

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Оптимізація технології виробництва пружин за рахунок впровадження у виробничий процес методики оцінювання структурного стану металу по його магнітних характеристиках»: 89 с., 10 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 60С2ХА 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 60С2ХА, а також на її механічні властивості.

У четвертому розділі встановлено взаємозв'язок між твердістю по Роквелу та коерцитивною силою сталі 60С2ХА, відпущеною при температурах від 100 до 600°C після гартування у маслі.

У п'ятому розділі досліджено основні дефекти структури пружин із сталі 60С2ХА.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП.....	5
1 Аналіз впливу структури пружин на їхні властивості .....	6
1.1 Класифікація пружин.....	6
1.2 Пружинні сталі.....	8
1.3 Методи одержання циліндричних пружин.....	17
2 Матеріали, задачі і методи дослідження.....	28
3 Дослідження властивостей і структури пружин електровоза зі сталі 60С2ХА.....	35
3.1 Випробування пружин на залишкову деформацію.....	35
3.2 Дослідження якості термічної обробки пружин.....	39
4 Дослідження впливу температури відпуску на структурні перетворення ме- тодом магнітного аналізу.....	47
4.1 Магнітний аналіз для контролю властивостей і структури.....	47
4.2 Визначення коерцитивної сили та твердості сталі залежно від тем- ператури відпуску.....	49
4.3 Знаходження функціональної залежності коерцитивної сили від твердості.....	55
4.4 Структурні перетворення при відпуску.....	68
5 Дослідження причин руйнування пружин.....	71
6 Охорона праці .....	80
Висновки.....	87
Перелік джерел посилання.....	88

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

H – мікротвердість, МПа.

HВ – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

$\delta$  – відносне подовження, %.

$\sigma_m$  – межа текучості, МПа.

$\sigma_\delta$  – межа міцності, МПа.

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

$\sigma_{-1}$  – границя втоми, МПа.

$\psi$  – відносне звуження, %.

$\mu$  – коефіцієнт Пуасона.

H<sub>c</sub> – коерцитивна сила.

f – деформація пружини при стисненні на гідравлічному пресі.

## ВСТУП

Пружинні сталі – один з найважливіших класів конструкційних металевих матеріалів, які залежно від призначення та умов служби пружних елементів повинні мати досить різноманітні властивості. Насамперед, вони повинні мати певні стандартні для всіх конструкційних сплавів механічні властивості, тобто міцність в умовах статичного, циклічного або динамічного навантаження, пластичність і в'язкість, а також спеціальні механічні властивості і, в першу чергу, високий опір малим пластичним деформаціям в умовах статичного або циклічного навантаження при різних температурах. Крім того, у багатьох випадках пружинні сталі повинні бути сплавами з особливими фізико-хімічними властивостями – корозійностійкими, немагнітними або феромагнітними, з низькою або високою електропровідністю, із заданим коефіцієнтом температурного розширення, з низьким температурним коефіцієнтом модуля пружності.



# 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ПРУЖИН НА ЇХНІ ВЛАСТИВОСТІ

## 1.1 Класифікація пружин

Пружини широко застосовуються у конструкціях в якості віброізолюючих, амортизуючих, зворотно - подавальних, натяжних, динамометричних та інших пристроїв.

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

За видом навантаження розрізняють [1, 2]:

1) пружини стиснення, що сприймають поздовжньо - осьове стискаюче навантаження;

2) пружини розтягування, що сприймають поздовжньо - осьове навантаження розтягування;

3) пружини крутіння, що сприймають навантаження, яке зводиться до пар сил, що діють у площинах, перпендикулярних вісі пружини;

4) пружини, що сприймають комбіновані навантаження (рис. 1.1).

Конструкція пружини вибирається відповідно до виду та величини діючого навантаження:

Пружини стиснення виготовляють із підтисненими по кінцях витками і з ретельно обробленими торцевими поверхнями. Циліндричні гвинтові пружини стиснення виготовляють відкритою навивкою із просвітами між витками, які повинні на 10 - 20 % перевищувати осьові пружні переміщення кожного витка при найбільшому зовнішньому навантаженні.

Пружини розтягування виготовляють, як правило, закритою навивкою. При цьому витки щільно притиснуті один до одного, внаслідок чого створюється попередня сила натягування пружини. Для передачі зовнішнього навантаження такі пружини виготовляють з зачепами. Наприклад, для пружин малого діаметру (3 - 4 мм) зачепи виконують у формі відігнутих останніх витків. Однак такі зачепи знижують опір пружин втомному руйнуванню через високу концентрацію напруг у місцях від-

гину. Для відповідальних пружин діаметром понад 4 мм часто застосовують заставні зачепи, хоча вони менш технологічні.

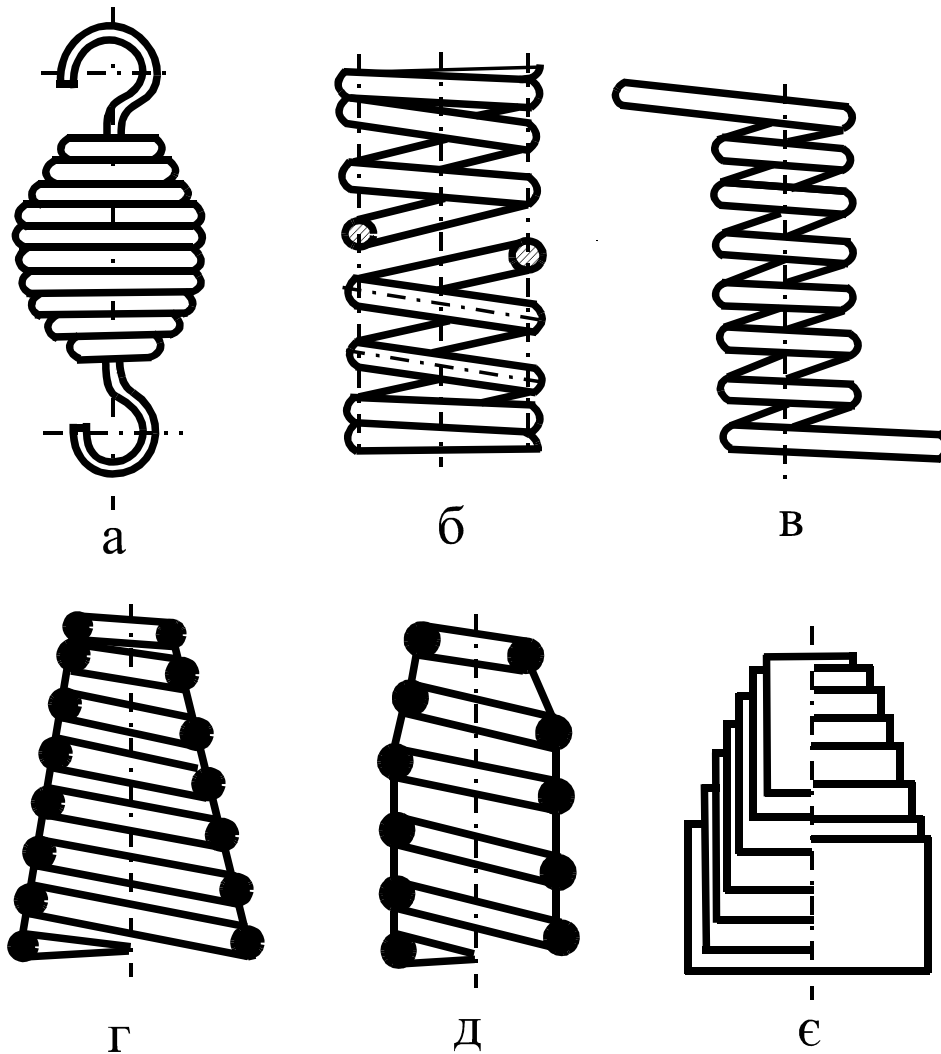


Рисунок 1.1 – Виті пружини (циліндричні розтягування – а; стиснення – б; крутіння – в; фасонні стиснення – г - є)

Пружини крутіння навивають зазвичай з малим кутом підйому і невеликими зазорами між витками (0,5 мм). Зовнішнє навантаження вони сприймають за допомогою зачепів, утворених відгином кінцевих витків [3].

Пружини як пружні елементи конструкцій можуть бути розбиті на наступні групи [4]:

1) пружини статичної дії; до них відносяться в основному пружини запобіжних пристроїв;

2) пружини обмежено кратної динамічної дії; до цієї групи відносяться операційні пружини у машинах-знаряддях, пружини зброї та ін.; цю групу пружин можна розділити на дві підгрупи - пружини, що працюють при змінних навантаженнях, які прикладені плавно, або імпульсних навантаженнях із кратністю 50000-100000 циклів, і пружини, що працюють при різко виражених ударних навантаженнях;

3) пружини багаторазової та необмежено кратної дії, наприклад клапанні пружини двигунів внутрішнього згорання.

Пружини всіх зазначених видів можуть бути звиті зі сталевого пружинного дроту та сортової пружинної сталі круглого, прямокутного і трапецеїдального перетинів.

## 1.2 Пружинні сталі

Для виготовлення пружин, пружних елементів, пружинних деталей приладів і механізмів, а також ресор різного типу призначені пружинні сталі.

Пружинні сталі – один з найважливіших класів конструкційних металевих матеріалів, які залежно від призначення та умов служби пружних елементів повинні мати досить різноманітні властивості. Насамперед, вони повинні мати певні стандартні для всіх конструкційних сплавів механічні властивості, тобто міцність в умовах статичного, циклічного або динамічного навантаження, пластичність і в'язкість, а також спеціальні механічні властивості і, в першу чергу, високий опір малим пластичним деформаціям в умовах статичного або циклічного навантаження при різних температурах. Крім того, у багатьох випадках пружинні сталі повинні бути сплавами з особливими фізико-хімічними властивостями – корозійностійкими, немагнітними або феромагнітними, з низькою або високою електропровідністю, із заданим коефіцієнтом температурного розширення, з низьким температурним коефіцієнтом модуля пружності [5, 6].

Пружинні сталі, нарешті, повинні задовольняти певним вимогам по технологічним властивостям – без цього не можна виготовити пружні елементи заданої конфігурації та одержати комплекс високих фізико-механічних властивостей. Тому сталі повинні мати хорошу пластичність, глибоку прожарюваність, малу схильність до

росту зерна та окислювання у процесі термічної обробки, а в деяких випадках також добре зварюватись та оброблятись різанням.

Опір мікропластичній або малій пластичній деформації – найважливіша характеристика якості пружинних сталей, тому що чим вище цей опір, тим менше при даній прикладеній напрузі непружні та залишкові деформації і, отже, нижчі усі непружні ефекти, які визначають властивості пружних елементів [7].

Як показують експерименти, для одержання високого опору малим пластичним деформаціям сталі повинні мати певні мікроструктуру і субструктуру [5, 7]. Мета різних методів обробки – забезпечення такого структурного стану сталі, при якому мікроструктура є дрібнозернистою, практично усі дислокації при досить високій їхній щільності розподілені рівномірно та міцно заблоковані. Таким чином, методи зміцнювальної обробки сталей відносно їх впливу на структурний стан мають безсумнівну спільність.

Основними матеріалами для пружин є високоміцний спеціальний дріт 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.

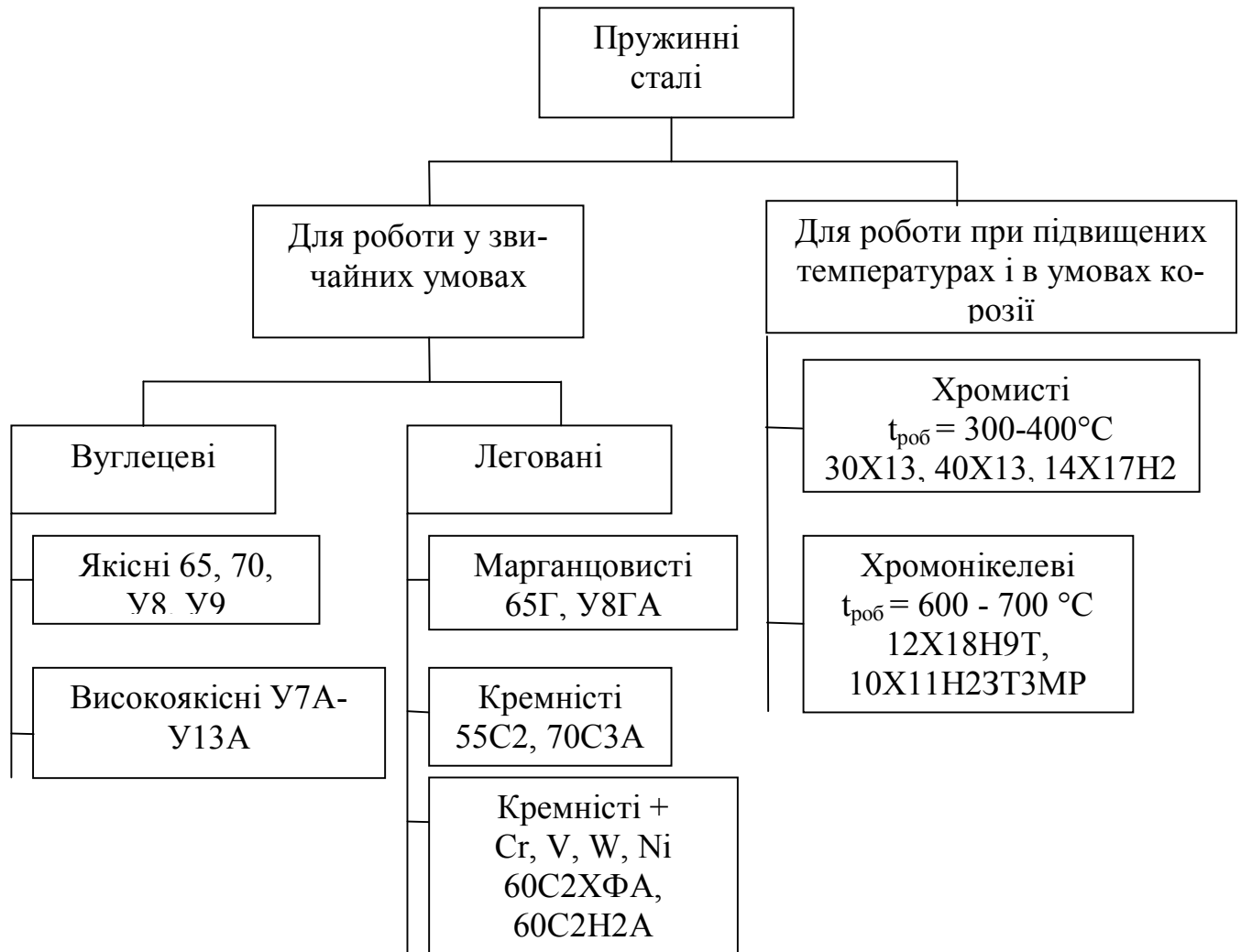


Рисунок 1.2 – Класифікація пружинних сталей [5]

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

Патентований вуглецевий дріт 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.

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 (55С2, 60С2, 60С2А, 70С3А). 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  $\alpha$  - фази. Коли при відпуску відбудеться розпад залишкового аустеніту, карбіди вже будуть досить великими, а структура  $\alpha$  - фази – частково ре кристалізованою [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 дефо-

рмачії фериту у порівнянні зі сталлю без кремнію. Систематичні дослідження впливу кремнію, які виконані І.В. Паісовим і В.С. Томсинським, показали, що при невеликих концентраціях (~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.

Межа пружності, МПа

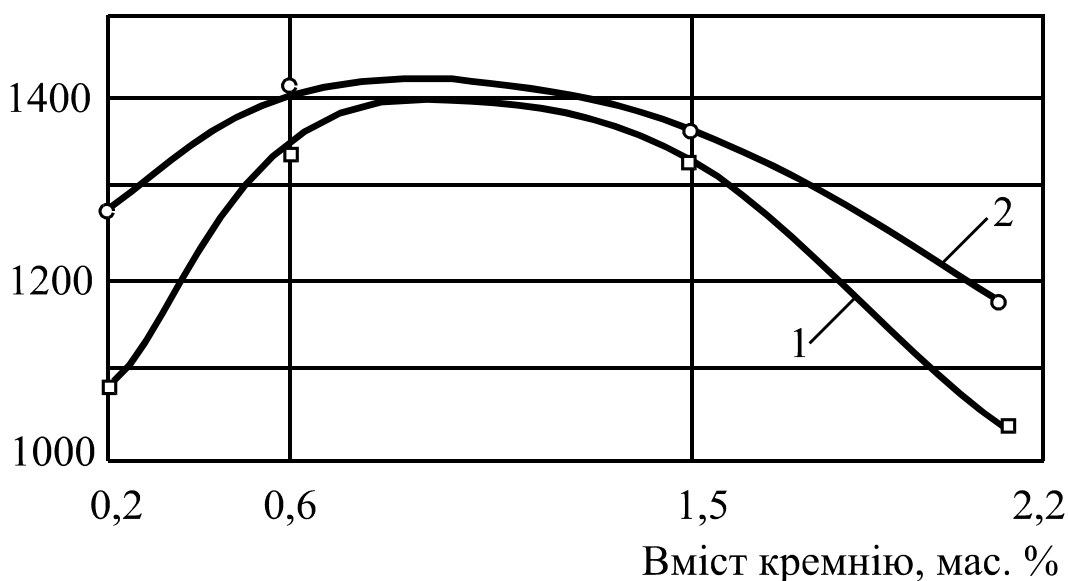


Рисунок 1.3 – Залежність межі пружності від вмісту кремнію у сталі після гартування та відпуску при 300°C протягом 1 години  
(І.В. Паісов, В.С. Томсинський) [5]: 1 – 0,4 % С; 2 – 0,6 % С

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 під-

вищує її механічні характеристики – межу пружності, межу текучості, межу міцності та ударну в'язкість. Хороша прожарюваність дозволяє застосовувати для навивки прутки діаметром до 25 мм.

Сталь 60С2ХА має кращі технологічні властивості, ніж сталь 60С2А. Вона характеризується більш високою стійкістю переохолодженого аустеніту, ніж сталь 60С2А (рис. 1.4), а звідси і більш високою прожарюваністю. Так, якщо критичний діаметр сталі 60С2А при гартуванні від 880°С у воді дорівнює 31 мм, у маслі – 20 мм, то для сталі 60С2ХА він відповідно дорівнює 58 і 44 мм [7].

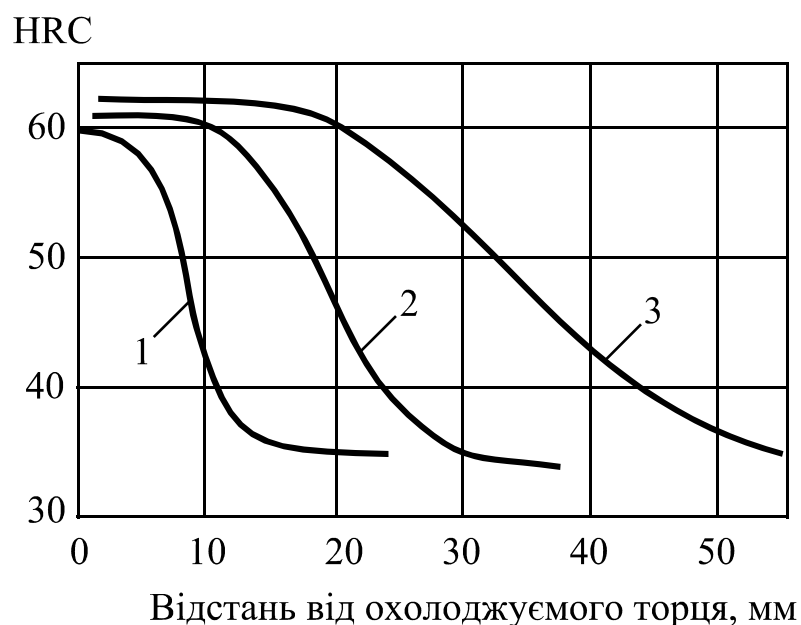


Рисунок 1.4 – Криві прожарювання кремністих сталей (М.Ю. Ейфер) [7]: температура аустенізації 880°С;

1 – сталь 60С2А; 2 – сталь 60С2ХА; 3 – сталь 60С2ХФА

Введення хрому також зменшує швидкість росту зерна. Його величина, починаючи від температур 900°С, приблизно на 1 бал менше, ніж у сталі 60С2А. 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°С протягом 30 хв. становить 0,24 мм для сталі 60С2А, 0,2 мм для сталі 60С2ХА і 0,12 мм для сталі 60С2ХФА [7].



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 60С2ХА, як і у сталі 55С2, 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).

Межа витривалості, МПа

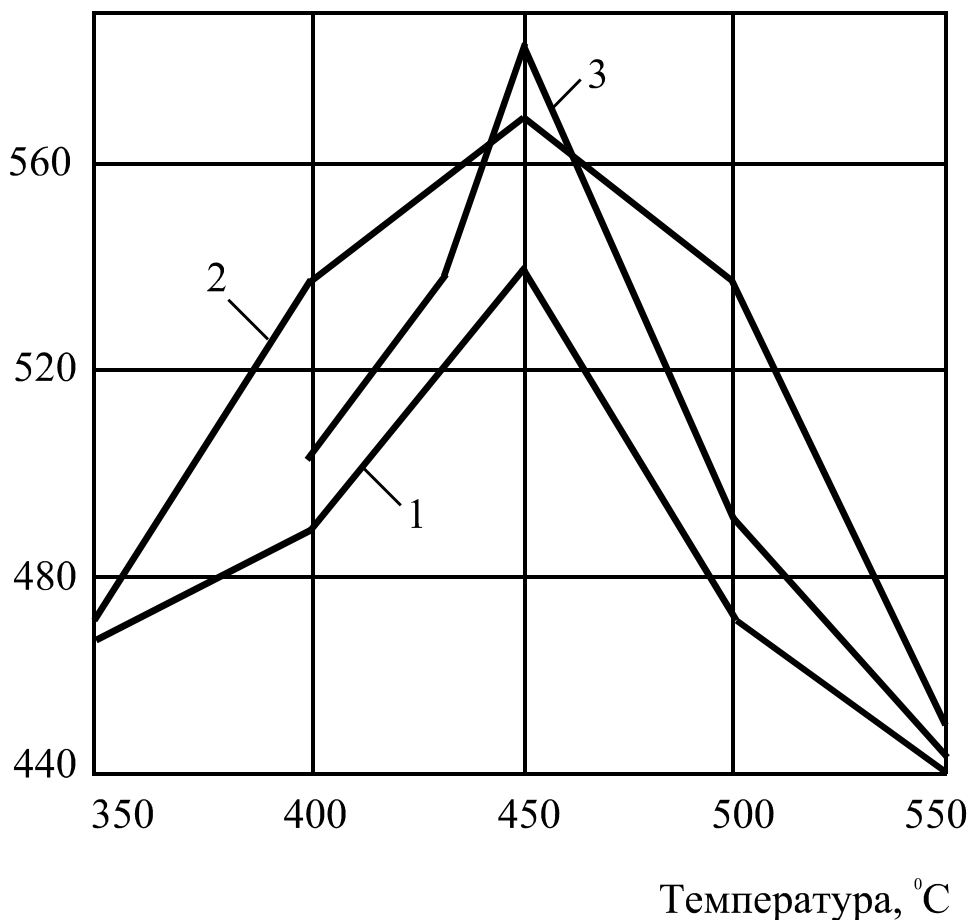


Рисунок 1.5 – Залежність межі витривалості сталей від температури відпуску (М.Ю. Ейфер) [7]: 1 – сталь 60С2А, 2 – сталь 60С2ХА, 3 – сталь 60С2ХФА

У виробництві пружин застосовують сталь 55ГС із 0,5 - 0,8 % Si і 0,6 - 0,9 % Mn і сталі 55С2, 60С2 та 60С2А, які містять 1,3 - 1,8 % Si і 0,8 - 1,0 % Mn [1].

Для одержання оптимальних властивостей кремністомарганцевистих пружинних сталей доцільним є різне співвідношення кількості кремнію і марганцю. Менший 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 пружинних властивостей, більшою стійкістю аустеніту до переохолодження і тому кращою прожарюваністю, дрібнозернистістю і стійкістю проти відпуску. Вольфрамокремніста сталь застосо-

вується для виробництва пружин, які працюють при динамічному навантаженні і підвищеній температурі (до 250°C) [1, 2].

Хромомарганцовисті сталі (50ХГ, 50ХГА) і особливо хромомарганцовованадієві 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].

На підставі комплексного дослідження великої групи пружинних сталей встановлено, що властивості цих сталей більшою мірою залежать від відносно невеликих коливань вмісту в них вуглецю. При вмісті вуглецю вище 0,64 % ударна в'язкість і релаксаційна стійкість сталей різко знижуються, однак при вмісті вуглецю нижче 0,54 % і при значному підвищенні в'язкості знижуються пружні властивості сталей.

У результаті проведеного пошуку оптимального співвідношення легуючих компонентів і на підставі порівняльних випробувань механічних властивостей пружинних сталей різних марок з'ясувалося, що сталь 60С2ХА містить оптимальну кількість вуглецю і легуючих елементів. Ця сталь має більш високі межі пружності і витривалості, підвищені релаксаційну стійкість і тривалу міцність у порівнянні зі сталями 60С2 і 55С2 (табл. 1.1, 1.2) [1].

Таблиця 1.1 – Механічні властивості пружинних сталей після гартування у маслі та відпуску при 350 - 550°C

Марка сталі	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
65	1000	1300	5	20
65Г	1420	1550	8,6	39
55С2	1200	1300	6	30
60С2	1050	1400	5	25
50ХФА	1540	1620	8,5	40
70С2ХА	1450	1600	7	30
60С2ХА	1830	1980	7,5	38,2
60С2ХФА	1810	1900	8,1	32,0

### 1.3 Методи одержання циліндричних пружин

По технологічним процесам виготовлення гвинтові циліндричні пружини можна розбити на дві групи – пружини холодної і гарячої навивки. Кожна з цих груп включає пружини стискання, розтягування та крутіння, які також мають деякі особливості у технології виготовлення.

Ресорно-пружинна сталь поставляється у гарячекатаному і холоднотягнутому стані. Холоднотягнена сталь застосовується для виготовлення пружин, які навиваються у холодному стані і не піддають гартуванню. Для виготовлення пружин, які піддають гартуванню, використовується гарячекатана сталь.

Макроструктура сталі у зламах і на протравлених поперечних темплетях (відрізаних з готових прутків) не повинна мати рихлості, порожнеч, тріщин, розшарувань, газових міхурів і шлакових включень [3]. Умови роботи пружин визначають підвищені вимоги до якості прокату. На поверхні прутків не повинно бути тріщин, закатів, волосовин, раковин, втисненої окалини і розшарувань. Місцеві дефекти припустимо видаляти шліфуванням у межах припустимих найменших розмірів поперечного перетину прокату [3].

Таблиця 1.2 – Хімічний склад пружинних сталей (%)

Марка сталі	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Орієнтовне призначення
65	0,62-0,70	0,50-0,80	0,17-0,37	≤0,25	≤0,25	<0,04	<0,04	Пружини механізмів і машин
65Г	0,62-0,70	0,90-1,20	0,17-0,37	≤0,25	≤0,25	<0,04	<0,04	
55С2	0,52-0,60	0,60-0,90	1,50-2,0	≤0,30	≤0,25	<0,04	<0,04	Ресори автомобілів. Пружини рухомого складу з/д транспорту
60С2	0,57-0,65	0,60-0,90	1,50-2,0	≤0,30	≤0,25	<0,04	<0,04	
50ХФА	0,46-0,54	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10	≤0,25	<0,03	<0,035	Пружини особливо відповідального призначення. Ресори легкових автомобілів
70С2ХА	0,65-0,75	0,4-0,6	1,40-1,70	0,2-0,4	-	<0,03	<0,03	Пружини годинникових механізмів
60С2ХА	0,56-0,64	0,40-0,70	1,40-1,80	0,70-1,00	≤0,25	<0,03	<0,035	Великі пружини відповідального призначення
60С2ХФА	0,56-0,64	0,40-0,70	1,40-1,80	0,90-1,20	≤0,25	<0,03	<0,035	

Дріт, який поступає для навивання пружин, не повинен бути хвилястим, сплутаним або перекрученим. При навиванні пружин на автоматах дріт правиться спеціальним правильним пристроєм автомата [3]. Перед навиванням пружин на верстатах і у спеціальних пристосуваннях дріт в разі необхідності правлять на рихтувально - відрізнному верстаті пропущенням його через порожній циліндр, затиснутий в оберттовому патроні токарського верстата. Заготовки для пружин, що навивають методом

холодної навивки на верстатах, нарізають ножицями. Поверхня зрізу прутка повинна бути рівна, без зминання країв. Зім'ятий метал при відтягуванні кінців може закатуватись, що призводить до появи тріщин у готовій пружині після гартування [3].

Існують два способи холодної навивки – безоправна навивка (за допомогою роликів і спеціальних завивателів) і навивка на оправку [4].

При серійному і масовому виробництві циліндричних гвинтових пружин із дроту діаметром від 0,2 до 12 мм застосовують спеціалізовані пружинонавивальні автомати, що працюють за принципом безоправної навивки або навивки на оправку [4].

Більшість конструкцій пружинонавивальних автоматів включає механізми для виправлення дроту, подачі його до навивального пристрою, навивання пружин (із щільним притиском витків або з необхідним кроком витків), а також механізм для різання і загинання кінцевих кріплень [4].

При оправній навивці циліндричних гвинтових пружин необхідно попередньо визначити діаметр оправки. Діаметр пружини трохи збільшується після холодної навивки внаслідок пружних деформацій дроту, а потім перетерплює усадку після термічної обробки.

Якість пружин (точність по діаметру та кроку) залежить також від напрямку навивки і від натягу, з яким навивається дріт. Напрямок і ступінь натягу дроту встановлюють після визначення діаметра оправки.

Для підвищення стабільності розмірів і характеристик пружності при тривалій експлуатації пружин у процесі виготовлення їх піддають термічній обробці, осадці шляхом обтиснення і заневолюванню, а в деяких випадках і випробуванням на витривалість. При цьому крок пружин трохи зменшується, що слід враховувати при навивці [5, 7].

Перед гарячою навивкою заготовку нагрівають до температури 800 - 1000°C. Температура нагрівання залежить від марки сталі і технологічного процесу навивки. Вона повинна забезпечити рівномірний прогрів заготовки по всьому перетину [2].

Для нагрівання прутків застосовують муфельні або полум'яні печі, а також установки для контактного та індукційного нагрівання електричним струмом [7]. У

порівнянні з нагріванням у полум'яних печах електроконтактне нагрівання має ряд переваг: менша глибина знеуглецьованого шару, невеликі габарити установок, простота в експлуатації та високий коефіцієнт корисної дії установок.

Установки для контактного нагрівання прутків електричним струмом методом опору працюють при малих напругах і великих силах струму [7].

У масовому виробництві великих пружин можна застосовувати більш потужні установки для електроконтактного нагрівання. Наприклад, на автоматичній лінії виготовлення залізничних пружин впроваджена електроконтактна установка, що має три нагрівальні позиції, з'єднані із вторинними обмотками трьох силових трансформаторів. Первинні обмотки трансформаторів з'єднані за схемою «трикутник» [7].

В установці нагріваються одночасно три заготовки; кожна заготовка нагрівається послідовно на кожній із трьох позицій. Для компенсації теплового подовження заготовок у процесі нагрівання на всіх трьох нагрівальних позиціях передбачені пневматичні компенсатори. Температура нагрівання заготовки контролюється на третій нагрівальній позиції фотопірометром, який при досягненні заданої температури дає команду на відключення напруги, звільнення заготовок і переміщення їх автоматичним пневмотранспортером на наступні позиції. Нагріта заготовка подається на навивальний верстат, а на її місце надходить нова заготовка [7].

Конструкція електроконтактної установки забезпечує просте переналагодження на інший типорозмір пружинної заготовки.

Великі пружини можна навивати на звичайному токарсько - гвинторізному або на спеціальному навивальному верстатах. При навивці на токарському верстаті застосовують оправки, які встановлюються у патроні шпинделя з опорою в центрі задньої бабки. Нагрітий пруток пропускають через напрямне пристосування поздовжнього супорту і закріплюють одним кінцем на оправці. Заданий крок між витками пружини отримують за допомогою гітарного механізму і ходового гвинта верстата [7].

Токарські верстати, котрі спеціально пристосовані для навивки пружин, мають знімний пристрій, що забезпечує: швидке затискання кінця заготовки при навивці і звільнення його після навивки; рівномірний крок усіх витків і підтискання опорних

витків; вільне знімання готової пружини з оправки. Поруч із верстатом може бути встановлена газова піч для нагрівання заготовок.

У крупносерійному і масовому виробництві застосовують спеціальні верстати і верстати - автомати для навивання пружин з мірних прутків у гарячому стані.

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 стали, піддають термічній обробці – гартуванню та відпуску. Пружини з патентованого вуглецевого дроту, що має сорбітну структуру, піддають тільки відпуску. Для пружинних сталей температура нагрівання при гартуванні визначається положенням критичних точок  $A_{c1}$  -  $A_{c3}$ . Вуглецеві сталі нагрівають на 30 - 40°C вище критичної точки  $A_{c3}$ . Нагрівання при гартуванні проводять із перевищенням верхньої критичної точки для скорочення тривалості витримки. Витримка призначається з таким розрахунком, щоб деталь не перегрівалась, але щоб температура сталі встигла вирівнятись, структурні перетворення встигли завершитись повністю по всьому перетину деталі і щоб у той же час не викликати значного зростання зерна [2, 7].

Велике значення для якості металу має середовище, в якому відбувається нагрівання. Внаслідок хімічного впливу навколишнього середовища на поверхні деталі можливо утворення знеуглецьованого поверхневого шару, а також окислювання поверхні [2, 7].

Утворення знеуглецьованого поверхневого шару і окислювання є процесами дифузійними, які прискорюються з підвищенням температури нагрівання. При температурі нижче 500°C окалина на поверхні заготівлі не утворюється [7].

При гартуванні необхідно швидке охолодження, але не у всьому інтервалі від температури нагрівання до кімнатної температури, а лише в межах 650 - 400°C, де аустеніт найменш стійкий. Нижче 650 - 400°C знову починається зона підвищеної



стійкості аустеніту і тому подальше охолодження може бути повільним; особливо це важливо в температурному інтервалі утворення мартенситу (200 - 300°C) [6, 7].

Найбільш розповсюдженими охолоджувальними середовищами є проточна вода, мінеральні масла та водні емульсії. У практиці термічної обробки пружин відповідального призначення у ряді випадків застосовується обробка пружин холодом (охолодження до -70 - 80°C) після гартування, що різко знижує вміст залишкового аустеніту [5, 7].

Для зняття значних внутрішніх напруг, які виникають у процесі гартування внаслідок неоднорідності охолодження і неоднорідності перетворення аустеніту на мартенсит по об'єму деталі, застосовується відпуск.

Пружини нагрівають під гартування після заправлення кінців, правки по кроку і висоті. Висока якість термічної обробки пружин забезпечується за умови однорідності нагрівання і охолодження. Для запобігання деформацій пружин при гартуванні застосовують різні пристосування у вигляді стрижнів або склянок (рис. 1.6) [7]. Для нагрівання пружин застосовують камерні і муфельні пічі. Нагрівальні пічі працюють на газоподібному паливі або на електроенергії. Найбільше поширення мають газові і електричні пічі.

Конструкції сучасних газових камерних пічей орієнтовані переважно на радіаційне нагрівання заготовок. Робочі камери пічей заповнюються контрольованою відновною атмосферою. При радіаційному нагріванні випромінювання тепла відбувається через стінки жаротривких труб, у яких відбувається згоряння газоподібного палива.

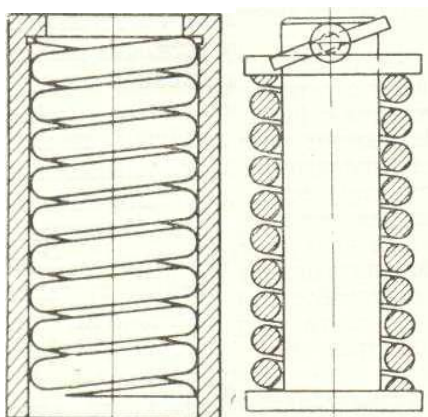


Рисунок 1.6 – Пристосування, які застосовуються при гартуванні пружин стиснення

Термічна обробка може забезпечити оптимальні властивості деталей тільки у тому випадку, якщо при нагріванні взаємодія поверхні металу з навколишньою атмосферою строго обмежена.

Хімічний склад атмосфери для запобігання окислюванню і вигорянню вуглецю у поверхневих шарах деталі залежить від температури, тривалості витримки при нагріванні і хімічного складу сталі. Чим вище вміст вуглецю у сталі, тим нижче повинен бути вміст вуглекислого газу, щоб перешкодити вигорянню вуглецю і утворенню в деталі знеуглецьованого шару. Припустимий вміст вуглекислого газу у захисному середовищі збільшується із зниженням температури обробки.

Контрольована атмосфера виготовляється в окремих установках і подається у робочий простір пічі. Хімічний склад атмосфери регулюється у вузьких межах; особливо ретельно контролюється вміст кисню, вуглекислоти, парів води та аміаку.

Для безоxygenного нагрівання до  $1000^{\circ}\text{C}$  застосовують атмосфери, які утворюються при частковому спалюванні вуглеводних газів за умови, що відношення  $\text{CO}_2/\text{CO}$  у цих атмосферах не перевищує 0,4, а відношення  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$  – не перевищує 0,7. Добре захищають від окислювання також інертні гази (аргон, гелій, азот), відновні гази (водень) і продукти дисоціації аміаку [2].

Електричні пічі застосовують із відкритими нагрівальними елементами, з елементами, встановленими у радіаційні труби або розташованими у поглибленнях внутрішнього шамотного облицювання стінок і під подовою плитою пічі. Елементи опору електричних печей виготовляють із жаростійких хромонікелевих сплавів (ніхрому) у вигляді дротової спіралі або стрічки [2].

Велике поширення одержали методи електроконтактного нагрівання пружин під гартування, а також методи індукційного нагрівання струмами високої частоти.

Електроконтактному нагріванню піддають пружини з діаметром прутка від 12 до 60 мм. Гартування у ряді випадків проводиться безпосередньо після навивання пружин гарячим дротом без проміжного нагрівання. Індукційне нагрівання струмами високої частоти застосовують як для поверхневої, так і для наскрізної термічної обробки пружин, які піддають гартуванню [7].

Після виготовлення пружини необхідно обжати до дотику витків. Тому після термічної обробки і очищення пружини піддають 3 - 5 - кратному навантаженню для попередньої осадки і стабілізації положення кінцевих витків. Пружини стиснення навантажують до дотику витків; пружини розтягування піддають розтягуванню до розрахункового робочого ходу плюс 5 %; пружини крутіння закручують на робочий кут плюс 5 % [7]. Таке попереднє навантаження пружин, пов'язане з деякою пластичною деформацією, призводить до зміцнення металу і перешкоджає розвитку пластичних деформацій при подальшому робочому навантаженні.

Проведення попередньої осадки пружин дозволяє судити про якість термічної обробки і сприяє виявленню дефектів матеріалу (тріщин, волосовин тощо) [5]. При правильно проведених процесах формоутворення і термічної обробки пружини після попереднього навантаження (осадки) повинні мати розміри в межах допусків, встановлених кресленням. Пружини, розміри яких вийшли за межі допустимих розмірів, направляють на виправлення або остаточно забраковують.

Осадку пружин здійснюють у спеціальних пристосуваннях вручну або під пресом. У масовому виробництві застосовують напівавтомати, автомати та автоматичні пристосування.

Значна частина циліндричних пружин на кінцевій стадії виготовлення піддається заневолюванню. Операція заневолювання полягає у тому, що пружина навантажується і витримується певний час під навантаженням у деформованому за межу пружності стані.

Гвинтові циліндричні пружини при заневолюванні піддаються [1 - 3]:

- стисненню до дотику витків (пружини стиснення);
- розтягуванню до довжини більше розрахункового значення не менше, ніж на 5 % (пружини розтягування);
- закручуванню на кут більше робочого кута не менше, ніж на 5 % (пружини крутіння).

Основна осадка пружин при заневолюванні відбувається за перші 20 - 30 годин, потім збільшується несуттєво. Осадка, яка виникає як у результаті попереднього трьох - п'ятикратного навантаження пружин, так і після операції заневолювання,

встановлюється дослідним шляхом і враховується при технологічному розрахунку кроку навивки [3, 4].

Заневолювання пружин здійснюють за допомогою найпростіших пристосувань і пристроїв, які фіксують пружину при певному ступені деформації. Найбільш широко заневолювання застосовується у виробництві пружин стиснення.

Сутність методу зміцнення заневолюванням полягає у тому, що пружину піддають деформації за межею пружності для створення у найбільш напружених ділянках залишкових напруг протилежного знака відносно напруг від зовнішнього навантаження. Заневолювання підвищує несучу здатність пружин у межах пружних деформацій, сприяє стабілізації силових і розмірних параметрів і підвищенню витривалості при циклічному знакопостійному навантаженні. Після операції заневолювання, яка забезпечує створення у матеріалі пружин корисних залишкових напруг, ніяка термічна обробка проводитись не повинна [3, 5].

Функціональні покриття служать ефективним засобом захисту пружин від корозії і тим самим забезпечують значне збільшення їхньої довговічності.

На пружину наносять металеві покриття (лудіння і цинкування), неметалічні покриття (лаки, фарби, масла, змащення, смоли) і хімічні покриття (фосфатування, оксидування) [7].

Перед нанесенням захисних покриттів поверхню пружин очищають від окалини, забруднень і залишків омідніння (покриття міді). Підготовка пружин до нанесення покриттів включає операції механічної, хімічної або електрохімічної обробки поверхні. Механічне очищення пружин здійснюють піскоструминною, гідропіскоструминною або дробоструминною обробкою.

Для знежирення поверхні пружин застосовують розчинники: гас, бензин, ацетон. Однак найбільше поширення одержали методи хімічного знежирення у гарячих розчинах лугу з добавкою таких емульгаторів, як тринатрійфосфат, рідке скло і препарати ОП - 7, ОП - 10. Швидкість і якість очищення залежать від концентрації хімікатів, температури процесу і інтенсивності перемішування розчину [7].

Для підготовки поверхні пружин під покриття може застосовуватись процес електрохімічного знежирення. Електрохімічне знежирення здійснюється у гарячих лужних розчинах і забезпечує високу якість очищення.

Після знежирення пружини промивають у гарячій проточній воді, а потім – у холодній. Для видалення з поверхні іржі та оксидів пружини проходять операцію травлення, у процесі якого відбувається хімічне розчинення оксидів заліза і часткове розчинення поверхні металу.

Склад розчинів і режими травлення повинні призначатись з урахуванням забезпечення розчинності оксидів металу з виділенням мінімальної кількості водню. Тому при травленні пружин не слід застосовувати розчини великої концентрації. Після операції травлення пружини промивають у холодній і гарячій проточній воді.

Безпосередньо перед нанесенням покриття пружини проходять операцію декапірування, яка полягає у короткочасній хімічній обробці у слабких розчинах сіркової та соляної кислот (по 3 - 5 % кожної) для видалення поверхневої окисної плівки. Потім пружини промивають у гарячій і холодній проточній воді.

У виробництві пружин знайшло широке застосування гальванічне покриття цинком (цинкування). Гальванічне цинкування використовують для покриття пружин середніх і великих розмірів [3, 7].

Широке застосування гальванічного цинкування обумовлене високими захисними властивостями цинку і низькою його вартістю. Шар цинку у парі залізо - цинк є анодним покриттям, внаслідок чого покриття захищає залізо не тільки механічно, але і електрохімічно. Електроліти для цинкування розділяються за хімічним складом на кислі і лужні.

Простим і дешевим методом захисту поверхні від корозії є оксидування. Воно застосовується для пружин, які працюють при наявності змащення і при відсутності жорстких корозійних умов. Оксидна плівка, що утворюється при оксидуванні, складається з магнітного оксиду заліза  $Fe_3O_4$  товщиною 6 - 8 мкм. Оксидування проводиться у лужних або кислих розчинах.

У масовому виробництві великих гвинтових циліндричних пружин в якості завершальних операцій застосовують фарбування кистю, методами занурення, пульверизацією.

## 2 МАТЕРІАЛИ, ЗАДАЧІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Пружні елементи машин, особливо пружини, працюють при великих циклічних напругах, часто на межі пружності матеріалу, що значно відрізняє умови їхньої роботи від умов роботи інших деталей.

Вага пружини при заданій силі та пружному переміщенні зворотно пропорційна квадрату допустимої напруги, у той час як, наприклад, вага стрижня при навантаженні згинаючим та крутним моментом зворотно пропорційна допустимій напрузі у ступені  $2/3$ . У цих умовах особливого значення набувають характеристики міцності металу пружини – висока межа пружності та втомі і мала схильність до релаксації напруг. Під релаксацією напруг розуміється мимовільне згасаюче падіння напруг при постійній сумарній деформації.

Особливо високі вимоги пред'являються до матеріалів для пружин, що працюють у динамічних умовах. Після відповідної термічної обробки пружина повинна володіти поряд зі стійкими у часі пружними властивостями значною міцністю та витривалістю, а також достатньою пластичністю та опором ударним навантаженням. Тому вибір пружинної сталі у кожному конкретному випадку слід вести з урахуванням умов роботи пружин і відповідальності вузла машини. При цьому треба враховувати засіб прикладання навантаження, тривалість навантаження, стан навколишнього середовища. При виборі пружинної сталі слід враховувати її прожарюваність, можливість та ефективність поверхневого зміцнення, дефіцитність легуючих присадок та економічність процесу виготовлення.

В автобудуванні, у залізничному транспорті, у машинах і приладах різної будови найбільше застосування знаходить хромокремніста сталь, тому що кремній найдешевший з легуючих елементів і суттєво впливає на різні властивості сталі.

У роботі вивчались 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 властиво-

стей пружин встановленим вимогам, а також причин руйнування пружин у процесі експлуатації.

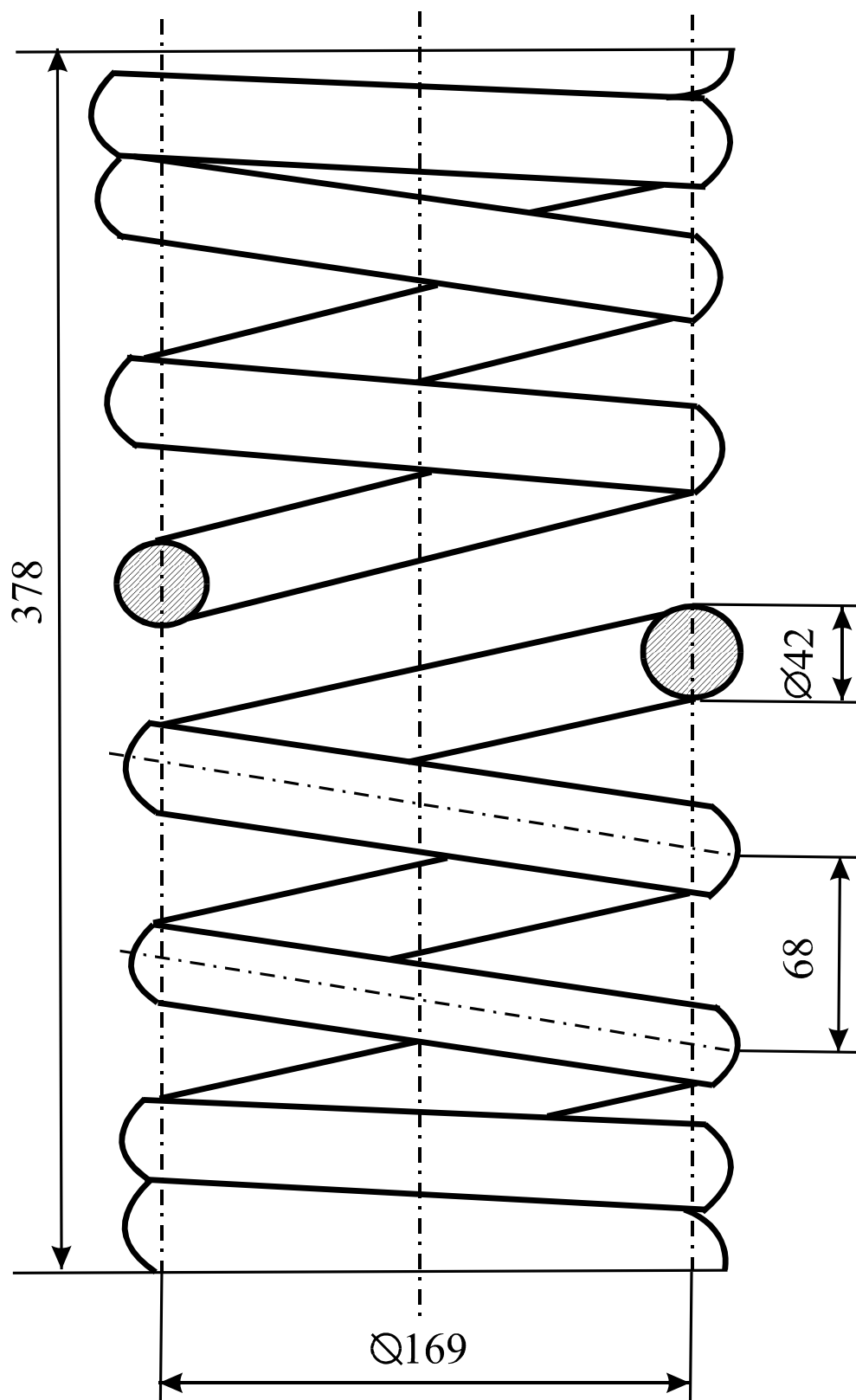


Рисунок 2.1 – Пружина 8ТН 281.319



Пружини виготовляються зі сталі 60С2ХА. Хімічний склад і механічні властивості матеріалу пружин представлені у табл. 2.1, 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 60С2ХА, % (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 60С2ХА (ДСТУ 14959-99)

Термічна обробка			Механічні властивості					
$t_{\text{гарт.}}$ °C	Середовище для гартуван- ня	$t_{\text{відп.}}$ °C	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	HRC	f, мм
870 - 900	масло	470	1830	1980	7,5	38,2	39,9- 47,1	71 - 86

Хромокремніста сталь 60С2ХА 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 8ТН 281.319

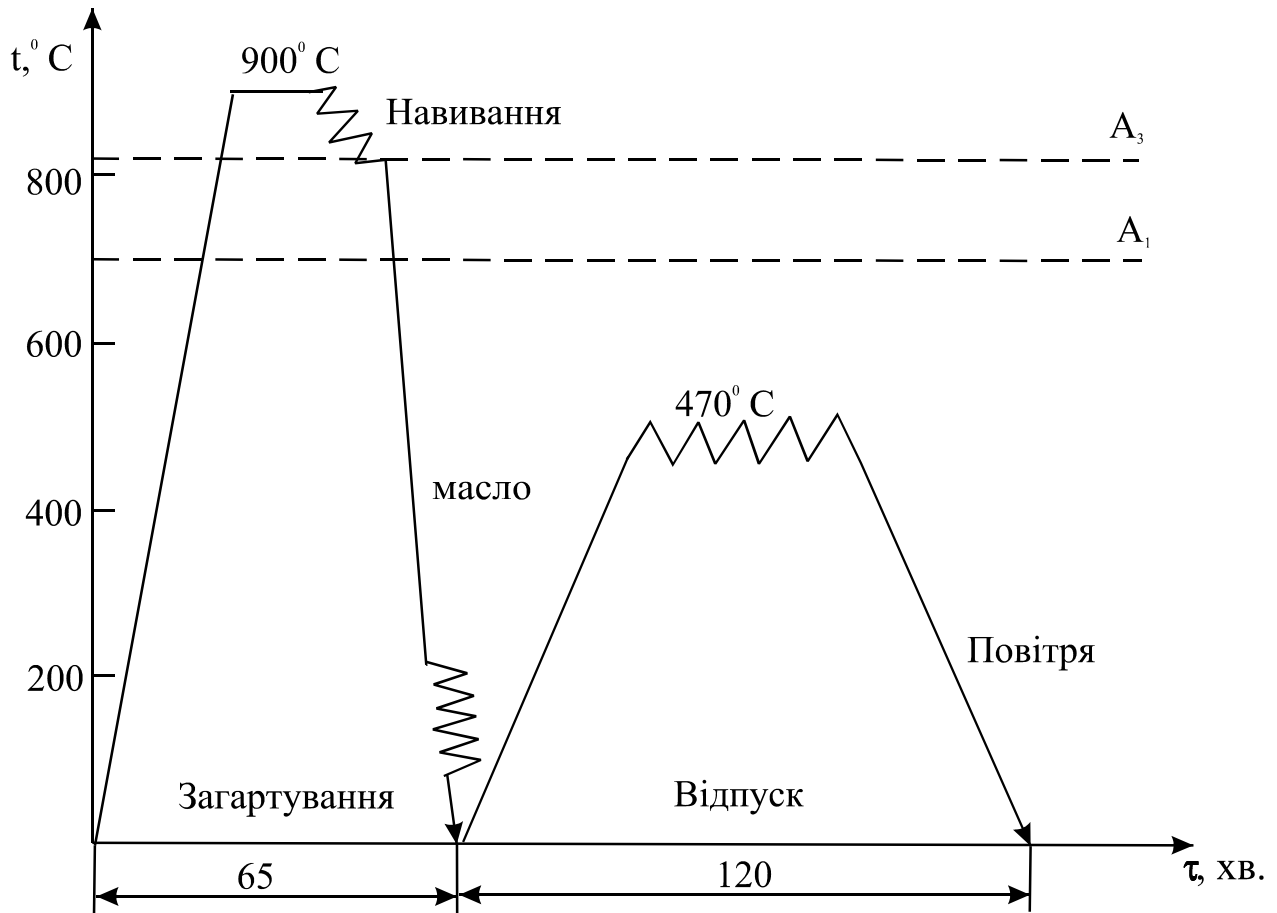


Рисунок 2.3 – Графік режиму термічної обробки пружин 8ТН 281.319

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°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  $\alpha$ -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 відпуску 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 ( $\text{HNO}_3$ ) 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

Після термічної обробки пружини проходять огляд для виявлення дефектів матеріалу і зовнішніх ушкоджень. На поверхні пружин не допускаються тріщини, волосовини, розшарування, плівки, окалина, сліди роз'їдання свинцем і солями. Допускається усунення дефектів пологим зачищенням, що не виводить розміри перетину витка з меж допусків на нормальний розмір дроту.

На пружинах не допускаються скрученість пружинної сортової сталі або дроту та скривлення витків. Дрібні поглиблення від опалої окалини, окремі подряпини та риски на пружинах, сліди від державок і роликів на пружинах, які навивають на пружинно - навивальних верстатах - автоматах, допускаються для пружин відповідального призначення у межах половини допуску на фактичний розмір дроту або прутка, для інших пружин – у межах допуску на фактичний розмір дроту або прутка.

Для виявлення дефектів матеріалу (тріщин, розшарувань) застосовується метод магнітної дефектоскопії або магнітопорошковий метод, при якому намагнічені пружини занурюють у суспензію магнітного порошку у маслі з концентрацією порошку 10 - 25 г/л. В якості магнітного порошку використовують суміш оксидів заліза  $Fe_3O_4$  і  $Fe_2O_3$ . Дисперсність порошку знаходиться у межах від 0,1 до 50 мкм. Дефекти металу виявляються завдяки щільному осіданню суспензії вздовж мікротріщин у вигляді чітких ліній (прямих, звивистих або ламаних). Пори і нещільності мають вигляд коротких смуг і плям. Для надійного виявлення дефектів при магнітопорошковому методі освітленість контрольованої поверхні повинна бути не менше 500 лк. Контроль за допомогою магнітного дефектоскопа застосовується для пружин, які пройшли гартування і відпуск, і обмовляється у кресленні.

Контроль і виявлення дефектів при магнітопорошковому методі здійснюється візуально. Припустимим є також застосування оптичних засобів не більш ніж з десятикратним збільшенням. Огляд контрольованої поверхні проводиться після сті-

кання суспензії, коли картина відкладень магнітного порошку вже сформувалась. Зовнішній огляд пружин здійснюється перед і після контрольних випробувань.

При виявленні хоча б на одній пружині тріщин, розшарувань, волосовин уся партія пред'явлених до здачі пружин піддається гасовій або масляній пробі протягом 10 хв., далі піскоструминній обробці або іншим способам механічного очищення, що забезпечує необхідну чистоту поверхні, і потім наступному огляду.

Піскоструминна обробка або інше механічне очищення і огляд пружин повинні бути проведені не пізніше 1 години з моменту витягування пружин з масла або гасу.

При контролі розмірів і відхилень за формою у пружин вимірюють: вільну висоту, зовнішній і внутрішній діаметр, число витків, рівномірність кроку і перпендикулярність опорної площини до геометричної вісі пружин. Розміри і форма пружин повинні відповідати вимогам креслення з урахуванням допустимих відхилень.

Після зовнішнього огляду і контролю розмірів пружин і відхилень за геометричною формою здійснюється їхнє випробування на залишкову деформацію.

Випробування на залишкову деформацію проводиться відповідно до ДСТУ 1452-86 «Пружини циліндричні гвинтові візків та ударно-тягових приладів рухомого складу залізниць».

На практиці застосовують два методи випробування пружин стиснення під робочим навантаженням:

1) шляхом постійного навантаження від мінімуму робочого навантаження до максимального навантаження при повному стисненні до дотику витків; при цьому визначається прогин і висота пружини;

2) шляхом навантаження до максимальної напруги (до дотику витків) з наступним розвантаженням до максимального робочого навантаження і потім до мінімального робочого навантаження.

У зв'язку з тим, що при навантаженні до дотику витків пружина осідає, другий метод, коли пружина спочатку навантажується до дотику витків, а потім розвантажується до робочих навантажень (з виміром відповідної висоти пружини), слід вважати більш доцільним.

Пружини стискають пробним навантаженням, величина якого відповідає найбільшому сумарному значенню статичного і динамічного навантажень, які діють на пружину.

Для даних пружин встановлені два навантаження:  $P_1 = 100$  кН,  $P_2 = 68,7$  кН.

Схема випробування пружини стиснення на залишкову деформацію показана на рис. 3.1. На гідравлічному пресі під навантаженням 100 кН пружину стискають два рази, і після зняття навантаження вимірюють її висоту у вільному стані (рис. 3.1). При цьому висота пружини повинна залишитися незмінною. Під навантаженням 68,7 кН вимірюють висоту пружини у стисненому стані, а потім повністю розвантажують пружину.

За результатами випробувань знаходять стрілу прогину.

Стріла прогину – це різниця між результатом вимірювання висоти пружини у вільному стані ( $H_1$ ) і під статичним навантаженням ( $H_2$ ):

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

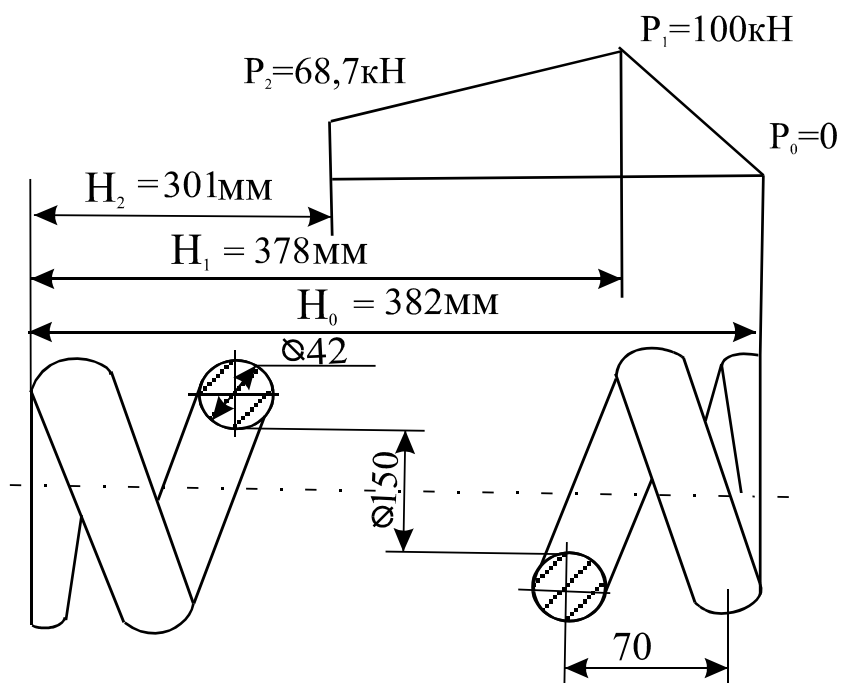


Рисунок 3.1 – Схема випробування пружини на залишкову деформацію



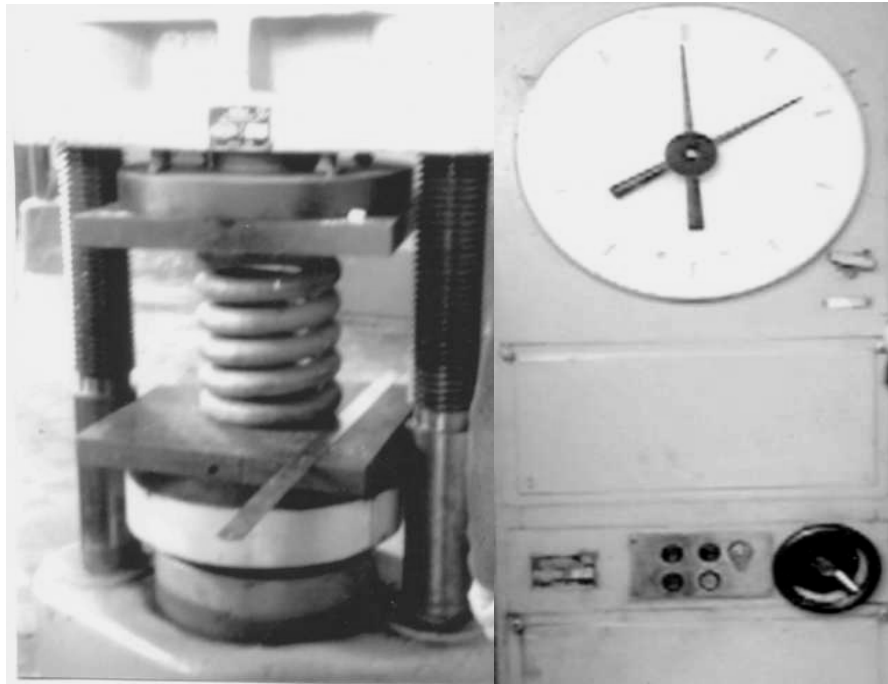


Рисунок 3.2 – Вимірювання прогину пружини під статичним навантаженням на гідравлічному пресі П-125

Проведено випробування пружин у кількості 20 штук. Результати випробувань наведені у табл. 3.1.

Граничні відхилення прогину пружин під статичним навантаженням не повинні перевищувати + 9 мм і -6 мм відносно розрахункового значення стріли прогину. Розрахункове значення стріли прогину дорівнює  $f = 77$  мм.

Пружини, які були піддані стисканню під навантаженням, не повинні мати залишкової деформації.

У результаті аналізу механічних випробувань встановили, що стріла прогину пружин 1, 6, 12, 15 і 19 не відповідає вимогам. Пружини, що не витримали статичного навантаження за величиною стріли прогину можна розділити на дві групи:

1. Стріла прогину нижче нижньої межі (71 мм) – пружини 6 і 19;
2. Стріла прогину вище верхньої межі (86 мм) – пружини 1, 12 і 15.

З метою виявлення причин зниженої або підвищеної залишкової деформації пружин були проведені контроль твердості і мікроскопічний аналіз.

Таблиця 3.1 – Результати механічних випробувань пружин 8ТН.281.319 на залишкову деформацію

№	$H_{\text{вільна}}, \text{ мм}$	$H_1, \text{ мм}$ $P_1 = 100 \text{ кН}$	$H_2, \text{ мм}$ $P_2 = 68,7 \text{ кН}$	$f, \text{ стріла прогину}, \text{ мм}$
1	382	380,5	292,5	88
2	380	379	303	76
3	378	378	300	78
4	380,5	379	299,5	79,5
5	379	378	297	81
6	381	380	308	70
7	382	381	299	82
8	380	379	299	80
9	379	379	300	79
10	383	382,5	302	80,5
11	379	378	298	80
12	382	380	293	87
13	377	377	298	79
14	376	376	297	79
15	380	378	292	89
16	380	379	296	83
17	381	380	303	77
18	383	381	302	79
19	380	379	308	69
20	380	378	300	78

### 3.2 Дослідження якості термічної обробки пружин

Термічна обробка пружин електровоза полягає у гартуванні і відпуску. У результаті сталь повинна мати дрібнозернисту структуру, незначні зональні внутрішні

напруження і мінімальну кількість залишкового аустеніту. Ці умови сприяють високому опору сталі малим пластичним деформаціям.

Мінімальний вміст залишкового аустеніту повинен бути забезпечений у процесі самого гартування, тому що наступний відпуск, який викликає розпад залишкового аустеніту, не усуває повною мірою негативний вплив продуктів його розпаду на опір сталі малим пластичним деформаціям і протіканню релаксаційних процесів.

Режим нагрівання під гартування повинен забезпечити повний і рівномірний прогрів пружини, тому що недогрів призводить до неповного гартування сталі і внаслідок цього до зниження пружних властивостей, а перегрів може викликати підвищену крихкість, утворення знеуглецьованого шару значної глибини і виникнення тріщин.

Якість термічної обробки оцінювалась випробуванням пружин на твердість [ДСТУ 9013-59].

Твердість вимірювалась на приладі типу Роквел (ТК). Робоче навантаження дорівнювало 1500Н; індентор являв собою алмазний конус із кутом при вершині 120° і радіусом заокруглення 0,2 мм. При виконанні вимірювань індентор вдавлюється у зразок під дією двох послідовно прикладених навантажень: попереднього  $P_0$  і загального (основного)  $P_1$ . Повне навантаження складає  $P = P_0 + P_1$ .

Число твердості за Роквелом вимірюють в умовних одиницях. Воно є мірою глибини вдавнення індентору під певним навантаженням.

Схема визначення твердості за Роквелом при вдавненні алмазного конуса наведена на рис. 3.3.

Мінімальна товщина зразка залежить від твердості матеріалу і повинна бути не меншою, ніж восьмикратна глибина вдавлювання.

Існує декілька типів приладів для вимірювання твердості за Роквелом, але принципові схеми їхньої роботи аналогічні. На рис. 3.4 дана схема приладу ТК.

Порядок вимірювання твердості пружин показаний на рис. 3.5.

На кожній пружині твердість вимірювалась у 3 - х точках (табл. 3.2). Для пружин, які не витримали випробувань під статичним навантаженням, вимірювалась також твердість серцевини на вирізаних зразках (табл. 3.3).

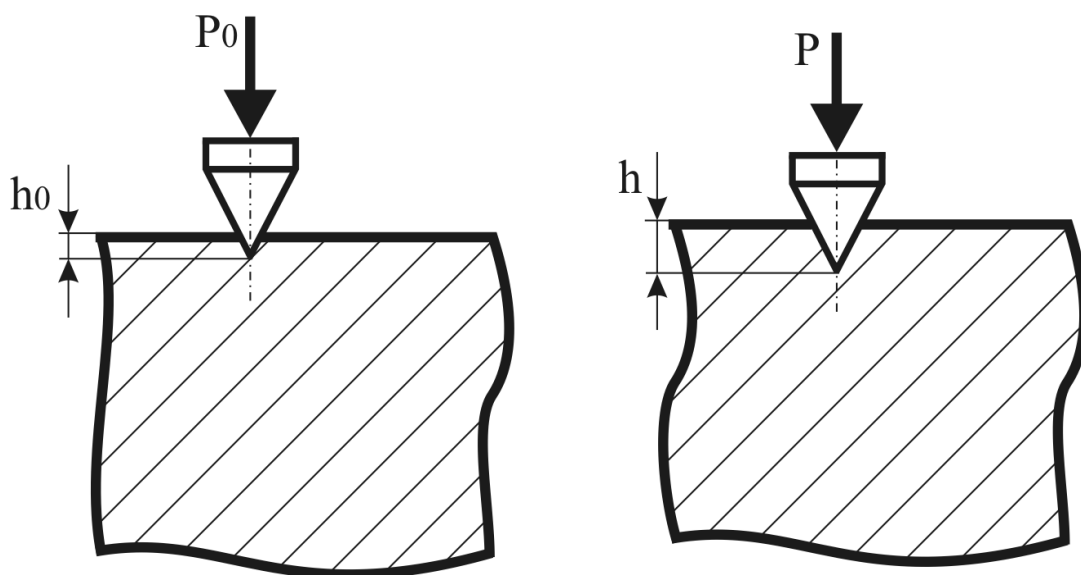


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання твердості на приборі Роквелла

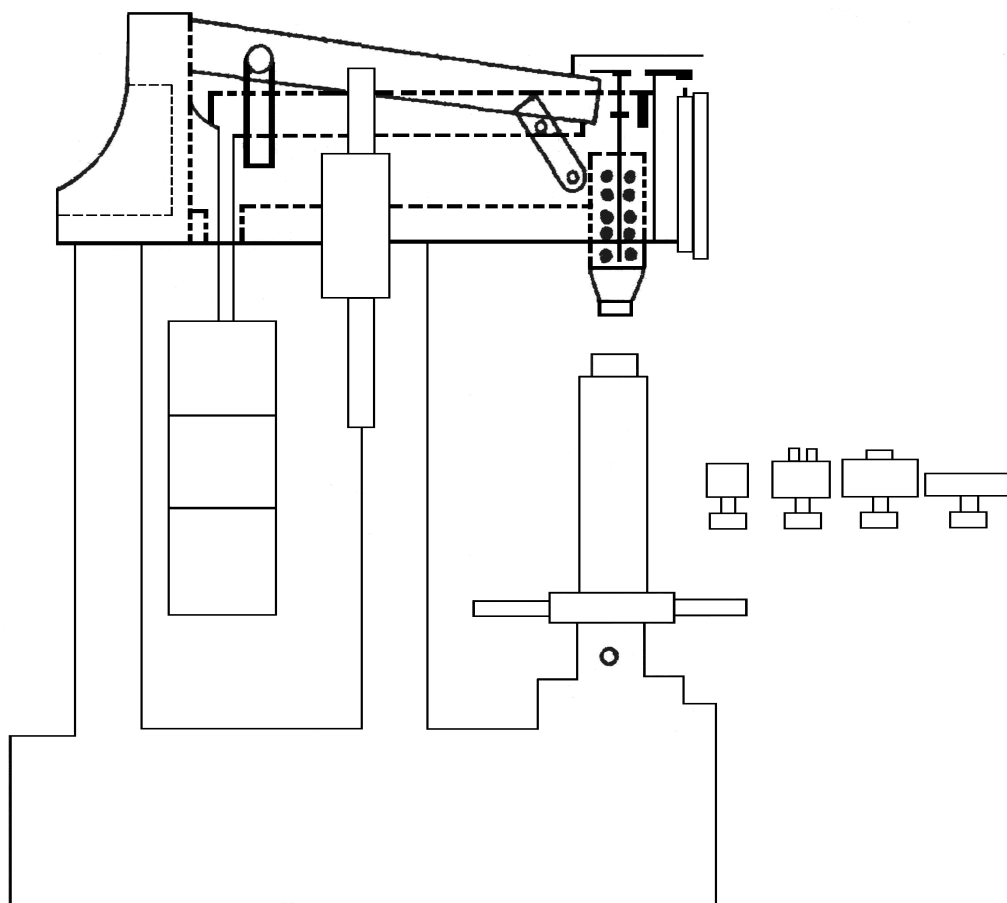


Рисунок 3.4 – Схема приладу типу ТК для вимірювання твердості по Роквелу

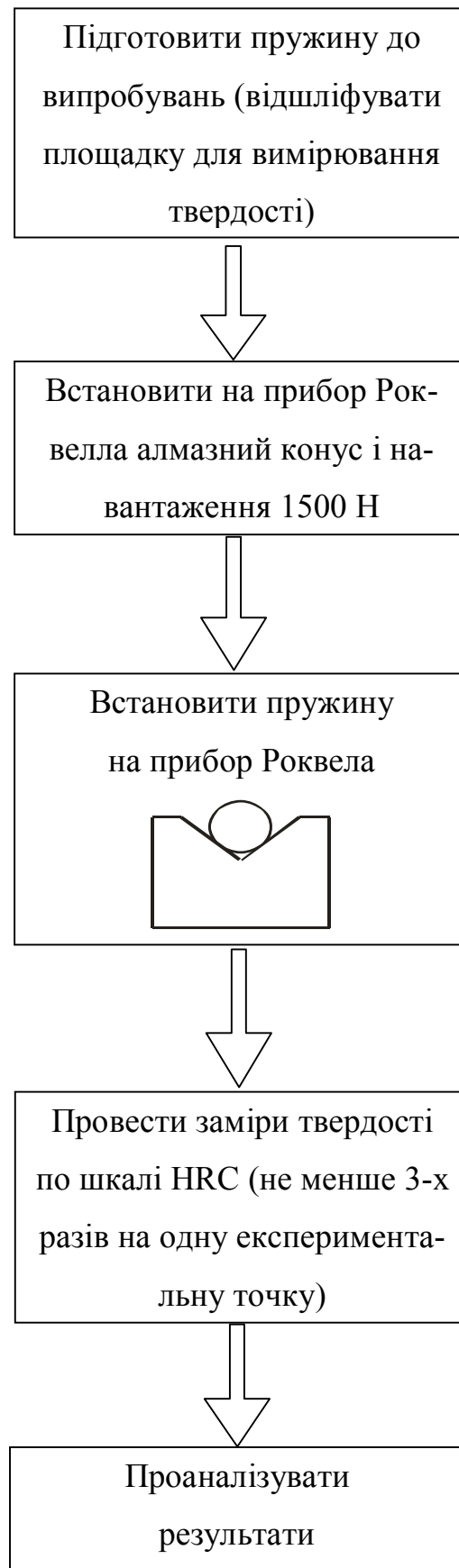


Рисунок 3.5 – Порядок вимірювання твердості пружин 8ТН.281.319 на приборі Роквела (ДСТУ 9014-59)

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання поверхневої твердості пружин

№ пружини	HRC	№	HRC
1	37; 38; 36	11	42; 44; 43
2	42; 41; 42	12	36,5; 37; 38
3	43; 42; 41	13	43; 42; 42
4	44; 43; 43	14	43; 44; 45
5	43; 44; 42	15	37; 37; 38
6	48; 50; 48,5	16	43; 44; 45
7	43; 44; 43,5	17	41; 42; 41
8	42; 43; 42	18	45; 43; 43
9	43; 42; 41	19	48,5; 49; 48
10	42; 41; 43	20	45; 44; 45

Таблиця 3.3 – Твердість пружин, які не витримали випробувань на залишкову деформацію

№ пружини	Твердість, HRC		f, стріла прогину, мм
	поверхні	серцевини	
1	37; 38; 36	39; 40; 42	88
6	48; 50; 48,5	49; 50; 51	70
12	36,5; 37; 38	42; 41; 44	87
15	37; 37; 38	39; 38; 38	89
19	48,5; 49; 48	50; 48; 50,5	69

Пружини, які мають підвищену стрілу прогину, мають знижену твердість, а пружини, які мають знижену стрілу прогину, характеризуються підвищеною твердістю.

Із пружин були вирізані зразки для дослідження мікроструктури. Вирізання здійснювалось абразивним кругом з безперервною подачею у зону різання води.

Проведений мікроаналіз показав, що у пружинах № 1, 12 і 15 зі стрілою прогину при випробуванні на залишкову деформацію вище верхньої межі, у поверхні спостерігається нерівномірний по глибині знеуглецьований шар глибиною 1,3 - 1,9 мм (рис. 3.6).

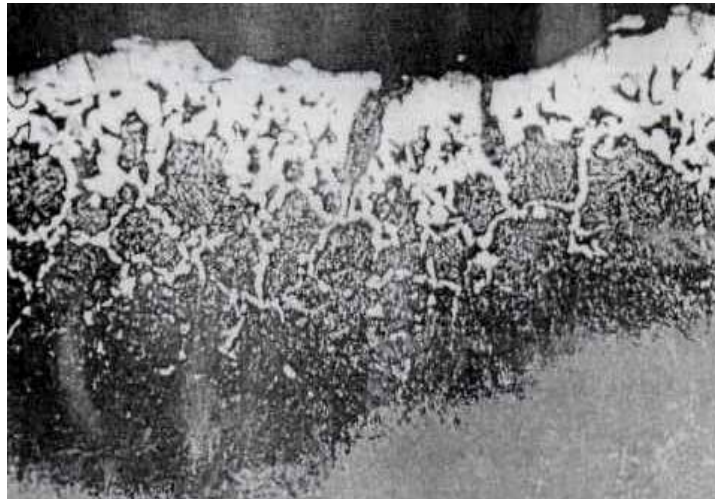


Рисунок 3.6 – Знеуглецьований шар на поверхні пружин з високою стрілою прогину,  $\times 300$

Згідно існуючого стандарту (ДСТУ 1763 - 98) загальна глибина знеуглецьованого шару для пружин з гарячекатаної сталі не повинна перевищувати 2,5 % діаметра прутка. Для пружин, які досліджувались, з діаметром витків 42 мм максимальна глибина знеуглецьованого шару не повинна перевищувати 1,05 мм.

У пружині № 15 спостерігаються дрібні включення фериту, який утворюється за умов, коли температура гартування нижче критичної точки  $A_{c3}$ . Ферит є м'якою і пластичною структурою з дуже низьким опором пластичній деформації. Його підвищена кількість у структурі сприяє значній деформації пружин під навантаженням.

У поверхні пружин № 6 і № 19 зі стрілою прогину при випробуванні на залишкову деформацію нижче нижньої межі, також спостерігається знеуглецьований шар, але глибина його незначна і не перевищує 0,4 мм (рис. 3.7). Мікроструктура серцевини пружин троосто - мартенситна, рівномірна (рис. 3.8) і характеризується підвищеною твердістю. Оптимальною структурою серцевини і поверхні пружин є троостит.

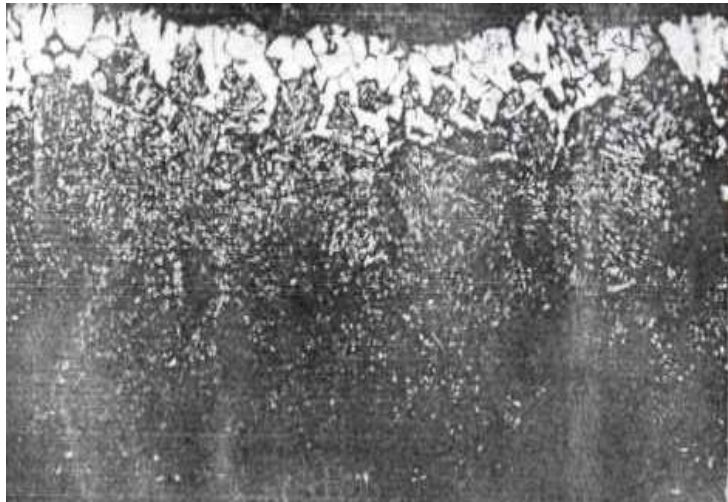


Рисунок 3.7 – Знеуглецьований шар на поверхні пружин з низькою стрілою проги-  
ну,× 300

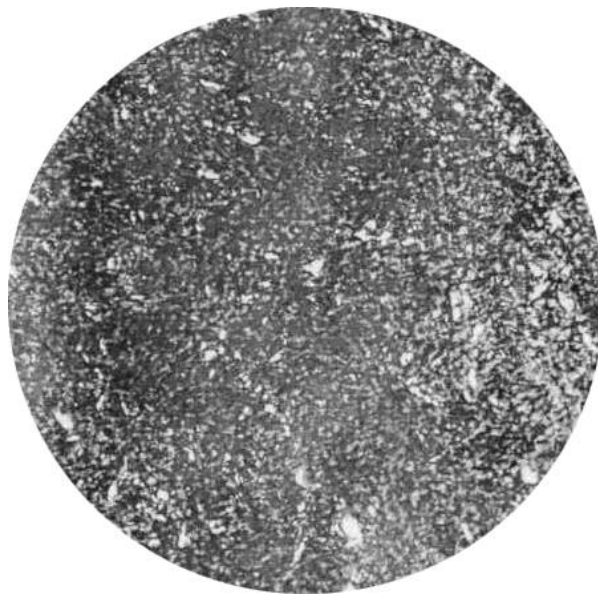


Рисунок 3.8 – Троосто - мартенситна структура серцевини пружин,× 300

Підвищена твердість на поверхні і у серцевині є результатом порушення режиму відпуску: знижена температура або недостатня теплова витримка. Таким чином, пружини, які не витримали випробувань на залишкову деформацію, виготовлені з порушенням технологічних процесів гартування та відпуску, а саме: порушені оптимальні температурні режими гартування та відпуску.



Висновок: При випробуванні пружин 8ТН.281.319, які виготовлені з пружинної кремністохромістої сталі 60С2ХА ДСТУ 14959-79 і застосовуються на візках електровоза 2ЕЛ5, було встановлено, що з партії пружин у кількості 20 штук 15 пружин за механічними характеристиками задовольняють вимогам ДСТУ 1452-96, 5 пружин не відповідають вимогам стандарту за величиною залишкової деформації і твердості. Це пов'язано з недотриманням оптимальних термічних режимів гартування та відпуску.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ВІДПУСКУ НА СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ МЕТОДОМ МАГНІТНОГО АНАЛІЗУ

### 4.1 Магнітний аналіз для контролю властивостей і структури

Усі магнітні характеристики сплавів можна умовно об'єднати у дві групи: перша група – сплави, нечутливі до структурних змін, але чутливі до зміни фазового складу, друга група – сплави, чутливі до структурних змін [1]. Характеристики першої групи використовують для фазового магнітного аналізу, другої групи – для магнітного структурного аналізу [4]. Механічні, а також багато фізичних і хімічних властивостей сплавів визначаються їхнім фазовим складом і структурою. Ці залежності є основою для непрямого визначення фізико - механічних властивостей сплавів за допомогою магнітного фазового і структурного аналізу. Істотною особливістю цього методу є можливість оцінки властивостей без руйнування виробів.

Фазовий магнітний аналіз використовують для контролю сплавів на основі заліза. Контролю піддають як вихідну литу структуру і структуру прокату, так і ефективність термічної обробки деталей [8]. Необхідність такого контролю викликана наступними обставинами. Відомо, що при збільшенні вмісту фериту у сталях інтенсивно знижуються їхня міцність і твердість. При збільшенні вмісту перліту і особливо цементиту у вигляді самостійної структурної складової (вторинного цементиту) сильно підвищуються твердість сталей і їх схильність до крихкого руйнування. Одночасно з цим різко погіршується оброблюваність деталей різанням. Таким чином, визначення фазового складу є не самоціллю, а способом оцінки властивостей деталей без їхнього руйнування [3].

Метод магнітної ферометрії (тобто вимірювання кількості фериту) найбільш широко застосовується для контролю фазового складу безпосередньо деталей, виготовлених з прокату та методами литва [9]. Він заснований на вимірюванні характеристик взаємодії магнітного поля з виробом, який контролюється. Для цієї мети використовують феритометри наступних типів: пондеромоторні, принцип роботи яких заснований на вимірюванні сили відриву постійного магніту або електромагніту від поверхні деталі; магнітостатичні, що працюють за принципом вимірювання магніт-

ної проникності матеріалу, який контролюється; індукційні, принцип дії котрих заснований на вимірюванні комплексного опору або індуктивності вимірювальної котушки [9].

Залежно від типу приладу в якості датчика або накладного перетворювача використовують постійний магніт, електромагніт, систему постійний магніт - ферозонд або електромагніт - ферозонд. Вибір типу приладу визначається припустимими межами вмісту фериту, необхідною точністю вимірювання і особливостями виробу, що контролюється (матеріал і геометрія) [8, 9].

Контроль якості є самою масовою технологічною операцією у виробництві, тому що жодна деталь не може бути виготовлена без вимірювання її технологічних характеристик. У зв'язку з ускладненням і вимогою неухильного підвищення надійності нової техніки трудомісткість контрольних операцій у промисловості постійно збільшується.

Особливу роль починають грати засоби неруйнівного контролю як основні елементи технічної діагностики і як найважливіша складова частина гнучких автоматизованих виробництв.

Багато механічних і технологічних властивостей сплавів визначаються не тільки фазовим складом, але і структурою – розміром зерна, формою і взаємним розташуванням різних структурних складових, їхньою дисперсністю. На властивості матеріалів впливають також різні дефекти кристалічної будови і мікронапруги. Тому необхідним є контроль структури виробів, оскільки без цього неможливо забезпечити їхній необхідний комплекс властивостей [7].

В останні роки для оцінки якості термічної обробки виробів зі сталей почали широко застосовуватись методи неруйнівного контролю. Одним з таких методів є магнітний структурний аналіз. Для магнітного аналізу і структуроскопії використовується кореляція між магнітними та фізико - хімічними властивостями матеріалів. Кореляція виникає у тих випадках, коли фізичні і хімічні процеси утворення і перебудови структури та фазового складу металу одночасно формують і змінюють його магнітні властивості. Він заснований на визначенні коерцитивної сили. Коерцитивною силою називають значення напруженості магнітного поля, при якому дорівнює

нулю намагніченість матеріалу, котра змінюється по петлі гістерезису. Для вимірювання коерцитивної сили сталей на зразках, а також визначення ступеня кореляції між коерцитивною силою і фізико-механічними властивостями матеріалу деталей, що контролюються, можуть бути застосовані коерцитиметри [8].

Найбільш широко застосовують коерцитиметри із приставними електромагнітами, винесеними в окремий блок. Такий блок являє собою П - образний електромагніт із обмотками намагнічування і розмагнічування. Перемичкою електромагніту служить сердечник ферозонду, який є водночас нульовим індикатором [4, 8].

Після намагнічування ділянки виробу, на якій здійснюється контроль, плавно збільшують струм розмагнічування, поки вимірювальний прилад, підключений до ферозонду, не покаже відсутність магнітного потоку у виробі [8].

Коерцитиметр може бути використаний для роботи у термічних цехах, лабораторіях, відділах технічного контролю (ВТК) машинобудівних, металургійних, інструментальних підприємств для розбраковування або атестації виробів однакової форми та розмірів.

#### **4.2 Визначення коерцитивної сили і твердості сталі залежно від температури відпуску**

До теперішнього часу не існує загальної теорії магнітної структуроскопії, тому у кожному конкретному випадку доводиться знаходити кореляцію між магнітними і іншими властивостями матеріалів [6, 8]. У тих випадках, коли наявність такої кореляції відома з літературних або інших джерел, її необхідно перевіряти і встановлювати умови її існування при впровадженні контролю у конкретних виробничих умовах з урахуванням матеріалу деталі і технології її виготовлення.

Найбільш тісна кореляція встановлена між коерцитивною силою  $H_c$  і твердістю HRC різних марок ливарних сталей (рис. 4.1, заштрихована область). Очевидно, що залежність коерцитивної сили від твердості для сталі 60С2ХА перебуває у заштрихованій області рис. 4.1, однак точний її вид невідомий і може бути встановлений тільки експериментально [7].

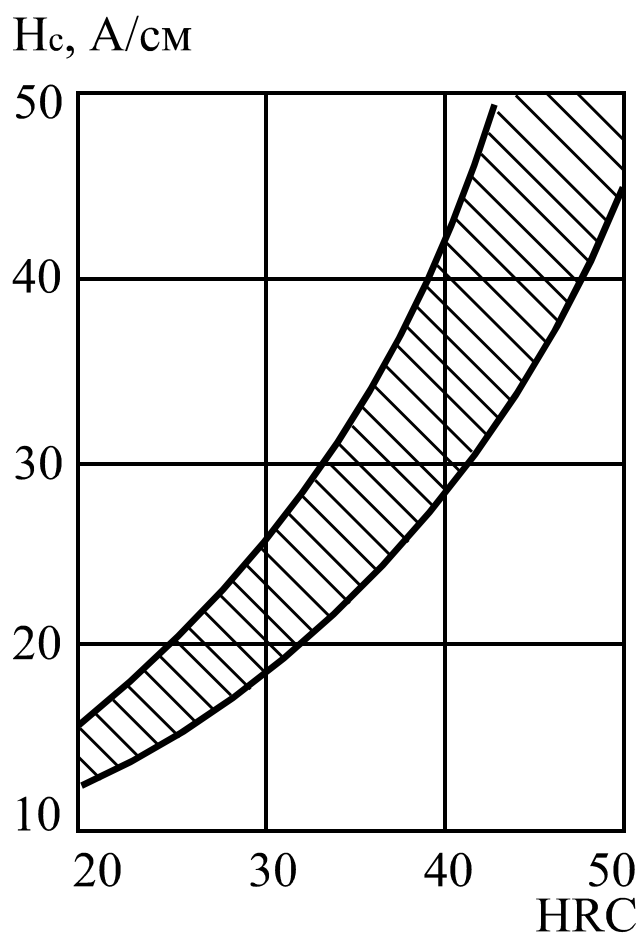


Рисунок 4.1 – Взаємозв'язок коерцитивної сили і твердості ливарних сталей

У роботі встановлювався кореляційний зв'язок між твердістю сталі 60С2ХА і її коерцитивною силою. Для дослідження використовувались зразки діаметром 42 мм, довжиною 100 мм, нарізані із прутків пружинної сталі 60С2ХА. Усі зразки піддавались гартуванню за наступним режимом: температура нагрівання  $t = 850 - 870^{\circ}\text{C}$ ; витримка у печі  $\tau = 30$  хв.; охолодження у маслі; відпуск при температурах 100, 200, 300, 400, 500,  $600^{\circ}\text{C}$  протягом 1 години з охолодженням на повітрі.

Коерцитивна сила вимірювалась коерцитиметром КІМФ-1. Коерцитиметр КІМФ-1 призначений для контролю якості термічної і хіміко-термічної обробки ферромагнітних сталевих виробів довільної форми, а також механічних властивостей сталевого прокату при наявності однозначного кореляційного зв'язку між параметрами, що контролюються, і коерцитивною силою.

Основними функціональними вузлами коерцитиметру є блок вимірювання і два датчики. Блок вимірювання виконаний у вигляді переносного приладу в уніфікованому корпусі. Його функціональна схема наведена на рис. 4.2.

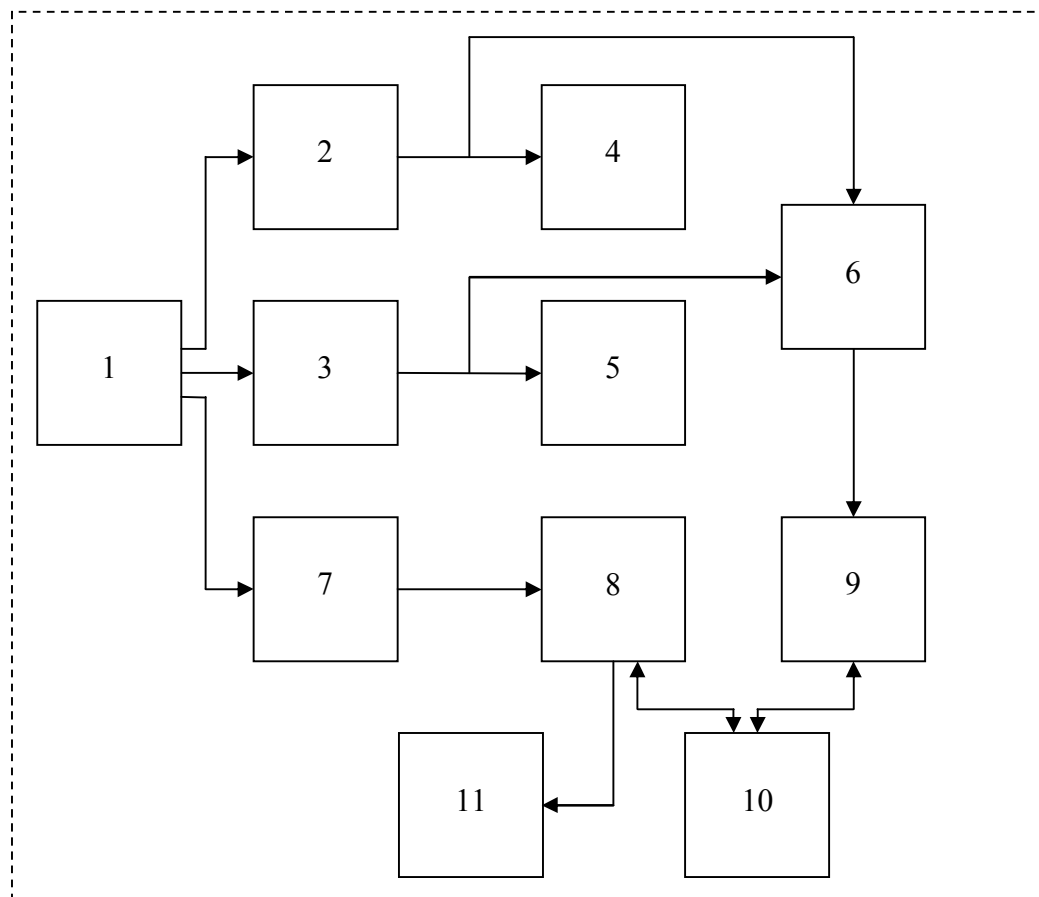


Рисунок 4.2 – Функціональна схема блоку вимірювання коерцитиметру КІМФ -1

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.

Напруга у мережі 220 В (50 Гц) подається на силовий трансформатор 1, до виходу якого підключені джерела струмів розмагнічування і намагнічування. У випрямлячі струму намагнічування 3 застосована схема електронної стабілізації. Струм намагнічування регулюється і контролюється за допомогою індикатора 4.

Далі через комутатор 6 струм намагнічування підводиться до електромагніта 9. На той же комутатор 6 подається струм розмагнічування, який формується випрямлячем 2 і контролюється міліамперметром 5. Ферозонд 8 живиться від окремої обмотки 7 силового трансформатора 1. Коерцитивна сила вимірюється за допомогою фазометричної схеми 11, підключеної до вимірювальних обмоток ферозонда 8.

Датчик являє собою приставний електромагніт з магнітопроводом, поміщений у корпус із магнітного матеріалу. Корпус виконує роль магнітного екрана (рис. 4.3). На сердечниках магнітопроводу розміщені котушки, з'єднані послідовно. До кінців сердечників магнітопроводу за допомогою гвинтів кріпляться наконечники, які можуть мати різну конфігурацію залежно від профілю об'єкта, що контролюється. У верхній частині електромагніта у зазорі між сердечниками вмонтований ферозонд, який виконує роль індикатора магнітного потоку.

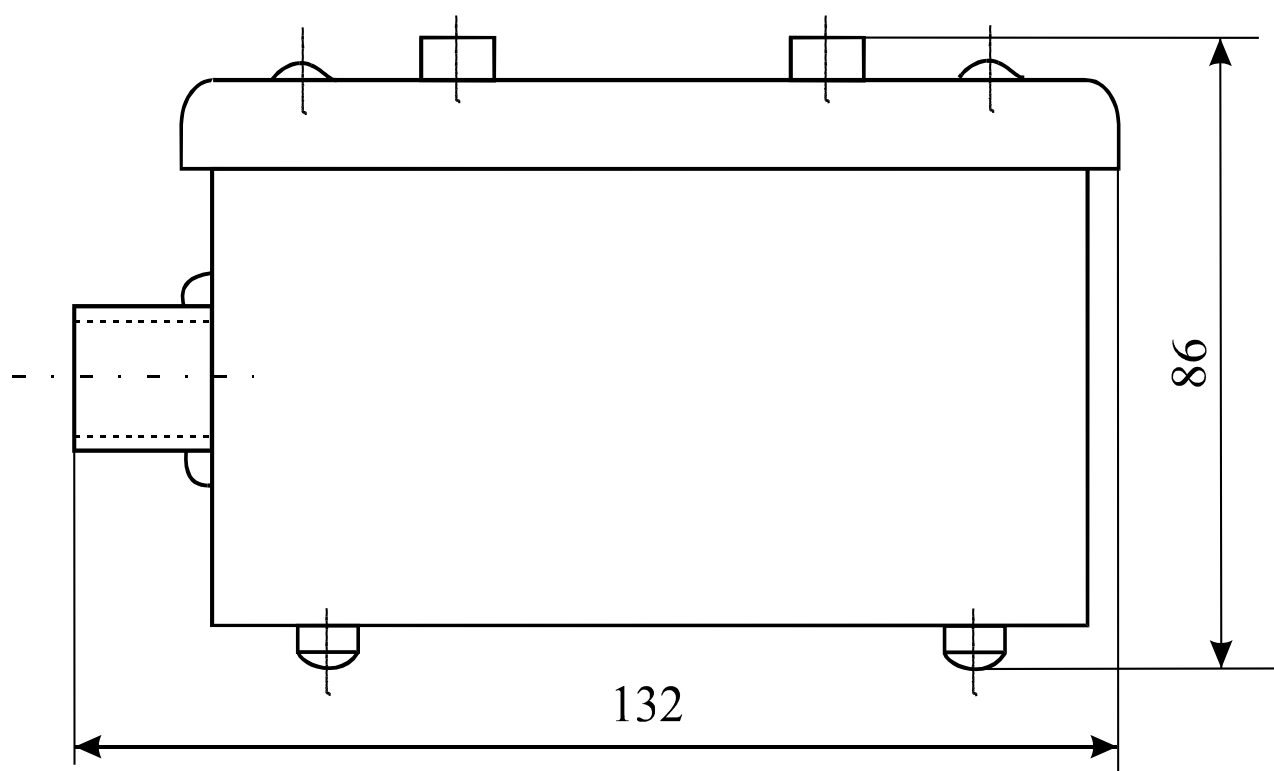


Рисунок 4.3 – Датчик коерцитиметра КІМФ-1

Ферозонд являє собою замкнутий сердечник у формі прямокутної рамки, набраної із пластин трансформаторної сталі. На двох протилежних плечах сердечника розміщені обмотки збудження ферозонда, які з'єднані між собою послідовно. По-

верх обмоток збудження намотана вимірювальна обмотка. Сердечники магнітопроводу скріплені між собою за допомогою скоби з немагнітного матеріалу.

Принцип дії ферозонду полягає у перетворенні постійного магнітного поля в електричний сигнал.

Порядок визначення коерцитивної сили:

1. Встановити датчик на ділянку виробу, яка підлягає контролю. При цьому повинне бути забезпечене щільне прилягання полюсних наконечників датчика до поверхні виробу.

2. Натисканням кнопки перемикача «вимірювання» включити ланцюги намагнічування і вимірювання.

3. Після проходження імпульсу струму намагнічування стрілка мікроамперметра відхиляється вліво до упору. Обертанням вправо ручок резисторів «грубо» і «плавно» слід домогтися збігу стрілки мікроамперметра з нулем. Величина струму розмагнічування ( $I_p$ ), відлічена по міліамперметру, при якій досягається нульове положення стрілки мікроамперметра, являє собою показання коерцитиметру, яке є пропорційним коерцитивній силі матеріалу виробу (рис. 4.4).

4. Після закінчення вимірювання перемикач «грубо» і «плавно» встановити у вихідне положення через 3 - 5 сек. Коерцитиметр готовий до наступного вимірювання.

Досліджено залежності твердості сталі від температури відпуску та коерцитивної сили сталі від її твердості після термічної обробки. Результати вимірювань твердості на зразках, відпущених при різних температурах, представлені у табл. 4.1. Для одержання однієї експериментальної точки використовувались три зразки, вирізані з одного і того ж самого прутка і відпущені при однаковій температурі.



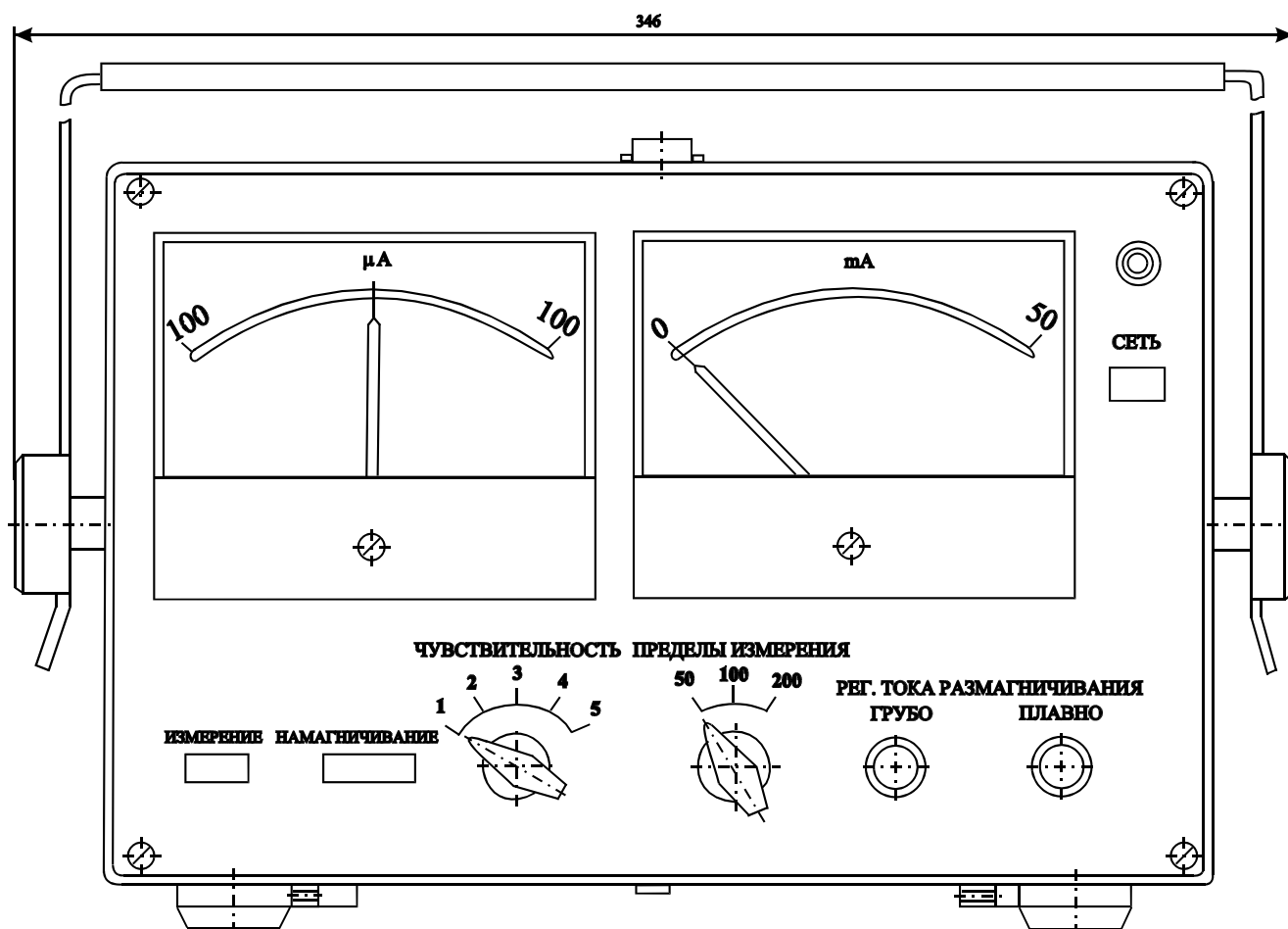


Рисунок 4.4 – Лицьова панель блоку вимірювання коерцитиметру КІМФ-1

Таблиця 4.1 – Твердість і коерцитивна сила сталі 60С2ХА залежно від температури відпуску

Температура відпуску, °С	№ зразка	HRC	Коерцитивна сила, $H_c$ , А/см
150	1-1	61	119
	1-2	62	118
	1-3	60,5	120
200	2-1	60	115
	2-2	59,5	116
	2-3	60,5	113
250	3-1	58	103
	3-2	57	102
	3-3	58	105
300	4-1	56	94
	4-2	55	93
	4-3	54	94

Продовження табл. 4.1

Температура відпуску, °С	№ зразка	HRC	Коерцитивна сила, H <sub>c</sub> , А/см
350	5-1	52	70
	5-2	53	68
	5-3	51	71
400	6-1	47	60
	6-2	45	61
	6-3	46	61
450	7-1	40	53
	7-2	42	52
	7-3	41	54
500	8-1	32	42
	8-2	31	43
	8-3	31,5	44
550	9-1	29	35
	9-2	30	36
	9-3	28	35
600	10-1	26	30
	10-2	27	30
	10-3	25	32

### 4.3 Знаходження функціональної залежності між коерцитивною силою та твердістю

Побудова функціональної залежності за дослідними даними може бути реалізована двома засобами – інтерполяцією і апроксимацією (згладжуванням) [8]. Відомо, що через  $n$  крапок завжди можна провести криву, яка аналітично виражається багаточленом  $(n - 1)$ -го ступеня. Цей багаточлен називають інтерполяційним, а заміну функції  $y(x)$  на функцію  $f(x)$  таким чином, що їхні значення збігаються у вузлових (експериментальних) крапках ( $y(x_i) = f(x_i)$ ), називають інтерполяцією. Однак таке рішення проблеми не є задовільним, оскільки насправді  $y(x_i) \neq f(x_i)$  через випадкові помилки вимірювань [9 - 11]. Тому потрібно провести теоретичну криву таким чином, щоб вона у найменшому ступені залежала від випадкових помилок вимірювань. Це завдання називається апроксимацією (згладжуванням) експериментальної залежності. Найбільш часто вона вирішується методом найменших квадратів. Згла-

дзгувальну криву називають апроксимуючою.

Залежності твердості сталі 60С2ХА від температури відпуску і коерцитивної сили сталі від її твердості визначались шляхом підбору стандартних двопараметричних математичних функцій, виходячи з умови забезпечення найменшої помилки апроксимації. В якості згладжувальних функцій використовують статечну, логарифмічну, показову, гіперболічну та ін. функції, а також багаточлени різного ступеня [9 - 11]. Ці функції в якості невідомих параметрів містять коефіцієнти, які необхідно визначити у процесі апроксимації. Невідомі параметри (коефіцієнти) апроксимуючих функцій визначаються з рівнянь, отриманих у теорії математичної статистики. Основною умовою при виводі даних рівнянь є умова мінімуму суми квадратів випадкових помилок:  $\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2$ . Тут  $n$  – кількість експериментальних крапок;  $y_i$  – експериментальні значення параметра  $y$  в  $i$ -тій експериментальній крапці;  $f_i$  – значення апроксимуючої функції в  $i$ -тій експериментальній крапці [9 - 11].

У зв'язку з тим, що кількість функцій, які можуть бути використані для апроксимації експериментальних даних, досить велике і безпосереднє використання методу найменших квадратів для визначення невідомих коефіцієнтів, що входять у рівняння цих функцій, пов'язане з необхідністю проведення великого об'єму складних обчислень, в інженерній практиці часто застосовують лінеаризацію нелінійних апроксимуючих функцій. Під лінеаризацією мається на увазі приведення вихідної нелінійної функції до лінійного вигляду шляхом однієї або декількох заміни змінних (підстановок).

Лінійна функція для апроксимації експериментальних даних має вигляд [9]:

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

де  $b_0$ ,  $b_1$  – невідомі коефіцієнти.

Для визначення коефіцієнтів  $b_0$  та  $b_1$  за методом найменших квадратів використовуються наступні вирази [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  $y$  і змінної  $x$ ;

$r_{x,y}$  – коефіцієнт кореляції між значеннями функції  $y$  і змінної  $x$ .

Через очевидну простоту розрахунків апроксимація експериментальних даних лінійною функцією використовується доволі часто. Для лінеаризації нелінійної функції (для перетворення нелінійної функції у лінійну) необхідно підібрати таке перетворення вихідної залежності  $f(x) = \varphi(x, a_0, a_1)$ , у результаті якого вона набуває лінійного виду [9]:

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

Далі вирішується завдання лінійної апроксимації для нової лінійної залежності (4.3) і обчислені коефіцієнти  $b_0$  і  $b_1$  перераховуються у коефіцієнти  $a_0$  та  $a_1$ .

Вираз (4.2) для лінеаризованої функції (4.3) в узагальненому виді записуються у такий спосіб [9]:

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

Для деяких двопараметричних залежностей, які були використані для апроксимації експериментальних даних, заміни змінних у виразах (4.3, 4.4), а також зворотні заміни для перерахування коефіцієнтів  $b_0$  і  $b_1$  у  $a_0$  і  $a_1$  наведені в табл. 4.2.

Помилка апроксимації (згладжування) визначається з виразу [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	
Експонентна $f(x) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot x}$	$v(x) = \ln[f(x)]$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = x;$ $u_i = x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_1 = b_1$
Статечна $f(x) = a_0 \cdot x^{a_1}$	$v(x) = \ln f(x)$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = \ln x;$ $u_i = \ln x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_1 = b_1$
Показова $f(x) = a_0 \cdot a_1^x$	$v(x) = \ln f(x)$ $v_i = \ln(y_i)$	$u = x;$ $u_i = x_i$	$v(x) = b_0 + b_1 \cdot u$	$a_0 = e^{b_0}$	$a_0 = e^{b_1}$

Точність апроксимації вважається задовільною, якщо виконується умова:

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

Сутність параболічної апроксимації за методом Чебишева полягає у перетворенні вихідного масиву експериментальних даних, який містить значення аргументу, у ряд цілих чисел  $x_i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n-1, n$ . Тут  $i$  – номер елементів масиву.

Після перетворення вихідного масиву, який містить значення аргументу, у ряд цілих чисел  $x_i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n-1, n$  переходять безпосередньо до апроксимації. Апроксимуюче рівняння має вигляд [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;

Коефіцієнт  $k_0$  визначається з виразу [10]:

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

де  $n$  – кількість експериментальних крапок.

Рівняння параболі нульового ступеня має вигляд [10]:

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

Помилка апроксимації експериментальних даних параболою нульового порядку обчислюється по рівнянню [10]:

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

Рівняння параболі першого порядку записується у вигляді суми [10]:

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

Коефіцієнт  $k_1$  і функція  $\psi_1(x)$ , які входять у рівняння (4.11), визначаються з наступних виразів [10]:

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

Помилка апроксимації експериментальних даних параболою першого порядку становить [10]:

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

Рівняння параболі другого порядку має вигляд [10]:

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

де  $f(x)_1$  – рівняння параболи першого порядку.

Коефіцієнт  $k_2$  і функція  $\psi_2(x)$  визначаються у такий спосіб [10]:

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

Помилка апроксимації експериментальних даних параблою другого порядку становить [10]:

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

Рівняння кубічної параболи має такий вигляд [10]:

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

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

Коефіцієнт  $k_3$  і функція  $\psi_3(x)$  визначаються з виразів [10]:

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

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

Помилка апроксимації експериментальних даних кубічною параблою становить [10]:

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

Рівняння параболі четвертого ступеня [10]:

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

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

Коефіцієнт  $k_4$  і функція  $\psi_4(x)$  визначаються з виразів [10]:

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

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

Помилка апроксимації експериментальних даних параболою четвертого порядку становить [10]:

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

Рівняння параболі п'ятого порядку має вигляд [10]:

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

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

Коефіцієнт  $k_5$  і функція  $\psi_5(x)$  визначаються з наступних виразів [10]:

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



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

Помилка апроксимації експериментальних даних параболою п'ятого порядку становить [10]:

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

Точність апроксимації оцінюється по рівнянню (4.6).

Після досягнення необхідної точності апроксимації слід перейти від допоміжної змінної  $x$  ( $x_i = 1, 2, 3 \dots n-1, n$ ) до дійсного аргументу.

Серед розглянутих функцій найкраще наближення до експериментальної залежності твердості стали 60С2ХА від температури відпуску дає параболою 5-го порядку. В узагальненому виді її рівняння записується у наступний спосіб:

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

де  $T$  – температура відпуску;

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

Для визначення шести невідомих коефіцієнтів у рівнянні (4.26) необхідно скласти систему із шести лінійних рівнянь. Для складання такої системи рівнянь слід обчислити значення функції  $f_5(T)$  у шести будь-яких точках, які знаходяться у діапазоні температур  $T = 150 - 600^\circ\text{C}$ . В якості таких точок були обрані наступні значення температур відпуску:  $T_1 = 150^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 250^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 300^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 400^\circ\text{C}$ ;  $T_6 = 600^\circ\text{C}$ .

Система лінійних рівнянь для 6 обраних точок ( $T_1 = 150^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 250^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 300^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 400^\circ\text{C}$ ;  $T_6 = 600^\circ\text{C}$ ) записується наступним чином:

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

Система рівнянь (4.27) у середовищі програмування “Mathcad” представляється у матричній формі. У матрицю  $M$  вводяться значення параметрів, які відповідають коефіцієнтам  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ . У матрицю  $m$  вводяться значення функції  $f_5(T_1), f_5(T_2), f_5(T_3), f_5(T_4), f_5(T_5), f_5(T_6)$ . Потім за допомогою оператора “Isolve” здійснюється обчислення коефіцієнтів  $a_i$ :

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

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

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

За отриманим значенням коефіцієнтів  $a_i$  будується рівняння параболи п'ятого порядку. Значення коефіцієнтів підставляються у рівняння (4.26). Для залежності твердості сталі від температури відпуску рівняння (4.26) має такий вигляд:

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

Графік залежності твердості сталі від температури відпуску наведений на рис. 4.4. Відповідно до цього графіку у діапазоні температур відпуску 150 - 200°C твердість сталі зменшується несуттєво, що обумовлено збереженням високої концентрації вуглецю у твердому розчині на основі  $\alpha$  - Fe. При збільшенні температури відпуску концентрація вуглецю у твердому розчині знижується внаслідок утворення карбідів, і твердість сталі зменшується.

Експериментальні дані по залежності коерцитивної сили сталі 60C2XA від її твердості з найменшою помилкою апроксимуються рівнянням параболи 3-го порядку (рис. 4.5). Дещо більш високу помилку дає апроксимація показовою та експонентною функціями (рис. 4.6). Апроксимуючі рівняння на основі показової та експонентної функцій мають такий вигляд:

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

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

Рівняння параболи 3-го порядку в узагальненому виді записується в такий спосіб:

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

де  $T$  – твердість по Роквелу;

$a_0, a_1, a_2, a_3$  – невідомі коефіцієнти.

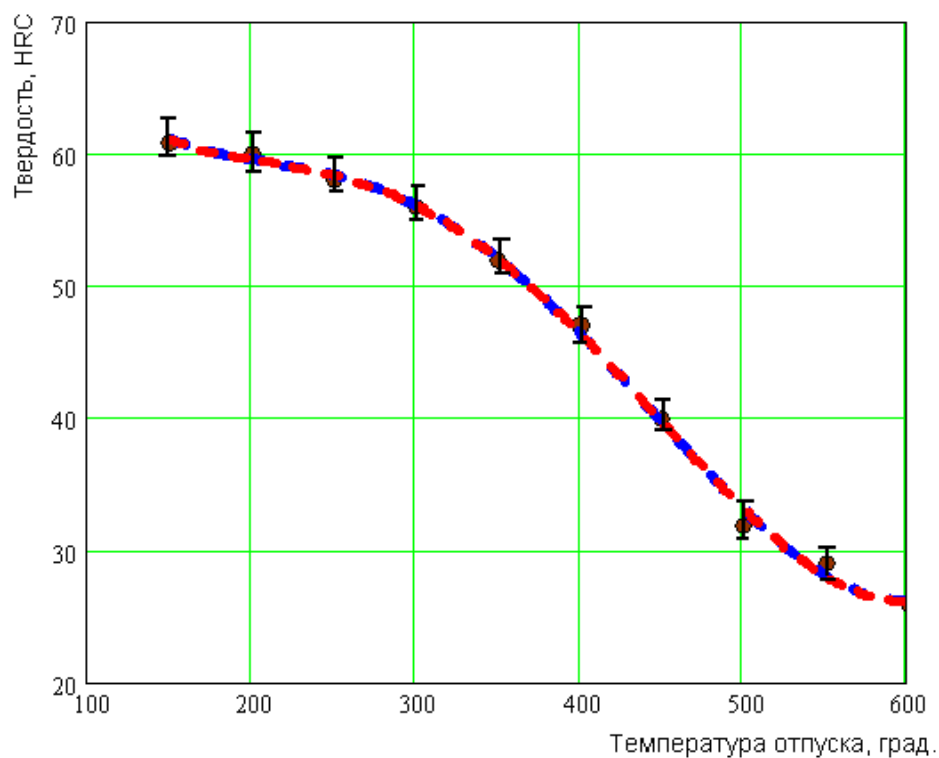


Рисунок 4.4 – Графік залежності твердості сталі 60С2ХА від температури відпуску:

● - експеримент ; - - - розрахунок

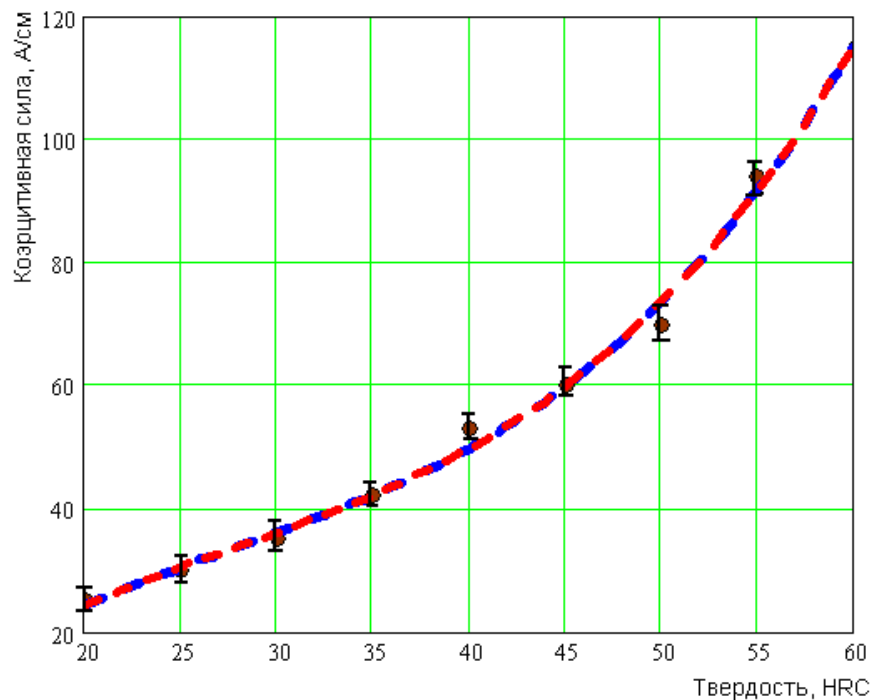


Рисунок 4.5 – Графік залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від твердості, отриманої шляхом параболічної апроксимації:

● - експеримент ; - - - розрахунок

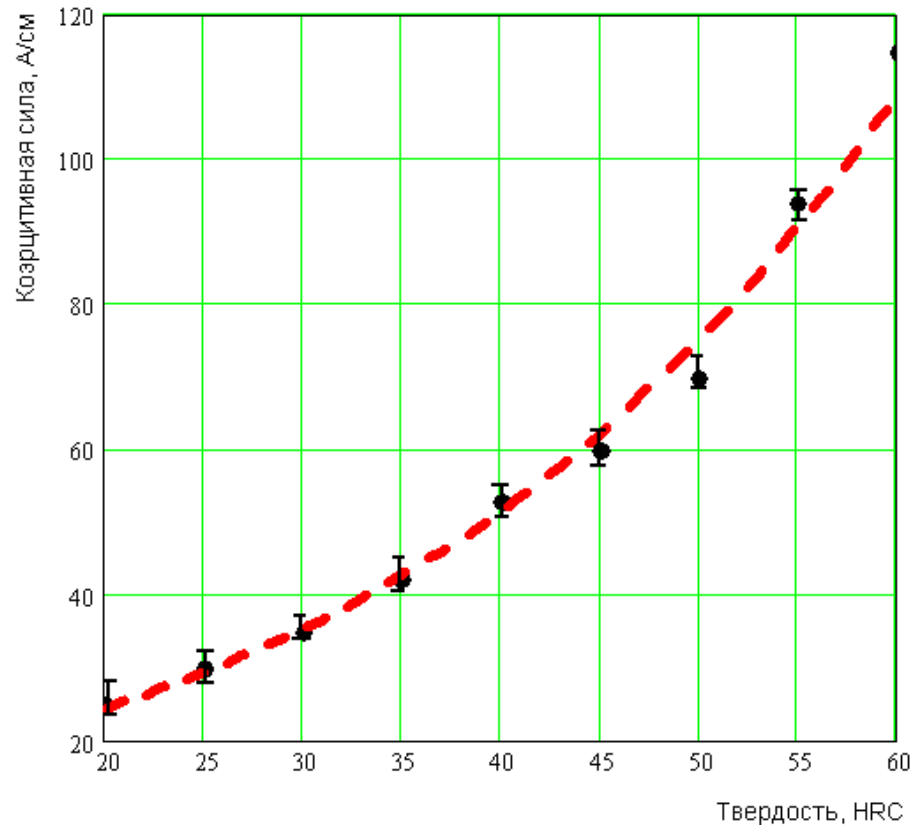


Рисунок 4.6 – Графік залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від її твердості, отриманої шляхом апроксимації по показовій та експонентній функціям:

● - експеримент ; - - - - розрахунок

Для визначення чотирьох невідомих коефіцієнтів у рівнянні (4.30) необхідно скласти систему із чотирьох лінійних рівнянь. Для складання такої системи рівнянь слід обчислити значення функції  $f_3(T)$  у чотирьох будь-яких крапках, які знаходяться у діапазоні значень твердості  $T = 25 - 60$  HRC. В якості таких крапок були обрані наступні значення твердості:  $T_1 = 20$  HRC;  $T_2 = 30$  HRC;  $T_3 = 40$  HRC;  $T_4 = 60$  HRC. Система лінійних рівнянь записується у такий спосіб:

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

Система рівнянь (4.31) у середовищі програмування “Mathcad” представляється у матричній формі. У матрицю  $M$  вводяться значення параметрів, які відповідають коефіцієнтам  $a_0, a_1, a_2, a_3$ . У матрицю  $m$  вводяться значення функції  $f_3(T_1), f_3(T_2), f_3(T_3), f_3(T_4)$ . Потім за допомогою оператора “Isolve” здійснюється обчислення коефіцієнтів  $a_i$ :

$$M := \begin{bmatrix} 1 & T_1 & (T_1)^2 & (T_1)^3 \\ 1 & T_2 & (T_2)^2 & (T_2)^3 \\ 1 & T_3 & (T_3)^2 & (T_3)^3 \\ 1 & T_4 & (T_4)^2 & (T_4)^3 \end{bmatrix} \quad m := \begin{pmatrix} f_3(T_1) \\ f_3(T_2) \\ f_3(T_3) \\ f_3(T_4) \end{pmatrix}$$

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

$$a = \begin{pmatrix} -24.052 \\ 4.052 \\ -0.108 \\ 1.313 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} a_0 = -24.052 \\ a_1 = 4.052 \\ a_2 = -0.108 \\ a_3 = 1.313 \times 10^{-3} \end{matrix}$$

За отриманим значенням коефіцієнтів  $a_i$  будується рівняння параболи третього порядку. Значення коефіцієнтів підставляються у рівняння (4.30). Для залежності коерцитивної сили сталі 60С2ХА від її твердості рівняння (4.30) має такий вигляд (у даному рівнянні  $T = \text{HRC}$ ):

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

**Висновок:** в основі методів статистичного контролю лежать математична статистика і теорія імовірності. Для встановлення статистичної залежності між твердістю та коерцитивною силою для конкретного матеріалу використовують велике число експериментальних даних, які отримані шляхом вимірювання коерцитивної сили на зразках різної твердості, відібраних з різних партій деталей. Використовуючи ці дані, можна одержати загальну оцінку технологічного процесу по точності і стабільності. На підставі статистичних даних будуються аналітичні криві взаємозв'язку

коерцитивної сили та твердості, які враховують можливі відхилення значень коерцитивної сили, які отримують шляхом вимірювання, від її теоретичних значень, що відповідають аналітичній залежності, яка наведена на рис. 4.6.

#### 4.4 Структурні перетворення при відпуску

Задача про кореляцію магнітних і механічних властивостей сталей тісно пов'язана із встановленням залежності між магнітними властивостями сталей і режимом їхньої термічної обробки. Оскільки режим термічної обробки водночас впливає і на магнітні і на механічні властивості сталей, практично у всіх випадках, коли магнітні властивості корелюють із твердістю або іншими механічними властивостями, вони також однозначно пов'язані з режимом термічної обробки.

Після гартування сталі на мартенсит вуглець знаходиться у твердому розчині на основі  $\alpha$  - Fe. Розчиняючись у  $\alpha$  - Fe, вуглець змінює параметр кристалічної ґратки заліза. Це призводить до виникнення значних внутрішніх напружень і збільшення магнітної жорсткості сталі. Як наслідок, сильно зростає її коерцитивна сила. У літературі є дані щодо величини коерцитивної сили деяких сталей після загартування: для сталі 37X2HSM – 2400 А/см, 14X17H2 – 3600 А/см, Сталі 45 – 2160 А/см, 12X2H4A – 1840 А/см [7].

Структура загартованої сталі метастабільна. При нагріванні після гартування внаслідок збільшення дифузійної рухливості атомів створюються умови для процесів, які змінюють структуру сталі у напрямку до більш рівноважного стану. Характер цих процесів визначається трьома найважливішими особливостями будови загартованої сталі: сильною перенасиченістю твердого розчину – мартенситу, підвищеною щільністю у ньому дефектів кристалічної ґратки – дислокацій, малокутових і висококутових границь, двійникованих прошарків і присутністю у багатьох сталях залишкового аустеніту [7, 8].

Розпад мартенситу з виділенням карбідів – головний процес при відпуску сталей. Закономірності розпаду мартенситу багато у чому подібні із закономірностями розпаду пересиченого розчину при старінні сплавів, які піддаються гартуванню без поліморфного перетворення. Розпад мартенситу залежно від температури і тривало-

сті відпуску проходить через стадії передвиділення, виділення проміжних метастабільних карбідів, виділення цементиту і коагуляції цементиту [3, 7].

Утворення цементиту  $Fe_3C$  із структурою, ідентичною або близькою до структури цементиту відпаленої сталі, відбувається при температурах вище  $250^{\circ}C$ , причому найбільш активно в інтервалі температур  $300 - 400^{\circ}C$  [3, 7].

Цементит  $Fe_3C$  – більш стабільна фаза, яка володіє меншою об'ємною («хімічною») вільною енергією, ніж проміжний карбід. Крім того, при підвищенні температури відпуску зниження концентрації вуглецю у твердому  $\alpha$  - розчині змінює міжплощинні відстані таким чином, що кристалічна ґратка  $\alpha$  - фази краще сполучається вже не із ґраткою  $\epsilon$  - карбиду, а із ґраткою цементиту. Таким чином, при більш високих температурах відпуску виграш в об'ємній і поверхневій вільній енергії призводить до зародження і росту цементиту  $Fe_3C$ , а не проміжного карбиду [2, 7].

Встановлено два механізми зародження цементиту. По - перше, цементит виділяється безпосередньо з пересиченого твердого  $\alpha$  - розчину, причому зростання часток  $Fe_3C$  супроводжується розчиненням виділень менш стабільного карбиду, що утворився раніше. По - друге, цементит утворюється перебудовою кристалічної ґратки проміжного карбиду у кристалічну ґратку  $Fe_3C$  (у межах об'єму часток проміжного карбиду) [5, 7].

Коагуляція і сфероїдизація цементиту – завершальна стадія процесів карбидоутворення при відпуску. При порівняно низьких температурах цементит росте у вигляді дисперсних пластин, напівкогерентних металевій матриці [7]. Розмір цементитних пластин різний. Концентрація вуглецю у твердому  $\alpha$  - розчині біля відносно дрібних часток вища, ніж біля більш крупних часток. Ця різниця концентрацій забезпечує дифузію вуглецю у  $\alpha$  - розчині від більш дрібних цементитних часток до більш крупних часток. У результаті такої вирівнювальної дифузії  $\alpha$  - розчин стає ненасиченим біля дрібних часток і пересиченим біля великих часток [7]. Більше дрібні цементитні частки розчиняються, а більш крупні збільшуються у розмірах. Цементит виділяється з  $\alpha$  - розчину на великих частках подалі від їхніх вершин та ребер, і форма великої частки наближається до сферичної [6, 7]. Таким чином, переносом речовини через розчин здійснюються коагуляції і сфероїдизація цементиту при від-



пуску сталі. Нижче  $350^{\circ}\text{C}$  ці процеси розвинені дуже слабо. По-справжньому інтенсивна коагуляція і сфероїдизація починаються з температури  $350 - 400^{\circ}\text{C}$  [7]. Вище  $600^{\circ}\text{C}$  усі частки цементиту сферичні і протікає тільки їхня коагуляція [7]. При ізотермічній витримці коагуляція цементиту інтенсивно розвивається протягом короткого часу (першої години) і потім згасає [1, 7]. Середній розмір цементитних часток збільшується з підвищенням температури відпуску.

Розпад залишкового аустеніту відіграє істотну роль у процесах відпуску високовуглецевих сталей, в яких він перебуває у значній кількості. Розпад аустеніту активно протікає в інтервалі температур  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  [7]. Залишковий аустеніт при відпуску перетворюється у нижній бейніт.

Вище головна увага була приділена карбідоутворенню при відпуску. Не менш важливими є зміни стану матричної фази: зменшення концентрації вуглецю у  $\alpha$ -розчині і зміни субструктури та мікроструктури  $\alpha$ -фази.

Зменшення концентрації вуглецю у  $\alpha$ -розчині протікає у всьому температурному інтервалі виділення з нього карбідної фази.

Утворення фериту і наближення його будови до рівноважного стану значно зменшує коерцитивну силу сталі. Коерцитивна сила фериту залежно від вмісту вуглецю і легуючих елементів приблизно у 5 - 8 разів менша коерцитивної сили мартенситу.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ПРУЖИН

При зовнішньому огляді на пружині виявлена волосоподібна тріщина. Тріщина поширюється по всій довжині витка пружини на значну глибину (рис. 5.1). Злам на пружині має специфічні ознаки втомного руйнування. На пружині спостерігається складний втомний злам – дві площини зламу утворюють приблизно прямий кут. Наклепана частина зламу свідчить про те, що руйнування відбувалось повільно, тобто пружина певний час працювала із тріщиною (рис. 5.2).

Втомні злами виникають при тривалому впливі на метал повторно-змінних напруг, які можуть викликати утворення тріщин. Поступове накопичення ушкоджень у металі під дією циклічних навантажень, які призводять до утворення тріщин і руйнування, називається втомою, а властивість матеріалів опиратися втомі – витривалістю.

Втомний злам має специфічні ознаки, що відрізняють його від зламу, який утворюється при статичному навантаженні. На рис. 5.3, де показана типова картина зламу при втомі, можна виділити дві зони.

Перша зона – АВС – слід поширення власно втомної тріщини, котрий характеризується найчастіше приблизно концентричними контурами, що позначають послідовні позиції фронту тріщини. Фокус цих контурів знаходиться у місці зародження (А) втомної тріщини. Поверхня цієї зони гладка, притерта. Такий характер поверхні – результат наклепу, який викликаний повторюваним натисканням двох поверхонь тріщини одна на іншу або їхнім взаємним зсувом при зміні знака напруги.

Друга зона – ВС – результат заключної стадії втомного руйнування, який протікає залежно від умов випробування по в'язкому або крихкому механізму, притаманному для статичного руйнування. Відповідно, злам у цій зоні має або волокнистий, або кристалічний вигляд.

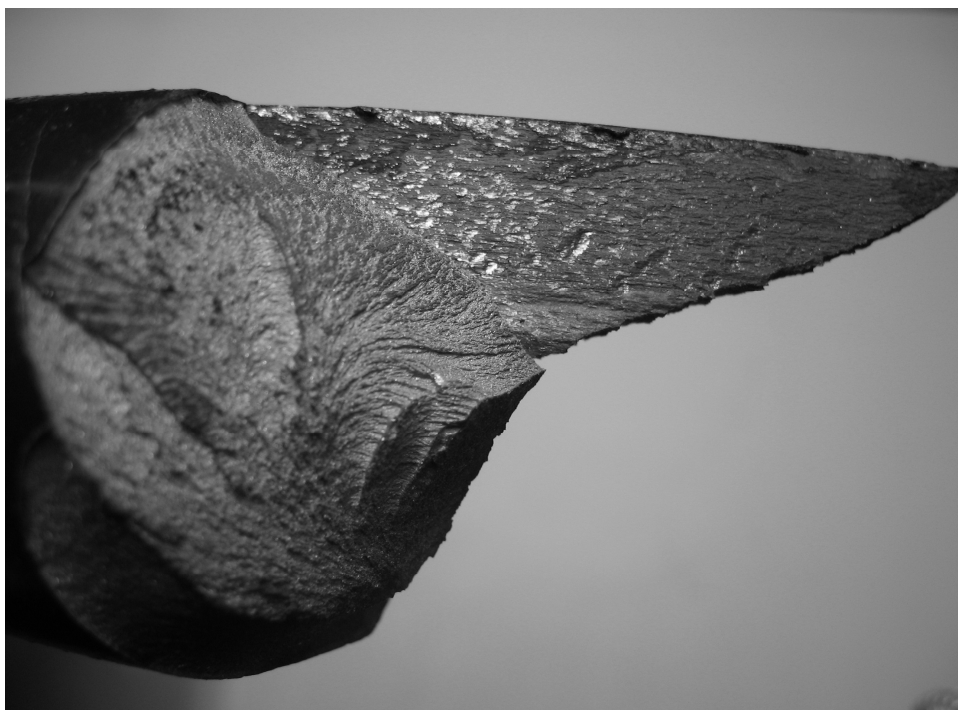


а



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

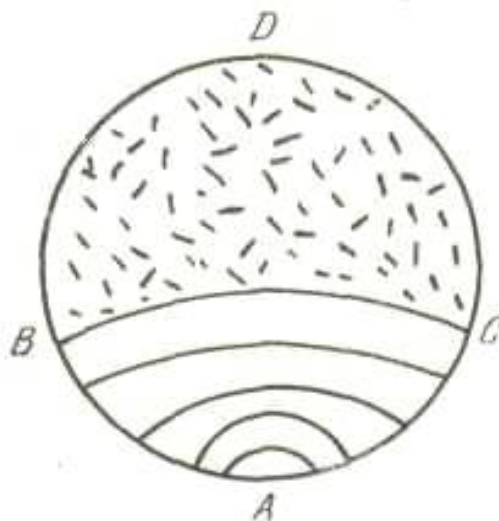


Рисунок 5.3 – Типова картина зламу у результаті втомного руйнування

На зламах пружини, що досліджувалась (рис. 5.4), виявлені обидві зони, характерні для типового втомного руйнування. На зламах чітко видні сліди поширення втомної тріщини у вигляді концентричних контурів, які позначають послідовні позиції фронту тріщини. Чітко фіксується також зона, у якій відбулося остаточне руйнування пружини. Злам у цій зоні має волокнистий (в'язкий) характер.

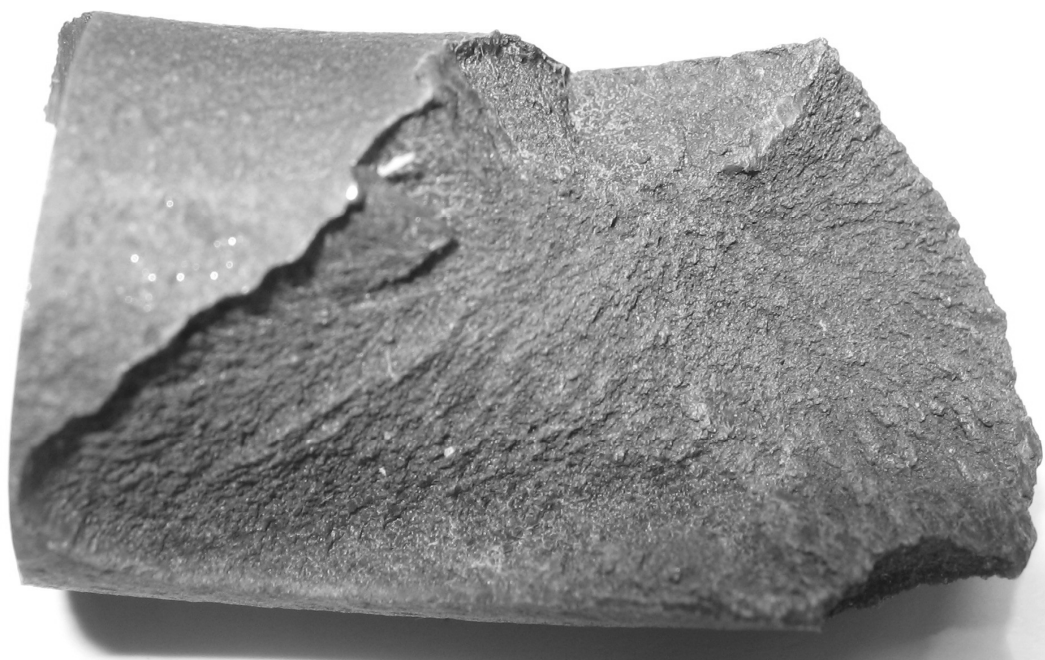
З метою встановлення причини руйнування пружини проведено металографічне дослідження, яке включало:

1. Контрольний хімічний аналіз.
2. Макроаналіз.
3. Мікроаналіз.
4. Контроль твердості.

Результати контрольного хімічного аналізу показали, що пружина виготовлена зі сталі 60С2ХА, що відповідає вимогам креслення (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Вміст елементів у сталі, мас. %

С	Mn	Si	S	P	Cr
0,59 - 0,61	0,63 - 0,67	1,55 - 1,61	<0,023	<0,014	0,98 - 1,01



а



б

Рисунок 5.4 – Втомні злами пружини

Для проведення макроаналізу у поперечному напрямку витка пружини у місці розташування поверхневої тріщини був вирізаний темплет, з якого виготовлений макрошліф. Для травлення використовувався реактив Гейна (53мл  $\text{NH}_4\text{Cl}$  , 85мл  $\text{CuCl}_2$  на 1л  $\text{H}_2\text{O}$ ). У результаті аналізу травлених макрошліфів встановлено, що поверхнева тріщина поширюється на глибину 7 мм (рис. 5.5). Інших дефектів на поверхні пружини не виявлено.



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

При дослідженні мікроструктури до травлення видно, що тріщина у поверхні рівна і тонка, потім переходить у звивисту (рис. 5.6). Края тріщини окислені, у деяких ділянках тріщина заповнена оксидами, дрібні включення типу оксидів розташовуються і навколо тріщини (рис. 5.7).

Після травлення у 4 % розчині  $\text{HNO}_3$  в спирті у поверхні тріщини виявлений знеуглецьований шар (рис. 5.8).

Мікроструктура пружини троосно-мартенситна, дрібно і середньогольчата (рис. 5.9).

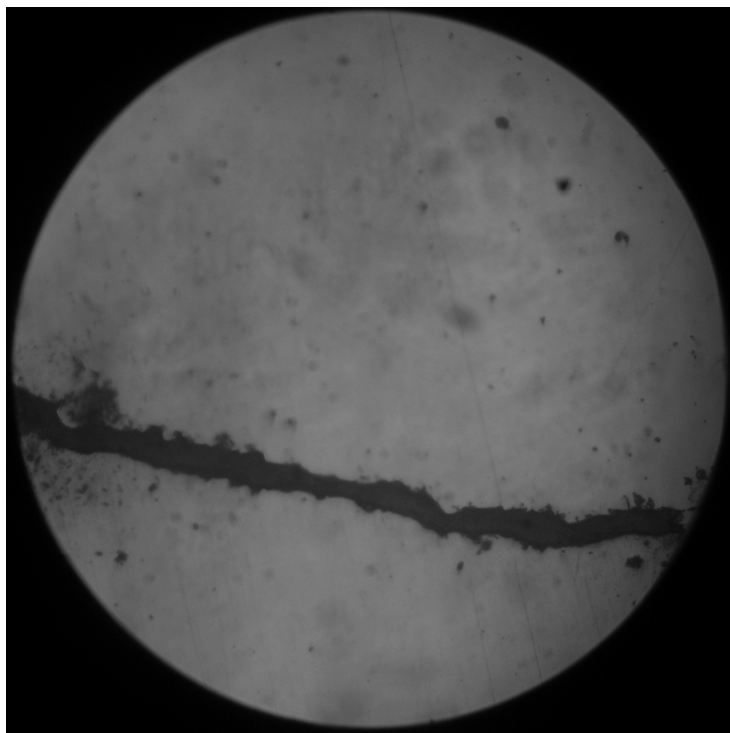


Рисунок 5.6 – Вид тріщини у поперечному перерізі пружини ( $\times 250$ )

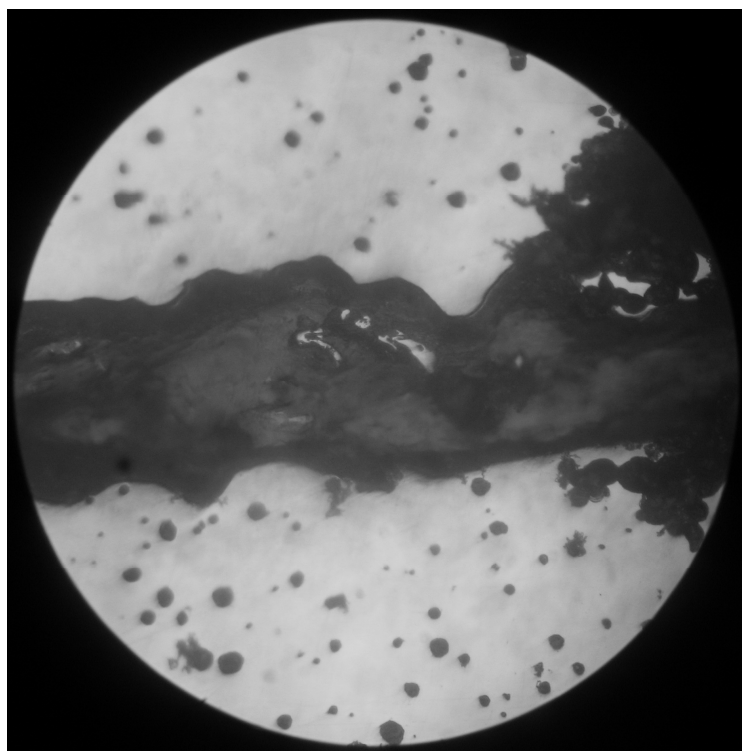


Рисунок 5.7 – Окиснення краю тріщини на пружині.  
Включення оксидів у металі ( $\times 250$ )





Рисунок 5.8 – Зневуглецьований шар у краю тріщини на пружині ( $\times 250$ )



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

Твердість пружин визначалась на приладі типу Роквел (ТК) при навантаженні 1500 Н алмазним конусом. При виконанні вимірювань індендор вдавлюється у зразок під дією двох послідовно прикладених навантажень: попереднього  $P_0$  і загального  $P = P_0 + P_1$ , де  $P_1$  – основне навантаження.

На поверхні пружини твердість HRC = 51,5 - 53. У центрі, серцевині пружини HRC = 51. Біля тріщини пружини HRC = 49,5 - 53.

На підставі проведеного дослідження встановлено:

1. Відповідно до контрольного хімічного аналізу матеріалом пружини є сталь 60С2ХА, що відповідає ДСТУ 14959-79.
2. Твердість і мікроструктура пружини задовільні, тобто порушень режиму термічної обробки не виявлено.
3. Вид і розташування волосоподібної тріщини, а також наявність оксидів і знеуглецьованого шару по її краях свідчать про те, що тріщина на прутках утворилась до операцій навивки і термічної обробки, тобто є дефектом металургійного виробництва.
4. Руйнування пружини настало внаслідок втомного розвитку волосоподібної тріщини.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету.

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках.

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;

- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю необхідно негайно покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

## **6.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи**

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів гасіння пожежі.

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;
- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;
- наявності та справності блокувальних і запобіжних пристроїв, заблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Виключено". Повторне включення преса має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення. Повернення у вихідне положення органів аварійного відключення не повинно викликати повторного включення будь-якої частини преса.

Робота на пресах повинна проводитися після перевірки:

- справності роботи приладів системи управління, наявності та рівня мастила в резервуарі;
- відсутність течії масла;

-дії аварійно-попереджувальної сигналізації на сигнальному табло (червона лампочка - небезпеки);

-справності роботи фотозахисту;

-наявності тиску і відповідності його зусилля.

### **6.3 Вимоги охорони праці під час роботи**

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути:

-одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;

-робота з несправними електроприладами;

-порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220В електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захаращували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщень поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

#### **6.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи**

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використувані подовжувачі мережі 220В.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займісті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

#### **6.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях**

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій.

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.



Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі:

-негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;

-негайно евакуувати в безпечне місце людей що були ушкоджені;

-повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;

-видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;

-приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;

-повідомити керівництво університету про те, що сталося;

-електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;

-гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

## 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.
4. Розглянуто питання охорони праці в лабораторії.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Конструкционные стали / Л.А. Позняк, С.И. Тишаев, Ю.М. Скрынченко и др. – Справочник. – М.: Metallurgy, 1977. – 168с.
2. Гуляев А.П. Пружинные стали. Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 272с.
3. Позняк Л.А. Конструкционные и инструментальные стали. – М.: Metallurgy, 1986. – 147с.
4. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Пружинные стали в машиностроении. – М.: Metallurgy, 1980. – 244с.
5. Паисов И.В. Термическая обработка стали и чугуна. – М.: Metallurgy, 1970. – 264с.
6. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н. Теплофизические свойства сталей и сплавов. – М.: Metallurgy, 1970. – 592с.
7. Геллер Ю.А. Пружинные стали со специальными свойствами. Изд. 2-е. – М.: Metallurgizdat, 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. Ноулер 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.
13. Безопасность производственных процессов: Справочник / Под ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

14. Охрана труда в машиностроении: Учебник для вузов / Е.Я. Юдин, С.В. Белов, С.К. Баланцев и др.; Под ред. Е.Я. Юдина и С.В. Белова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1983. – 432 с.