до росту зерна [3].

У виробництві гвинтових циліндричних пружин використовують марганцовисті сталі типу 50Г, 65Г. Легування марганцем сприяє подрібненню тонкої структури зерна і підвищує внаслідок цього опір сталі малим пластичним деформаціям [7]. Марганцовисті сталі добре прожарюються (при діаметрі заготовки до 20 мм), не

схильні до поверхневого вигорання вуглецю і мають хорошу чистоту поверхні. До недоліків цих сталей відносяться підвищена чутливість до перегріву (росту зерна), що сильно знижує ударну в'язкість і пружні характеристики, а також схильність до відпускнуї крихкості першого роду і утворення гартівних тріщин.

Ще більш широке застосування у виробництві пружин знаходять кремністі сталі (55C2, 60C2, 60C2A, 70C3A). Кремністі сталі стійкі до втрати міцності при відпуску. При наявності кремнію стабілізується також і залишковий аустеніт. Він може бути присутнім у структурі відпущеної сталі, коли вже досягнута оптимальна для одержання максимального опору малим пластичним деформаціям дисперсність і розподіл карбідів поряд з подрібненою субструктурою матричної α - фази. Коли при відпуску відбудеться розпад залишкового аустеніту, карбіди вже будуть досить великими, а структура α - фази – частково рекристалізованою [3, 4]. Із цих причин у кремністій пружинній сталі або у конструкційній сталі з додатковим легуванням кремнієм не вдається досягти значного збільшення опору малим пластичним деформаціям сталі, хоча він і підвищує енергію активації та опору мікропластичній деформації фериту у порівнянні зі сталлю без кремнію. Систематичні дослідження впливу кремнію, які виконані І.В. Паїсовим і В.С. Томсинським, показали, що при невеликих концентраціях ($\sim 0,6$ %) кремнію підвищується межа пружності сталі з 0,4 та 0,6 % вуглецю [5]. Причому особливо помітно межа пружності зростає при концентрації вуглецю у сталі 0,4 % (рис. 1.3). Це може бути обумовлено тим, що при вмісті кремнію до 0,6 % не збільшується стійкість залишкового аустеніту при відпуску.

Однак при більш високому вмісті кремнію, притаманному для пружинної сталі, межа пружності знижується, і при максимальній концентрації 2,2 % Si вона знаходиться на рівні вуглецевої сталі. Хоча невеликі концентрації кремнію і підвищують межу пружності, цей ефект не має великого технічного значення, оскільки при введенні 0,6 % Si не поліпшуються такі важливі технологічні характеристики сталі, як схильність до гартування та прожарюваність. Окрім того, не підвищуються показники міцності – опір великим пластичним деформаціям. Ці сталі порівняно дешеві і добре піддаються термічній обробці. Термічна обробка кремністої сталі значно підвищує її механічні характеристики – межу пружності, межу текучості, межу міцнос-

ті та ударну в'язкість. Хороша прожарюваність дозволяє застосовувати для навивки прутки діаметром до 25 мм.

Межа пружності, МПа

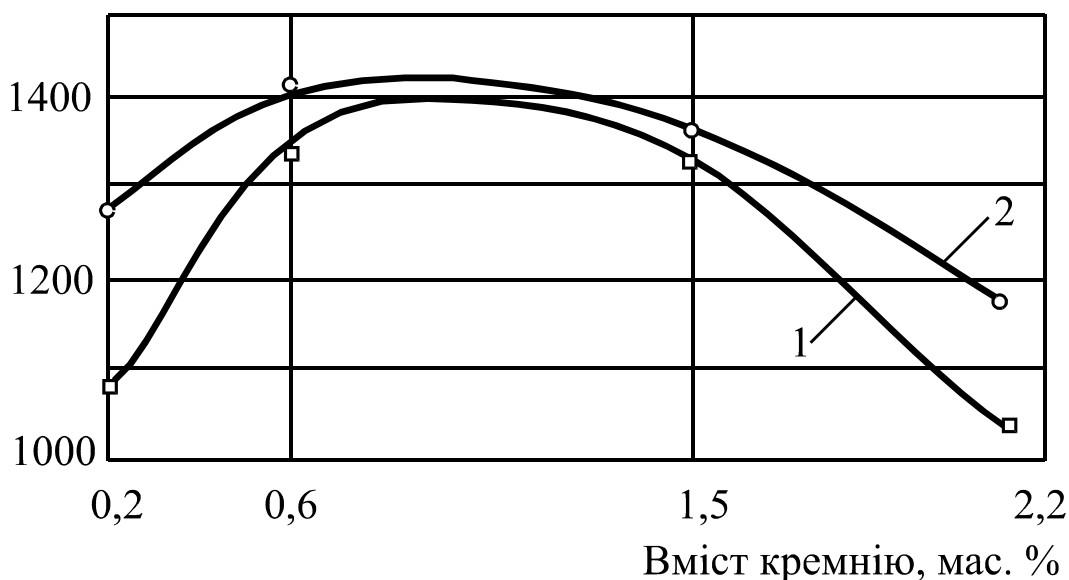


Рисунок 1.3 – Залежність межі пружності від вмісту кремнію у сталі після гартування та відпуску при 300°C протягом 1 години

(І.В. Паісов, В.С. Томсинський) [5]: 1 – 0,4 % C; 2 – 0,6 % C

Сталь 60C2XA має кращі технологічні властивості, ніж сталь 60C2A. Вона характеризується більш високою стійкістю переохолодженого аустеніту, ніж сталь 60C2A (рис. 1.4), а звідси і більш високою прожарюваністю. Так, якщо критичний діаметр сталі 60C2A при гартуванні від 880°C у воді дорівнює 31 мм, у маслі – 20 мм, то для сталі 60C2XA він відповідно дорівнює 58 і 44 мм [7].

Введення хрому також зменшує швидкість росту зерна. Його величина, починаючи від температур 900°C, приблизно на 1 бал менше, ніж у сталі 60C2A. Суттєвим є те, що легування хромом або хромом і ванадієм зменшує глибину шару, в межах якого відбувається вигорання вуглецю у кремністій сталі. За даними М.Ю. Ейфера глибина знеуглецьованого шару після нагрівання при 880 - 900°C протягом 30 хв. становить 0,24 мм для сталі 60C2A, 0,2 мм для сталі 60C2XA і 0,12 мм для сталі 60C2XФА [7].

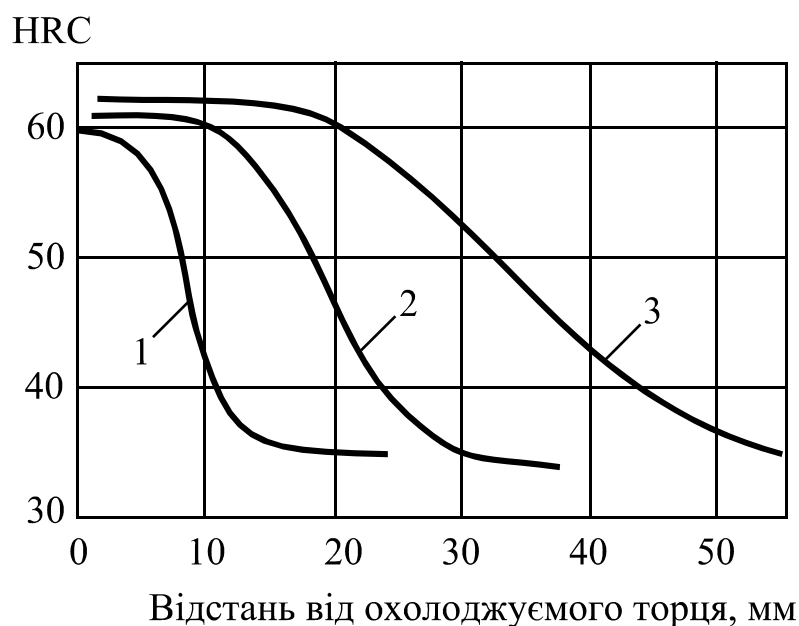


Рисунок 1.4 – Криві прожарювання кремністих сталей (М.Ю. Ейфер) [7]: температура аустенізації 880°C;

1 – сталь 60C2A; 2 – сталь 60C2XA; 3 – сталь 60C2XФА

Забезпечуючи сполучення високої міцності і підвищеної пластичності та в'язкості, легована кремнієм сталь дозволяє застосовувати пружини для роботи в умовах динамічних навантажень [7]. До недоліків кремністих сталей відносяться їхня підвищена чутливість до поверхневого вигорання вуглецю, до графітизації і перегріву. Поверхнєве вигорання вуглецю, особливо при вмісті кремнію більше 2 %, значно знижує пружність і міцність поверхневих шарів, найбільш навантажених та напружених у процесі роботи пружин [6]. У сталях може спостерігатись падіння довговічності після відпуску, що пояснюють розвитком незворотної відпускнуї крихкості. Внаслідок відпускнуї крихкості помітно знижується ударна в'язкість сталі.

Сталь із підвищеною крихкістю може характеризуватися зниженою довговічністю і навіть більш низькою межою витривалості. При цьому, вочевидь, не має істотного значення той структурний механізм, що призводить до відпускнуї крихкості. Про це свідчить той факт, що зворотна і незворотна крихкості кремністої пружинної сталі впливають на одну і ту ж саму характеристику зниження втомної міцності – обмежену довговічність. За даними М.Ю. Ейфера межа витривалості на зразках без знеуглецьованого шару у сталі 60C2XA, як і у сталі 55C2, має максимальне

значення після гартування і відпуску при 450°C (інтервал досліджених температур 350 - 550°C) (рис. 1.5) [7]. При цьому абсолютні значення межі витривалості таких зразків вищі, ніж зразків із знеуглецьованим шаром.

Кремністі сталі мають схильність до виділення графітних включень, що погіршує їхню прожарюваність і знижує характеристики міцності і пластичності [1].

Показники міцності і технологічні властивості кремністої сталі підвищуються додатковим легуванням карбідоутворюючими елементами – марганцем, хромом, вольфрамом. У кремністомарганцовистій сталі сполучуються позитивний вплив марганцю (збільшення прожарювання і зменшення схильності до втрат вуглецю у поверхневих шарах при нагріванні) і кремнію (зниження схильності до утворення тріщин при гартуванні і стійкість проти відпуску).

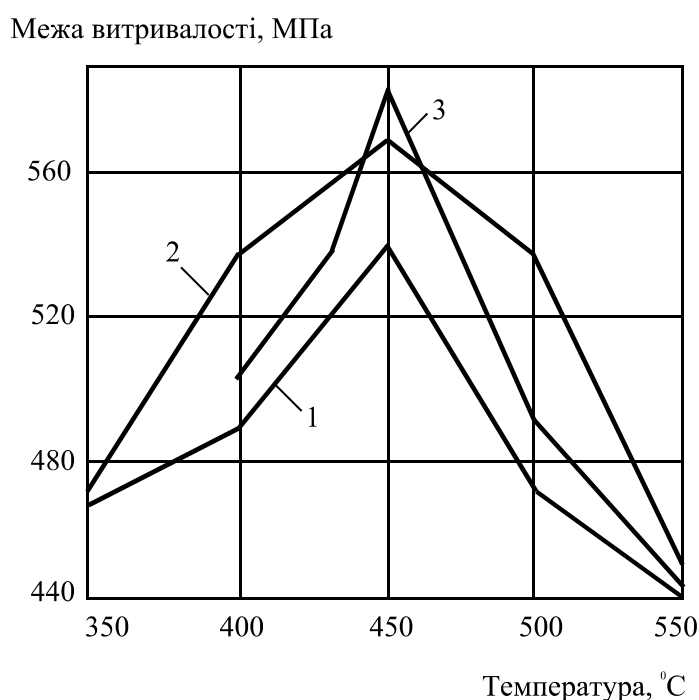


Рисунок 1.5 – Залежність межі витривалості сталей від температури відпуску (М.Ю. Ейфер) [7]: 1 – сталь 60C2A, 2 – сталь 60C2XA, 3 – сталь 60C2XФА

У виробництві пружин застосовують сталь 55ГС із 0,5 - 0,8 % Si і 0,6 - 0,9 % Mn і сталі 55C2, 60C2 та 60C2A, які містять 1,3 - 1,8 % Si і 0,8 - 1,0 % Mn [1].

Для одержання оптимальних властивостей кремністомарганцовистих пружинних сталей доцільним є різне співвідношення кількості кремнію і марганцю. Мен-

ший вміст кремнію і більший вміст марганцю рекомендований для сталі 60С2. Для сталі 55ГС потрібно збільшити вміст обох компонентів [1].

Вольфрамокремніста сталь 60С2ВА у порівнянні із кремністою сталлю 60С2А відрізняється більш високою витривалістю і стабільністю пружних властивостей, більшою стійкістю аустеніту до переохолодження і тому кращою прожарюваністю, дрібнозернистістю і стійкістю проти відпуску. Вольфрамокремніста сталь застосовується для виробництва пружин, які працюють при динамічному навантаженні і підвищеній температурі (до 250°C) [1, 2].

Хромомарганцовисті сталі (50ХГ, 50ХГА) і особливо хромомарганцовована дієві сталі (50ХГФА) відрізняються високими пружними властивостями і ще більш високими технологічними властивостями – високою прожарюваністю, стійкістю проти відпуску, малою товщиною знеуглецьованого шару. Присутність ванадію забезпечує дрібнозернистість сталі, стабільність сегрегації вуглецю і малу схильність до коагуляції часток карбідної фази. Пружини зі сталі 50ХГФА можуть працювати в умовах значних динамічних навантажень при температурі до 250°C [1, 2].

Хромованадієва сталь 50ХФА відрізняється високими пружними властивостями і релаксаційною стійкістю у сполученні з підвищеною в'язкістю та малою чутливістю до перегріву. Сталі цього типу із-за невисокої прожарюваності рекомендуються для пружин перетином до 8 мм [3].

Для пружних елементів машин значних поперечних перетинів, які вимагають відповідно до умов експлуатації високої міцності у сполученні із в'язкістю, а також для інших відповідальних деталей, що працюють при підвищених температурах (клапанні пружини), застосовують нікельхромисті і нікелькремністі сталі (40ХНМФА, 60С2Н2А). Ці сталі відрізняються дуже високою прожарюваністю [4].

1.3 Методи виробництва циліндричних пружин

Виготовлення пружин з заготовок, що мають круглий перетин, може бути виконано шляхом холодного або гарячого навивання. Першим способом зазвичай виготовляють дрібні / середні пружини (з дроту діаметром до 8 мм), а другим – великі.

Крім того, відмінність обумовлюється застосуванням різних видів термічної обробки [3 - 7].

Технологія холодного навивання пружин без термообробки. Навивання заготовок виконується з патентованого дроту. У сформованих навиванням заготовках контролюють наступні параметри:

- діаметр пружини;
- кількість витків;
- крок витків та висота пружини;
- правильність підтискання крайніх витків.

Наступний етап – механічна обробка (торцювання), в процесі якої кінцеві витки (неробочі витки) обробляються до утворення поверхні, перпендикулярній до центральної вісі пружини. Після цього проводиться термічна обробка – низькотемпературний відпуск. Низькотемпературний відпуск стабілізує пружні властивості і сприяє частковій релаксації внутрішніх напруг [4, 6]. Після термічної обробки пружини проходять контрольні операції (детальний опис контрольних операцій наведено у розділі 3 магістерської роботи).

Технологія холодного навивання пружин з термообробкою. Відмінність даної технології від описаної раніше починається тільки на етапі термічної обробки. Першим етапом термічної обробки є гартування: нагрівання до температури гартування, витримка протягом зазначеного часу і примусове (швидке) охолодження в гартівному середовищі (головним чином, в маслі). Пружини розташовуються у робочому просторі печі у горизонтальному положенні, щоб не допустити їхнього просідання під власною вагою. Завершальною операцією термічної обробки є відпуск, після якого виконуються відповідні контрольні операції

Технологія гарячого навивання пружин з термообробкою. Гаряче навивання передбачає попереднє нагрівання прокату в електричній або газовій печі (можливим є використання струмів високої частоти). Підготовлена таким чином заготовка піддається навиванню з подальшим торцюванням (обробкою торців). Після цього пружини проходять гартування, а потім – відпуск. Після закінчення термообробки проводяться контрольні операції і, в разі необхідності, додаткове обтиснення, та зане-

волювання. Завершальною стадією виробництва пружин є фарбування та сушіння [7].

Пружинна сталь може постачатись гарячекатаною або холоднотягнутою. З холоднотягнутої сталі виготовляються пружини, що навиваються у холодному стані і не проходять гартування. Пружини, що проходять гартування з подальшим відпуском, виготовляються з гарячекатаної сталі.

Макроструктуру вихідного прокату, з якого навиваються пружини, контролюється на зламах, а також на попередньо протравлених мікрошліфах (на поперечних темплетях, вирізаних з прокату). Недопустимими дефектами є пори, тріщини, розшарування металу, шлакові включення, закати, волосовини, раковини, втиснена окалина [3]. Місцеві дефекти можуть видалятися шліфуванням, якщо при цьому не зменшується до неприпустимих значень діаметр дроту, з якого навивається пружина [3].

Дріт, з якого навиваються пружини, не повинен мати хвилястості та скрученості. Якщо навивання пружин здійснюється на автоматах, правка прутка виконується правильним пристроєм, вбудованим в автомат [3]. Якщо навивання пружин виконується на верстатах загального призначення або у спеціальних пристосуваннях, правка вихідного дроту, якщо в цьому виникає необхідність, виконується на окремому рихтувальному верстаті. Заготовки для виготовлення пружин, що навиваються у холодному стані на верстатах загального призначення, нарізають гільйотинними ножицями. Поверхня різу дроту має бути рівною, без зминання країв [3].

Холодне навивання пружин виконується у два різні способи – навивання без оправки (за допомогою спеціальних пристроїв) і навивання на оправку [4].

Навивання циліндричних гвинтових пружин з дроту діаметром від 0,2 до 12 мм в умовах серійного та масового виробництва здійснюється на спеціалізованих автоматах з використанням оправок або без їхнього використання [4].

Більшість автоматів для навивання пружин мають у своєму складі правильні механізми, механізми подачі дроту у навивальний пристрій, власне навивальний пристрій, а також механізм для розрізання дроту і загинання кінців [4].

Якщо циліндричні гвинтові пружини навиваються на оправку, попередньо слід розрахувати необхідний діаметр оправки. Слід враховувати деяке збільшення діаметру пружини після навивання у холодному стані під дією пружних деформацій дроту.

Точність геометричних розмірів пружин (діаметр та крок витків) значною мірою залежить від натугу дроту і від того, в якому напрямку здійснюється навивання. Напрямок навивання пружин і необхідний натяг дроту встановлюються після того, як буде визначений діаметр оправки.

Задля того, щоб підвищити стабільність розмірів і пружних характеристик пружин при їхній експлуатації, пружини можуть піддаватись спеціальній термічній обробці, осадці (обтисненню) та заневолюванню. При цьому відбувається невелике зменшення кроку витків. Ця обставина має бути врахованою при навиванні пружини [5, 7].

При гарячому навиванні вихідну заготовку піддають нагріванню до температури 800 - 1000°C. Вибір температури нагрівання залежить, головним чином, від механічних властивостей прокату і технологічних особливостей навивання. При нагріванні має бути забезпечене рівномірне нагрівання заготовки по усьому її перетину [2].

Для нагрівання прутків, з яких навиваються пружини, найчастіше застосовують пічі загального призначення або спеціалізовані електроконтактні та індукційні установки [7]. Електроконтактне нагрівання дає низку переваг порівняно із пічним нагріванням: досягається суттєве зменшення глибини знеуглецьованого шару, значно зменшуються габарити нагрівального обладнання, а також спрощується його експлуатація та технічне обслуговування.

В умовах масового виробництва великогабаритних пружин існує можливість застосування більш потужних установок електроконтактного нагрівання металевих дроту [7]. В [6] надано опис установки електроконтактного нагрівання одночасно трьох заготовок. Нагрівання кожної заготовки відбувається на трьох позиціях. Задля того, щоб компенсувати теплове подовження заготовок при їхньому нагріванні використовуються спеціальні пневматичні компенсатори. Для контролю температури

заготовок на третій позиції використовується фотопірометр. Якщо температура заготовок досягає необхідного значення фотопірометр генерує електричний сигнал, яким здійснюється відключення напруги. Після цього заготовки розкріпляються і переміщуються пневмотранспортером на інші позиції. Нагріта заготовка поступає у навивальний верстат, а на її місце надходить нова заготовка [7].

Після навивання пружин стискання відбувається обробка торця опорних поверхонь. Метою обробки є створення з обох кінців пружини опорних площин, строго перпендикулярних до вісі пружини. Тому пружини стискання виготовляють із підтисненими крайніми витками, по одному витку з кожної сторони [7].

Для обробки торцевої опорної поверхні застосовують звичайні заточувальні та плоскошліфувальні верстати, спеціальні напівавтомати і автомати [7].

Пружини, які виготовлені з вуглецевих і легованих сортів сталі, піддають термічній обробці. Виходячи з основним вимог до пружних елементів, основним видом їх термічної обробки є гартування з наступним середнім відпуском. Гартування сталі - це процес термічної обробки, що полягає в нагріванні сталі до температури вище критичної з наступним швидким охолодженням. В результаті цієї операції підвищуються твердість і міцність сталі, а пластичність знижується. Після гартування сталь стає крихкою і твердою. Поверхневий шар виробів при нагріванні в термічних печах покривається окалиною і знеуглецьовується тим більше, чим вище температура нагрівання і час витримки в печі. Режими гартування сталі залежать від її хімічного складу та технічних вимог до виробу. Температуру гартування обирають вище критичної точки A_{C3} для доевтектоїдних сталей та вище критичної точки A_{C1} для заевтектоїдних сталей. Після гартування деталі швидко охолоджують. Таким чином, при гартуванні отримують структуру мартенситу без ділянок трооститу і з мінімальною кількістю залишкового аустеніту. Залишковий аустеніт має понижену границю пружності, а його можливе перетворення в мартенсит викликає зниження релаксаційної стійкості та підвищує схильність до сповільненого руйнування. У зв'язку з цим після гартування іноді проводять обробку холодом. Необхідна швидкість охолодження забезпечується за допомогою вибору охолоджуючого середовища. При цьому надмірно швидке охолодження призводить до появи тріщин або короблення

виробів. Для запобігання окисленню та знеуглецюванню, гартування сталі виконується в середовищі аргону. Ресорно-пружинні сталі відносяться до доевтектоїдного класу, отже температури гартування обираються на 30-50°C вище лінії A_{C3} . Наприклад, для сталі 60C2A температура критичної точки A_{C3} дорівнює 820°C, отже температура гартування буде складати 850 – 870°C. Така температура достатня для забезпечення повного розчинення всіх структурних елементів в аустеніті. Гартування при нижчих температурах приводить до появи фериту у структурі загартованої сталі. Ферит є м'якою складовою, що значно знижує твердість, міцність і сильно підвищує пластичність, тому його наявність в структурі є небажаною. Гартування при підвищених температурах також призводить до зниження твердості та міцності сталі через укрупнення зерна та утворення великої кількості залишкового аустеніту, що є вкрай небажаною структурною складовою.

Витримка при температурі гартування забезпечує повне розчинення цементиту в аустеніті. В загалом, витримка при температурі гартування не перевищує 60 хвилин. Коротка витримка не забезпечує повного розчинення цементиту, а надто тривала витримка при температурі гартування призводить до зниження твердості загартованої сталі [5-7].

При гартуванні вироби охолоджуються зі швидкістю вище за критичну для утворення структури мартенситу гарту. Потрібна швидкість охолодження забезпечується правильним вибором гартівного середовища. Для ресорно-пружинних сталей оптимальним варіантом гартівного середовища є масло. Гартування у воді призводить до сильної деформації виробів, а охолодження на повітрі не забезпечує необхідної швидкості охолодження, що унеможлиблює утворення мартенситу [4].

Остаточні властивості визначаються умовами відпуску. Режими відпуску слід обирати з урахуванням призначення і умов експлуатації пружних елементів. Для більшості пружин відпуск проводять при температурах, що забезпечують утворення структури трооститу відпуску (420 - 520°C), який має високі значення границі пружності [3].

Висока границя пружності ресорно-пружинних сталей забезпечується саме утворенням трооститу відпуску, який має дуже дрібнозернисту структуру, тому при

відпуску пружинних сталей слід дотримуватись встановлених температурних режимів. Перегрівання при відпуску призводить до значного зниження твердості та втрати пружних властивостей. Недогрів, навпаки, призводить до отримання надмірно високої твердості, і, як наслідок, підвищеної крихкості пружин через те, що в їхній структурі залишився мартенсит відпуску.

Витримка при відпуску, зазвичай, приймається в межах 2-3 годин. Ця витримка необхідна для того, щоб мартенсит гарту та залишковий аустеніт повністю перетворились на троостит відпуску. Надто коротка витримка при відпуску призводить до неповного перетворення мартенситу та залишкового аустеніту у троостит відпуску. Надто тривала витримка призводить до укрупнення цементитних включень, що призводить до суттєвого зменшення пружних властивостей. Охолодження після відпуску проводять на повітрі, що забезпечує мінімальну деформацію пружин [7].

Для попередження поверхневого окислення і знеуглецювання, нагрівання пружин, особливо пружин невеликої товщини, слід проводити в захисній атмосфері або вакуумі. Нагрівання в соляних ваннах забезпечує отримання чистої поверхні, але може викликати поверхневі ушкодження, що знижують втомну міцність, що неприпустимо для пружин відповідального призначення. При виконанні гартування і відпуску пружин передбачають заходи по зменшенню їх деформації. Подальша правка пружних елементів небажана, тому що це викликає появу залишкових напружень і призводить до погіршення фізико-механічних властивостей [2].

Заходи по зменшенню деформації розробляються відповідно до конкретних видів і типорозмірів пружин. При термообробці можна використовувати такі прийоми, як рівномірну укладку пружин в піч; пристосування, що фіксують форму і розміри пружин при нагріванні і охолодженні (рис. 1.6); відпуск на оправках. Ефективним засобом зменшення деформації є ізотермічне гартування.

Для пружин, що працюють в умовах динамічного навантаження, для яких виникнення раптових або уповільнених руйнувань особливо небезпечно, визначальне значення при виборі режиму відпуску набуває рівень пластичності і опір крихкому руйнуванню. У зв'язку з цим температура відпуску підвищується вище тієї температури, яка відповідає найбільшій границі пружності.

Більш висока границя пружності, більш висока в'язкість та втомна міцність досягаються при ізотермічному гартуванні пружинних сталей. Ізотермічне гартування дозволяє отримати структуру нижнього бейніту. Додатковий відпуск сталей при температурах, близьких до температури утворення нижнього бейніту ще більшою мірою підвищує пружні властивості сталей. Зазначений процес називається подвійним ізотермічним гартуванням. Слід зазначити, що присутність верхнього бейніту є неприпустимою, оскільки його наявність у структурі пружинної сталі погіршує увесь комплекс механічних властивостей [6].

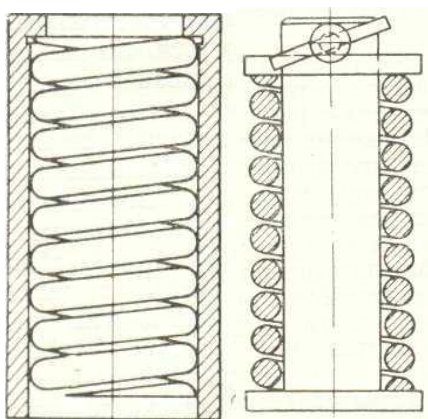


Рисунок 1.6 – Пристосування для гартування пружин стиснення

2 МАТЕРІАЛИ, ЗАДАЧІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Особливості роботи пружин полягають в тому, що при значних змінних та статичних навантаженнях в них не припустима залишкова деформація. Тому вироби повинні володіти високими показниками опору пластичним деформаціям (оцінюється границею пружності) та границі витривалості при достатніх пластичності та опору крихкому руйнуванню, мати підвищену релаксаційну стійкість (оцінюється опором релаксації напружень, що полягає в зниженні робочих напружень в виробі при заданій пружній деформації).

При знакозмінних навантаженнях групи дислокацій в площинах ковзання рухаються то в одному, то в іншому напрямку, при цьому підвищується ймовірність накопичення значної кількості дислокацій на обмеженій ділянці. Якщо число дислокацій, що зібралися біля перешкоди, досить велике, в матеріалі може виникнути тріщина. Накопичення дислокацій представляє собою локальне зміцнення матеріалу, утворення тріщини знімає це зміцнення; при наступних циклах в тій же площині ковзання зрушення відбувається безперешкодно, нові дислокації як би стікають в тріщину, яка за рахунок цього зростає [1].

Мікроскопічні дослідження показують, що втомна тріщина, як правило, проходить крізь тіло кристалічного зерна; по межах зерен вона може пройти тільки випадково, на деякій частині свого шляху. Металографічні та рентгенографічні дослідження показують, що циклічні навантаження не викликають у металі будь-яких структурних змін, але в окремих кристалічних зернах спостерігається невелика пластична деформація, яка не відрізняється принципово від пластичної деформації при статичному навантаженні. Незначні пластичні деформації в окремих, найбільш несприятливо розташованих зернах існують і при статичних навантаженнях тоді, коли напруження значно нижче границі текучості або границі пружності. Дійсно, границя пружності завжди визначається умовно і знаходження істинної границі, при якій з'являються перші пластичні деформації, практично неможливо [1-3].

У роботі вивчалися властивості пружин 8ТН 281.319, які застосовуються у люлечній підвісці переднього і заднього візку електровозів 2ЕЛ5 (рис. 2.1).

Метою дослідження є проведення випробувань пружин на залишкову деформацію, вивчення мікроструктури та встановлення причин невідповідності властивостей пружин встановленим вимогам, а також причин руйнування пружин у процесі експлуатації.

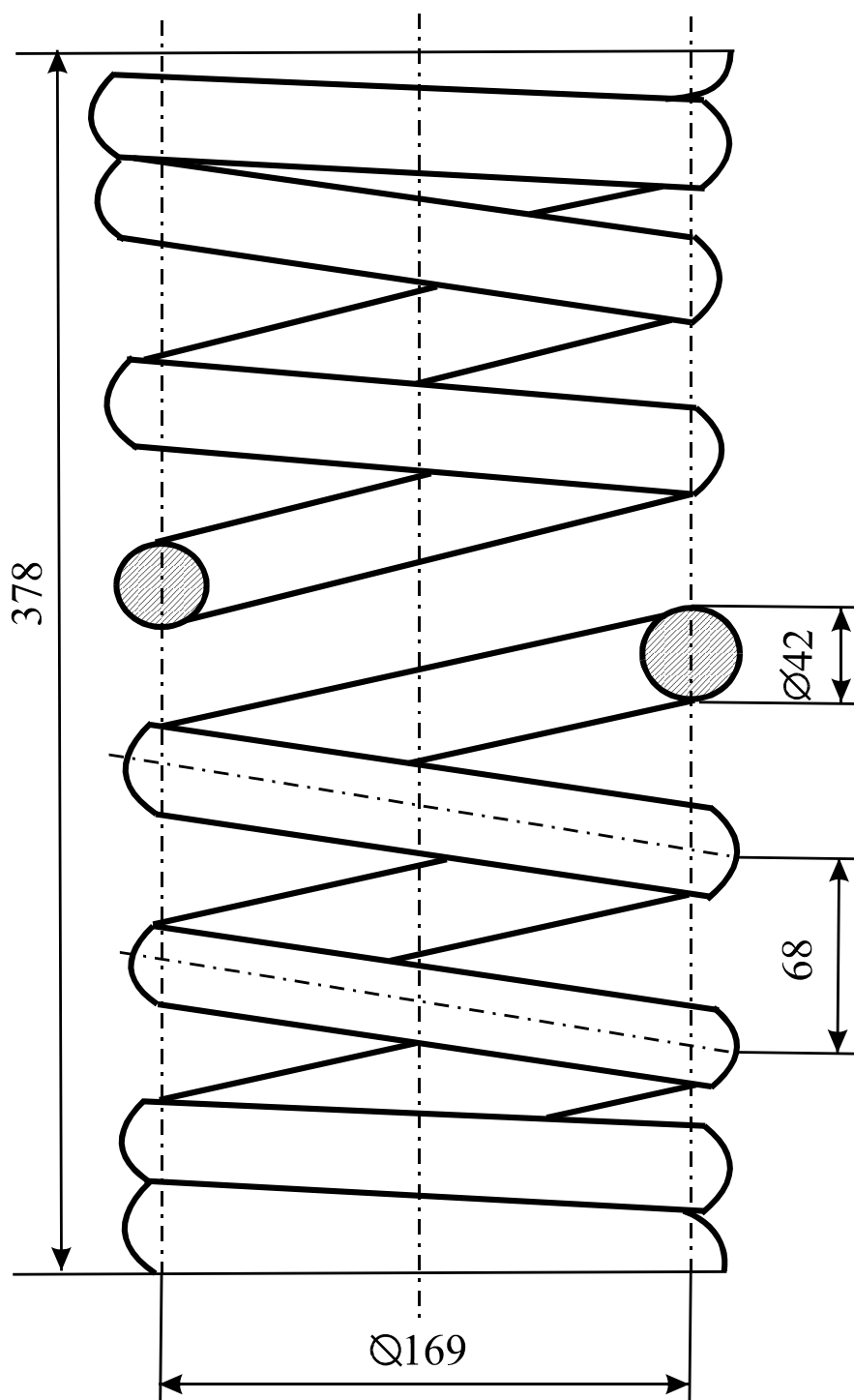


Рисунок 2.1 – Пружина 8ТН 281.319

Пружини виготовляються зі сталі 60C2XA. Хімічний склад і механічні властивості матеріалу пружин представлені у табл. 2.1, 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 60C2XA, % (ДСТУ 14959-99)

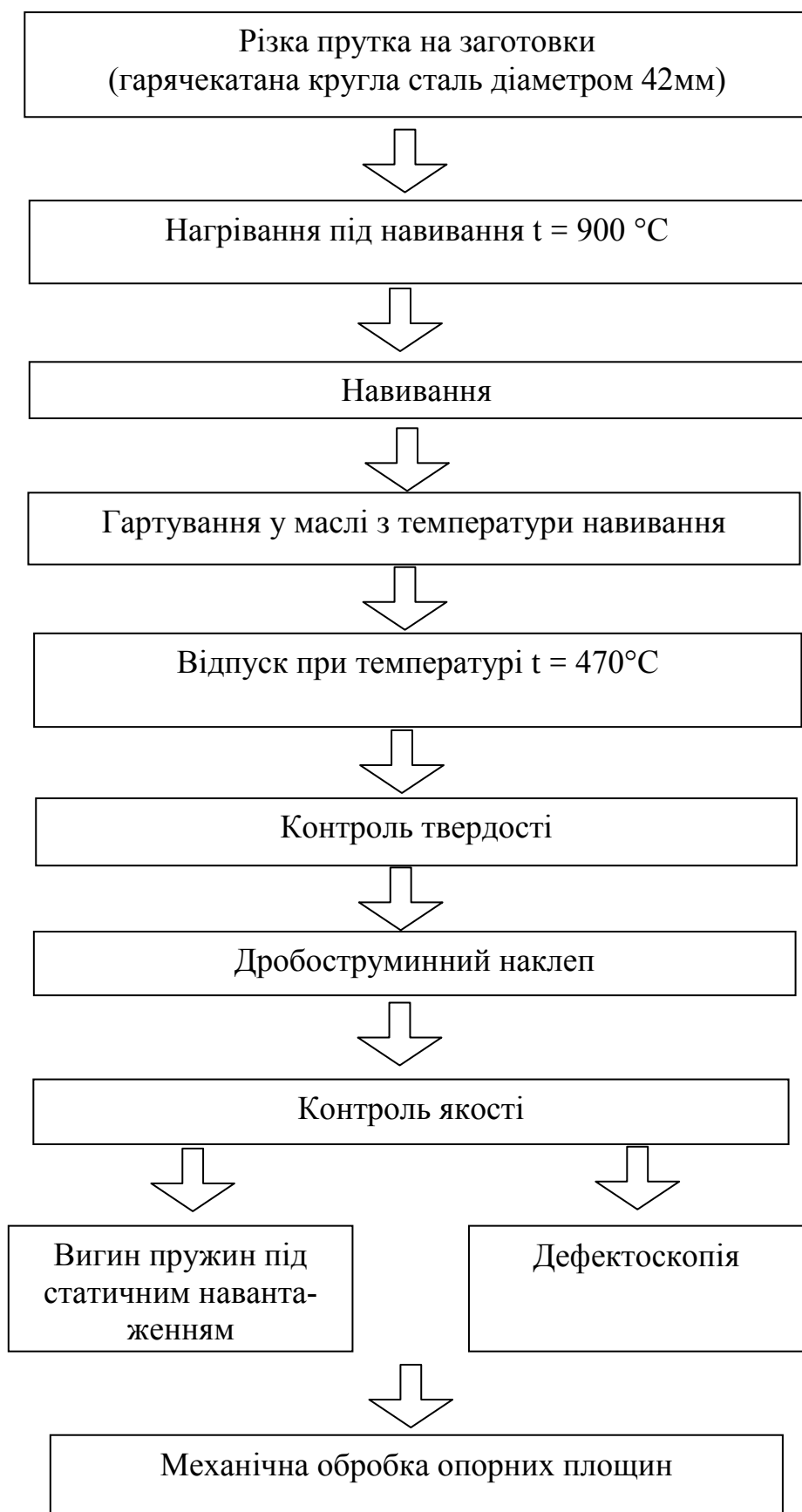
C	Si	Mn	Cr	Ni
0,56 - 0,64	1,4 - 1,8	0,40 - 0,70	0,70 - 1,00	0,25

Таблиця 2.2 – Механічні властивості термічно обробленої сталі 60C2XA (ДСТУ 14959-99)

Термічна обробка			Механічні властивості					
t _{гарт.} , °C	Гартівне се- редовище	t _{відп.} , °C	σ _T , МПа	σ _B , МПа	δ, %	Ψ, %	HRC	f, мм
870 - 900	масло	470	1830	1980	7,5	38,2	39,9- 47,1	71 - 86

Хромокремніста сталь 60C2XA легована кремнієм і хромом. Вона відрізняється від звичайних кремністих сталей як більш високою міцністю і релаксаційною стійкістю, так і кращими технологічними властивостями – меншою схильністю до утворення тріщин при гартуванні, більш високою прожарюваністю та більш високим температурним порогом росту зерна, тобто зменшується швидкість росту зерна і його величина. Треба, однак, пам'ятати, що кремніста сталь при нагріванні схильна до утворення знеуглецьованого поверхневого шару. Це може різко знизити опір пружин тривалим змінним навантаженням, тому сталь легують хромом.

Маршрутна технологія виготовлення пружин 8ТН 281.319 показана на рис. 2.2, графік режиму термічної обробки – на рис. 2.3.



Рису-

нок 2.2 – Маршрутна технологія виготовлення пружин 8TH 281.319

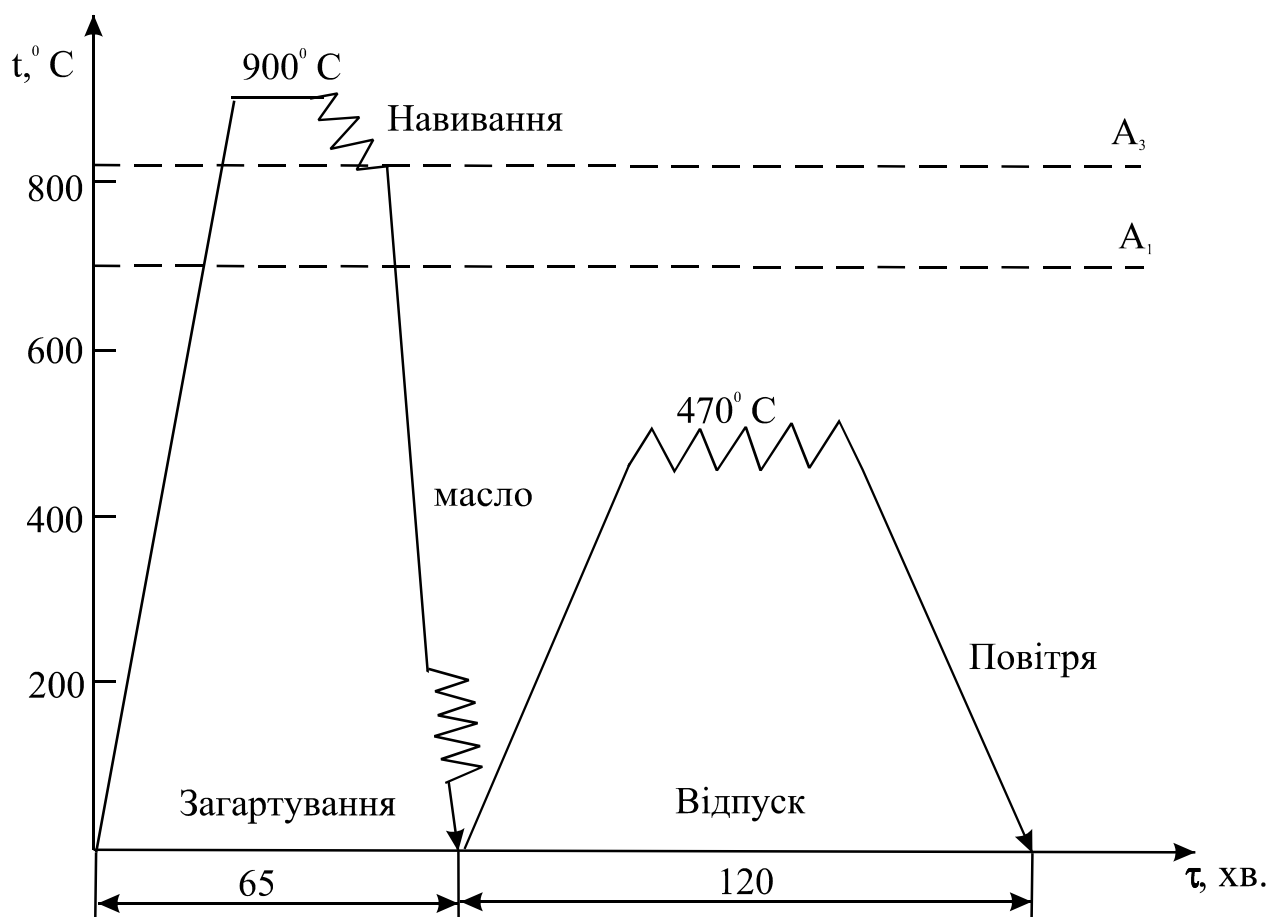


Рисунок 2.3 – Графік режиму термічної обробки пружин 8ТН 281.319

У технології виготовлення пружин застосоване гартування безпосередньо після навивання і правлення. Правлення, підгинання кінця та контроль розмірів пружини повинні бути виконані за 1,5 хв., щоб загальний час від моменту доставання заготовки з пічі до гартування був не більше 2-3 хв., а температура пружини не зменшилась нижче температури критичної точки $A_3 = 830^\circ\text{C}$. В якості охолоджувального середовища застосовуються мінеральні масла. Температура масла у баці для гартування не повинна підніматись вище $60 - 70^\circ\text{C}$.

У результаті гартування механічні властивості пружинної сталі істотно змінюються, значно підвищуються показники міцності і у той же час значно знижуються пластичність та ударна в'язкість. Об'ємні зміни, що відбуваються у процесі гартування, пов'язані зі структурними перетвореннями у сталі і викликають значні залишкові напруги. У той же час нормальна робота пружин в умовах експлуатації вимагає поряд з високими значеннями межі пружності сталі збереження певного запасу

пластичності. Одержання зазначених властивостей забезпечується застосуванням відпуску.

При низькій температурі відпуску значно підвищується межа пружності, що пов'язано з розпадом залишкового аустеніту та зміною тонкої структури кристалів α -фази (протікання початкової стадії полігонізації). Подальше підвищення температури відпуску призводить до росту полігонів і, як наслідок цього, до зменшення межі пружності і зниження опору сталі малим пластичним деформаціям.

Стабільність залишкового аустеніту залежить від хімічного складу сталі і режиму термічної обробки. Негативно позначаються на процесі розпаду аустеніту такі порушення технологічного процесу, як тривалі перерви між операціями гартування і відпуску пружин, повільне нагрівання до температури відпуску.

Метою відпуску пружин після гартування є зміна механічних властивостей сталі в напрямку досягнення оптимальних міцності та пластичності і зменшення внутрішніх напружень.

Час витримки пружин діаметром 42 мм при нагріванні до температури гартування (нагрівання в електричній пічі опору) – 65 - 75 хв., при відпуску – 120 - 140 хв.

Рівномірність нагрівання при відпустку має ще більше значення, ніж при нагріванні під гартування, внаслідок чого пічі для відпуску пружин повинні забезпечувати стабільність встановленої температури і легкість її регулювання.

Охолодження пружин після відпуску здійснюється на повітрі. Після відпуску пружини проходять піскоструминне очищення.

Механічні властивості пружин контролюються: по твердості та вигину під статичним навантаженням.

Твердість визначається на приладі типу ТК при навантаженні 1500Н алмазним конусом. Найбільш тісна кореляція встановлена між твердістю і коерцитивною силою. Тому доцільно використовувати метод контролю твердості, який базується на вимірі коерцитивної сили.

Коерцитивна сила вимірювалась на коерцитиметрі КІМФ-1.

Іспити на залишкову деформацію проводились на гідравлічному пресі П-125.

Для дослідження мікроструктури використовувався оптичний металографічний мікроскоп МІМ-7. Реактив для травлення мікрошліфів: 4 % - й розчин азотної кислоти (HNO_3) в етиловому спирті.

Статистична обробка експериментальних даних проводилась з використанням програмного комплексу «MathCad». В якості базового засобу статистичної обробки була прийнята апроксимація за методом найменших квадратів з використанням набору стандартних математичних функцій.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ ПРУЖИН ЕЛЕКТРОВОЗА ЗІ СТАЛІ 60С2ХА

3.1 Випробування пружин на залишкову деформацію

Пружини, що пройшли термічну обробку, піддаються візуальному огляду задля того, щоб виявити зовнішні дефекти та пошкодження. Візуальним оглядом виявляються наступні дефекти пружин: тріщини, зокрема колосовидні тріщини, розшарування металу, оксидні плівки, включення оксидів, сліди роз'їдання металу пружини солями. Допускається усувати дефекти пологим зачищенням за умови, що таке зачищення не призводить до неприпустимого зменшення перетину прокату, з якого навиваються пружини.

Пружити не мають містити викривлень витків. Прокат, з якого навиваються пружини, не повинен бути перекрученим. Пружини можуть містити невеликі виїмки, що утворились на місці опалі окалини, окремі риски, сліди, що залишились від закріплюючих пристроїв, державок та роликів (це стосується випадку, коли навивання пружин здійснюється на пружинно-навивальних верстатах автоматичної дії). Стосовно пружин відповідального призначення, наявність вищезгаданих дефектів допускається в межах половини допуску на фактичний розмір прутка. Стосовно інших пружин, наявність вищезгаданих дефектів допускається в межах допуску на фактичний розмір прутка.

Задля того, щоб виявити такі дефекти металу, як тріщини та розшарування, можна використовувати магнітну дефектоскопію або магнітопорошковий метод. Для виконання магнітної дефектоскопії використовують спеціальні прилади – магнітні дефектоскопи. У разі використання магнітопорошкового методу пружини спочатку намагнічують, а потім занурюють у суспензію. Суспензія для магнітопорошкової дефектоскопії містить масло та порошок феромагнітного матеріалу. Концентрація феромагнітного порошку у суспензії складає 10 - 25 г/л. В якості порошку феромагнітного матеріалу можна використовувати суміш порошоків оксидів заліза Fe_3O_4 та Fe_2O_3 . Розмір часток порошку складає від 0,1 до 50 мкм. Дефекти, присутні у металі, виявляються завдяки тому, що суспензія, яка містить феромагнітний порошок,

щільно осідає навколо тріщин, утворюючи при цьому чіткі прямі, звивисті або ламані лінії. Навколо пор та пустот суспензія утворює короткі смуги та плями. Задля того, щоб забезпечити надійне виявлення дефектів магнітопорошковою дефектоскопією, необхідно забезпечити відповідний рівень освітленості поверхні, що піддається контролю. Освітленість досліджуваної поверхні виробу має становити не менше 500 лк. Магнітний дефектоскоп використовується для виявлення дефектів на пружинах, що пройшли термічну обробку (мається на увазі гартування із наступним відпуском).

Метод магнітопорошкової дефектоскопії передбачає візуальне виявлення зовнішніх дефектів. Задля огляду поверхні, що контролюється, також припустимо використовувати оптичні засоби, збільшення яких не перевищує десяти крат. Поверхня, що контролюється, піддається зовнішньому огляду після стікання магнітопорошкової суспензії, після того, як буде повністю сформована картина відкладень порошку феромагнітного матеріалу, що входить до складу суспензії. Пружини піддаються зовнішньому огляду перед контрольними випробуваннями та після контрольних випробувань.

Якщо хоча б на одній з досліджуваних пружин будуть виявлені тріщини, колосовидні тріщини, розрашування металу, уся пружини даної партії мають пройти гасову або масляну пробу тривалістю 10 хвилин. Після проходження гасової або масляної проби пружини піддаються піскоструминній обробці. Допускається використання інших способів механічного очищення за умови забезпечення необхідної чистоти поверхні. Потім пружини піддаються зовнішньому огляду.

Механічне очищення пружин (піскоструминна обробка або інші методи, що забезпечують необхідний рівень чистоти поверхні) мають бути проведеними не пізніше однієї години з моменту проходження масляної або гасової проби.

На етапі контролю геометричних розмірів та форми пружин вимірюються наступні параметри: висота у вільному стані, зовнішній діаметр, внутрішній діаметр, число витків, рівномірність кроку витків, перпендикулярність опорної площини відносно геометричної вісі. Розміри та геометрична форма пружин мають відповідати вимогам, що вказані на їхніх робочих кресленнях.

Після того, як пружини пройшли зовнішній огляд та контроль геометричних розмірів та форми, вони піддаються випробуванню, яке полягає у визначенні залишкової деформації.

Випробування, яке полягає у визначенні залишкової деформації, має проводитись відповідно до вимог діючого державного стандарту (ДСТУ 1452-86 «Пружини циліндричні гвинтові візків та ударно-тягових приладів рухомого складу залізниць»).

Практичне застосування знаходять два методи випробування пружин стиснення на залишкову деформацію:

1) Поступове навантаження пружин від мінімального робочого стискаючого навантаження до максимального стискаючого навантаження, при якому відбувається дотик витків пружини. При такому випробуванні вимірюються прогин та висота пружини у стисненому стані.

2) Навантаження до дотику витків пружини, наступне зниження навантаження до максимального робочого стискаючого навантаження, наступне зниження навантаження до мінімального робочого стискаючого навантаження.

Оскільки при навантаженні до дотику витків відбувається осідання пружини, більш доцільно використовувати другий метод.

До пружини прикладається пробне навантаження. Величина пробного навантаження відповідає найбільшому сумарному значенню робочого навантаження, що прикладається до пружини під час її експлуатації.

До пружин, що досліджувались у даній магістерській роботі, піддавались два навантаження: $P_1 = 100$ кН, $P_2 = 68,7$ кН.

Схема випробування, яке полягає у визначенні залишкової деформації пружин, наведена на рис. 3.1. Для прикладання навантаження до пружин використовується гідравлічний прес. Прикладаючи до пружини навантаження 100 кН, пружину стискають два рази. Після того, як навантаження буде повністю зняте, виконується вимірювання висоти пружини у ненавантаженому стані (рис. 3.1). При цьому висота пружини не повинна змінюватись. Прикладаючи до пружини навантаження 68,7 кН,

виконують вимірювання висоти пружини у навантаженому стані, після чого пружину повністю розвантажують.

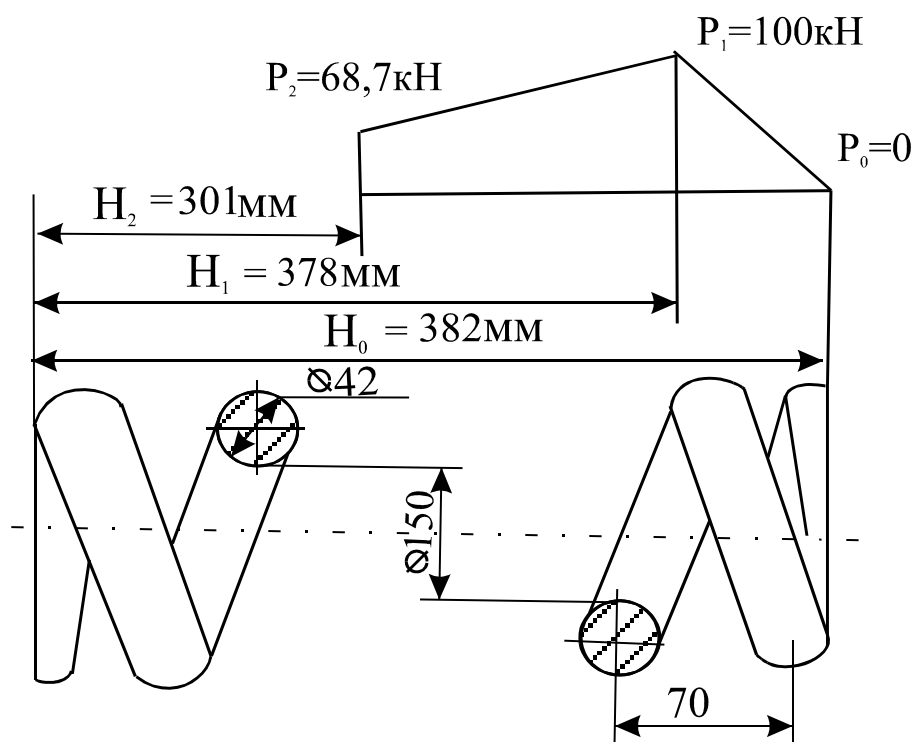


Рисунок 3.1 – Схема випробування пружини на залишкову деформацію

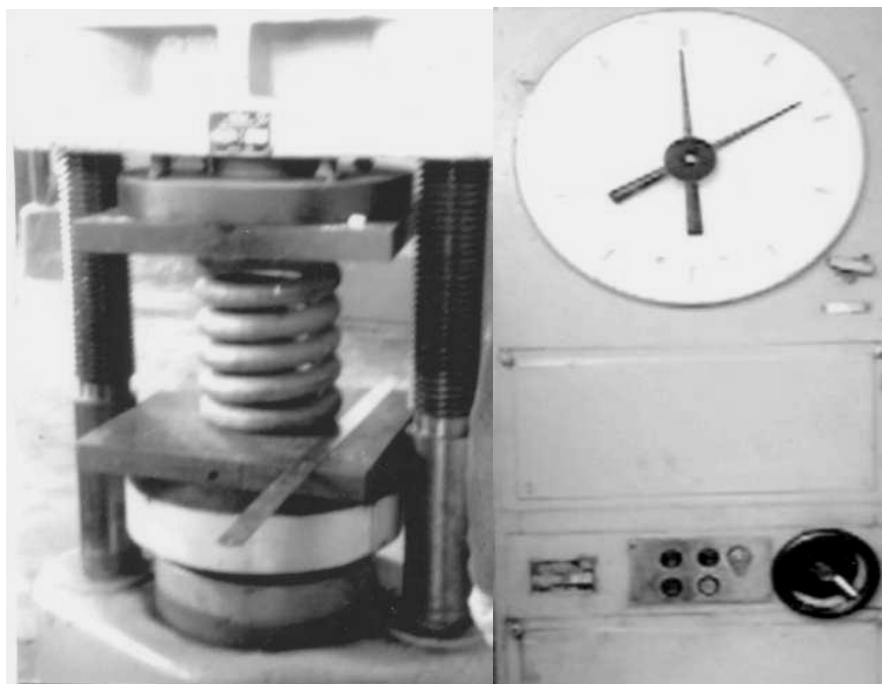


Рисунок 3.2 – Вимірювання прогину пружини під дією статичного навантаження на гідравлічному пресі П-125

Після проведення випробувань розраховують стрілу прогину пружини.

Стріла прогину представляє собою різницю між висотою пружини у ненавантаженому стані (H_1) та її висотою при прикладанні статичного навантаження (H_2):

$$f = H_1 - H_2, \quad (3.1)$$

Випробування на залишкову деформацію пройшли 20 пружин. Результати випробувань пружин на залишкову деформацію представлені в табл. 3.1.

Абсолютне відхилення величини прогину пружин під дією статичного навантаження не має перевищувати + 9 мм та -6 мм відносно заданої стріли прогину. Для даного типу пружин задана стріла прогину складає $f = 77$ мм.

Залишкова деформація пружин після зняття статичного навантаження є неприпустимою.

Результати випробувань свідчать про те, що в пружинах 1, 6, 12, 15 і 19 стріла прогину не відповідає встановленим вимогам. Пружини, що не пройшли випробування на залишкову деформацію, можуть бути розділені на дві групи, залежно від отриманих значень стріли прогину:

1. Пружини, в яких стріла прогину є меншою за нижню межу (71 мм) – пружини 6 і 19;
2. Пружини, в яких стріла прогину перевищує верхню межу (86 мм) – пружини 1, 12 і 15.

Задля того, щоб виявити причини відхилення експериментальних значень залишкової деформації від регламентованих її значень було проведено вимірювання твердості по Роквелу та металографічний аналіз металу, з якого виготовлені пружини. Механічні властивості та хімічний склад пружинної сталі, а також методика вимірювання твердості по Роквелу та металографічного аналізу наведені вище.

Таблиця 3.1 – Результати, що були отримані при випробуванні пружин 8ТН.281.319 на залишкову деформацію

№	$H_{\text{вільна}}, \text{ мм}$	$H_1, \text{ мм}$ $P_1 = 100 \text{ кН}$	$H_2, \text{ мм}$ $P_2 = 68,7 \text{ кН}$	$f, \text{ мм}$
1	381	380	291	86
2	379	378	301	74
3	377	377	301	76
4	380	378	298	78
5	378	377	295	80
6	380	379	306	71
7	381	380	297	80
8	379	378	297	78
9	379	377	301	77
10	382	381	303	79
11	378	376	296	78
12	381	378	291	82
13	376	375	296	77
14	375	374	295	74
15	379	376	290	82
16	379	379	294	83
17	380	378	301	75
18	382	379	301	77
19	379	377	306	67
20	378	376	288	76

3.2 Дослідження якості термічної обробки пружин

Термообробка пружин включає в себе дві основні операції: гартування та середній відпуск. Структура термообробленої сталі має бути дрібнозернистою. Вміст залишкового аустеніту та внутрішні напруги в сталі мають бути мінімальними. Не-

велика кількість залишкового аустеніту та незначний рівень внутрішніх напруг забезпечують високий опір сталі невеликим пластичним деформаціям, що перешкоджає передчасному втомному руйнуванню.

Слід зауважити на те, що мінімального вмісту залишкового аустеніту слід досягти безпосередньо при гартуванні пружин, оскільки середній відпуск, у процесі якого відбувається розпад залишкового аустеніту, не може усунути у повній мірі негативний вплив продуктів розпаду залишкового аустеніту, що утворюється при гартуванні, на опір конструкційної легованої сталі невеликим пластичним деформаціям.

При нагріванні пружин під гартування має бути забезпечене повне прогрівання пружин по усьому їхньому перетину. Недогрів може призвести до неповного гартування пружинної сталі з утворенням великої кількості фериту. Наявність фериту у структурі пружинної сталі суттєво знижує її пружні властивості. Перегрів пружинної сталі під гартування може стати причиною її підвищеної крихкості. Внаслідок перегріву на поверхні пружин також може утворитись знеуглецьований шар, наявність якого є причиною утворення поверхневих тріщин в умовах циклічного навантаження.

Для вимірювання твердості пружин використовувався твердомір ТК. Робоче навантаження, при якому індентор вдавлювався у поверхню досліджуваного зразка, складало 1500Н. В якості індентора використовувався алмазний конус: кут при вершині – 120° , радіус заокруглення – 0,2 мм. Вдавлювання індентора у зразок здійснювалось шляхом послідовного прикладання двох навантажень: спочатку у ручному режимі прикладалось попереднє навантаження, а потім, в автоматичному режимі, - основне навантаження.

Схема вимірювання твердості по Роквелу представлена на рис. 3.3.

Для вимірювання твердості по Роквелу можуть бути використані декілька типів твердомірів, котрі, тим не менш, мають однаковий принцип дії. На рис. 3.4 наведено схему твердоміру типа ТК.

Порядок, в якому здійснювалось вимірювання твердості по Роквелу, наведений на рис. 3.5.

На кожній пружині вимірювання твердості здійснювалось не менше, ніж у 3 - х точках (табл. 3.2). У пружинах, що не пройшли випробувань при прикладанні до них статичного навантаження, також визначалась твердість серцевини (табл. 3.3).

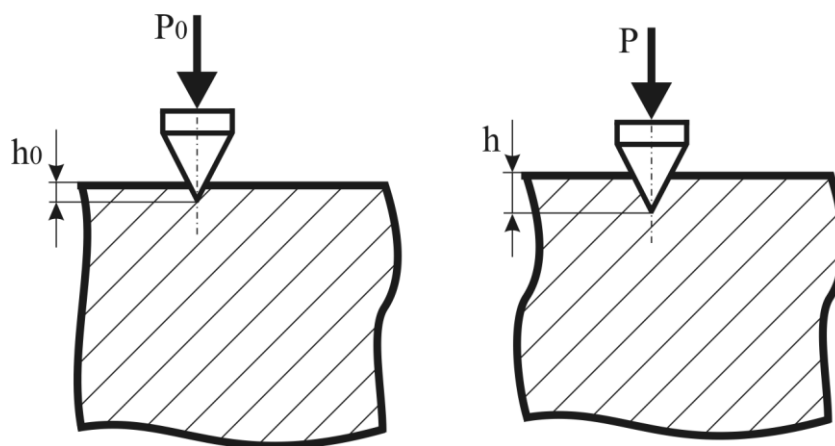


Рисунок 3.3 – Схема визначення твердості по Роквелу

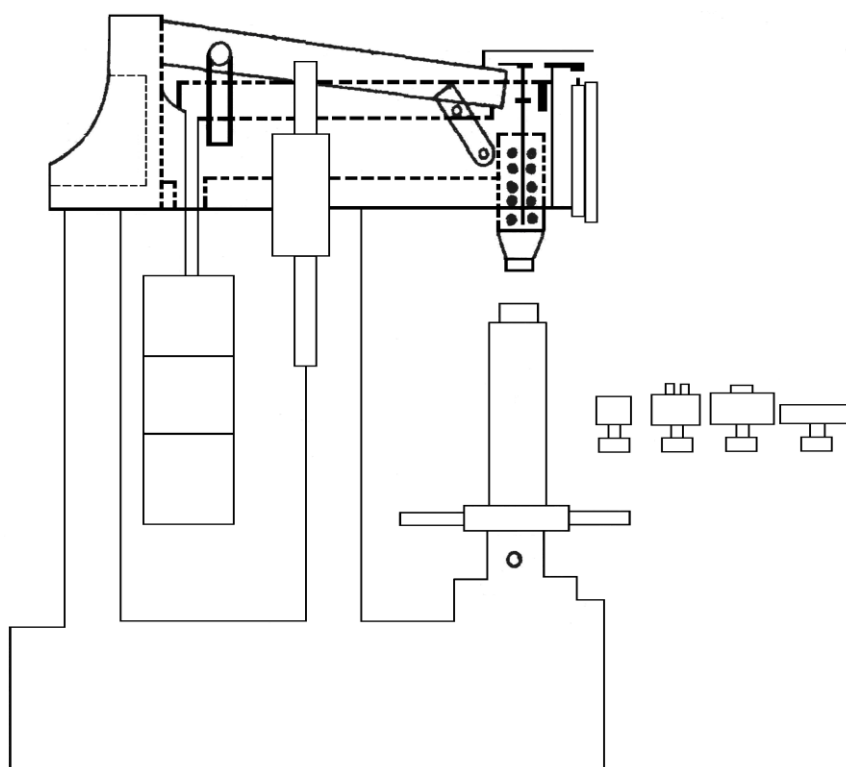


Рисунок 3.4 – Схема твердоміру типу ТК

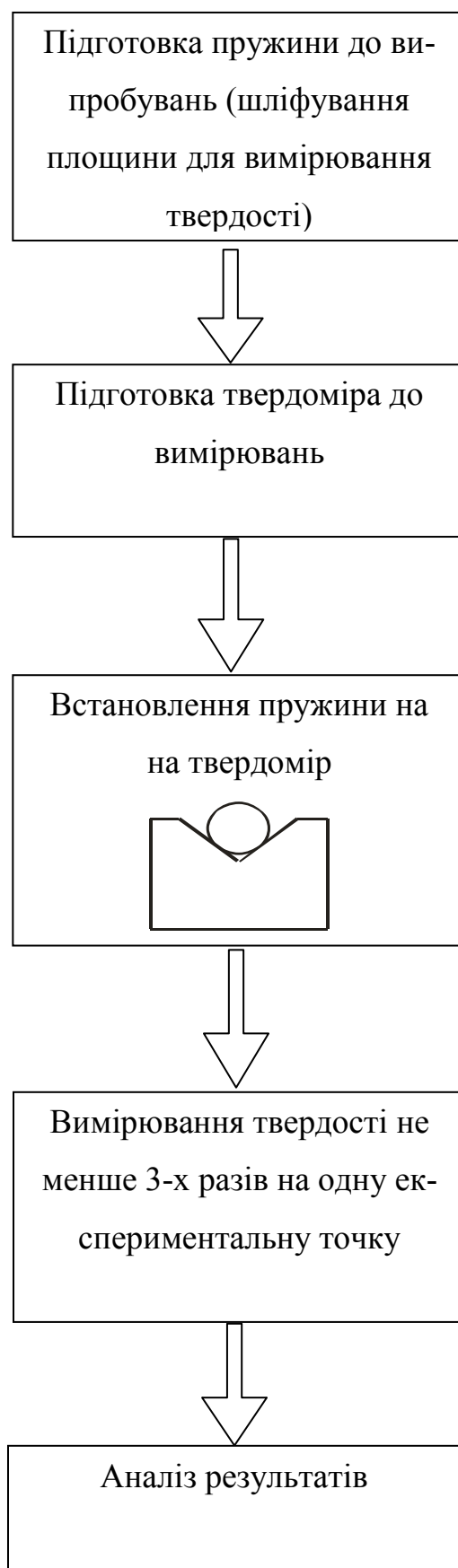


Рисунок 3.5 – Порядок, в якому здійснювалось вимірювання твердості пружин

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання твердості на поверхні пружин

№ зразка	Твердість HRC	№ зразка	Твердість HRC
1	36; 37; 35	11,0	41; 43; 42
2	41; 40; 41	12,0	36; 37; 37
3	42; 41; 40	13,0	42; 41; 41
4	43; 42; 42	14,0	42; 43; 44
5	42; 43; 41	15,0	36; 36; 37
6	47; 49; 47	16,0	42; 43; 44
7	42; 43; 43	17,0	40; 41; 40
8	41; 42; 41	18,0	44; 42; 42
9	42; 41; 40	19,0	48; 48; 47
10	41; 40; 42	20,0	44; 43; 44

Таблиця 3.3 – Твердість пружин, що не пройшли випробування на залишкову деформацію

№ пружини	HRC		f, мм
	На поверхні	У серцевині	
1	36; 37; 35	38; 39; 41	87
6	47; 49; 48	48; 49; 50	71
12	36; 36; 37	41; 40; 43	86
15	36; 36; 37	38; 37; 37	88
19	48; 47; 47	48; 49; 50	68

Пружини, для яких характерною є підвищена стріла прогину, характеризуються зниженою твердістю. Пружини, для яких характерною є знижена стріла прогину, мають підвищену твердість.

Для проведення металографічних досліджень з пружин, що не пройшли випробування на залишкову деформацію, були вирізані відповідні зразки. Для вирі-

зання використовувався абразивний круг. При вирізанні зразків у зону різання безперервно подавалася вода.

Результати металографічних досліджень свідчать про те, що пружини № 1, 12 і 15, стріла прогину яких перевищує верхню межу, містять знеуглецьований шар, глибина якого змінюється від 1,3 до 1,9 мм (рис. 3.6).

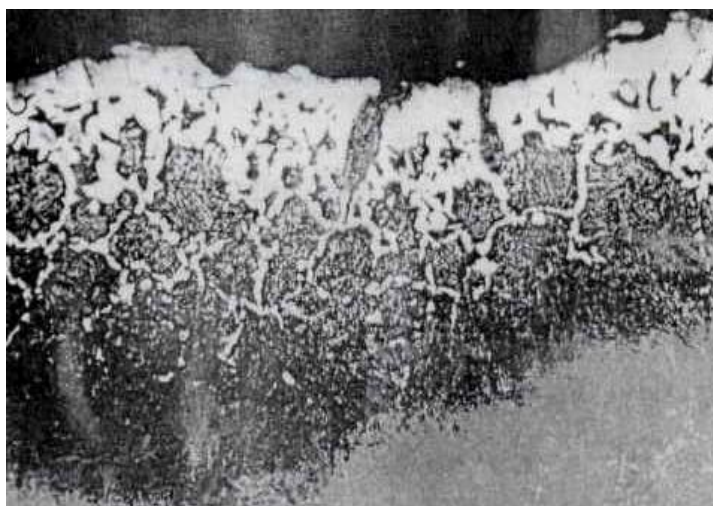


Рисунок 3.6 – Знеуглецьований шар у пружинах, що характеризуються надмірно високою стрілою прогину, $\times 300$

Існуючим стандартом (ДСТУ 1763 - 98) передбачено, що глибина знеуглецьованого шару на пружинах, виготовлених з гарячекатаної сталі, не може перевищувати 2,5 % від діаметру прутка. Якщо спиратись на цей стандарт, глибина знеуглецьованого шару у досліджуваних пружинах, діаметр витків котрих дорівнює 42 мм, не має перевищувати 1,05 мм.

Пружина № 15 містить дрібнодисперсні включення фериту. Ферит як окрема структурна складова може утворюватись у тому випадку, коли температура нагрівання сталі під гартування знаходиться нижче критичної точки A_{c3} . Ферит має дуже низький опір пластичній деформації. Підвищений вміст фериту у пружинній сталі призводить до значної деформації пружин при прикладанні до них стискаючого навантаження.

Знеуглецьований шар також був виявлений на поверхні пружин № 6 і № 19, стріла прогину яких при випробуванні на залишкову деформацію виявилась нижчою

за нижню межу. Глибина знеуглецьованого шару є незначною – вона не перевищує 0,4 мм (рис. 3.7). Структура пружин у серцевині: троостит + мартенсит з рівномірним розподілом структурних складових (рис. 3.8). Пружини із цією структурою мають підвищену твердість (оптимальною структурою пружин є троостит з меншою твердістю).

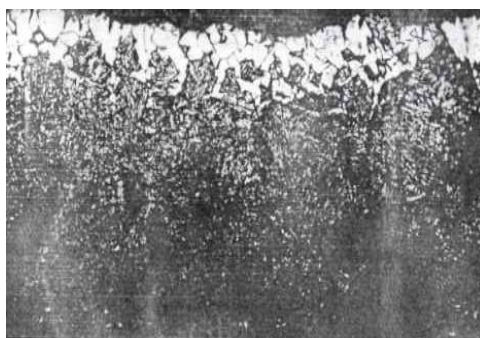


Рисунок 3.7 – Знеуглецьований шар, виявлений на поверхні пружин, що мають низьку стрілу прогину, $\times 300$

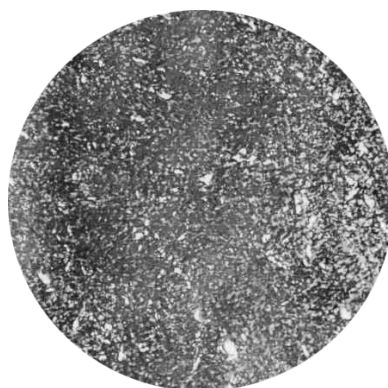


Рисунок 3.8 – Троосто - мартенситна структура серцевини пружин, $\times 300$

Підвищена твердість поверхневих шарів та серцевини пружин обумовлена порушенням режиму відпуску: занижена температура відпуску або недостатня тривалість витримки при температурі відпуску. Таким чином, пружини, які не витримали випробувань на залишкову деформацію, виготовлені з порушенням технологічних процесів гартування та відпуску, а саме: були порушені оптимальні температурні режими гартування та відпуску.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ВІДПУСКУ НА СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ МЕТОДОМ МАГНІТНОГО АНАЛІЗУ

4.1 Магнітний аналіз для контролю властивостей і структури

Усі відомі магнітні характеристики матеріалів, що використовуються у процесах неруйнівного контролю, можуть бути об'єднані у дві групи. До першої групи відносяться магнітні характеристики, що не є чутливими до структурних перетворень, але водночас проявляють чутливість до зміни фазового складу. До другої групи відносяться магнітні характеристики, що є чутливими до структурних перетворень [1]. Характеристики, що відносяться до першої групи, можуть бути використані для фазового магнітного аналізу конструкційних матеріалів. Характеристики, що відносяться до другої групи, можуть бути використані для магнітного структурного аналізу конструкційних матеріалів [4]. Механічні, фізичні та хімічні властивості конструкційних матеріалів у багатьох випадках напряму залежать від їхнього фазового складу та структури. Саме у таких випадках існує можливість безпосереднього використання магнітного фазового або структурного аналізу для неруйнівного контролю структури та властивостей конструкційних матеріалів.

Фазовим магнітним аналізом можна контролювати структуру виливків, структуру прокату, а також структуру готових деталей, що пройшли термічну обробку [8]. Необхідність проведення цього контролю обумовлюється такими обставинами. Якщо в сталях збільшується кількість феритної фази, відбувається зниження міцності та твердості сталей, зокрема і втомної міцності. Якщо в сталях збільшується кількість перліту або надлишкового (вторинного) цементиту, спостерігається підвищення твердості сталей і, водночас, їхньої схильності до крихкого руйнування. Разом з цим спостерігається погіршення оброблюваності деталей різанням. Отже, оцінка фазового складу методами ферометрії не є самоціллю: це є спосіб, що дозволяє здійснити неруйнівний контроль структури та властивостей матеріалів [3].

Метод магнітної ферометрії базується на тому, що у процесі вимірювань визначаються характеристики взаємодії зовнішнього магнітного поля, створеного вимірювальним пристроєм, з виробом, що піддається контролю [9]. Задля цього найча-

стіше використовують феритометри. Феритометри бувають наступних типів. Пондеромоторні феритометри: у процесі контролю вимірюється сила відриву магніту від поверхні деталі, що контролюється. Магнітостатичні феритометри: у процесі контролю вимірюється магнітна проникність матеріалу деталі, що піддається контролю. Індукційні феритометри: у процесі контролю вимірюється комплексний опір або індуктивність вимірювальної котушки феритометра [9].

Залежно від того, який саме прилад використовується для проведення контролю, в якості датчика можуть бути використані електромагніт або постійний магніт, а також модуль ферозонд-постійний магніт або ферозонд-електромагніт. Тип вимірювального приладу залежить від фактичного вмісту фериту в деталі, вимог до точності визначення кількості фериту, а також від конструктивних особливостей деталі, що піддається контролю [8, 9].

Контроль якості являє собою найбільш масову технологічну операцію у будь-якому виробничому циклі. У зв'язку з тим, що вимоги до надійності нової техніки постійно підвищуються, у сучасному машинобудуванні спостерігається неухильне зростання трудомісткості контрольних операцій. За таких умов процеси неруйнівного контролю стають однією з найважливіших складових гнучких автоматизованих виробництв.

Значна кількість механічних властивостей конструкційних матеріалів залежить не тільки від фазового складу, але і від структури, зокрема від форми та взаємного розташування окремих структурних складових, розміру зерна тощо. На властивості конструкційних матеріалів суттєвий вплив чинять також дефекти мікронапруги, що утворюються під час термічної та термо-механічної обробки [7].

Останнім часом спостерігається тенденція до більш широкого впровадження методів неруйнівного контролю структури термооброблених виробів, виготовлених з конструкційних сталей. До таких методів, власне, належить і магнітний структурний аналіз. Магнітний структурний аналіз базується на існуванні кореляції між магнітними та механічними характеристиками конструкційних матеріалів. Така кореляція може виникати за умови, коли фазові та структурні перетворення, що протікають у конструкційному матеріалі, водночас змінюють його магнітні властивості. Основ-

ною магнітною характеристикою, що вимірюється при магнітному структурному аналізі, є коерцитивна сила. Коерцитивна сила матеріалу відповідає такому значенню напруженості розмагнічувального магнітного поля, при якому залишкова намагніченість матеріалу дорівнює нулю. Для вимірювання коерцитивної сили, а також для виявлення кореляції між коерцитивною силою та механічними властивостями матеріалів використовуються коерцитиметри [8].

Найбільш широке застосування знаходять коерцитиметри, в яких приставні електромагніти виконані у вигляді окремого блоку. Такий блок містить П-образний електромагніт з намагнічувальною та розмагнічувальною обмотками. В якості перемички, яка водночас виконує роль нульового індикатора, використовується сердечник ферозонду [4, 8].

Спочатку виконується цикл намагнічування тієї ділянки виробу, що піддається контролю. Після намагнічування здійснюється розмагнічування тієї ж самої ділянки виробу. Струм розмагнічування плавно збільшується доти, доки вимірювальний прилад, що утворює з ферозондом єдиний електричний ланцюг, не покаже повну відсутність магнітного потоку [8].

4.2 Визначення коерцитивної сили і твердості сталі залежно від температури відпуску

Станом на сьогодні слід констатувати відсутність будь-якої єдиної теорії магнітного структурного аналізу, внаслідок чого виникає необхідність пошуку кореляції між магнітними та механічними властивостями конструкційних матеріалів для кожного окремого матеріалу, а іноді і для кожної окремої деталі [6, 8]. Навіть якщо про наявність кореляції між магнітними та механічними властивостями відомо з літературних джерел, цю кореляцію необхідно перевіряти у конкретних виробничих умовах, враховуючи матеріал та технологію виробництва тієї чи іншої деталі.

Найбільш точно зв'язок між коерцитивною силою та твердістю встановлений для деяких марок ливарних сталей (заштрихована область на рис. 4.1). Вочевидь, залежність $H_c(HRC)$ для сталі 60C2XA перебуватиме у заштрихованій області, показу-

ній на рис. 4.1. Однак для встановлення точної залежності коерцитивної сили від твердості цієї сталі необхідно провести додатковий експеримент [7].

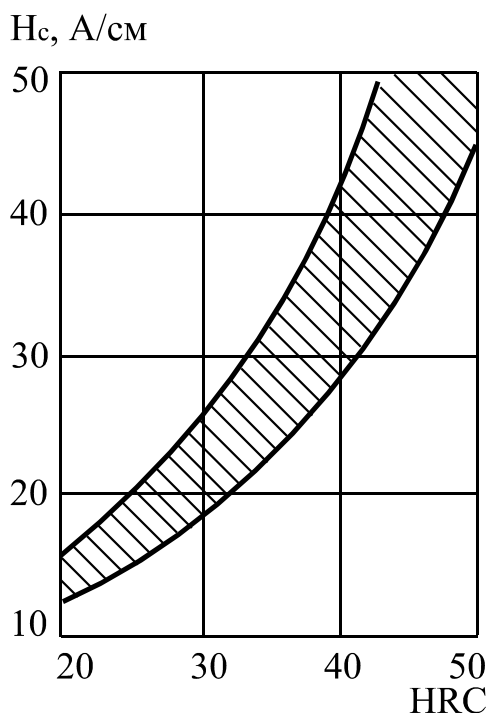


Рисунок 4.1 – Взаємозв'язок між коерцитивною силою та твердістю ливарних сталей

Коерцитивна сила вимірювалась на зразках, що мали діаметр 42 мм та довжину 100 мм. Зразки були отримані розрізанням пруткової пружинної сталі 60С2ХА. Усі зразки проходили зміцнювальну термічну обробку, а саме, гартування з наступним відпуском. Режими термічної обробки: температура нагрівання під гартування $t = 850 - 870^{\circ}\text{C}$; тривалість витримки зразків у пічі – 30 хвилин; охолодження у маслі; відпуск. Температура відпуску: 100, 200, 300, 400, 500, 600°C . Тривалість відпуску – 1 година з наступним охолодженням відпущених зразків на повітрі.

Для вимірювання коерцитивної сили використовувався коерцитиметр КІМФ-1. Цей коерцитиметр може використовуватись для контролю структури термооброблених феромагнітних виробів з конструкційних сталей, незалежно від геометричної форми виробів.

Коерцитиметр складається з наступних основних вузлів: з блоку вимірювання та двох датчиків. Блок вимірювання представляє собою переносний прилад, розта-

шований в уніфікованому корпусі. Функціональна схема вимірювального блоку представлена на рис. 4.2.

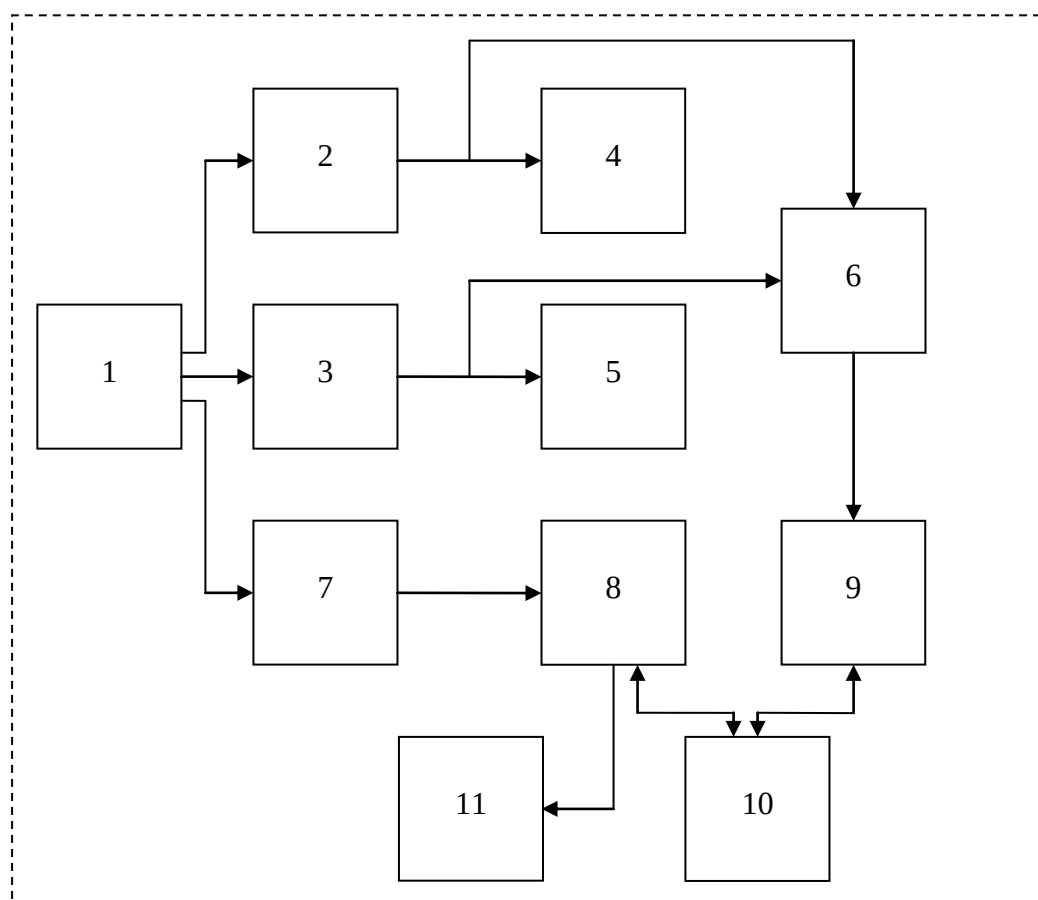


Рисунок 4.2 – Функціональна схема вимірювального блоку коерцитиметру КІМФ -1

На рис. 4.2 прийняті наступні позначення: 1 – силовий трансформатор; 2 – стабілізований випрямляч струму розмагнічування, 3 – випрямляч струму намагнічування; 4 – індикатор струму розмагнічування; 5 – індикатор струму намагнічування; 6 – комутатор; 7 – ланцюг живлення ферозонду; 8 – ферозонд; 9 – електромагніт; 10 – об'єкт, що контролюється; 11 – фазометричний ланцюг вимірювання напруги на виході ферозонду.

Мережева напруга 220 В (50 Гц) подається на первинну обмотку силового трансформатору 1. Вторинна обмотка силового трансформатору підключається до джерела струмів намагнічування та розмагнічування. Випрямлячі струму намагнічування 3 містить схему електронної стабілізації струму. Регулювання струму намагнічування здійснюється за допомогою індикатора 4. Струм намагнічування підво-

диться до електромагніта 9 через комутатор 6. На той же самий комутатор 6 подається струм розмагнічування. Формування струму розмагнічування здійснюється у випрямлячі 2. Для контролю струму розмагнічування призначений міліамперметр 5. Живлення ферозонду 8 здійснюється від окремої обмотки 7, розташованій на силовому трансформаторі 1. Для вимірювання коерцитивної сили використовується фазометрична схема 11, що підключається до вимірювальних обмоток, розташованих на ферозонді 8.

Конструктивно датчик є приставним електромагнітом, що містить магнітопровід. Датчик знаходиться у корпусі із магнітного матеріалу, який одночасно є магнітним екраном (рис. 4.3). На сердечниках магнітопроводу розташовані послідовно з'єднані між собою вимірювальні котушки. Залежно від конфігурації контролюємого об'єкта, до кінців сердечників магнітопроводу кріпляться відповідні наконечники (закріплення наконечників здійснюється за допомогою гвинтів). У верхню частину електромагніту, у зазор між сердечниками, встановлений ферозонд. Ферозонд є індикатором магнітного потоку.

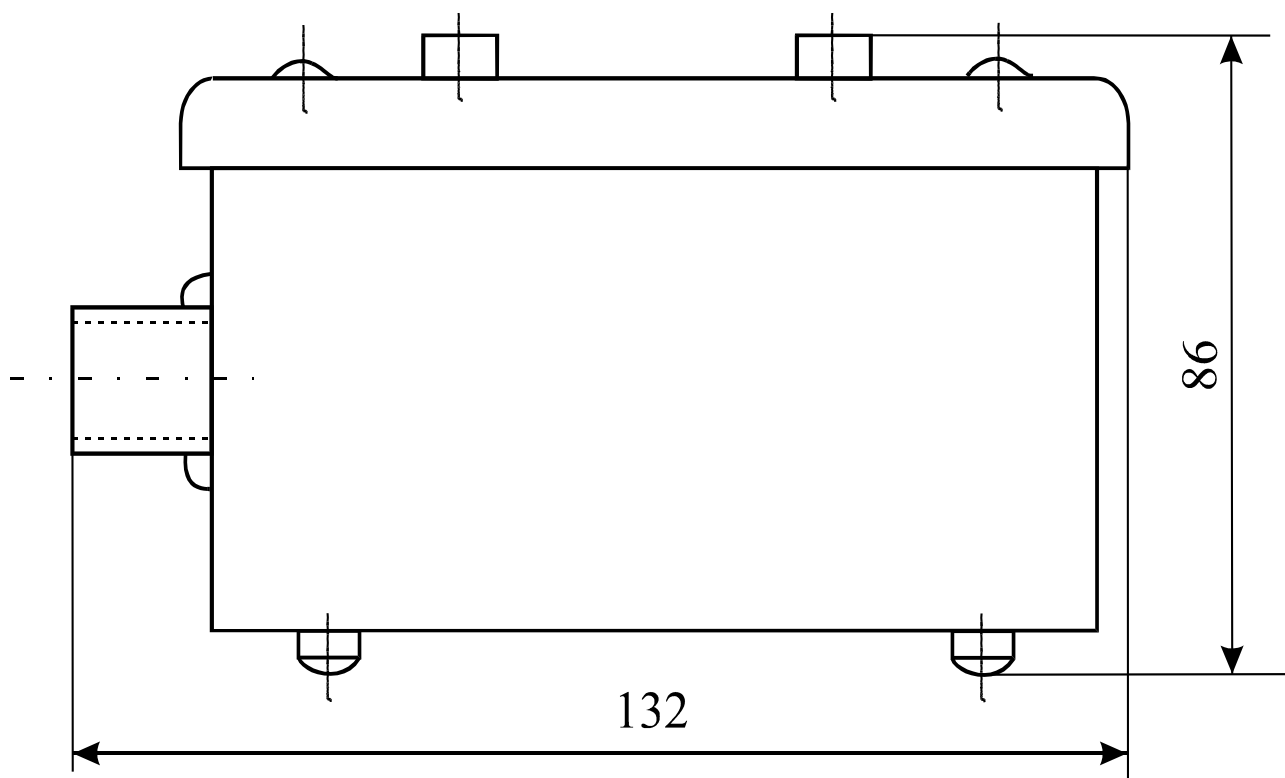


Рисунок 4.3 – Схема датчика коерцитиметра КІМФ-1

Ферозонд фактично представляє собою замкнений сердечник, який має форму шихтованої прямокутної рамки: рамка набрана з пластин трансформаторної сталі. На двох протилежних плечах сердечника розташовані послідовно з'єднані між собою обмотки збудження ферозонда. Вимірювальна обмотка намотана поверх обмоток збудження. Для скріплення сердечників магнітопроводу використовується скоба, виготовлена з немагнітного матеріалу.

Ферозонд перетворює постійне магнітне поле в електричний сигнал.

Коерцитивна сила визначається наступним чином:

1. Датчик встановлюється на ділянку виробу, що контролюється. При цьому необхідно слідкувати за тим, щоб полюсні наконечники датчика щільно прилягали до поверхні виробу.

2. Включається ланцюг намагнічування та ланцюг вимірювання. Задля включення цих ланцюгів слід натиснути на кнопку перемикача «вимірювання» .

3. Після того, як імпульс струму намагнічування пройде через вимірювальну обмотку, стрілка мікроамперметра відхилиться вліво у крайнє положення. Обертаючи рукоятки резисторів «грубо» та «плавно» вправо, необхідно повернути стрілку мікроамперметра у нульове положення. Струм розмагнічування (I_p), відлік якого здійснюється по міліамперметру, при якому стрілка мікроамперметра повертається у нульове положення, є величиною, пропорційною коерцитивній силі (рис. 4.4).

4. Після того, як вимірювання закінчено, перемикач «грубо» та «плавно» слід встановити у вихідне положення (встановлення перемикача у вихідне положення слід здійснювати не раніше, ніж через 3-5 секунд після закінчення вимірювання). Коерцитиметр готовий до наступного вимірювання.

Дані щодо твердості зразків пружинної сталі 60С2ХА, відпущених при різних температурах, наведені у табл. 4.1. Кожна експериментальна точка будувалась за результатами вимірювання твердості на трьох однотипних зразках.

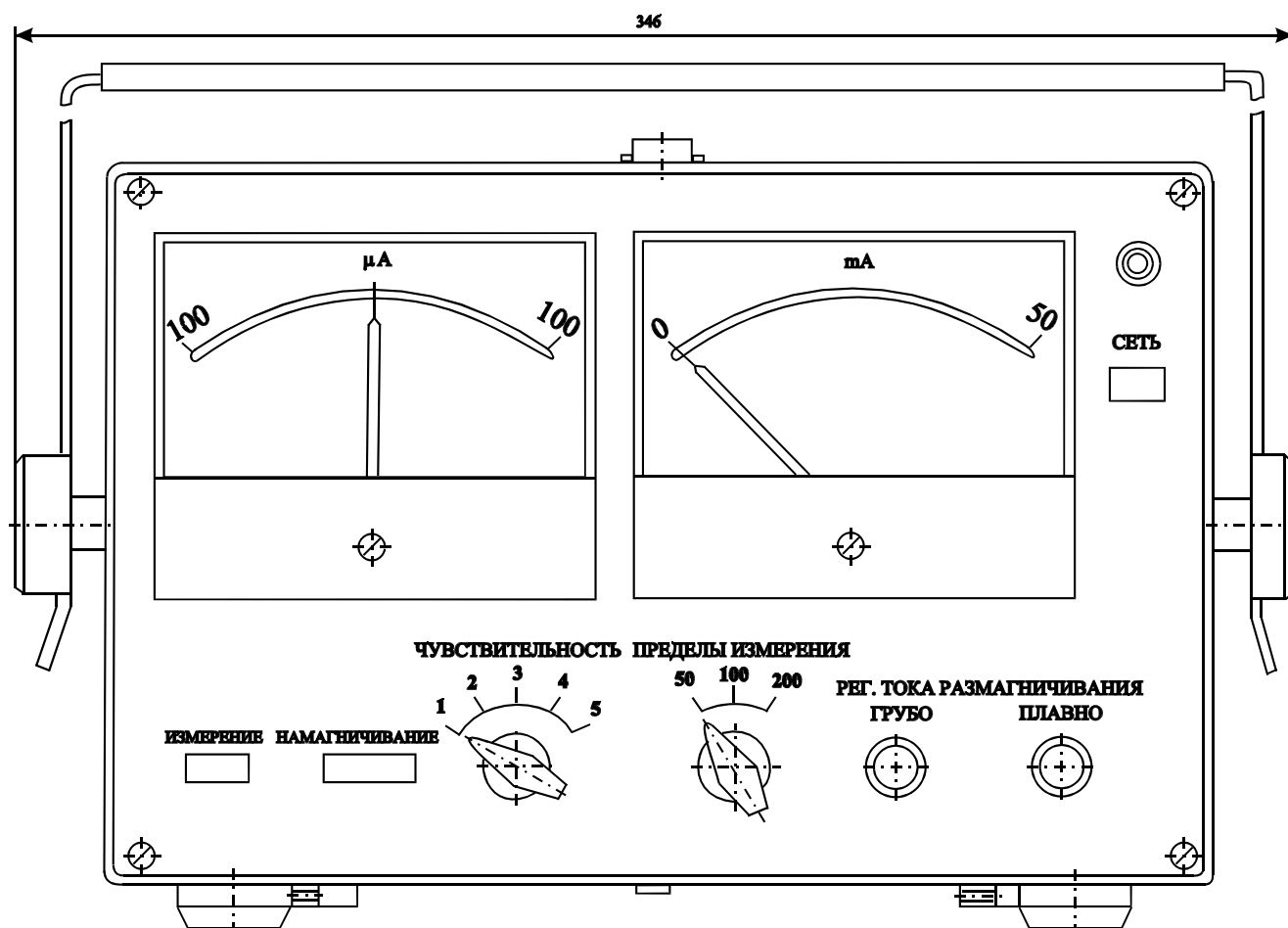


Рисунок 4.4 – Лицьова панель блоку вимірювання коерцитиметру КІМФ-1

Таблиця 4.1 – Залежність твердості та коерцитивної сили загартованої сталі 60С2ХА від температури відпуску

Температура відпуску, °С	№ зразка	HRC	H _c , А/см
150	1-1	60	118
	1-2	61	117
	1-3	60	119
200	2-1	61	114
	2-2	59	115
	2-3	60	112
250	3-1	57	102
	3-2	56	101
	3-3	57	104
300	4-1	55	93
	4-2	54	92
	4-3	53	93

Продовження табл. 4.1

Температура від- пуску, °С	№ зразка	HRC	H _c , А/см
350	5-1	51	69
	5-2	52	67
	5-3	50	70
400	6-1	46	59
	6-2	44	60
	6-3	45	60
450	7-1	39	52
	7-2	41	51
	7-3	40	53
500	8-1	31	41
	8-2	30	42
	8-3	31	43
550	9-1	28	34
	9-2	29	35
	9-3	27	34
600	10-1	25	29
	10-2	26	29
	10-3	24	31

4.3 Знаходження функціональної залежності між коерцитивною силою та твердістю

Функціональна залежність за експериментальними даними може бути побудована з використанням двох різних способів – інтерполяції або апроксимації [8]. Через n крапок, отриманих експериментальним шляхом, завжди можна провести криву, що буде описуватись багаточленом, ступінь якого дорівнюватиме $(n - 1)$. Такий багаточлен отримав назву інтерполяційного багаточлена. Саму ж заміну функції $y(x)$ на функцію $f(x)$, при якій $y(x_i) = f(x_i)$, називають інтерполяцією. Однак така обробка експериментальних даних не може дати задовільних результатів, оскільки в дійсності $y(x_i) \neq f(x_i)$ через наявність випадкових помилок вимірювань [9 - 11]. Тому теоретична крива, що описує експериментальні дані, має бути побудована таким чином, щоб була забезпечена її мінімальна залежність від випадкових помилок вимірювань. Побудова теоретичної кривої за таким принципом отримала назву апроксимації

(згладжування). Найчастіше апроксимація проводиться за методом найменших квадратів.

Побудова теоретичної кривої при апроксимації здійснюється шляхом підбору (прогонки): здійснюється прогонка отриманих експериментальних даних через набір стандартних математичних функцій з метою пошуку функції, яка дає найменшу похибку апроксимації. Для знаходження залежності твердості сталі 60С2ХА від температури відпуску і залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від її твердості використовувались стандартні двопараметричні функції. В якості апроксимуючих функцій були використані показова, гіперболічна, статечна, логарифмічна функції, а також інші стандартні математичні функції [8 - 11]. До складу цих функцій входять коефіцієнти, значення яких мають бути визначені при проведенні апроксимації. Коефіцієнти апроксимуючих функцій визначаються на основі метода найменших квадратів, згідно з яким має бути досягнутий мінімум суми квадратів випадкових помилок: $\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2$. Тут n – кількість експериментальних точок; y_i – експериментальні значення досліджуваного параметру; f_i – значення апроксимуючої функції в i -тій експериментальній точці [9 - 11].

Слід зауважити, що для апроксимації експериментальних даних може бути використана дуже велика кількість різноманітних математичних функцій, як стандартних, так і спеціальних. У такому випадку, якщо для визначення невідомих коефіцієнтів, що входять до складу апроксимуючих функцій, буде напряду застосований метод найменших квадратів, виникне необхідність у проведенні величезного об'єму складних обчислень. Задля спрощення розрахунків доцільно використати процедуру лінеаризації нелінійних функцій. Під лінеаризацією розуміється перетворення вихідної нелінійної функції у лінійну функцію за допомогою однієї або декількох заміन.

Рівняння лінійної апроксимуючої функції має наступний вид [9]:

$$f(x) = b_0 + b_1 \cdot x, \quad (4.1)$$

де b_0 , b_1 – коефіцієнти, які підлягають визначенню.

Для того, щоб розрахувати коефіцієнти b_0 та b_1 на основі метода найменших квадратів, можна скористуватись наступними формулами [9]:

$$b_0 = \bar{y} - r_{x,y} \cdot \bar{x}; \quad b_1 = r_{x,y}; \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}; \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad r_{x,y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.2)$$

де $\bar{y}$, $\bar{x}$ – середні значення функції y та змінної x ;

$r_{x,y}$ – розрахункове значення коефіцієнту кореляції.

Щоб здійснити лінеаризацію нелінійної функції (перетворити нелінійну функцію у лінійну), необхідно здійснити таку заміну змінних у вихідній нелінійній функції $f(x) = \varphi(x, a_0, a_1)$, при якій ця нелінійна функція набуде лінійного виду [9]:

$$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u. \quad (4.3)$$

Після цього виконується лінійна апроксимація, в ході якої коефіцієнти b_0 і b_1 перераховуються у коефіцієнти a_0 та a_1 .

Для лінеаризованої функції (4.3) рівняння (4.2) можуть бути записані наступним чином [9]:

$$b_0 = \bar{v} - r_{u,v} \cdot \bar{u}; \quad b_1 = r_{u,v}; \quad \bar{v} = \frac{\sum v_i}{n}; \quad \bar{u} = \frac{\sum u_i}{n}; \quad r_{u,v} = \frac{\sum (u_i - \bar{u}) \cdot v_i}{\sum (u_i - \bar{u})^2}. \quad (4.4)$$

В табл. 4.2 для деяких двопараметричних апроксимуючих функцій наведені заміни змінних у виразах (4.3, 4.4), а також зворотні заміни, що використовувались для перерахунку коефіцієнтів b_0 і b_1 відповідно у коефіцієнти a_0 і a_1 .

Для розрахунку помилки апроксимації був використаний наступний вираз [9]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - f_i)^2}{n-1}}, \quad (4.5)$$

де f_i – значення апроксимуючої функції у вузлових експериментальних точках.

Таблиця 4.2 – Заміни змінних для лінеаризації нелінійних функцій

Вид функції	Заміна змінних		Лінеаризована функція	Зворотна заміна змінних	
$f(x) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot x}$	$v(x) = \ln[f(x)]$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = x;$ $u_i = x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_1 = b_1$
$f(x) = a_0 \cdot x^{a_1}$	$v(x) = \ln f(x)$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = \ln x;$ $u_i = \ln x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_1 = b_1$
$f(x) = a_0 \cdot a_1^x$	$v(x) = \ln f(x)$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = x;$ $u_i = x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_0 = e^{b_1}$

Точність апроксимації може вважатись задовільною при виконанні наступної умови:

$$\sigma \leq 0,1 \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (4.6)$$

У разі апроксимації експериментальних даних параболічними функціями за методом Чебишева, вихідний масив експериментальних даних, в якому знаходяться значення аргументу, перетворюється у ряд цілих чисел $x_i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n-1, n$, де i – номер елементів масиву.

Апроксимаційна функція по Чебишеву може бути представлена у наступному виді (з урахуванням вищезгаданої заміни) [10]:

$$f(x) = k_0 + k_1 \psi_1(x) + k_2 \psi_2(x) + \dots + k_\lambda \psi_\lambda(x), \quad (4.7)$$

де $k_0, k_1, \dots, k_n$ – коефіцієнти;

$\psi_1(x), \psi_2(x), \dots, \psi_\lambda(x)$ – статечні функції.

Для визначення коефіцієнту k_0 використовується наступний вираз [10]:

$$k_0 = \frac{\sum y_i}{n}, \quad (4.8)$$

де n – загальна кількість експериментальних точок.

Парабола нульового порядку може бути представлена наступним рівнянням [10]:

$$f(x)_0 = k_0. \quad (4.9)$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{S_0}{n-1}}; S_0 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}. \quad (4.10)$$

Парабола першого порядку може бути представлена наступним рівнянням [10]:

$$f(x)_1 = k_0 + k_1 \psi_1(x). \quad (4.11)$$

Для розрахунку коефіцієнта k_1 та функції $\psi_1(x)$ використовуються наступні вирази [10]:

$$\psi_1(x) = x - \frac{n+1}{2}; k_1 = \frac{\sum y_i \cdot \psi_1(x_i)}{\sum [\psi_1(x_i)]^2}; \psi_1(x_i) = x_i - \frac{n+1}{2}. \quad (4.12)$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{S_1}{n-2}}; S_1 = S_0 - k_1^2 \cdot \sum (\psi_1(x_i))^2. \quad (4.13)$$

Парабола другого порядку може бути представлена у вигляді наступного рів-

няння [10]:

$$f(x)_2 = f(x)_1 + k_2 \psi_2(x), \quad (4.14)$$

де $f(x)_1$ – рівняння, що описує параболу першого порядку.

Для розрахунку коефіцієнта k_2 та функції $\psi_2(x)$ використовуються наступні вирази [10]:

$$\psi_2(x) = \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^2 - \frac{n^2-1}{12}; \quad k_2 = \frac{\sum y_i \cdot \psi_2(x_i)}{\sum [\psi_2(x_i)]^2}; \quad \psi_2(x_i) = \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^2 - \frac{n^2-1}{12}. \quad (4.15)$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{S_2}{n-3}}; \quad S_2 = S_1 - (k_2)^2 \cdot \sum (\psi_2(x_i))^2. \quad (4.16)$$

Кубічна параболу може бути представлена у вигляді наступного рівняння [10]:

$$f(x)_3 = f(x)_2 + k_3 \psi_3(x), \quad (4.17)$$

де $f(x)_2$ – рівняння параболу другого порядку.

Для розрахунку коефіцієнта k_3 та функції $\psi_3(x)$ використовуються наступні вирази [10]:

$$\psi_3(x) = \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^3 - \frac{3n^2-7}{20} \cdot \left(x - \frac{n+1}{2}\right); \quad k_3 = \frac{\sum y_i \cdot \psi_3(x_i)}{\sum [\psi_3(x_i)]^2}; \quad (4.18)$$

$$\psi_3(x_i) = \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^3 - \frac{3n^2-7}{20} \cdot \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right).$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{S_3}{n-4}}; S_3 = S_2 - (k_3)^2 \cdot \sum (\psi_3(x_i))^2. \quad (4.19)$$

Парабола четвертого порядку може бути представлена у вигляді наступного рівняння [10]:

$$f(x)_4 = f(x)_3 + k_4 \psi_4(x), \quad (4.20)$$

де $f(x)_3$ – рівняння кубічної параболи.

Для розрахунку коефіцієнта k_4 та функції $\psi_4(x)$ використовуються наступні вирази [10]:

$$\psi_4(x) = \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^4 - \frac{3n^2-13}{14} \cdot \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^2 + \frac{3(n^2-1)(n^2-9)}{560}; k_4 = \frac{\sum y_i \cdot \psi_4(x_i)}{\sum [\psi_4(x_i)]^2}; \quad (4.21)$$

$$\psi_4(x_i) = \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^4 - \frac{3n^2-13}{14} \cdot \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^2 + \frac{3(n^2-1)(n^2-9)}{560}.$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{S_4}{n-5}}; S_4 = S_3 - (k_4)^2 \cdot \sum (\psi_4(x_i))^2. \quad (4.22)$$

Парабола п'ятого порядку може бути представлена у вигляді наступного рівняння [10]:

$$f(x)_5 = f(x)_4 + k_5 \psi_5(x), \quad (4.23)$$

де $f(x)_4$ – рівняння параболи четвертого порядку.

Для розрахунку коефіцієнта k_5 та функції $\psi_5(x)$ використовуються наступні вирази [10]:

$$\psi_5(x) = \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^5 - \frac{5(n^2-7)}{18} \cdot \left(x - \frac{n+1}{2}\right)^3 + \frac{(15n^4 - 230n^2 + 407)}{1008} \left(x - \frac{n+1}{2}\right); \quad k_5 = \frac{\sum y_i \cdot \psi_5(x_i)}{\sum [\psi_5(x_i)]^2};$$

$$\psi_5(x_i) = \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^5 - \frac{5(n^2-7)}{18} \cdot \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right)^3 + \frac{(15n^4 - 230n^2 + 407)}{1008} \left(x_i - \frac{n+1}{2}\right). \quad (4.24)$$

Для обчислювання помилки апроксимації використовується наступний вираз [10]:

$$\sigma_5 = \sqrt{\frac{S_5}{n-6}}; \quad S_5 = S_4 - (k_5)^2 \cdot \sum (\psi_5(x_i))^2. \quad (4.25)$$

Для оцінки точності апроксимації використовується рівняння (4.6).

Після того, як буде досягнута необхідна точність апроксимації, необхідно зробити зворотну заміну змінних, тобто перейти від ряду значень допоміжної змінної x до ряду значень дійсного аргументу.

Серед апроксимуючих функцій, що були розглянуті вище, найменшу помилку апроксимації експериментальної залежності твердості пружинної сталі 60С2ХА від температури її відпуску дає парабола 5-го порядку. Для подальших розрахунків рівняння параболи 5-го порядку доцільно записати у наступному виді:

$$f_5(T) = a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5, \quad (4.26)$$

де T – температура відпуску;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – коефіцієнти.

Задля того, щоб визначити шість коефіцієнтів, що входять у рівняння (4.26), слід скласти систему з 6 рівнянь. Щоб скласти таку систему рівнянь, необхідно знайти значення функції $f_5(T)$ у будь-яких 6 точках, що знаходяться в температурному інтервалі $T = 150 - 600^\circ\text{C}$. Для знаходження відповідних значень функції $f_5(T)$ було обрано наступні температури відпуску: 150°C ; 200°C ; 250°C ; 300°C ; 400°C ; 600°C .

Відповідна система лінійних рівнянь може бути записана наступним чином:

$$\begin{aligned} f_5(T_1) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot (T_1)^2 + a_3 \cdot (T_1)^3 + a_4 \cdot (T_1)^4 + a_5 \cdot (T_1)^5; \\ f_5(T_2) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_2 + a_2 \cdot (T_2)^2 + a_3 \cdot (T_2)^3 + a_4 \cdot (T_2)^4 + a_5 \cdot (T_2)^5; \\ f_5(T_3) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_3 + a_2 \cdot (T_3)^2 + a_3 \cdot (T_3)^3 + a_4 \cdot (T_3)^4 + a_5 \cdot (T_3)^5; \\ f_5(T_4) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_4 + a_2 \cdot (T_4)^2 + a_3 \cdot (T_4)^3 + a_4 \cdot (T_4)^4 + a_5 \cdot (T_4)^5; \\ f_5(T_5) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_5 + a_2 \cdot (T_5)^2 + a_3 \cdot (T_5)^3 + a_4 \cdot (T_5)^4 + a_5 \cdot (T_5)^5; \\ f_5(T_6) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_6 + a_2 \cdot (T_6)^2 + a_3 \cdot (T_6)^3 + a_4 \cdot (T_6)^4 + a_5 \cdot (T_6)^5. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для виконання розрахунків у програмному середовищі “Mathcad” систему рівнянь (4.27) записували у матричній формі. Матриця M містить числові значення параметрів, які помножуються з коефіцієнтами $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$. Матриця m містить числові значення параболічної функції $f_5(T)$. Для обчислювання коефіцієнтів a_i у програмному середовищі “Mathcad” використовується оператор “lsolve”:

$$M := \begin{bmatrix} 1 & T_1 & (T_1)^2 & (T_1)^3 & (T_1)^4 & (T_1)^5 \\ 1 & T_2 & (T_2)^2 & (T_2)^3 & (T_2)^4 & (T_2)^5 \\ 1 & T_3 & (T_3)^2 & (T_3)^3 & (T_3)^4 & (T_3)^5 \\ 1 & T_4 & (T_4)^2 & (T_4)^3 & (T_4)^4 & (T_4)^5 \\ 1 & T_5 & (T_5)^2 & (T_5)^3 & (T_5)^4 & (T_5)^5 \\ 1 & T_6 & (T_6)^2 & (T_6)^3 & (T_6)^4 & (T_6)^5 \end{bmatrix} \quad m := \begin{pmatrix} f_5(T_1) \\ f_5(T_2) \\ f_5(T_3) \\ f_5(T_4) \\ f_5(T_5) \\ f_5(T_6) \end{pmatrix}$$

$$a := \text{lsolve}(M, m)$$

$$a = \begin{pmatrix} 97.618 \\ -0.578 \\ 3.362 \times 10^{-3} \\ -8.91 \times 10^{-6} \\ 9.604 \times 10^{-9} \\ -3.282 \times 10^{-12} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} a_0 = 97.618 \\ a_1 = -0.578 \\ a_2 = 3.362 \times 10^{-3} \\ a_3 = -8.91 \times 10^{-6} \\ a_4 = 9.604 \times 10^{-9} \\ a_5 = -3.282 \times 10^{-12} \end{matrix}$$

Після підстановки числових значень коефіцієнтів a_i в рівняння (4.26) отримаємо наступну залежність твердості пружинної сталі від температури її відпуску:

$$\text{HRC} = 97,618 - 0,578 \cdot T + 3,362 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 8,91 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 9,604 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 3,282 \cdot 10^{-12} \cdot T^5.$$

Графік параболічної функції, що відображає залежність твердості пружинної сталі від температури її відпуску, представлений на рис. 4.4. Згідно цього графіку, при температурі відпуску пружинної сталі 150 - 200°C твердість сталі, порівняно із її твердістю у загартованому стані, зменшується несуттєво. Це обумовлено, у першу чергу тим, що у твердому розчині зберігається велика кількість вуглецю. У разі збільшення температури відпуску пружинної сталі спостерігається зменшення її твердості внаслідок виділення вуглецю із твердого розчину і утворення карбідів.

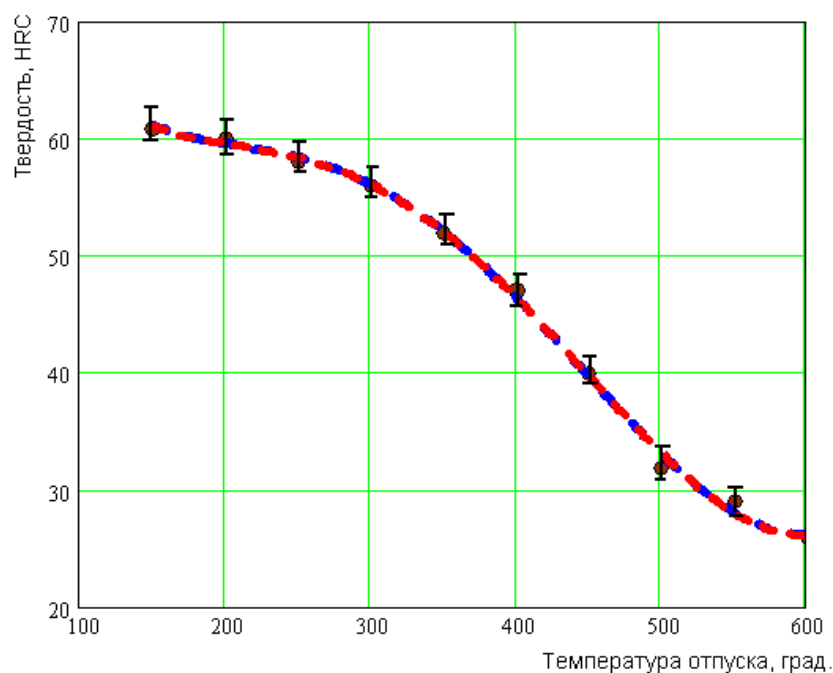


Рисунок 4.4 – Графік залежності твердості сталі 60C2XA від температури відпуску:

● - експеримент ; - - - розрахунок

Найменшу помилку апроксимації експериментальної залежності коерцитивної сили пружинної сталі 60C2XA від її твердості дає парабола 3-го порядку (рис. 4.5). Апроксимація експериментальної залежності коерцитивної сили пружинної сталі 60C2XA від її твердості показовою та експонентною функціями дає дещо більш високу помилку (рис. 4.6). Відповідні рівняння апроксимуючих функцій записуються у наступному виді:

$$H_c(\text{HRC}) = 11,507 \cdot 1,038^{\text{HRC}}. \quad (4.28)$$

$$H_c(\text{HRC}) = 11,507 \cdot e^{0,038\text{HRC}}. \quad (4.29)$$

Рівняння параболи третього порядку може бути представлене у наступному виді:

$$f_3(T) = a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3, \quad (4.30)$$

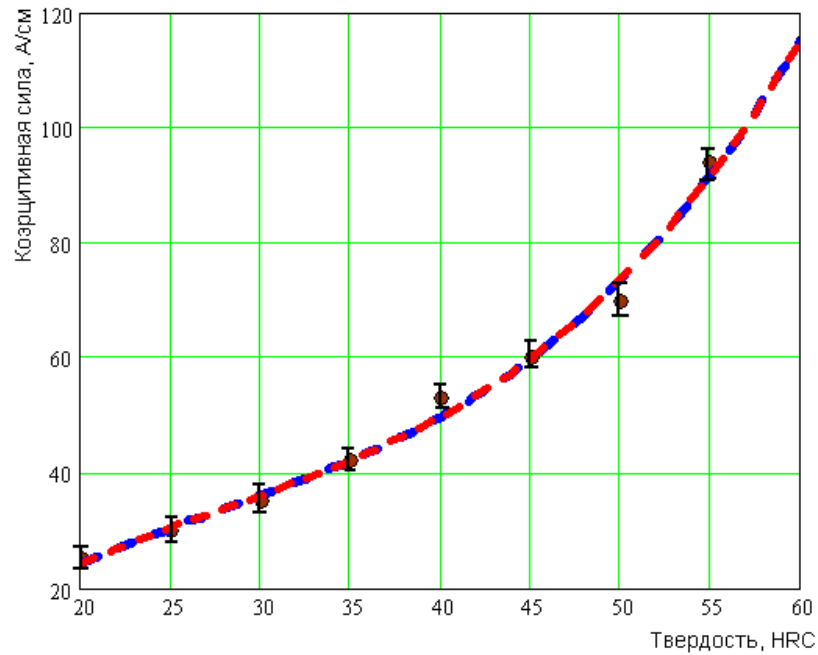


Рисунок 4.5 – Графік залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від твердості, отриманої шляхом параболічної апроксимації:

● - експеримент ; - - розрахунок

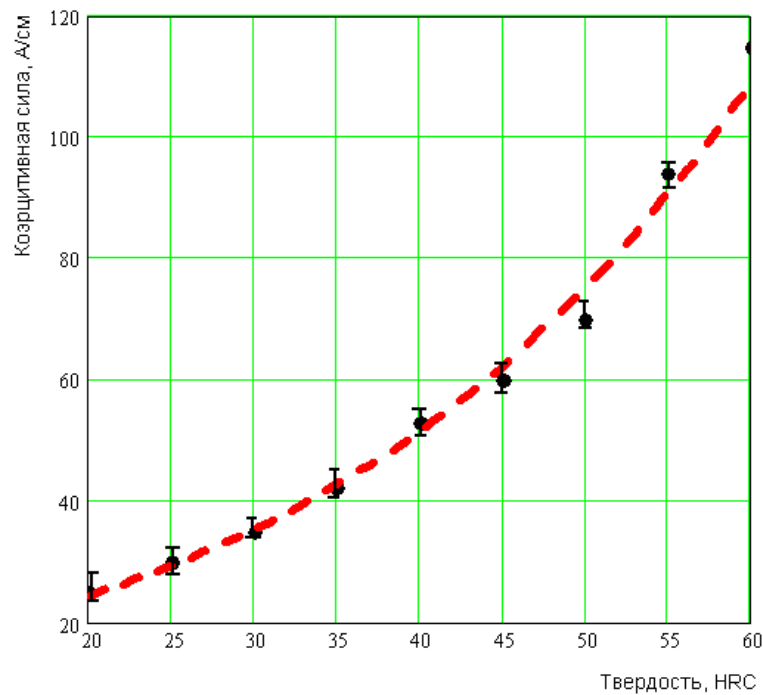


Рисунок 4.6 – Графік залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від її твердості, отриманої шляхом апроксимації по показовій та експонентній функціям:

● - експеримент ; - - розрахунок

де T – твердість по Роквелу;

a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти.

Задля того, щоб визначити чотири коефіцієнти, що входять до складу рівняння (4.30), слід скласти систему з 4-х рівнянь. Для того, щоб скласти таку систему рівнянь, необхідно знайти значення функції $f_3(T)$ у будь-яких 4-х точках, що знаходяться в діапазоні $T = 25 - 60$ HRC. Для розрахунку відповідних значень функції $f_3(T)$ було обрано наступні чотири точки: 20 HRC; 30 HRC; 40 HRC; 60 HRC. З урахуванням цього, система рівнянь може бути записана наступним чином:

$$\begin{aligned} f_3(T_1) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot (T_1)^2 + a_3 \cdot (T_1)^3; \\ f_3(T_2) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_2 + a_2 \cdot (T_2)^2 + a_3 \cdot (T_2)^3; \\ f_3(T_3) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_3 + a_2 \cdot (T_3)^2 + a_3 \cdot (T_3)^3; \\ f_3(T_4) &= a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot T_4 + a_2 \cdot (T_4)^2 + a_3 \cdot (T_4)^3. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Для проведення розрахунків у програмному середовищі “Mathcad”, вихідна система рівнянь (4.31) записувалась в матричній формі. Матриця M містить числові значення параметрів, які помножуються з коефіцієнтами a_0, a_1, a_2, a_3 . Матриця m містить відповідні значення функції $f_3(T)$. Коефіцієнти a_i розраховувались у програмному середовищі “Mathcad” Потім з використанням оператора “Isolve” згідно алгоритма, що був описаний вище.

Після підстановки числових значень коефіцієнтів a_i у рівняння (4.30) отримаємо наступну залежність коерцитивної сили пружинної сталі 60C2ХА від її твердості:

$$H_c = -24,052 + 4,052 \cdot HRC - 0,108 \cdot HRC^2 + 1,313 \cdot 10^{-3} \cdot HRC^3.$$

4.4 Структурні перетворення при відпуску

Встановлення зв'язку між магнітними та механічними властивостями сталей на пряму пов'язану зі встановленням зв'язку між магнітними властивостями та режимами термообробки сталей. Внаслідок того, що режим термообробки практично

завжди впливає як на магнітні, так і на механічні властивості конструкційних сталей, практично завжди існують кореляції між магнітними властивостями та твердістю конструкційних сталей.

У процесі гартування вуглець, що спочатку знаходиться в сталі у вигляді карбідів, переходить у твердий розчин на основі α - Fe. Аномальне розчинення вуглецю в α - залізі призводить до зміни параметру кристалічної ґратки α -заліза. Зміна параметру кристалічної ґратки α -заліза супроводжується виникненням значних мікронапружень та збільшенням коерцитивної сили сталі. Літературні джерела містять такі дані про коерцитивну силу деяких загартованих сталей: 37X2HСМ – 2400 А/см, 14X17H2 – 3600 А/см, Сталі 45 – 2160 А/см, 12X2H4А – 1840 А/см [7].

Після гартування в сталі формується метастабільна структура. У процесі нагрівання загартованої сталі збільшується дифузійна рухливість атомів вуглецю. Це створює умови для протікання процесів, які сприяють утворенню більш стабільної структури сталі. На протікання цих процесів впливають три найважливіші особливості мікроструктури загартованої сталі: надвисока концентрація вуглецю у твердого розчину на основі α - Fe; висока щільність дефектів кристалічної ґратки мартенситу (маються на увазі дислокації, а також малокутові і висококутові границі, двійниковані прошарки та наявність певної кількості залишкового аустеніту [7, 8]).

Головним процесом, що відбувається при відпуску конструкційних сталей, є розпад мартенситу. Розпад мартенситу завжди супроводжується утворенням карбідів (фактично відбувається вторинна кристалізація). Закономірності, що визначають кінетику розпаду мартенситу при його нагрівання, мають багато спільного із закономірностями, що визначають кінетику розпаду пересичених твердих розчинів при старінні (старіння використовується замість відпуску для сплавів, гартування яких не супроводжується протіканням поліморфних перетворень). Залежно від того, до якої температури нагрівається загартована сталь і якою є тривалість витримки при відпуску, розрізняють наступні стадії розпаду мартенситу: стадія передвиділення карбідів; стадія, на якій утворюються проміжні карбіди (низький відпуск з утворен-

ням метастабільних карбідів); стадія утворення карбідів цементитного типу; коагуляція карбідів цементитного типу (високий відпуск) [3, 7].

Виділення із твердого розчину карбідів цементитного типу, структура яких відповідає структурі карбідної фази, що міститься у відпаленій сталі, відбувається при температурах, що перевищують 250°C. Найбільш активне виділення карбідів цементитного типу відбувається в температурному інтервалі відпуску 300 - 400°C [3, 7].

Цементит є більш стабільною фазою. Він має меншу об'ємну вільну енергію порівняно із метастабільними проміжними карбідами. Крім того, у разі підвищення температури нагрівання при відпуску, разом із зниженням вмісту вуглецю у твердому розчині на основі α – заліза відбувається зміна міжплощинних відстаней. Причому, при зміні міжплощинних відстаней досягається краще сполучення кристалічної ґратки α - заліза саме із ґраткою цементиту, а не метастабільного ϵ - карбіду. Отже, у разі збільшення температури відпуску відбувається зародження та виділення стабільного цементиту замість проміжного карбіду за рахунок того, що стабільний цементит має меншу об'ємну вільну енергію порівняно із метастабільним проміжним карбідом [2, 7].

На основі існуючих літературних джерел можна зробити висновок про існування двох механізмів зародження стабільного цементиту у процесі відпуску загартованої сталі. По - перше, виділення цементиту відбувається безпосередньо із твердого розчину на основі α - заліза, при цьому разом із зростанням часток цементиту відбувається розчинення включень метастабільного карбіду, що утворились при більш низьких температурах відпуску. По - друге, утворення цементиту відбувається за рахунок перебудови кристалічної ґратки метастабільного карбіду в кристалічну ґратку цементиту (таке перетворення відбувається лише в межах об'єму, який займають частки метастабільного карбіду) [5, 7].

Завершальною стадією утворення карбідів при відпуску є коагуляція та сфероїдизація включень цементиту. При відносно невисоких температурах відпуску цементит, що виділяється з пересиченого твердого розчину, має форму дисперсних пластин. Пластини цементиту є напівкогерентними до металевої матриці [7]. Розмір пластин цементиту може варіюватись залежно від температури відпуску та тривалості

витримки при відпуску. Більш висока концентрація вуглецю у пересиченому твердому розчині на основі α – заліза досягається біля більш дрібних часток цементиту. Наявність цієї різниці концентрацій вуглецю між частками цементиту, що мають різні розміри, призводить до того, що вуглець дифундує з пересиченого твердого розчину від більш дрібних включень цементиту до більш крупних цементитних включень. При такому дифузійному переносі вуглецю відбувається суттєве зниження концентрації вуглецю у твердому розчині біля дрібних цементитних включень і, водночас, збагачення твердого розчину вуглецем біля крупних цементитних включень [7]. Далі відбувається повне розчинення більш дрібних цементитних включень, зменшення розмірів крупних цементитних включень з їхньою подальшою сфероїдізацією [6, 7]. При температурі відпуску нижче 350°C процеси коагуляції та сфероїдізації цементиту виражені дуже слабо. Інтенсивна коагуляція та сфероїдізація включень цементиту стає можливою лише починаючи з температури відпуску 350 - 400°C [7].

Концентрація вуглецю у пересиченому твердому розчині на основі α - заліза починає зменшуватись при перших ознаках карбідоутворення. Процес карбідоутворення інтенсифікується із зростанням температури відпуску загартованої сталі. Утворення феритної фази і наближення структури сталі до її структури у рівноважному стані суттєво зменшує коерцитивну силу відпущеної сталі. Коерцитивна сила фериту, що утворюється у процесі відпуску загартованої сталі, у 5 - 8 разів менша за коерцитивну силу мартенситу до відпуску.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ПРУЖИН

Зовнішній огляд пружини виявив наявність в неї волосоподібної тріщини. Тріщина розповсюджується на усю довжину витка пружини, причому глибина проникнення тріщини є значною (рис. 5.1). Злам пружини однозначно свідчить про втомний характер її руйнування, тобто руйнування пружини сталося не одразу, а через певний час її знаходження в експлуатації за рахунок поступового розкриття тріщини. Досліджувана пружина характеризується наявністю складного втомного зламу. Злам має дві площини, що розташовані одна до одної приблизно під прямим кутом. Наявність слідів деформаційного зміцнення (наклепу) свідчить про повільний розвиток процесу руйнування, що підтверджує припущення про те, що пружина працювала із тріщиною протягом певного часу (рис. 5.2).

Виникнення втомних зламів обумовлено тривалим впливом на метал повторно-змінних навантажень, які можуть спровокувати зародження та утворення тріщин, або розвиток тріщин, що вже містяться у металі. Процес поступового накопичення в металі макро- та мікроушкоджень під впливом циклічних навантажень з подальшим руйнуванням металу називається втомою, а властивість металу пручатись втомному руйнуванню – витривалістю.

Втомний злам характеризується наявністю певних характерних ознак. За цими ознаками втомний злам можна легко розрізнити від зламу, що утворюється при статичному навантаженні у звичайних умовах. На рис. 5.3 схематично показана схема зламу, що утворюється при втомному руйнуванні металу. На цьому зламі можна виділити дві різні зони.

Перша зона (ABC) є слідом поширення втомної тріщини. Як правило, слід поширення втомної тріщини представляє собою концентричні контури, що позначають переміщення фронту тріщини при втомному руйнуванні. Фокус цих контурів розташований у тому місці, де сталося зародження тріщини (А). Поверхня зони, що є слідом поширення втомної тріщини, є гладкою та притертою. Така форма цієї зони є наслідком деформаційного зміцнення (наклепу). Деформаційне зміцнення обумовлене періодичним натисканням двох поверхонь втомної тріщини одна на одну або

тим, що ці поверхні зсуваються одна відносно одної при зміні напрямку навантаження.

Друга зона (BC) утворюється на завершальній стадії втомного руйнування. Руйнування матеріалу у цій зоні, залежно від умов навантаження, може бути або в'язким, або крихким. Тобто, візуально злам у цій зоні може бути або волокнистим, або кристалічним.

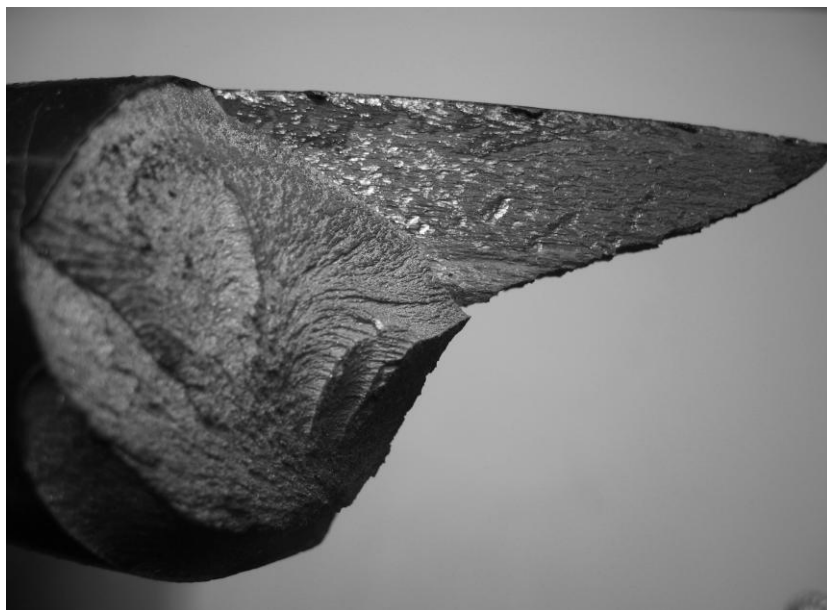


а



б

Рисунок 5.1 – Утворення зламу від волосоподібної тріщини на поверхні витка пружини: а – вид зламу; б – волосоподібна поверхнева тріщина



а



б

Рисунок 5.2 – Наклеп на поверхні втомного зламу

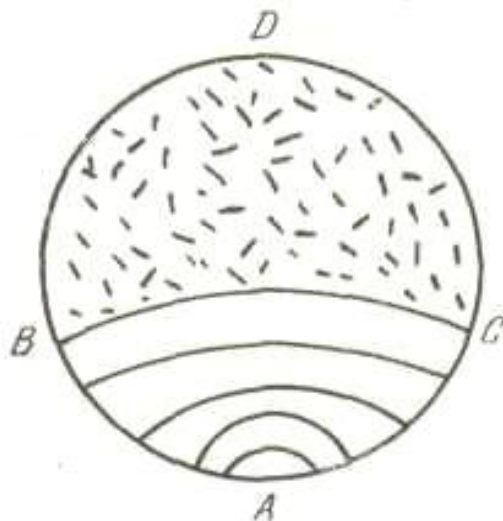


Рисунок 5.3 – Типова картина зламу у результаті втомного руйнування

На зламі досліджуваної пружини (рис. 5.4) є наявними обидві зони, що можуть утворюватись при втомному руйнуванні. На зламі чітко ідентифікується зона, в якій відбувалось поширення тріщини. Ця зона має вид концентричних контурів, що відображають положення фронту втомної тріщини по мірі її розкриття. Також досить чітко ідентифікується зона остаточного руйнування. Ця зона має волокнистий (в'язкий) злам.

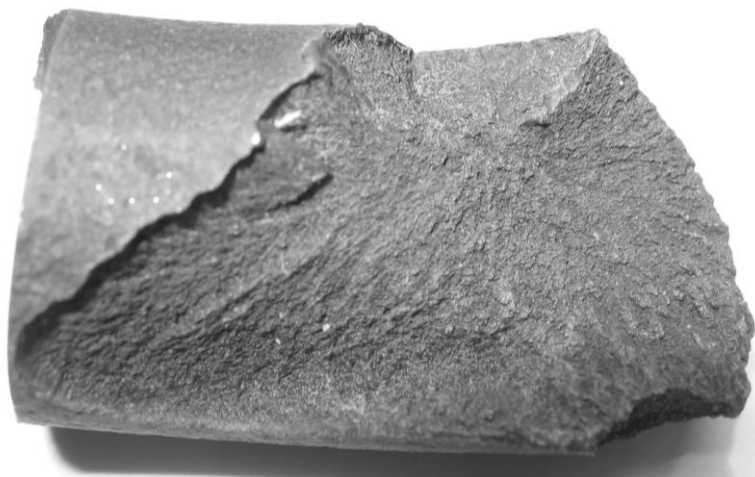
Задля того, щоб виявити причини руйнування, в лабораторних умовах був проведений металографічний аналіз зруйнованої пружини. В загалом, дослідження зруйнованої пружини включало в себе наступні етапи:

1. Контроль хімічного складу.
2. Макроаналіз на темплетях, вирізаних із зруйнованої пружини.
3. Мікроаналіз на темплетях, вирізаних із зруйнованої пружини.
4. Вимірювання твердості на темплетях, вирізаних із зруйнованої пружини.

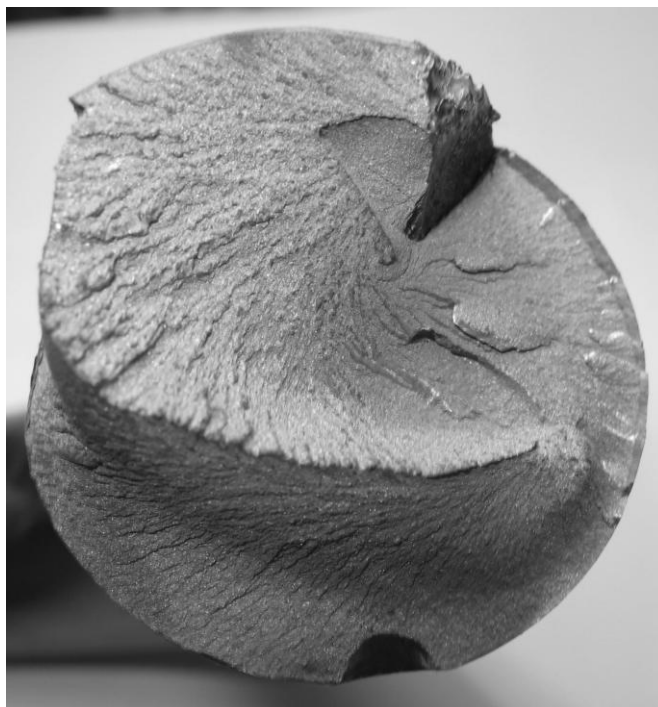
Із результатів хімічного аналізу витікає, що матеріалом пружини є сталь 60С2ХА, хімічний склад якої наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Хімічний склад матеріалу, з якого виготовлено пружину (вміст елементів вказаний у мас. %)

C	Mn	Si	S	P	Cr
0,6	0,62	1,58	<0,023	<0,014	0,99



а



б

Рисунок 5.4 – Втомні злами пружини

Макроаналіз проводився на макрошліфі, зробленому на темплеті, що був вирізаний у поперечному напрямку в місті, де знаходиться поверхнева тріщина. Травлення макрошліфа здійснювалось реактивом Гейна (53 мл NH_4Cl , 85 мл CuCl_2 на 1 л H_2O). Безпосередньо на макрошліфах вдалося виміряти глибину проникнення тріщини. Середня глибина проникнення тріщини становила 7 мм (рис. 5.5). Окрім втої тріщини, на поверхні пружини не було виявлено будь-яких інших дефектів.



Рисунок 5.5 – Вид тріщини на пружині після травлення у реактиві Гейна

Аналіз мікроструктури металу пружини до хімічного травлення показує, що в поверхневих шарах металу тріщина є рівною та тонкою. По мірі заглиблення у метал, тріщина набуває звивистої форми (рис. 5.6). По краях тріщини фіксуються оксиди. Деякі ділянки тріщини повністю заповнені оксидами. Багато дрібних оксидних включень також розташовано навколо тріщини (рис. 5.7).

Після того, як було проведене хімічне травлення мікрошліфів (для травлення використовувався 4 %-й розчин азотної кислоти в етиловому спирті), в поверхневих шарах тріщини вдалося виявити наявність знеуглецьованого шару (рис. 5.8).

Пружини має дрібногочасту та середньогочасту троосно-мартенситну структуру (структура пружини – троостит + мартенсит) (рис. 5.9).

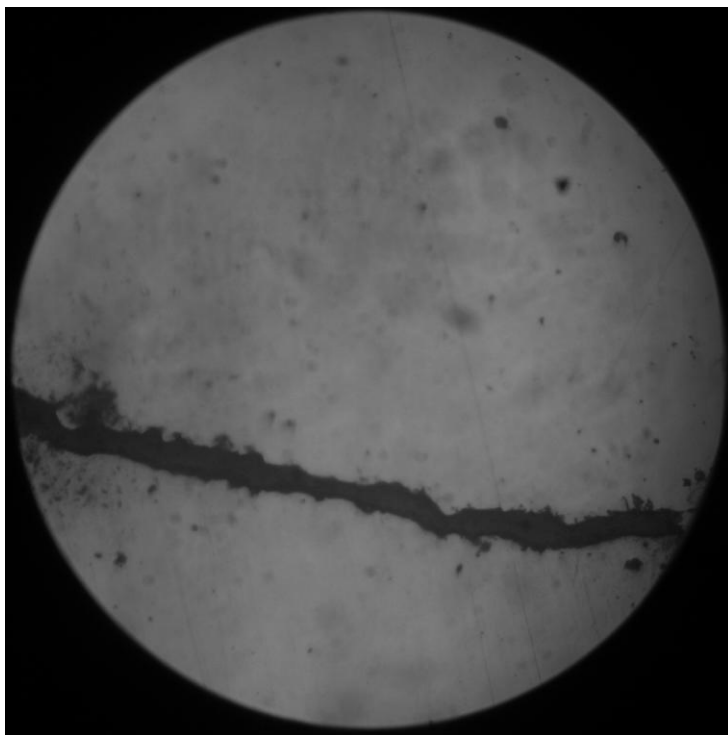


Рисунок 5.6 – Поперечний переріз пружини ($\times 250$)

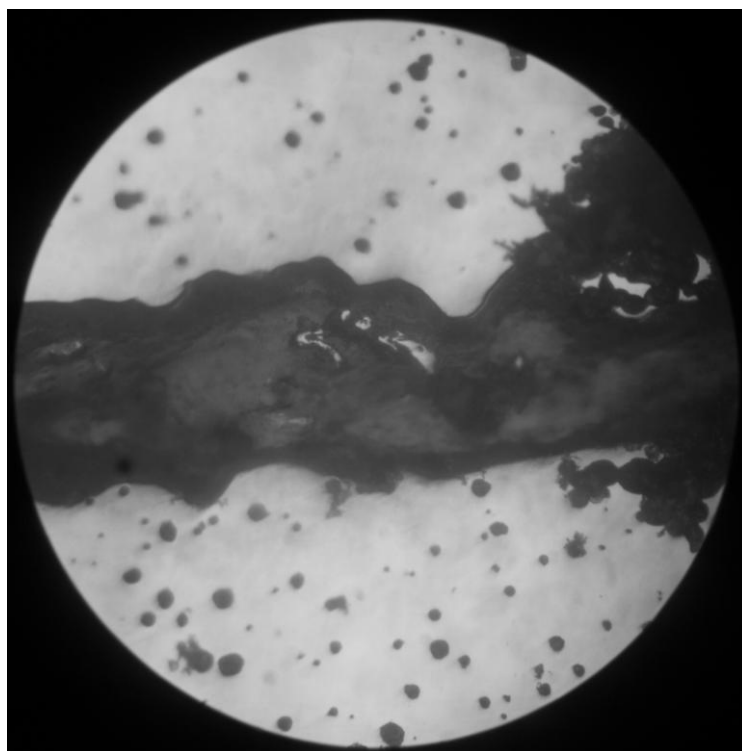


Рисунок 5.7 – Окиснення металу по краям тріщини
Оксидні включення ($\times 250$)



Рисунок 5.8 – Знеуглецьований шар по краям тріщини ($\times 250$)

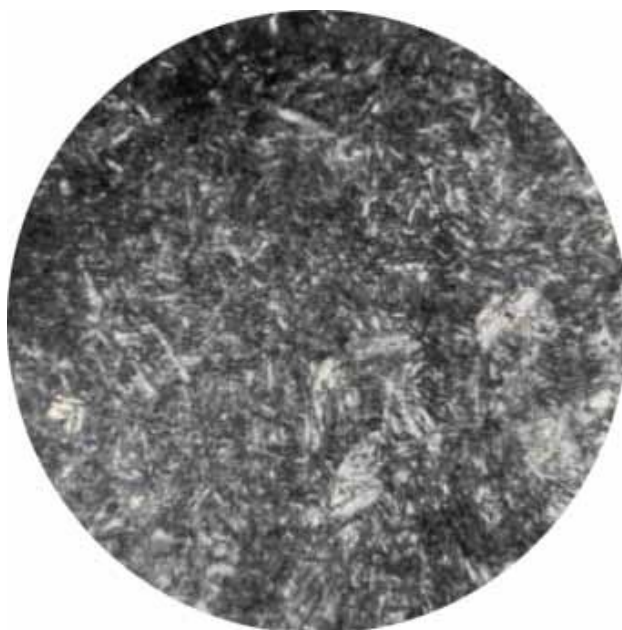


Рисунок 5.9 – Мікроструктура пружини ($\times 250$)

Твердість металу пружини визначалась за шкалою Роквела. Вимірювання твердості здійснювалось на твердомірі ТК. Зусилля навантаження на індентор, в якості якого використовувався алмазний конус, складало 1500 Н. Під час виконання вимірювань до індентора послідовно прикладались два зусилля – попереднє та остаточне. Попереднє зусилля прикладалось у ручному режимі, остаточне – в автоматичному режимі.

Твердість у поверхневих шарах пружини складає 51,5 - 53 HRC, у серцевині – 51 HRC. Твердість металу біля тріщини пружини дорівнює 49,5 - 53 HRC.

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Згідно результатів хімічного аналізу матеріалу пружини, пружина виготовлена зі сталі 60C2XA. Хімічний склад сталі відповідає ДСТУ 14959-79.

2. Твердість та мікроструктура пружини є цілком задовільними. Це свідчить про відсутність будь-яких суттєвих порушень режиму термообробки.

3. Вигляд та розташування волосоподібної тріщини, наявність оксидних включень і знеуглецьованого шару по краях волосоподібної тріщини вказують на те, що тріщина утворилась до операцій навивання та термообробки. Отже, виявлена на поверхні пружини колосовидна тріщина є металургійним дефектом.

4. Основною причиною руйнування пружини є втомне руйнування, що полягає у поступовому розвитку та розкритті волосоподібної тріщини.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено основні дефекти структури пружин зі сталі 60С2ХА, що виникають при їх термічній обробці. Встановлено, що незадовільні механічні властивості пружин обумовлені порушенням технологічних режимів гартування та відпуску.

2. Досліджено вплив температури відпуску на структурні перетворення в загартованій пружинній сталі 60С2ХА. Методом структурного магнітного аналізу встановлено взаємозв'язок між твердістю по Роквелу та коерцитивною силою сталі при різних температурах відпуску – від 100 до 600°C.

3. Математичною обробкою експериментальних даних отримано рівняння залежностей коерцитивної сили сталі від температури відпуску та твердості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Конструкционные стали / Л.А. Позняк, С.И. Тишаев, Ю.М. Скрынченко и др. – Справочник. – М.: Металлургия, 1977. – 168с.
2. Гуляев А.П. Пружинные стали. Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 272с.
3. Позняк Л.А. Конструкционные и инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1986. – 147с.
4. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Пружинные стали в машиностроении. – М.: Металлургия, 1980. – 244с.
5. Паисов И.В. Термическая обработка стали и чугуна. – М.: Металлургия, 1970. – 264с.
6. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н. Теплофизические свойства сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 592с.
7. Геллер Ю.А. Пружинные стали со специальными свойствами. Изд. 2-е. – М.: Металлургиздат, 1973. – 568с.
8. Статистические методы обработки эмпирических данных / В.А. Грешников, Б.Н. Волков, А.И. Кубарев – М.: Изд-во стандартов. – 1978. – 232с.
9. Волченко В.Н. Статистические методы управления качеством по результатам неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение. – 1976. – 64с.
10. Ноултер Л., Хауэлл Дж., Голд Б. Статистические методы контроля качества продукции. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 104с.
11. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение. – 1980. – 304с.
12. Розанов Ю.Н. Методы математической статистики в материаловедении. – Л.: Машиностроение. – 1990. – 212с.