

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

Підвищення експлуатаційних властивостей пружин

Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВА.м 24-1
Шифр


Підпис

Олександр МАРУСІЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н, доцент
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Володимир ГОНЧАР
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 0 12 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

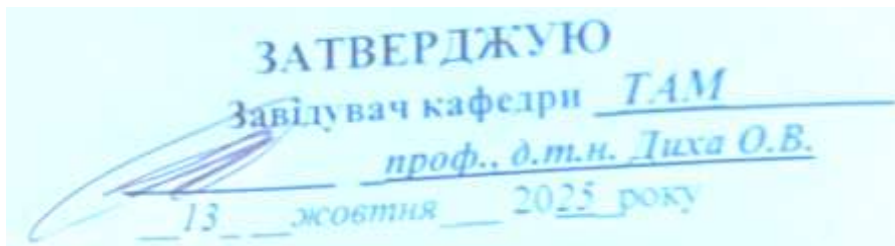
Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»



ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Марусію Олександрю Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Підвищення експлуатаційних властивостей пружин».

керівник роботи Гончар Володимир Антонович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Особливості матеріалів для виготовлення пружин;

2 Дослідження особливостей виготовлення та обробки пружин;

3 Дослідження можливостей підвищення експлуатаційних характеристик

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання_ ----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Дослідження особливостей виготовлення пружин</i>	<i>25.10. 2025</i>	
3	<i>Дослідження особливостей обробки пружин</i>	<i>15.11. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково–пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>1.12. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.12. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи


Підпис


Підпис

Олександр МАРУСІЙ
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Володимир ГОНЧАР
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційну роботу (магістерську роботу) виконано студентом гр. МТВАм 24-1 Марусієм Олександром на тему: «Підвищення експлуатаційних властивостей пружин».

Дослідження експлуатаційних характеристик та технологічних особливостей пружин зі сталі 60С2ХА спрямоване на визначення оптимальних умов їх виробництва та експлуатації. У роботі проаналізовано різні типи пружин та їх застосування в промисловості, зокрема в залізничному транспорті, машинобудуванні та приладобудуванні. Особлива увага приділяється впливу легуючих елементів, таких як кремній, хром та марганець, на формування механічних властивостей сталі 60С2ХА. Досліджено структурні перетворення, що відбуваються під час термічної обробки після гарячого навивання пружин, та їх вплив на експлуатаційні характеристики виробів. Важливим аспектом дослідження є аналіз причин знеуглецювання пружин залізничного составу та розробка методів запобігання цьому явищу. Розглянуто механізми деградації механічних властивостей під час експлуатації та фактори, що впливають на довговічність пружин

Мета кваліфікаційної роботи дослідження експлуатаційних характеристик та технологічних особливостей пружин спрямоване на визначення оптимальних умов їх виробництва та експлуатації..

Шляхом досягнення поставленої мети є виконання таких завдань:

- На основі літературного огляду проаналізувати різновиди пружин, специфіку їх роботи в експлуатаційних умовах
- Провести аналіз впливу технологічних параметрів термообробки на кінцеві властивості виробів
- Досліджено механізми формування структури та її вплив на експлуатаційні характеристики.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає в тому, що підібрано матеріал для виготовлення та його термічна обробка.

Практична значущість кваліфікаційної роботи дуже висока, оскільки вона забезпечує довговічність та надійність експлуатації пружин.

Кваліфікаційна робота містить 81 сторінку машинописного тексту з 16 рисунками та 15 таблицями, а також список використаних джерел із 17 найменувань, вступ, 4 розділи та висновок.

Ключові слова: ПРУЖИНИ, ГАРЯЧЕ НАВИВАННЯ, ЗНЕУГЛЕЦЮВАННЯ, МІКРОСТРУКТУРА, ТВЕРДІСТЬ, ЛЕГУВАННЯ, МОДИФІКУВАННЯ, СТРУКТУРА, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРТУВАННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПРУЖИН ТА ЇХ ОБРОБКА	7
1.1 Конструкції пружин і умови роботи	8
1.2 Матеріали для виготовлення пружин та вимоги	17
1.3 Обробка пружин.....	27
1.4 Пружинні сталі, їх структура і властивості.....	34
2 ДОСЛІДЖЕННЯ	38
2.1 Матеріали для виготовлення пружин транспорту	38
2.2 Мікроструктура зразків	39
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРУЖИН	44
3.1 Вплив легуючих елементів на властивості пружин	45
3.2 Огляд технології виготовлення пружин	50
4 Охорона праці.....	66
4.1 Потенційні небезпеки	66
4.2 Заходи попередження небезпеки	68
4.3 Виробнича санітарія	71
Висновки	74
Перелік посилань.....	76
Додатки.....	78

КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ				
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
		Марусій	<i>[Signature]</i>	
		Гончар	<i>[Signature]</i>	
		Реценз.	<i>[Signature]</i>	
		Н. Контр.	Бабак	
		Затверд.	Духа	
Підвищення експлуатаційних властивостей пружин			Літ.	Арк.
				4
ХНУ група МТВАм 24-1				

ВСТУП

Пружина є конструктивним елементом механічних систем, призначеним для акумулювання механічної енергії шляхом пружної деформації під дією зовнішнього навантаження. Після усунення цього навантаження пружина відновлює свою початкову геометрію, при цьому запасена енергія вивільняється та використовується для виконання корисної роботи або стабілізації руху елементів механізму.

У машинобудуванні та приладобудуванні пружні елементи, зокрема пружини й ресори, займають особливо важливе місце, оскільки вони функціонують в умовах багаторазових циклічних навантажень. У процесі експлуатації такі деталі зазнають не лише статичних, а й динамічних та ударних впливів, що висуває підвищені вимоги до їхньої надійності. Пружини повинні забезпечувати стабільність робочих характеристик, зберігаючи здатність повертатися до заданих параметрів після кожного циклу деформації.

Щоб запобігти появі залишкових деформацій і передчасному виходу з ладу, матеріали, з яких виготовляють пружини, мають відповідати суворим вимогам. До основних з них належать висока пружність і міцність, значна втомна витривалість, достатній рівень пластичності, а також стійкість до крихкого руйнування та релаксації напружень у процесі тривалої експлуатації.

Не менш важливим чинником, що визначає довговічність і

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

працездатність пружин, є технологія їх виготовлення та термічної обробки. Саме вибір матеріалу, режимів формоутворення й зміцнення значною мірою визначає експлуатаційні властивості готового виробу. Актуальність дослідження цієї тематики зумовлена широким і практично повсюдним застосуванням пружин як невід'ємних елементів у конструкціях сучасних машин, механізмів і технічних систем різного призначення.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПРУЖИН ТА ЇХ ОБРОБКА

Пружина являє собою функціональний елемент механічної системи, робота якого ґрунтується на здатності матеріалу акумулювати механічну енергію під час пружної деформації та повертати її при відновленні початкової форми. Саме завдяки цій властивості пружинні елементи забезпечують стабільність роботи, компенсацію навантажень і регулювання руху в багатьох технічних пристроях.

Пружини є обов'язковою складовою широкого спектра механізмів і машин та знаходять застосування практично в усіх галузях промисловості. Вони широко використовуються в залізничному транспорті, автомобілебудуванні, машинобудуванні, приладобудуванні, а також у високотехнологічних сферах, зокрема в авіаційній та космічній техніці. У годинникових механізмах пружини виконують функцію основного джерела енергії, забезпечуючи роботу системи без зовнішнього живлення.

Крім того, пружинні елементи відіграють важливу роль у конструкціях вогнепальної зброї, двигунів внутрішнього згоряння, паливних систем, запобіжних і демпфувальних пристроїв, а також у багатьох інших технічних вузлах. Їхня присутність дозволяє підвищити точність роботи механізмів, зменшити ударні навантаження та забезпечити плавність функціонування рухомих частин.

Якість виготовлення пружин, включаючи вибір матеріалу, технологію формування та режими термічної обробки, безпосередньо визначає експлуатаційну надійність, довговічність і стабільність роботи механічних систем у цілому. Недостатній рівень якості може призвести до передчасного виходу з ладу вузлів, порушення роботи обладнання та зниження його ресурсу,

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що підкреслює важливість ретельного підходу до проектування й виробництва пружинних елементів [1].

1.1 Конструкції пружин і умови роботи

Систематизація пружинних елементів здійснюється відповідно до типу навантаження, яке вони сприймають у процесі роботи. З огляду на цей критерій розрізняють пружини, що працюють на стискання, розтягування, кручення та згин [1,2]. Така класифікація дозволяє обґрунтовано підбирати тип пружини залежно від умов експлуатації та функціонального призначення механізму.

Пружини стискання призначені для сприйняття осьового навантаження, під дією якого відбувається зменшення відстані між витками. У міру прикладання зусилля крок між витками поступово скорочується, що забезпечує накопичення потенціальної енергії. Характерною конструктивною особливістю таких пружин є спеціально сформовані опорні поверхні на крайніх витках, які піддаються торцюванню та шліфуванню. Це забезпечує рівномірну передачу навантаження вздовж осі пружини та підвищує її стійкість у роботі. Основне призначення пружин стискання полягає в акумулюванні енергії під час деформації та створенні протидіючої сили після зняття навантаження.

У процесі роботи пружини стискання зазнають подовжньо-осьового навантаження та після його усунення повертаються до початкових геометричних розмірів. За способом виконання крайніх витків розрізняють пружини з непритиснутими та притиснутими (заточеними або шліфованими) торцями. Останні вимагають особливо точної механічної обробки для

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення перпендикулярності опорних площин відносно осі пружини. Зазвичай на ділянці приблизно трьох чвертей крайнього витка формується опорна поверхня, при цьому ці витки фактично не беруть участі в пружній деформації.

Для роботи в умовах значних навантажень застосовують складені системи, що складаються з кількох концентрично розташованих пружин стискання. З метою запобігання перекосам і небажаному закручуванню опор у таких конструкціях використовують чергування правої та лівої навивки.

Пружини розтягування призначені для сприйняття навантажень, які викликають збільшення їх довжини. У ненавантаженому стані витки таких пружин щільно прилягають один до одного, а робота пружини починається лише після прикладання розтягувального зусилля. Конструктивною особливістю пружин цього типу є наявність на кінцях спеціальних елементів кріплення — гачків або кілець. За способом оформлення торців розрізняють пружини зі спеціальними гвинтовими пробками без кілець та пружини з кільцями різної форми і конфігурації.

Монтаж пружин розтягування у вузлах машин здійснюється за допомогою відповідних кріпильних елементів, що забезпечують надійне закріплення та правильну орієнтацію. За геометричною формою такі пружини можуть бути циліндричними, конічними або бочкоподібними. Для їх виготовлення зазвичай використовують дрід діаметром від 0,2 до 8 мм, хоча в окремих випадках застосовується і значно товстіший дрід — понад 10 мм. Пружини з дроту великого діаметра (19–20 мм) використовують у специфічних умовах, зокрема в пантографах електровозів, механізмах підйому робочих органів комбайнів та інших вузлах сільськогосподарської і промислової техніки.

Пружини кручення функціонують за рахунок деформації, пов'язаної зі

					<i>KPM MТBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скручуванням навколо власної осі. Під час роботи їхні кінці повертаються один відносно одного на певний кут, створюючи момент, що протидіє прикладеному навантаженню. У вільному стані витки таких пружин, як правило, щільно зімкнуті. Кінцеві ділянки виконуються у вигляді прямих або зігнутих важелів, форма та довжина яких залежать від умов монтажу та експлуатації.

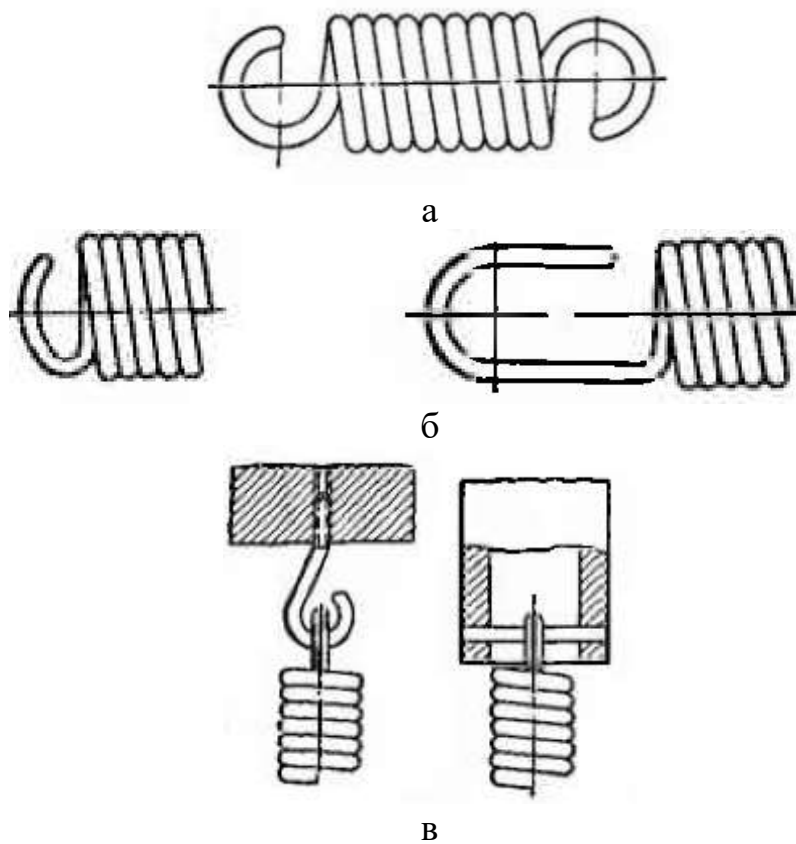
Пружини згину застосовуються значно рідше порівняно з іншими типами та працюють на деформацію вигину. Їх виготовляють з дроту або стрічкового матеріалу у вигляді плоских спіралей або завитків. Найчастіше такі пружини використовуються в точних механізмах та приладобудуванні. Залежно від форми поперечного перерізу вихідного матеріалу розрізняють пружини круглого, квадратного, прямокутного та інших спеціальних перерізів, що дозволяє адаптувати їх до конкретних умов навантаження та конструктивних вимог.

Для надійного встановлення та фіксації пружин у складі механічних вузлів застосовуються спеціальні елементи кріплення, зокрема гвинтові пробки та різноманітні кільця. Ці деталі забезпечують коректне розташування пружини в конструкції, сприйняття робочих навантажень і стабільність її роботи протягом усього терміну експлуатації. Залежно від умов монтажу та характеру навантаження пружини розтягування можуть мати різну геометричну форму.

За конфігурацією пружини розтягування зазвичай виготовляють у трьох основних виконаннях: циліндричному, конічному та бочкоподібному. Кожна з цих форм має свої переваги та використовується з урахуванням вимог до рівномірності деформації, компактності розміщення та стійкості під навантаженням. Для їх виробництва переважно застосовують дріт діаметром у межах від 0,2 до 8 мм, що дозволяє виготовляти пружини для широкого

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спектра промислових і побутових застосувань.



а – загальний вигляд; б – в – варіанти виконання

Рис. 1.1 – Вигляд торцевих кілець пружин розтягнення [1]

Водночас у спеціалізованих випадках, коли необхідно сприймати значні навантаження, використовують дрiт більшого діаметра — понад 10 мм. Характерним прикладом є застосування дроту діаметром 19–20 мм при виготовленні пружин для пантографів електровозів, механізмів підйому робочих органів комбайнів, а також інших вузлів сільськогосподарської та

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важкої промислової техніки, де висуваються підвищені вимоги до міцності та довговічності.

Пружини кручення працюють за рахунок дії пари сил, які створюють крутний момент у площинах, перпендикулярних до осі пружини (рисунок 1.2). У процесі навантаження відбувається скручування витків, унаслідок чого накопичується пружна енергія, що вивільняється при знятті навантаження. За конструктивним виконанням і характером роботи такі пружини поділяють на два основні різновиди [1].

До першої групи належать торсіонні пружини, які мають подовжений стрижень і працюють переважно на кручення. Вони широко застосовуються у машинобудуванні та технічних системах, де необхідно передавати або компенсувати значні крутні моменти. Другу групу становлять кручені пружини, які знаходять застосування переважно в побутових і офісних пристроях, зокрема в мишоловках, прищіпках для білизни, канцелярських дирижолках та інших механізмах. Для таких пружин характерна робота в умовах багаторазового циклічного скручування та розкручування, що висуває особливі вимоги до їхньої втомної міцності та стабільності параметрів у процесі експлуатації.

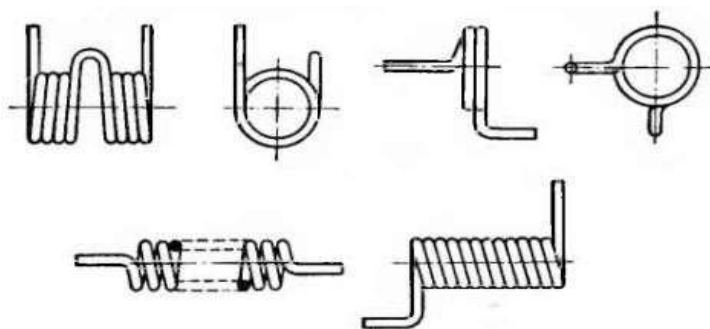


Рис. 1.2 – Вигляд пружин кручення

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пружини згину характеризуються відносно простою конструкцією та значною різноманітністю геометричних виконань. До цієї групи належать такі елементи, як торсіонні вузли, стопорні кільця й шайби, пружні затискачі, а також окремі деталі релейних і керувальних систем. Основною функцією пружин згину є передавання та сприйняття пружних деформацій за умов незначних змін геометричних параметрів як окремих елементів, так і складених пружинних систем, наприклад ресор або пакетів тарілчастих пружин.

Залежно від конструктивного виконання, просторової форми та принципу роботи пружинні елементи поділяють на низку типів, зокрема: кручені циліндричні (гвинтові), кручені конічні (що широко застосовуються в амортизаційних системах), тарілчасті, пластинчасті, торсіонні, а також рідинні, газові, плоскі та спіральні пружини. Така класифікація дозволяє обґрунтовано вибирати тип пружини з урахуванням умов експлуатації та вимог до навантажувальної здатності.

З огляду на практичне застосування, види пружин можна систематизувати за їх функціональним призначенням. Найбільш поширеними є гвинтові пружини, які використовуються в широкому діапазоні виробів — від елементів автомобільної підвіски до дрібних побутових механізмів, зокрема кулькових ручок. Такі пружини виготовляють як з постійним діаметром витків (циліндричні), так і зі змінним діаметром (конічні), причому останні часто застосовують в амортизаторах і системах з обмеженим монтажним простором [1–3].

Торсіонні пружини, незважаючи на певну конструктивну подібність до гвинтових, працюють переважно в режимі кручення або вигину. Вони знаходять застосування в маятникових механізмах, вимірювальних приладах, підвісках вантажних автомобілів, а також у механізмах відкриття воріт, балансувальних

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системах і противагах, де необхідно забезпечити стабільний крутний момент.

Спиральні пружини є плоскими елементами, виготовленими зі стрічкового матеріалу, закрученого у вигляді спіралі. Завдяки здатності ефективно накопичувати потенційну енергію в обмеженому об'ємі, вони широко використовуються в годинникових механізмах, самописних приладах і різних регулювальних пристроях.

Тарілчасті пружини складаються з набору дисків спеціальної форми, з'єднаних послідовно або паралельно. Вони вирізняються високою несучою здатністю та стійкістю до значних деформацій, що робить їх незамінними в запобіжних клапанах, гальмівних системах ліфтів і залізничного транспорту, а також у відповідальних вузлах силових установок.

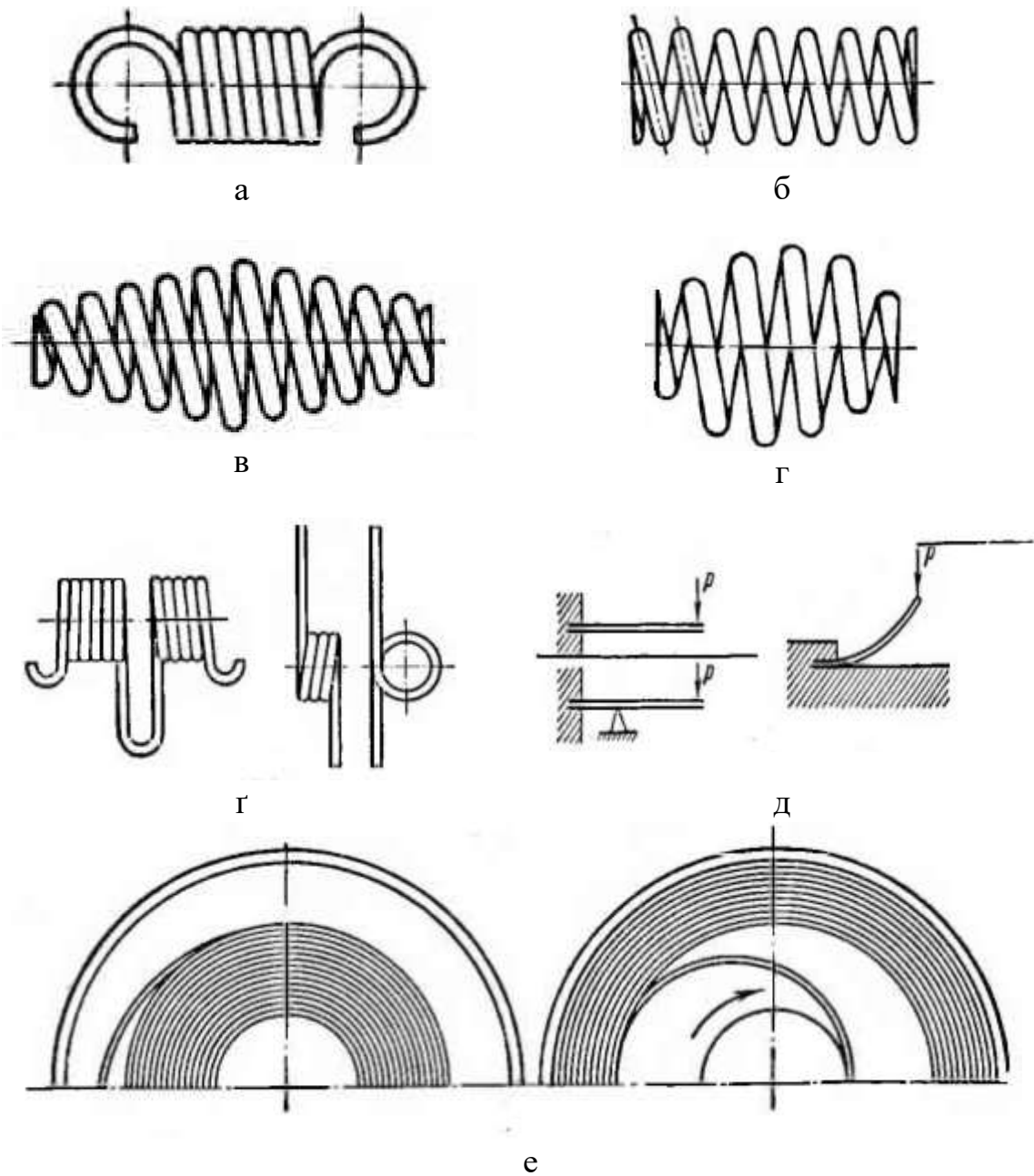
Хвильові пружини виготовляють у вигляді металевої стрічки з хвилеподібним профілем, яка навивається у спіраль. Їх основною перевагою є компактність, що дозволяє суттєво зменшувати габарити вузлів і механізмів. Такі пружини широко застосовуються у високоточних системах, зокрема в підшипникових вузлах, опорах і трубопровідній арматурі, та часто використовуються як альтернатива тарілчастим пружинам.

Газові пружини мають принципово іншу конструкцію, що включає герметичний циліндр, заповнений газом, і поршень, замість традиційного дротяного елемента. Вони широко застосовуються в автомобільній промисловості та меблевому виробництві для реалізації підйомних, балансувальних і фіксувальних механізмів [3].

Виті пружини загалом класифікують за низкою ознак, зокрема за геометричною формою, способом виготовлення, напрямом навивки та функціональним призначенням відповідно до характеру роботи. За формою такі пружини найчастіше поділяються на циліндричні, конічні, фасонні, плоскі та спіральні (рис. 1.3), що дозволяє максимально адаптувати їх до конкретних

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умов експлуатації та конструктивних обмежень.



а, б – циліндричні; в – конічні; г – бочкоподібні; Г – фасонні; д – плоскі;
е - спіральні

Рисунок 1.3 – Типи гвинтових пружин

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кручені пружини, незалежно від того, чи мають вони циліндричну, конічну або фасонну геометрію, розрізняють за напрямом навивки витків. У разі правої навивки витки розташовуються за ходом годинникової стрілки, тоді як ліва навивка характеризується протилежним напрямком укладання. Вибір напрямку навивки визначається конструктивними особливостями механізму та умовами прикладання навантаження, оскільки він безпосередньо впливає на роботу пружини в складі вузла.

За режимом навантаження пружинні елементи поділяють на дві основні групи. До першої належать пружини, що працюють в умовах періодичного навантаження. Для них характерний циклічний режим роботи з чергуванням фаз навантаження та розвантаження через певні проміжки часу. Такий характер експлуатації притаманний пружинам, які використовуються в механізмах затворів, храпових системах, собачках, накатниках та інших вузлах зброї й машин, де відбувається багаторазове повторення однакових робочих циклів.

Другу групу становлять пружини, що функціонують під дією постійного навантаження. У цьому випадку навантаження прикладається безперервно, а його величина змінюється поступово та плавно, без різких стрибків. Подібний режим роботи характерний, зокрема, для спіральних пружин, які застосовуються в годинникових механізмах, динамометрах, різноманітних вимірювальних приладах та регулювальних системах. Для таких пружин особливо важливими є стабільність пружних характеристик, мінімальна релаксація напружень і висока довговічність у процесі тривалої експлуатації.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1.2 Матеріали для виготовлення пружин та вимоги

Визначальною експлуатаційною ознакою пружинних сплавів є їх здатність протистояти навіть незначним пластичним деформаціям. Найбільш коректно ця властивість кількісно оцінюється через умовну межу пружності, яка відповідає появі залишкової деформації порядку $10^{-3}\%$, а в більш точних дослідженнях — навіть $10^{-4}\%$. Хоча в окремих випадках для характеристики якості пружинних матеріалів застосовують межу пропорційності, саме межа пружності вважається інформативнішою. Її перевага полягає не стільки у величині допустимої залишкової деформації, скільки у високій точності визначення, оскільки методика випробувань базується на вимірюванні лише залишкової деформації після повного зняття навантаження. Таким чином, межа пружності безпосередньо відображає рівень напружень, за якого виникає чітко визначена необоротна деформація. З інженерної точки зору саме ця характеристика задає допустимі напруження, перевищення яких під час експлуатації пружних елементів є небажаним або неприпустимим [4].

Зростання межі пружності, а також порогів мікроплинності й пружності в цілому свідчить про підвищення ефективності внутрішніх перешкод для руху дислокацій — як необоротного, так і оборотного. Унаслідок цього за однакових прикладених напружень зменшується ймовірність виникнення залишкових деформацій під час випадкових або змінних навантажень. Одночасно з цим слабше проявляються небажані непружні явища, зокрема механічний гістерезис і пружна післядія. Крім того, підвищення межі пружності супроводжується зростанням релаксаційної стійкості металевих матеріалів, що є критично важливим для тривалої роботи пружин. За умови високої структурної якості пружного елемента та відсутності концентраторів

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напружень можна очікувати, що його межа витривалості буде визначатися саме величиною порога пружності.

З огляду на це, основна увага при створенні та вдосконаленні пружинних сплавів має приділятися технологічним і фізичним процесам, які забезпечують зростання межі пружності. До таких процесів, характерних для різних механізмів зміцнення, належать:

- мартенситні фазові перетворення;
- деформаційний наклеп;
- формування сегрегацій легуючих елементів у певних областях кристалічної ґратки або на її дефектах;
- виділення другої, високодисперсної та більш міцної фази [5].

Згідно з дислокаційною теорією, структурні зміни в металі на початкових стадіях пластичної деформації, які відповідають досягненню межі пружності або мікроплинності, істотно відрізняються від змін, характерних для значної пластичної деформації, що визначає межу плинності, міцність або твердість. Різниця у структурному стані сплавів проявляється, зокрема, в тому, що модуль зміцнення в області мікропластичної деформації значно перевищує його значення при макропластичному деформуванні. Крім того, неоднаковим є і вплив розміру зерна на відповідні характеристики.

Відмінності в структурному стані також підтверджуються різною чутливістю межі пружності та межі плинності до параметрів термічної й деформаційної обробки. Так, при незначних ступенях наклепу межа пружності може знижуватися внаслідок інтенсивного утворення легкокорухливих дислокацій, тоді як межа плинності при цьому зростає. У процесі відпуску загартованої сталі зі збільшенням температури або тривалості витримки межі плинності та міцності, як правило, зменшуються майже монотонно, тоді як межа пружності спочатку різко зростає до певного максимуму, а лише згодом

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

починає знижуватися. Аналогічно, легування деяких сплавів, зокрема заліза, по-різному впливає на опір малим і великим пластичним деформаціям, причому вплив на макропластичну деформацію зазвичай є більш вираженим [4,5].

Специфічні властивості пружинних сплавів значною мірою визначаються їх мікроструктурою, яка включає розподіл дефектів кристалічної ґратки, домішок, легуючих елементів та надлишкових фаз, а також характер еволюції цієї структури під дією навантажень.

Для підвищення експлуатаційних характеристик існуючих матеріалів і створення нових ефективних пружинних сплавів найбільш результативним підходом є поєднання кількох механізмів зміцнення. Показовим прикладом є патентований пружинний дріт, у якому одночасно реалізуються фазовий наклеп у процесі перлітного перетворення, орієнтація цементиту за рахунок підвищеного вмісту вуглецю, деформаційний наклеп під час волочіння та ефект старіння при низькотемпературній відпустці.

Особливо важливе місце серед методів зміцнення займає термомеханічна обробка, яка поєднує фазові перетворення з інтенсивним деформаційним наклепом. Цей комплексний підхід є ефективним для широкого спектра пружинних сплавів, включаючи однофазні тверді розчини, дисперсійно-твердіючі та мартенситні матеріали.

Мартенситне перетворення забезпечує значне підвищення міцності завдяки одночасній дії кількох чинників: подрібненню зерна, формуванню фрагментованої субструктури, утворенню пересиченого вуглецем α -твердого розчину та подальшому перерозподілу атомів вуглецю. Додаткове зміцнення може бути досягнуте шляхом повторного загартування зі швидкісним нагріванням, що сприяє подальшому подрібненню зерна.

Легування є ще одним важливим інструментом покращення

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостей пружинних матеріалів і поєднує декілька механізмів зміцнення. Хоча такі елементи, як нікель, ванадій, кремній і хром, зазвичай лише незначно підвищують опір мікропластичним деформаціям, вони суттєво впливають на модуль зміцнення сталей, зокрема за рахунок гальмування поперечного ковзання дислокацій. Основним завданням легування є підвищення структурної стабільності та релаксаційної стійкості матеріалу, що досягається шляхом введення елементів, які збільшують енергію активації ковзання, формують стабільні сегрегації на дислокаціях і впливають на впорядкування матричної фази та енергію дефектів упаковки.

У сучасному виробництві використовується велика номенклатура пружинних сплавів, що зумовлено широким різноманіттям умов їх роботи, конструктивних форм і габаритів пружинних елементів. Кожна група таких виробів потребує специфічного поєднання механічних, фізико-хімічних і технологічних властивостей, які забезпечують надійність та довговічність у процесі експлуатації. Саме тому пружинні матеріали суттєво відрізняються між собою за хімічним складом, типом мікроструктури та застосовуваними режимами термічної і термомеханічної обробки.

Класифікацію пружинних сплавів доцільно здійснювати за різними ознаками, однак одним із найбільш інформативних критеріїв є домінуючий механізм зміцнення. Особливу групу становлять сплави, міцнісні властивості яких формуються внаслідок холодної пластичної деформації з подальшим низькотемпературним нагріванням або відпалом.

До цієї категорії належать, насамперед, сталі з підвищеним вмістом вуглецю (приблизно 0,4–0,8 %), які після попередньої термічної обробки піддаються інтенсивній холодній деформації, а згодом — низькому відпуску.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідний структурний стан, сформований під час термічної обробки, відіграє вирішальну роль, оскільки саме він визначає ефективність подальшого наклепу та ступінь зростання пружних характеристик. У процесі холодної деформації фазовий склад сталі практично не змінюється, однак істотно модифікується її тонка структура за рахунок різкого збільшення густини дислокацій.

Наступний низькотемпературний відпуск або старіння сприяє зняттю залишкових напружень, упорядкуванню дислокаційної структури та утворенню сегрегацій на дислокаціях. У сукупності ці процеси забезпечують підвищення межі пружності та покращення релаксаційної стійкості пружинних елементів [5,6].

До цієї ж групи відносять аустенітні сталі, у яких під час холодної пластичної деформації не відбувається фазових перетворень типу $\gamma \rightarrow \alpha$ або $\gamma \rightarrow \epsilon$. Під час відпуску в таких матеріалах реалізуються структурні процеси, подібні до перлітних сталей, однак з утворенням інших типів сегрегацій і специфічної дислокаційної субструктури. Аналогічні механізми зміцнення характерні й для деяких сплавів кольорових металів, зокрема однофазних латуней і бронз, а також сплавів молібдену, ренію, ніобію та інших елементів. Холодна деформація в цих матеріалах приводить до формування комірчастої або планарної дислокаційної субструктури та зміни початкового розподілу атомів. Подальший дорекристалізаційний відпал знижує рівень залишкових напружень, сприяє перерозподілу дислокацій за механізмом полігонізації та коригує атомну неоднорідність.

Характерною рисою всіх сплавів цієї групи є анізотропія пружних властивостей, яка найбільш виражена у деформованому стані. Після відпуску вона зменшується внаслідок вирівнювання напруженого стану та часткової релаксації дислокаційної структури [7].

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрему важливу групу становлять сталі й сплави, зміцнення яких відбувається в результаті мартенситного перетворення. До неї належать вуглецеві та леговані сталі, у тому числі мартенситно-старіючі, які набувають високих пружних характеристик після гартування. Сюди ж відносять нержавіючі сталі перехідного аустенітно-мартенситного класу, в яких мартенситне перетворення може відбуватися як при термічній обробці, так і в процесі деформаційного наклепу.

Мартенситне перетворення в сталях, що містять вуглець, супроводжується виникненням значних внутрішніх напружень у кристалічній ґратці, зумовлених присутністю атомів вуглецю у міжвузлових положеннях. Одночасно відбувається подрібнення зерен, різке зростання густини дислокацій і суттєва перебудова субструктури. У таких умовах формуються сегрегації атомів вуглецю на дислокаціях, а за певних режимів можливе виділення надлишкових фаз. Гартування мартенситно-старіючих сталей додатково підвищує концентрацію легувальних елементів у твердому розчині та сприяє інтенсивному накопиченню дислокацій.

У випадку, коли мартенситне перетворення реалізується під час деформаційного наклепу аустеніту, спостерігається загальне зростання густини дислокацій, однак їх розподіл є нерівномірним. Це призводить до розвитку анізотропії міцності та пластичності, причому найбільш чутливою до цього фактору виявляється межа пружності.

Максимальний опір малим пластичним деформаціям сталі з мартенситною структурою набувають після відпуску. У ході цього процесу відбувається розпад залишкового аустеніту, зняття залишкових напружень, перерозподіл дислокацій (часто за механізмом полігонізації), дифузія атомів вуглецю до дислокацій та виділення дисперсних карбідних або інших надлишкових фаз. Аналогічні структурні перетворення відбуваються і під час

					<i>KPM MТBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

старіння мартенситно-старіючих сталей та сталей перехідного класу, що в сукупності забезпечує високий рівень пружних властивостей і стабільність їх збереження в процесі експлуатації [7].

До пружинних сталей загального призначення переважно належать вуглецеві та леговані сталі перлітного класу, серед яких окрему підгрупу становлять також матеріали мартенситного класу (таблиця 1.1) [8]. Саме ці сталі найчастіше використовуються для виготовлення пружинних елементів завдяки оптимальному поєднанню міцності, пружності та технологічності.

Як вуглецеві, так і леговані пружинні сталі відрізняються підвищеним вмістом вуглецю, що зазвичай перебуває в межах 0,4–0,8 %. Така концентрація вуглецю є необхідною умовою для досягнення високого рівня зміцнення матеріалу як у процесі холодної пластичної деформації, так і внаслідок мартенситного перетворення під час загартування. Крім того, під час подальшого відпуску в структурі формується значна кількість дрібнодисперсних карбідних частинок, які ефективно гальмують рух дислокацій і, відповідно, сприяють підвищенню межі пружності та витривалості.

Однією з головних переваг вуглецевих пружинних сталей є можливість досягнення високих значень межі пружності завдяки поєднанню мартенситного перетворення з холодною пластичною деформацією або застосуванню кожного з цих механізмів зміцнення окремо. Такий підхід дозволяє формувати структуру, здатну ефективно протидіяти малим пластичним деформаціям у процесі експлуатації пружин.

Разом із тим вуглецеві сталі мають і низку суттєвих обмежень. Підвищений вміст вуглецю негативно впливає на пластичність і ударну

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкість матеріалу, що за умов дії змінних або ударних навантажень може спричинити схильність до крихкого руйнування пружних елементів. Додатковим недоліком є схильність таких сталей до знеуглецювання поверхневого шару під час термічної обробки, а також порівняно низька корозійна стійкість в агресивних середовищах.

З огляду на зазначені фактори, у багатьох практичних випадках доцільніше застосовувати леговані пружинні сталі. За аналогічного вмісту вуглецю вони забезпечують більш збалансований комплекс механічних властивостей, підвищену прокаліюваність, кращу стабільність структури після термічної обробки та вищу надійність у складних умовах експлуатації. Це робить леговані сталі більш універсальними та довговічними матеріалами для виготовлення відповідальних пружних елементів.

Вуглецеві пружинні сталі мають низку суттєвих обмежень, які звужують сферу їх практичного застосування. Зокрема, для них характерний порівняно низький опір релаксаційним процесам, недостатня корозійна стійкість, а також досить високий від'ємний температурний коефіцієнт модуля пружності, який може досягати величини близько $300 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Унаслідок цього вуглецеві сталі є малопридатними для роботи в умовах підвищених температур і, як правило, не рекомендуються для експлуатації за температур понад $100 \text{ } ^\circ\text{C}$. Додатковим недоліком є їх обмежена прогартованість, що істотно ускладнює отримання рівномірної структури по перерізу. Через це вуглецеві сталі доцільно застосовувати переважно для виготовлення пружин невеликого поперечного перерізу.

На відміну від них, леговані ресорно-пружинні сталі відзначаються значно вищою релаксаційною стійкістю та кращою стабільністю властивостей у часі. Крім того, вони дозволяють поєднувати високі показники міцності, зокрема підвищену межу пружності, з достатнім рівнем в'язкості навіть у

					<i>KPM MТBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробах великого перерізу. Важливою перевагою окремих легованих сталей є можливість гартування пружних елементів безпосередньо на повітрі. Такий режим охолодження істотно зменшує рівень зональних і залишкових напружень, що позитивно впливає на довговічність та стабільність експлуатаційних характеристик виробів [7,8].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад основних ресорно-пружинних сталей, % мас

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni
Пружини загальних механізмів і машин					
65	0,62...0,70	0,17...0,37	0,50...0,80	≤0,25	≤0,25
60Г	0,62...0,65	0,17...0,37	0,70...1,00	≤0,25	≤0,20
70	0,67...0,75	0,17...0,37	0,50...0,80	≤0,25	≤0,25
Пружини автомашин і рухомого складу залізничного транспорту					
60С2	0,57...0,65	1,50...2,00	0,60...0,90	≤0,30	≤0,25
60С2Г	0,55...0,65	1,80...2,20	0,70...1,00	≤0,30	≤0,25
50ХГА	0,47...0,52	0,17...0,37	0,80...1,00	0,95...1,20	≤0,25
55ХГР	0,52...0,60	0,17...0,37	0,90...1,20	0,90...1,20	≤0,25
Пружини відповідального призначення					
50ХФА	0,46...0,54	0,17...0,37	0,50...0,80	0,80...1,10	≤0,25
55С2ГФ	0,52...0,60	1,50...2,00	0,95...1,25	0,30...0,70	≤0,25
60С2ХА	0,56...0,64	1,40...1,80	0,40...0,70	0,70...1,00	≤0,25
60С2Н2А	0,56...0,64	1,40...1,80	0,40...0,70	0,30	1,40...1,70

Вибір вихідного стану пружинної сталі значною мірою визначається

застосовуваним методом зміцнення, а також конструктивною формою пружин. У практиці використовують кілька основних варіантів напівфабрикатів:

1. холоднодеформований дрiт або стрiчку, що пройшли попередню термічну обробку (часто патентування);
2. дрiт або стрiчку, термічно оброблені до заданого рівня міцності;
3. холоднодеформований відпалений дрiт або стрiчку;
4. гарячекатаний або холоднокатаний сортовий прокат.

Напівфабрикати, що перебувають у перших двох станах, характеризуються високими значеннями міцності, тому виготовлені з них пружні елементи зазвичай піддають лише низькому або середньому відпуску. До їхніх переваг належать висока точність геометричних розмірів, значні значення межі пружності та можливість формування виробів із точно заданою конфігурацією. Окрім цього, для таких матеріалів практично відсутні поверхневе знеуглецювання й окислення, які істотно знижують втомну міцність пружин.

Водночас зазначені напівфабрикати мають і певні недоліки. Через обмежену пластичність з них складно виготовляти пружини складної геометрії. Крім того, холоднодеформований дрiт у стані високої міцності може містити поверхневі дефекти, що виникають на завершальних стадіях волочіння. Такі дефекти негативно впливають на в'язкість матеріалу та знижують межу витривалості. У процесі навивання пружин з подібних напівфабрикатів можливе утворення додаткових пошкоджень поверхні, що ще більше погіршує експлуатаційні характеристики.

З метою усунення цих недоліків пружини складної форми зазвичай виготовляють методами холодної пластичної деформації з невеликим ступенем обтиснення після попереднього відпалу. Напівфабрикати у

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деформованому або відпаленому стані не володіють високою міцністю, проте відзначаються підвищеною пластичністю, що полегшує формоутворення. Остаточне зміцнення таких пружин досягається в результаті подальшого гартування та відпуску, що дозволяє сформувати необхідний рівень пружних і міцнісних властивостей [9].

1.3 Обробка пружин

Термічна обробка відіграє визначальну роль у формуванні структурного стану металу та, відповідно, у забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик пружинних елементів. Саме правильно підібрані режими термообробки дозволяють отримати оптимальне поєднання пружності, міцності, витривалості та стабільності властивостей у процесі тривалої експлуатації. Під час вибору конкретного виду та параметрів термічної обробки враховують марку сталі, геометрію та розміри заготовки, конструктивні особливості пружини, а також умови її роботи та функціональне призначення.

Для високовуглецевих і легованих пружинних сталей найбільш поширеною є комплексна схема обробки, що включає гартування з подальшим відпуском. Такий підхід забезпечує формування мартенситної або відпущеної мартенситної структури з високою межею пружності та достатньою пластичністю. Водночас пружини, виготовлені з патентованого дроту, зазвичай не потребують повного циклу гартування, оскільки основна структура формується ще на стадії виробництва дроту. Для таких виробів застосовують лише відпуск, який стабілізує структуру та знімає залишкові напруження після холодної деформації.

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес патентування, що переважно виконується на підприємствах-виробниках дроту, полягає у нагріванні сталі до температур вище критичних точок фазових перетворень з наступним контрольованим охолодженням. Охолодження здійснюють у розплавах свинцю або солей, а в окремих випадках — на повітрі. У результаті формується тонкодисперсна перлітна структура, яка значно підвищує здатність матеріалу до холодної пластичної деформації та забезпечує сприятливе поєднання фізико-механічних властивостей, необхідних для виготовлення пружин [10].

Температурні режими нагрівання під гартування та відпуск для окремих марок пружинних сталей, а також значення твердості готових виробів після термічної обробки наведені в таблиці 1.2 [11]. Дотримання цих параметрів є критично важливим, оскільки навіть незначні відхилення температури або часу витримки можуть призвести до погіршення механічних характеристик і зниження довговічності пружин.

Зазвичай гартування пружинних сталей здійснюють при температурах 830–870 °С з подальшим інтенсивним охолодженням у маслі або воді, вибір середовища залежить від хімічного складу сталі та необхідної глибини прогартування. Відпуск проводять у діапазоні 350–450 °С, що дозволяє знизити крихкість загартованого металу, зняти внутрішні напруження та сформувати задане співвідношення міцності й пластичності. Для патентування характерні температури нагрівання 850–900 °С, тоді як температура свинцевої ванни зазвичай підтримується в межах 450–550 °С, що забезпечує отримання оптимальної мікроструктури дроту.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Типові режими термічної обробки серійних ресоро-пружинних сталей

Марка сталі	Навивання пружин	Відпал перед волочінням, °C	Гаряче навивання пружин, °C	Гартування, °C	Відпуск	НВ
50ХФА	Навивання з дроту діаметром 4 мм			850-870	350-420	500
60С2	Навивання холодне	—	—	—	370-400	444
	Гаряче	730-850	850-950	850-870	430-460	387- 477
50С2, 55С2, 60С2Н2А	Гаряче навивання (високо напружені пружини відповідального призначення)	850	850-900	830-860	420-450	340-444
60С2ХФА 60С2ВА	Гаряче навивання (високо-напружені пружини відповідального призначення)	860	850-900	850-860	410-420	415-477
60С2	Гаряче навивання	750	800-900	860-870	350-250	HRC 45-48

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ

Арк.

29

Важливим елементом термічної обробки є забезпечення рівномірності нагрівання та охолодження по всьому об'єму виробу. Порушення теплового режиму може спричинити виникнення значних внутрішніх напружень, викривлення або навіть появу мікротріщин. Особливу увагу приділяють також захисту поверхні металу від окислення та знеуглецювання в умовах високих температур. Для цього застосовують захисні газові атмосфери, вакуумну обробку або спеціальні покриття.

Завершальним етапом є контроль якості після термічної обробки, який включає перевірку твердості, аналіз мікроструктури та оцінку основних механічних властивостей. Такий комплексний підхід дозволяє гарантувати відповідність пружин вимогам стандартів і забезпечити їх надійну роботу в заданих умовах експлуатації. За умови строгого дотримання встановлених режимів термічної обробки та достатнього рівня професійної підготовки терміста забезпечується стабільно висока якість пружин і їх надійна робота впродовж усього терміну експлуатації. Будь-які відхилення від технологічних параметрів або недостатній контроль процесу можуть призвести до зниження пружних характеристик, появи внутрішніх дефектів і передчасного виходу виробів з ладу.

Пружинні сталі характеризуються відносно низькою теплопровідністю, що суттєво впливає на умови їх нагрівання перед гартуванням. У зв'язку з цим під час термічної обробки деяких марок, особливо легованих пружинних сталей, необхідно враховувати специфічні особливості теплообміну. Зокрема, для високомарганцевих сталей різкий нагрів до температури гартування є небажаним, оскільки це може спричинити значні температурні градієнти та виникнення внутрішніх напружень.

З метою запобігання утворенню тріщин та інших дефектів такі сталі перед основним нагріванням під гартування піддають попередньому підігріву до температури 400...500 °С. У результаті процес нагрівання здійснюється

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поетапно (сходинково), що забезпечує більш рівномірний розподіл температури в об'ємі виробу. Такий підхід істотно знижує ризик термічних напружень і підвищує надійність подальшого гартування.

Процес гартування організують наступним чином. Партію пружин укладають у спеціальний металевий кошик із сітчастими стінками, який забезпечує вільну циркуляцію нагрівального середовища. Пружини надійно фіксують у кошику для запобігання деформаціям та механічним пошкодженням. Якщо технологічний регламент цього вимагає, перед основним нагріванням виконують попередній підігрів виробів.

Після цього кошик із пружинами завантажують у піч, попередньо розігріту до заданої температури гартування. Вироби витримують при цій температурі протягом часу, необхідного для повного прогріву металу по всьому перерізу. Лише після досягнення температурної рівноваги в об'ємі пружини забезпечуються умови для формування однорідної структури при подальшому охолодженні. Така організація процесу гартування є необхідною передумовою отримання стабільних механічних властивостей і високої експлуатаційної надійності пружин.

Тривалість витримки під час нагрівання визначається геометричними параметрами дроту, зокрема його поперечним перерізом, а також хімічним складом сталі. Після досягнення необхідної температури та завершення витримки здійснюється гартування у відповідно підібраному охолоджувальному середовищі. Для забезпечення збереження геометрії виробів пружини стиску перед термічною обробкою жорстко фіксують, з'єднуючи робочі та торцеві витки м'яким сталевим дротом.

З метою запобігання втраті форми, перекосам або залишковим деформаціям застосовують спеціальні технологічні пристосування (рисунок 1.4), а у спрощених умовах — стандартні швелерні балки. Під час термічної

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки пружин значних габаритів використовують чавунні обойми, які являють собою масивні бруси з висвердленими отворами та уступами, призначеними для надійного розміщення пружин. Обойму, заповнену пружинами, завантажують у піч для нагрівання, після чого разом із виробами обережно занурюють у гартівне середовище, забезпечуючи одночасне та рівномірне охолодження.

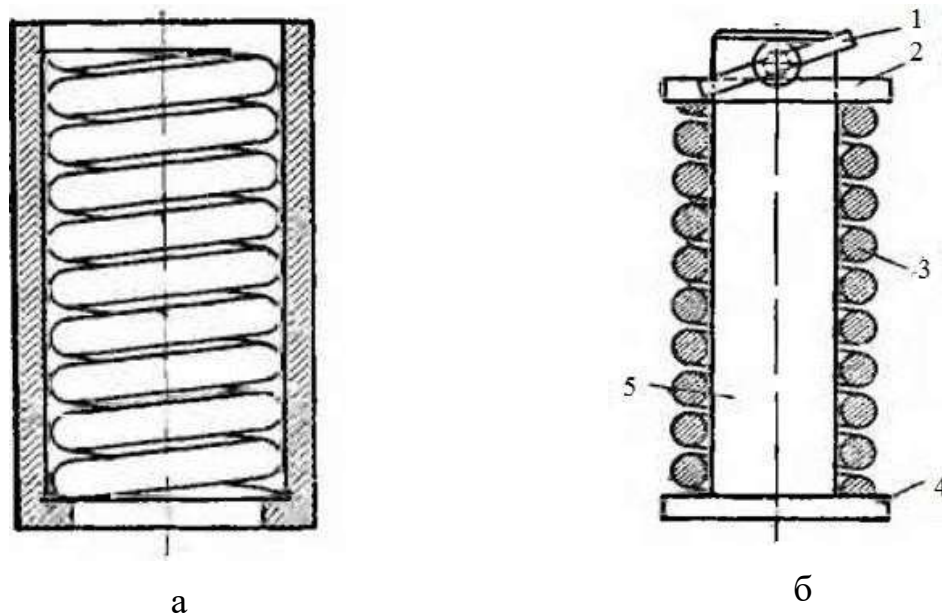


Рис. 1.4 – Пристрій для гартування пружин: а - з посадкою пружини в склянку, б - з посадкою пружини на оправлення;

1 - обмежувач, 2 - знімний верхній опорний майданчик, 3 - пружина,
4 - нижній опорний майданчик, 5 - оправлення

Для гартування пружинних сталей застосовують різні охолоджувальні середовища, зокрема масло, воду або повітря, вибір яких визначається маркою сталі, товщиною перерізу та вимогами до кінцевих властивостей. Гартівна

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рідина розміщується у спеціальних баках, оснащених системами охолодження та контролю температури. Водяне гартування використовується обмежено, оскільки надмірно інтенсивне охолодження може спричиняти появу тріщин і внутрішніх напружень. У разі необхідності застосування води до неї вводять спеціальні добавки (вапно, мило, крейду), що зменшують швидкість тепловідведення.

Температурний стан гартівного середовища має істотний вплив на формування структури та експлуатаційні властивості сталі. Так, гартування в маслі за температури близько 60 °С може не забезпечити повного загартування, тоді як охолодження при 30 °С дозволяє досягти необхідного рівня твердості. Саме тому масло є найбільш поширеним гартівним середовищем, оскільки поєднує достатню інтенсивність охолодження з мінімальним ризиком утворення дефектів і браку.

Через відмінності у теплопровідності охолоджувальних середовищ найбільш нагріті шари рідини зазвичай концентруються у верхній частині бака. Для вирівнювання температури по всьому об'єму застосовують примусове перемішування, зокрема продування стисненим повітрям через спеціальні трубки, а також додаткові системи циркуляції та охолодження.

Обов'язковим завершальним етапом після гартування є відпуск, який спрямований на підвищення в'язкості матеріалу та зниження внутрішніх напружень, що виникають унаслідок різкого охолодження. Відпуск виконують у спеціалізованих печах — полум'яних, муфельних або електричних, а також у соляних ваннах. Конкретні режими відпуску (температура та тривалість витримки) визначаються маркою сталі, розмірами та призначенням пружини.

Для пружин, виготовлених із патентованого дроту, відпуск здійснюють при температурах 250–350 °С з витримкою 15–30 хвилин. За відсутності цього етапу такі пружини при багаторазовому стисканні до повного змикання витків

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидко втрачають висоту, зазнають осадки та збільшуються в діаметрі. Відпуск дозволяє зменшити величину осадки майже вдвічі та суттєво покращити пружні характеристики. Водночас можливі незначні зміни геометрії: зменшення зовнішнього діаметра та збільшення кількості витків на 1–2 %, що обов'язково враховується під час налаштування автоматів навивання та вибору технологічного оснащення.

Загалом термічна обробка забезпечує отримання пружин високої якості та експлуатаційної надійності завдяки зниженню залишкових деформацій, стабілізації структури, підвищенню пружних властивостей і в'язкості матеріалу. Особливу увагу при цьому приділяють точності дотримання температурних режимів і рівномірності нагріву під час відпуску, оскільки саме ці фактори безпосередньо визначають довговічність готових виробів.

Для забезпечення стабільності процесу широко застосовуються сучасні системи автоматичного контролю та регулювання температури і часу витримки. Після завершення термічної обробки обов'язково виконують контроль якості, який включає перевірку геометричних параметрів, механічних властивостей і мікроструктури матеріалу.

1.4 Пружинні сталі, їх структура і властивості

Загартовані вироби з ресорно-пружинних сталей характеризуються не лише підвищеною концентрацією вуглецю в твердому розчині, але й значною густиною дислокацій, наявністю внутрішніх двійників деформації та сформованою дрібнозернистою мікроструктурою. Саме дрібнозерниста будова відіграє ключову роль у підвищенні опору мікропластичним деформаціям, оскільки сприяє зменшенню локальних концентрацій

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напружень у місцях контакту кристалів мартенситу з межами колишніх аустенітних зерен під час експлуатаційного навантаження.

Незважаючи на те, що остаточне руйнування матеріалу зазвичай проходить через зерно, початкове зародження та поширення тріщини відбувається переважно вздовж меж первинних аустенітних зерен. Зменшення розміру зерна істотно знижує схильність сталі до крихкого руйнування, особливо у високоміцному стані, а також знижує температуру переходу від в'язкого до крихкого механізму зламу. Важливим чинником підвищення тріщиностійкості є також зменшення рівня внутрішніх напружень, оскільки їх наявність знижує межу пружності та може викликати нестабільну роботу пружин унаслідок релаксаційних процесів під час тривалої експлуатації [12].

Одним із принципових завдань термічної обробки є мінімізація кількості залишкового аустеніту, оскільки ця фаза характеризується значно нижчою межею пружності порівняно з мартенситом, особливо після процесів старіння. Наявність залишкового аустеніту знижує загальну стійкість матеріалу до малих і середніх пластичних деформацій та погіршує експлуатаційні характеристики пружин.

Додатково негативний вплив залишкового аустеніту пов'язаний з його здатністю до перетворення в мартенсит під дією механічних навантажень або під час низькотемпературного охолодження. Такі перетворення призводять до зниження релаксаційної стійкості сталі та підвищують ймовірність крихкого руйнування, що може спричинити передчасний вихід пружин з ладу навіть за умов статичного навантаження. Для зменшення вмісту залишкового аустеніту застосовують комплекс технологічних заходів, зокрема оптимізацію режимів нагрівання, швидкості охолодження та параметрів гартування [13].

У процесі відпуску залишковий аустеніт може зазнавати фазових перетворень, які певною мірою сприяють зростанню межі пружності. Проте

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукти таких перетворень, як правило, мають нижчий опір малим пластичним деформаціям у порівнянні з мартенситними структурами. Сталі з повністю мартенситною структурою, сформованою з використанням холодної обробки, демонструють більш інтенсивне зростання межі пружності під час відпуску, ніж сталі з підвищеним вмістом залишкового аустеніту. Водночас після відпуску, який забезпечує повний розпад залишкового аустеніту, кінцеві значення межі пружності виявляються практично однаковими як для сталей з початково змішаною структурою, так і для сталей з первинно мартенситною будовою. Це явище певною мірою суперечить окремим експериментальним та практичним даним, наведеним у літературі.

Кінцеві експлуатаційні властивості пружин значною мірою визначаються режимами відпуску, під час якого реалізується потенціал підвищення опору малим пластичним деформаціям та комплексу міцнісних характеристик, закладений на стадії гартування. Найсуттєвіший вплив на ці процеси мають вміст вуглецю в мартенситі та особливості його субструктури — густина й розподіл дислокацій, наявність мікродвійників, тоді як субструктурні фактори відіграють дещо другорядну роль [12].

Максимальний опір мікро- та малим пластичним деформаціям загартованих сталей досягається після відпуску в температурному інтервалі 200–400 °С. За таких умов у структурі формується система дрібнодисперсних карбідних частинок, когерентно зв'язаних з матрицею мартенситу. Ці частинки розміщуються як у тілі кристалів, так і вздовж меж двійників, ефективно гальмуючи рух дислокацій.

Покращення механічних властивостей під час відпуску також пов'язують із перерозподілом та зростанням густини дислокацій, а також із релаксацією залишкових напружень, що виникли на стадії гартування. Спостерігається принципова подібність у трансформації дислокаційної

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структури як у загартованих мартенситних сталях, так і в матеріалах, зміцнених пластичною деформацією.

Для досягнення високої межі пружності після відпуску необхідною умовою є висока початкова густина дислокацій, сформована або внаслідок мартенситного перетворення, або шляхом деформаційного наклепу. У процесі відпуску в обох випадках відбувається модифікація дислокаційної структури через утворення сегрегацій та виділення карбідних частинок, які закріплюють дислокації та стабілізують субструктуру. Таким чином, величина межі пружності після відпуску прямо залежить від ступеня попередньої пластичної деформації або концентрації вуглецю в мартенситі [13].

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали для виготовлення пружин транспорту

Для виготовлення ресорно-пружинних елементів необхідно застосовувати матеріали, які здатні надійно працювати в умовах тривалих та змінних навантажень. Такі матеріали повинні поєднувати в собі високі значення статичної, циклічної та ударної міцності, достатню пластичність для запобігання крихкому руйнуванню, а також стабільність пружних властивостей упродовж усього строку експлуатації виробу. Особливо важливо, щоб матеріал не втрачав здатності до відновлення початкової форми після багаторазових деформацій і був стійким до релаксаційних процесів.

У межах даного дослідження як об'єкт аналізу обрано пружинні сталі марок 60С2А та 60С2ХА, які широко застосовуються у виробництві ресор і пружин для залізничних вагонів. Використання саме цих сталей зумовлене їх перевіреними експлуатаційними характеристиками, високою надійністю та відповідністю чинним нормативним вимогам. Зазначені матеріали регламентуються стандартом ГОСТ 1452–2011, який визначає допустимі межі хімічного складу, механічні властивості та вимоги до якості металу для відповідальних пружних елементів рухомого складу.

Пружинні сталі 60С2А та 60С2ХА належать до групи середньовуглецевих легованих сталей, у яких поєднання вуглецю з кремнієм, а також додаткове легування хромом (для сталі 60С2ХА) забезпечує підвищену межу пружності, зносостійкість і стабільність властивостей після термічної обробки. Саме збалансований хімічний склад створює передумови

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для формування оптимальної мікроструктури після гартування та відпуску, що є критично важливим для роботи пружин у важких умовах експлуатації.

Хімічний склад досліджуваних сталей, який визначає їх фізико-механічні властивості та технологічну придатність, наведено в таблиці 2.1. Аналіз цього складу дозволяє оцінити вплив окремих легуючих елементів на формування структури, рівень міцності та пружності, а також прогнозувати поведінку матеріалу під дією експлуатаційних навантажень.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад пружинних сталей, %мас

Сталь	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
60C2A	0.58-0,63	1,6-2,0	0,6-0,9	≤0,3	≤0.025	≤0.025	0.25	≤0.2
60C2XA	0.56-0.64	1.4-1.8	0.4-0.7	0.7-1.0	≤0.025	≤0.025	0.25	≤0.2

2.2 Мікроструктура зразків

Дослідження структурного стану сталей виконували із застосуванням комплексу сучасних металографічних методів, що включали оптичну та електронну мікроскопію. Використання цих методик дало змогу детально проаналізувати як загальні особливості мікроструктури, так і тонкі структурні елементи, зумовлені хімічним складом та режимами термічної обробки.

Підготовка металографічних зразків здійснювалася за класичною багатостадійною схемою та складалася з послідовних операцій: відбору представницького фрагмента матеріалу, механічної обробки поверхні, тонкого шліфування, полірування та подальшого хімічного травлення. Кожен із зазначених етапів мав вирішальне значення для отримання достовірної інформації про структуру досліджуваного металу.

Процес шліфування розпочинали з використання абразивного паперу з

відносно великою зернистістю (№ 60), що дозволяло видалити поверхневі дефекти та сліди попередньої механічної обробки. Надалі здійснювали поетапний перехід до дрібнозернистих абразивів, завершуючи обробку папером з номерами № 220–280. Під час шліфування зразок притискали до обертового диска з невеликим зусиллям, що забезпечувало рівномірне зняття матеріалу без локального перегріву.

При кожній зміні абразивного матеріалу поверхню зразка ретельно очищали від абразивного пилу та залишків металу, після чого зразок повертали на 90° відносно попереднього положення. Такий прийом дозволяв повністю усунути риски, залишені на попередньому етапі, та забезпечити поступове зменшення шорсткості поверхні. Після завершення шліфування зразок промивали проточною водою з метою видалення залишкових абразивних частинок і підготовки поверхні до полірування.

Механічне полірування виконували на спеціалізованому полірувальному верстаті протягом 8–10 секунд. Полірувальний диск був вкритий фетровою тканиною, змоченою суспензією на основі води та оксиду алюмінію ($H_2O + Al_2O_3$), що забезпечувало отримання дзеркально гладкої поверхні без деформації приповерхневого шару металу.

Для виявлення мікроструктури підготовлені шліфи піддавали хімічному травленню з використанням одного з реактивів, залежно від завдань аналізу:

- розчин на основі хлориду заліза (5 г $FeCl_3 + 5$ мл $HCl + 100$ мл H_2O);
- комбінований кислотно-спиртовий реактив (92 мл $HCl + 5$ мл $H_2SO_4 + 3$ мл $HNO_3 + 5$ г $CuSO_4 + 50$ мл C_2H_5OH).

Після завершення травлення поверхню шліфа промивали водою, обережно витирали та висушували за допомогою фільтрувального паперу, уникаючи пошкодження структури.

Для визначення твердості та мікротвердості використовували поліровані

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зразки стандартних розмірів 20×20 мм, що забезпечувало коректність вимірювань і відтворюваність результатів під час механічних випробувань.

Будова оптичного мікроскопа типу МІМ-8 є модульною і включає три функціонально взаємопов'язані вузли: систему освітлення, несучий корпус та верхній оптико-механічний блок (рисунок 2.1). Така компоновка забезпечує стабільність оптичної схеми, зручність налаштування та можливість проведення як візуальних, так і документальних досліджень мікроструктури матеріалів.

Освітлювальний вузол складається з ліхтаря (позиція 1), всередині якого встановлена джерельна лампа, що формує первинний світловий потік. Для точного суміщення нитки розжарювання лампи з оптичною віссю колектора передбачені регулювальні (центрувальні) гвинти (позиція 2). Їх використання дозволяє оптимізувати рівномірність освітлення поля зору та підвищити якість зображення при спостереженні мікроструктури.

У центральній частині мікроскопа, тобто в його корпусі, розміщено апертурну діафрагму, яка встановлена безпосередньо під оправою освітлювальної лупи (позиція 3). Діафрагма слугує для регулювання інтенсивності та кута розходження світлового пучка, що істотно впливає на контраст і роздільну здатність зображення. Крім того, в корпусі інтегрована фотографічна система, призначена для фіксації мікроструктури. Запис зображення здійснюється на фотопластинку, яка монтується у спеціальний посадковий механізм (позиція 4), що забезпечує її точне позиціонування відносно оптичної осі.

Верхній блок мікроскопа виконує функції спостереження та формування зображення. До його складу входить ілюмінаторний тубус (позиція 5), який забезпечує правильне введення освітлювального потоку в оптичну систему з

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

боку об'єкта дослідження. Також у верхньому модулі розташований візуальний тубус (позиція 7), оснащений спеціальним отвором для встановлення окуляра (позиція 8). Окуляр слугує завершальним елементом оптичного тракту та дозволяє оператору безпосередньо спостерігати мікроструктуру з необхідним збільшенням і чіткістю.

Завдяки такій конструкції мікроскоп МІМ-8 забезпечує надійне освітлення, стабільну фокусування та можливість документування результатів металографічних досліджень, що робить його придатним для лабораторних і навчально-наукових робіт.

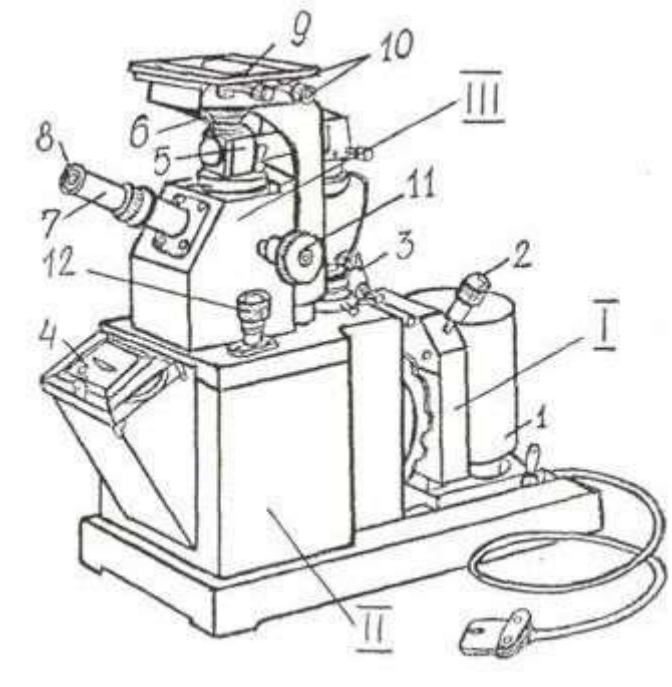


Рисунок 2.1 – Металографічний мікроскоп МІМ -8

Предметний столик мікроскопа (позиція 9) оснащений координатним механізмом переміщення, що реалізований за допомогою системи регульовальних гвинтів (позиція 10). Ці гвинти забезпечують точне переміщення столика у двох взаємно перпендикулярних напрямках у

горизонтальній площині, що дозволяє позиціонувати досліджуваний мікрошліф у межах поля зору з високою точністю. У центральній частині предметного столика виконано спеціальний технологічний отвір, призначений для проходження світлового потоку та спостереження структури зразка в прохідному світлі.

Вертикальне переміщення предметного столика здійснюється за допомогою макрометричного гвинта (позиція 11). Даний механізм використовується для швидкого та грубого наведення на фокус, зокрема при початковому встановленні зразка або зміні об'єктивів. Для забезпечення стабільності положення столика та запобігання його мимовільному опусканню під дією власної маси або вібрацій конструкцією передбачений фіксуючий гвинт, розташований у верхній лівій частині корпусу мікроскопа. Його застосування дозволяє надійно зафіксувати столик у заданому положенні після завершення грубого фокусування.

Тонке та високоточне наведення різкості здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта (позиція 12). На відміну від макрометричного механізму, цей гвинт забезпечує плавне та мінімальне вертикальне переміщення об'єктива, що є критично важливим при роботі на великих збільшеннях. Завдяки цьому досягається чітке відображення дрібних структурних елементів металу без ризику пошкодження зразка або оптичної системи.

У сукупності координатний механізм столика та система макро- і мікрофокусування забезпечують зручність роботи з мікроскопом МІМ-8, підвищують точність досліджень і дозволяють ефективно виконувати металографічний аналіз поверхневих та приповерхневих шарів матеріалів.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРУЖИН

У конструкції рухомого складу залізничного транспорту пружні елементи є одним із базових компонентів ходової системи вагонів. Колісні пари взаємодіють з рамою візка та кузовом через складну систему ресорної підвіски, до складу якої входять пружини, ресори та демпфувальні пристрої. Саме ця система забезпечує необхідний рівень комфорту та безпеки руху, сприймаючи та перерозподіляючи навантаження, що виникають у процесі експлуатації.

Основною функцією ресорної підвіски є гасіння ударних імпульсів і вібрацій, які передаються від коліс під час контакту з рейковою колією. Під час руху поїзда колісні пари постійно взаємодіють з різноманітними нерівностями шляху, такими як стики рейок, хрестовини стрілочних переводів, хвилеподібні дефекти та локальні просідання колії. Унаслідок цього виникають значні динамічні й ударні навантаження, які безпосередньо впливають на елементи ходової частини.

Окрім нерівностей колії, джерелом додаткових динамічних впливів можуть бути й дефекти самих колісних пар. До них належать зношування або пошкодження поверхні кочення, похибки при напресуванні коліс на вісь, порушення геометрії або дисбаланс колісної пари. Такі фактори істотно підвищують рівень навантажень, що передаються на елементи підвіски та кузов вагона.

У деяких конструктивних рішеннях пружні елементи виконують не лише амортизаційну функцію, а й беруть участь у передачі направляючих сил

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						44
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

від колісних пар до рами візка. Це особливо важливо при русі в кривих ділянках колії та під час гальмування, коли виникають додаткові бічні та поздовжні зусилля.

За відсутності ресорного підвішування всі вищезазначені навантаження передавалися б безпосередньо на кузов вагона, що призвело б до прискореного зносу конструкції, зниження комфорту руху та підвищення ризику пошкоджень. Саме тому до матеріалів, з яких виготовляють ресори та пружини залізничних вагонів, висуваються підвищені вимоги.

Матеріал пружних елементів повинен поєднувати високу статичну, динамічну та ударну міцність із достатнім рівнем пластичності, а також зберігати стабільні пружні властивості протягом усього строку служби. Сукупність цих експлуатаційних характеристик визначається хімічним складом сталі, її мікроструктурою, правильно підібраними режимами термічної обробки, а також якістю поверхневої обробки пружинних елементів, що безпосередньо впливає на їхню втомну міцність і довговічність.

3.1 Вплив легуючих елементів на властивості пружин

Сталі марок 60С2А та 60С2ХА (табл. 2.1) набули широкого поширення у виробництві пружних елементів завдяки вдалому поєднанню технологічності, високих механічних характеристик та економічної доцільності. Порівняно зі звичайними вуглецевими сталями ці матеріали забезпечують кращу пружність, підвищену витривалість і стабільність властивостей, залишаючись при цьому доступними з точки зору вартості та масового застосування в промисловості.

Разом із тим наявність кремнію в хімічному складі зазначених сталей зумовлює певні технологічні ускладнення. Зокрема, кремній підвищує

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схильність матеріалу до знеуглецювання під час високотемпературної термічної обробки. Це негативно позначається на властивостях поверхневого шару, спричиняючи зниження твердості, зносостійкості та втомної міцності, що є критично важливим для пружин і ресор, які працюють в умовах циклічних навантажень.

Найбільш сприятливе поєднання пружних і міцнісних характеристик у сталях 60С2А та 60С2ХА досягається після гартування з подальшим середнім відпуском у температурному інтервалі 350–500 °С. За таких умов мартенситна структура трансформується в троостит — тонкодисперсну суміш фериту та цементиту. Саме трооститна структура забезпечує високий рівень пружності, достатню в'язкість та необхідну твердість матеріалу. Водночас для отримання однорідної структури по всьому перерізу виробу обов'язковою умовою є повна прогартваність сталі.

Легувальні елементи істотно впливають на процеси знеуглецювання, оскільки змінюють умови дифузії вуглецю, температуру фазового перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ та термодинамічну активність вуглецю. Підвищення температури фазового переходу та активності вуглецю, як правило, сприяє інтенсифікації знеуглецювання поверхні під час нагрівання.

Рухливість атомів у кристалічній ґратці визначається енергією активації дифузії. Елементи, що розчиняються за механізмом впровадження, мають значно нижчу енергію активації порівняно з елементами заміщення, тому останні дифундують значно повільніше. Для вуглецю в аустеніті енергія активації дифузії становить приблизно 31 000 кал/Г·атом, що істотно менше, ніж у більшості легувальних елементів, для яких цей показник перевищує 60 000 кал/Г·атом.

Такі легувальні елементи, як хром, молібден і ванадій, здатні істотно сповільнювати дифузію вуглецю в аустеніті. Окрім цього, важливу роль у

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формуванні глибини зневуглецьованого шару відіграє інтенсивність окалиноутворення: чим активніше формується окалина на поверхні, тим менше глибина проникнення процесів зневуглецювання.

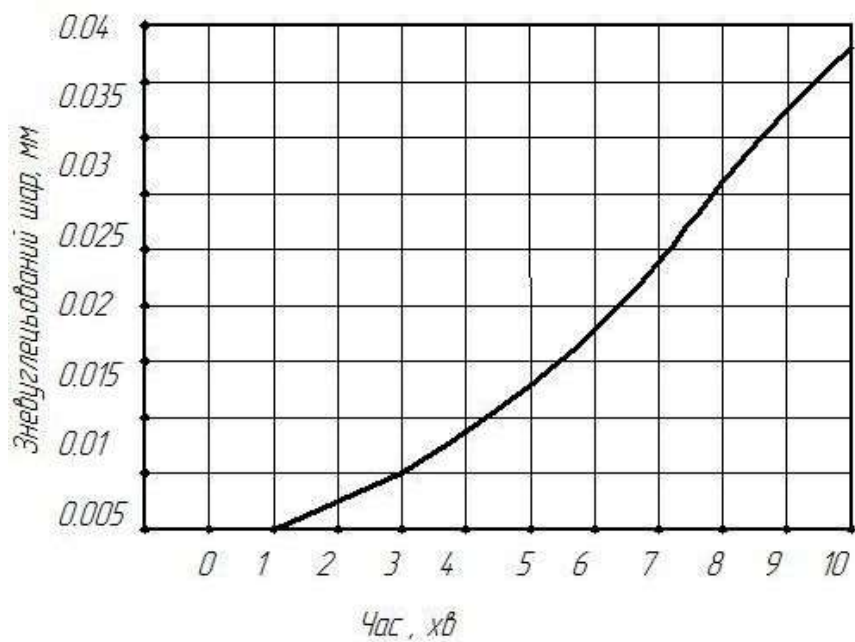
Хром, з одного боку, знижує швидкість утворення окалини та підвищує температуру фазового переходу $\alpha \rightarrow \gamma$, а з іншого — зменшує швидкість дифузії вуглецю та його активність. Сукупна дія цих факторів призводить до загального зниження схильності сталі до зневуглецювання.

Кремній діє інакше. Він сприяє утворенню захисних силікатних шарів типу Fe_2SiO_4 , що зменшує інтенсивність окалиноутворення. Водночас кремній підвищує активність вуглецю та температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення. Незважаючи на певне уповільнення дифузії вуглецю, сумарний вплив кремнію призводить до збільшення схильності сталей 60C2A та 60C2XA до зневуглецювання поверхневих шарів, що необхідно враховувати при виборі режимів термічної обробки та захисних атмосфер.

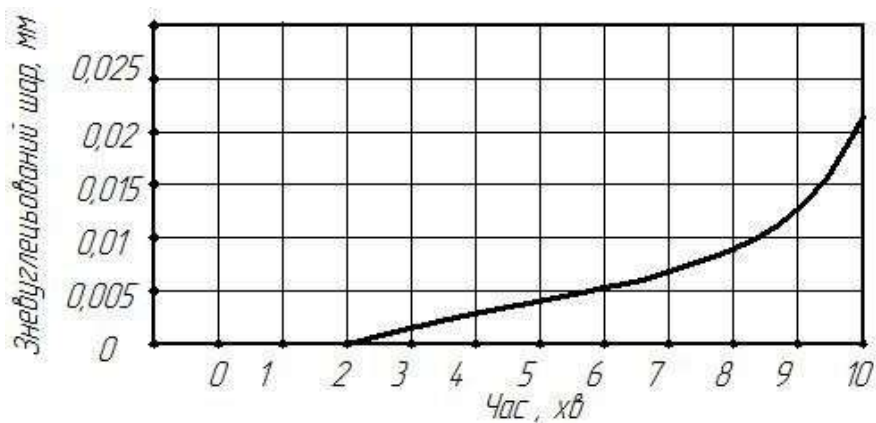
Марганець загалом чинить відносно слабкий вплив на процеси зневуглецювання та дифузійний рух вуглецю в сталі. Його присутність призводить до певного зниження активності вуглецю, а також до зменшення температури фазового перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$. Сукупна дія цих факторів дещо обмежує інтенсивність зневуглецювання поверхневих шарів, однак цей ефект не є визначальним у порівнянні з впливом інших легувальних елементів.

Нікель, на відміну від марганцю, підвищує як активність вуглецю, так і швидкість його дифузії в аустенітній фазі. При цьому він практично не змінює інтенсивність окалиноутворення під час нагрівання, однак сприяє формуванню щільних і міцних металевих проміжних шарів на поверхні сталі. Зниження температури $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення, характерне для сталей з вмістом нікелю, зазвичай зменшує загальну схильність матеріалу до зневуглецювання, що частково компенсує підвищену рухливість атомів вуглецю.

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рис. 3.1 – Залежність впливу часу витримки при гартуванні на глибину знеуглецьованого шару: а) – сталь 60С2А ; б) – сталь 60С2ХА

Ванадій та вольфрам діють переважно як елементи, що підсилюють

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вплив інших легувальних компонентів. Особливе значення має ванадій, який є активним карбїдоутворювачем. Утворення стійких ванадієвих карбїдів зменшує кількість вуглецю, здатного брати участь у дифузійних процесах, тим самим ефективно протидіючи зневуглецюванню деталей, у тому числі пружин і ресор, що піддаються тривалому високотемпературному нагріванню.

Принципова відмінність між сталями 60С2А та 60С2ХА полягає у наявності хрому в складі останньої. Саме цей елемент істотно змінює характер протікання дифузійних та окисних процесів при термічній обробці. На рисунку 3.1 наведено залежність глибини зневуглецьованого шару від часу витримки при гартуванні. Аналіз цих даних свідчить, що підвищення температури нагріву та збільшення тривалості витримки неминуче призводять до інтенсифікації зневуглецювання та зростання товщини зневуглецьованого шару.

Разом з тим порівняння сталей показує, що у матеріалі, легованому хромом, глибина зневуглецьованого шару є майже вдвічі меншою, ніж у сталі 60С2А без хрому. Окрім впливу на дифузію вуглецю та температуру фазових перетворень, хром в умовах окисних атмосфер нагрівання здатний формувати на поверхні сталі тонкі захисні оксидні плівки. Ці плівки уповільнюють контакт металу з навколишнім середовищем та додатково гальмують процеси зневуглецювання, що істотно підвищує стабільність поверхневих властивостей пружинних виробів при термічній обробці.

Таким чином, легування хромом є ефективним засобом зменшення втрат вуглецю з поверхні сталей типу 60С2, що має важливе практичне значення для забезпечення високої втомної міцності та довговічності пружин і ресор.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Огляд технології виготовлення

У конструкціях залізничного рухомого складу широко використовують циліндричні гвинтові пружини, призначені для роботи переважно в режимах стискання або розтягування. Ці елементи є відповідальними вузлами ресорного підвішування, тому до технології їх виготовлення висуваються підвищені вимоги щодо стабільності геометричних параметрів, механічних властивостей і довговічності.

Виробничий цикл виготовлення таких пружин є багатостадійним і починається з вхідного контролю якості металу, який включає перевірку хімічного складу, структури та механічних характеристик сталі. Далі здійснюється підготовка заготовок у вигляді прутків заданої довжини з обов'язковою попередньою механічною обробкою поверхні. Вихідна заготовка повинна мати рівну, оброблену точінням або шліфуванням поверхню з параметром шорсткості не гірше $Rz \leq 20$ мкм, що є необхідною умовою для забезпечення високої втомної міцності майбутньої пружини.

Розкрій прутків на заготовки здійснюють на прес-ножицях або ексцентрикових пресах. Залежно від діаметра та марки сталі розділення виконують у холодному стані або з попереднім нагріванням заготовки до температури 750–900 °С. Наступним етапом є підготовка кінців заготовок, для чого їх нагрівають у щілинних печах до температури 900–950 °С з витримкою 8–15 хвилин, тривалість якої визначається діаметром прутка та теплопровідністю сталі.

Після нагрівання виконується відтяжка кінців заготовок на обтискних вальцях. Температура металу наприкінці цієї операції повинна бути не нижчою за 800 °С, хоча на практиці вона, як правило, перевищує 900 °С, що

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує необхідну пластичність металу. На гарячу бокову поверхню сформованого кінця наноситься маркування, яке містить ідентифікаційні дані: умовний номер виробника, місяць і рік виготовлення, а також марку сталі.

Процес навивання пружин здійснюють на спеціалізованих навивальних установках після повторного нагрівання заготовок у напівметодичних печах до температури 900–950 °С з витримкою 20–30 хвилин. Безпосередньо після навивання пружини піддають гартуванню з метою формування необхідної структурно-фазової основи для подальшого зміцнення.

Завершальний етап виготовлення включає комплекс доводочних і контрольних операцій. Пружини калібрують за кроком витків на спеціальних пресах, виконують підтискання кінців для забезпечення щільного прилягання опорних витків, а також контролюють загальну висоту виробу. Особливу увагу приділяють перевірці перпендикулярності осі пружини відносно опорної поверхні, яку здійснюють за допомогою косинця або спеціальних вимірювальних пристроїв. Лише після проходження всіх контрольних процедур пружини допускаються до подальших операцій зі зміцнення поверхні, нанесення захисних покриттів та остаточного сушіння.

Досягнення заданого рівня твердості пружин, що відповідає інтервалу 375–444 НВ або 41,4–46,0 HRC, забезпечується застосуванням класичної термічної обробки, яка включає гартування з подальшим відпуском. Однак виробнича практика свідчить, що навіть за умови точного дотримання регламентованих температурних і часових параметрів технологічного процесу повністю уникнути дефектів не вдається. Зокрема, на поверхні заготовок і сформованих виробів фіксується поява тріщин, які можуть виникати як на етапі вальцювання торцевих частин, так і при поєднанні операцій навивання з подальшим гартуванням.

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

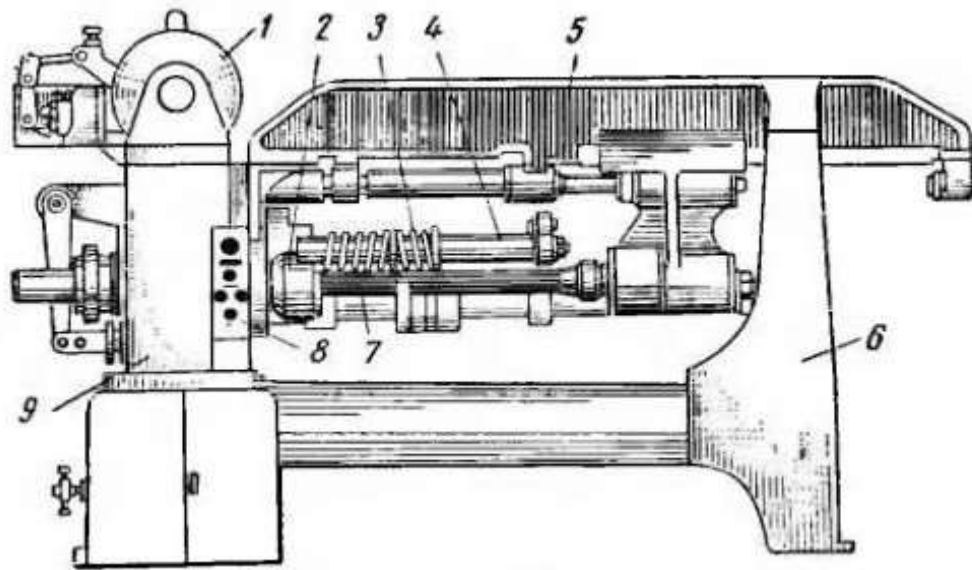


Рис. 3.2 – Верстат для гарячого навивання пружин 1 – електродвигун; 2 – шпиндель; 5 – траверса; 6 – задня стойка; 3 – копір; 4 – привод копіра; 9 – передня стойка; 7 – гладка відправка; 8 – панель кнопок управління;

Під час вальцювання торців основною причиною зародження тріщин є локальний перегрів металу в нагрівальних печах. При цьому принципово важливим є дотримання зони нагріву прутка на відстані близько 350 мм від торця. У процесі вальцювання формується виражений температурний градієнт: поверхневі шари торцевої ділянки інтенсивно охолоджуються та зазнають стискальних деформацій, тоді як внутрішні об'єми металу залишаються перегрітими і схильними до теплового розширення. Така нерівноваженість температурних і деформаційних процесів призводить до виникнення значних розтягувальних напружень у приповерхневих шарах, що експериментально підтверджується появою тріщин на відстані приблизно

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ

Арк.

52

100–150 мм від торця заготовки.

У ході технологічного циклу кінцеві ділянки заготовки, з яких формуються опорні витки пружини, зазнають подвійного теплового впливу, часто з елементами перегріву. Натомість циліндрична частина, яка формує робочі витки, проходить нагрівання лише один раз. Така різниця в тепловій історії окремих зон виробу зумовлює формування неоднорідної мікроструктури металу в перехідній області між опорними та робочими витками. Саме ця зона стає найбільш уразливою з точки зору експлуатаційної надійності.

Аналіз характеру руйнування ресорних комплектів у процесі експлуатації показує, що як великі, так і малі пружини найчастіше виходять з ладу в області опорного витка, а саме в перехідній зоні між плоскою опорною поверхнею та першим робочим витком. Це підтверджує вирішальний вплив структурної та напружено-деформованої неоднорідності, сформованої на етапах виготовлення.

Додатковим фактором, що сприяє утворенню гартівних тріщин, є наявність технологічних дефектів вальцювання, зокрема закатів, локального знеуглецювання поверхневого шару та мікронерівностей. Під час гартування такі дефекти слугують концентраторами напружень, у яких відбувається ініціація та подальше розгалуження тріщин, що значно знижує довговічність пружин.

Виявлені закономірності тріщиноутворення однозначно свідчать про необхідність удосконалення існуючого технологічного процесу виготовлення пружин. Передусім це стосується оптимізації режимів нагріву та охолодження, підвищення рівномірності температурного поля в заготовці, а також посилення контролю якості на всіх стадіях виробництва. Особливу увагу доцільно приділити мінімізації різких температурних градієнтів, які є

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основним джерелом внутрішніх напружень і, як наслідок, передумовою передчасного руйнування пружинних елементів у процесі експлуатації.

Під час гартування пружин фактична температура металу на момент охолодження нерідко відрізняється від нормативно рекомендованого інтервалу 830–870 °С. Це зумовлено особливостями реалізації технологічного маршруту, який не забезпечує стабільного збереження температури після виходу виробів із нагрівальної печі. Згідно з чинною технологією, розігріті пружини після завершення нагріву самопливом переміщуються по похилій площині на транспортер, з якого вже подаються безпосередньо до гартівної ванни.

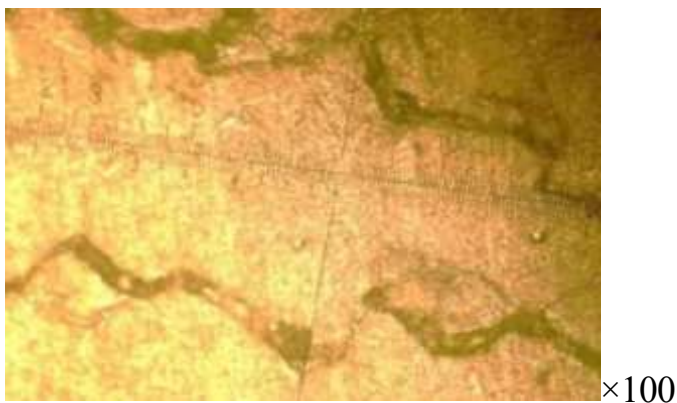


Рис. 3.3 – Розгалуження тріщини від вальцювання

На цьому етапі виникають додаткові теплові втрати, пов'язані з контактом пружин з навколишнім повітрям, металевими елементами конвеєра та збільшеним часом транспортування. Унаслідок цього температура окремих виробів перед зануренням у гартівне середовище може знижуватися або, навпаки, залишатися надмірно високою залежно від їх маси, геометрії та умов руху.

Безпосереднє гартування здійснюється у водяному середовищі, причому

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температура води підтримується в межах 30–40 °С. Такий режим охолодження забезпечує інтенсивний відвід тепла, однак у поєднанні з нестабільною температурою металу перед гартуванням може призводити до нерівномірного формування структури, підвищених термічних напружень і, як наслідок, до зростання ризику утворення гартівних дефектів. Таким чином, відхилення фактичних температурних умов від регламентованих значень є одним із чинників, що негативно впливають на якість та надійність готових пружин.

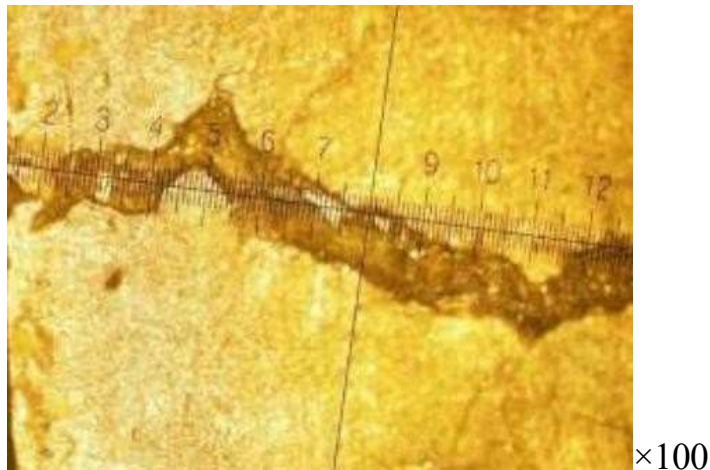


Рис. 3.4 – Розкриття тріщини після гартування

Нагрівання прутка, призначеного для операції навивання, здійснюється до температурного інтервалу 930–950 °С. Такий рівень температури є допустимим лише за умови нетривалої витримки, оскільки тривале перебування металу в цьому діапазоні призводить до погіршення структурної однорідності. Водночас відсутність проміжного етапу підстуджування заготовки до оптимальної температури гартування (приблизно 870 °С), а також значна нерівномірність температурного поля вздовж довжини прутка створюють передумови для виникнення напружень. У процесі мартенситного перетворення ці напруження реалізуються у вигляді тріщин, що формуються

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо під час охолодження (рисунок 3.4).

Після завершення гартування фіксується істотна неоднорідність твердості по довжині пружини: у зоні початкового витка значення твердості знижуються до рівня HRC 30–40, тоді як у кінцевому витку спостерігається надмірне загартування з досягненням твердості до 60 HRC. Такий розподіл властивостей є наслідком нерівномірного теплового режиму нагрівання та охолодження.

З метою стабілізації механічних характеристик і зменшення внутрішніх напружень загартовані пружини піддають відпусканню у двозонних конвеєрних печах. Важливою умовою є мінімізація паузи між гартуванням і відпуском — цей інтервал не повинен перевищувати чотирьох годин. Хоча технологічними рекомендаціями встановлена температура відпускання в межах 480–520 °С, на практиці температура в печах часто підвищується до 550 °С. Поєднання нерівномірного нагріву під час гартування та завищеної температури відпуску призводить до формування в межах однієї пружини зон із різними рівнями твердості: м'яких ділянок з твердістю не вище 40 HRC та більш твердих областей із твердістю близько 50 HRC, що є технологічно неприпустимим. Усунення залишкових деформацій здійснюють шляхом одноразового стискання пружини до повного змикання витків із витримкою 5–8 с.

Під час аналізу експлуатаційних властивостей кремнистих пружинних сталей необхідно враховувати їхні специфічні металургійні та технологічні особливості. У процесі прокатки профілів внаслідок ліквідації кремнію формується виражена структурна смугастість, яка після охолодження проявляється у вигляді феритних смуг. Навіть у разі відсутності такої неоднорідності в прокаті вона повторно виникає при нагріванні до температур гартування, досягаючи 4–5 балів у центральних зонах профілю. Значна

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зональна ліквіація вуглецю та дендритна ліквіація кремнію обумовлюють необхідність застосування різних температур аустенізації для виробів, виготовлених із різних ділянок прокатного зливка. Ділянки аустеніту, збагачені кремнієм, насичуються вуглецем повільно, тому повне вирівнювання концентрацій часто не відбувається. У зв'язку з цим режим гартування повинен забезпечувати формування максимально однорідного аустеніту навіть за наявності початкової хімічної неоднорідності сталі.

Додатково виявлено виражену структурну смугастість, що проявляється чергуванням світлих смуг, збагачених марганцем, і темних смуг, насичених кремнієм. Така неоднорідність є прямим наслідком дендритної ліквіації легувальних елементів.

Для формування дрібнокристалічного мартенситу оптимальною вважається температура гартування 850–870 °С із подальшим охолодженням у маслі або воді. Саме гартування забезпечує досягнення максимальної твердості, а наступне відпускання в інтервалі 400–470 °С дозволяє сформувати оптимальне поєднання міцності та пластичності. Найвищі значення границі пружності, а також підвищена в'язкість і пластичність спостерігаються після відпуску при 400–450 °С.

Охолодження пружних елементів після відпускання доцільно виконувати у воді з двох основних причин: по-перше, для формування залишкових напружень стиску в поверхневому шарі, а по-друге, для запобігання розвитку оборотної відпускнуї крихкості при швидкому охолодженні з температур 500–540 °С. Відпускуна крихкість негативно впливає на експлуатаційні властивості пружин, підвищує температуру холодноламкості та сприяє зародженню й розвитку втомних тріщин.

Після завершення термічної обробки (гартування та відпускання в діапазоні 250–500 °С) у структурі сталі одночасно присутні кілька карбідних

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фаз: ϵ -, χ -карбіди та цементит (Fe_3C). Максимальна кількість ϵ -карбіду спостерігається при температурі близько $350\text{ }^\circ\text{C}$, тоді як пік утворення χ -карбіду припадає на $400\text{ }^\circ\text{C}$. За вищих температур відпуску домінує цементит. Кремній сприяє стабілізації ϵ -карбіду та підвищує термічну стійкість мартенситу й залишкового аустеніту.

Поєднання операцій навивання та гартування з одного нагріву за контрольованих умов деформації та охолодження фактично реалізує процес термомеханічної обробки. У цьому випадку структурні особливості аустеніту, сформовані перед гартуванням, успадковуються мартенситом і зберігаються після відпуску. Підвищена температура нагрівання кремнієвмісних сталей перед гартуванням відіграє важливу роль не лише у забезпеченні деформування переохолодженого аустеніту, але й у підвищенні втомної міцності. Так, для сталі 60C2A межа витривалості після гартування з $870\text{ }^\circ\text{C}$ і відпускання при $480\text{ }^\circ\text{C}$ (твердість 40–42 HRC) становить 343 МН/м^2 , тоді як після гартування з $960\text{--}980\text{ }^\circ\text{C}$ і аналогічного відпуску вона зростає до 392 МН/м^2 . Аналогічна закономірність характерна і для сталі 60C2XA, для якої максимальні показники втомної міцності також досягаються після високотемпературного нагріву під гартування.

Результати сертифікаційних випробувань виявили відхилення від нормативних вимог. Під час перевірки прогину пружин S_1 під розрахунковим статичним навантаженням фактичне значення склало $+5,3$, що перевищує допустимі межі від $-3,4$ до $+4,8$, регламентовані нормативною документацією. Підвищена залишкова деформація зумовлена недостатньою наскрізною прогартованістю сталі 60C2A при перерізі 30 мм. Крім того, серійні пружини продемонстрували знижену циклічну довговічність — близько $0,4 \cdot 10^6$ циклів замість нормативних $0,5 \cdot 10^6$ (рисунк 3.5).

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.5 – Втомний злам витків пружини

У пружинних елементах із діаметром прутка 30 мм зафіксовано перевищення нормативного рівня твердості: фактичне значення становило близько HRC 47 за допустимого значення 46,5 HRC. Така різниця, хоча й незначна на перший погляд, є характерною ознакою перегріву сталі на стадії гартування. Надмірна температура аустенізації спричинила укрупнення зерна, що, у свою чергу, призвело до підвищеного вмісту залишкового аустеніту в структурі металу. Наслідком цих структурних змін стали відхилення геометричного параметра прогину S_1 від нормативних значень та помітне зниження втомної міцності пружин.

Після завершення термічної обробки структура пружинної сталі повинна містити мінімально можливу кількість залишкового аустеніту. Це пояснюється тим, що залишковий аустеніт має істотно нижчу границю пружності порівняно з мартенситом, унаслідок чого зменшується опір матеріалу малим та помірним пластичним деформаціям. Навіть незначна частка цієї фази негативно впливає на стабільність геометричних параметрів і

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пружних характеристик виробу.

Окрім зниження границі пружності, наявність залишкового аустеніту створює додаткову експлуатаційну небезпеку, пов'язану з його здатністю до деформаційно-індукованого або низькотемпературного мартенситного перетворення. За умов дії робочих навантажень, особливо при знижених температурах, залишковий аустеніт може трансформуватися в мартенсит безпосередньо під час експлуатації. Таке перетворення супроводжується локальним об'ємним ефектом і зростанням внутрішніх напружень, що призводить до зменшення релаксаційної стійкості матеріалу та розвитку процесів уповільненого руйнування. У результаті пружини можуть передчасно виходити з ладу навіть при тривалих статичних навантаженнях, які формально не перевищують розрахункових значень.

Зменшення вмісту залишкового аустеніту досягається шляхом раціонального вибору режимів термічної обробки. Основними технологічними важелями впливу є оптимізація температури аустенізації, швидкості нагрівання, умов витримки та інтенсивності охолодження при гартуванні. Хоча в процесі відпуску частина залишкового аустеніту може зазнавати розпаду, а межа пружності при цьому зростає, продукти такого перетворення характеризуються нижчим опором малим пластичним деформаціям, ніж структура, сформована в результаті повноцінного мартенситного перетворення. Тому надмірна орієнтація лише на процеси відпуску без забезпечення належної структури після гартування є технологічно недоцільною.

Для гарантування надійної та довговічної роботи пружин за умов тривалих статичних і циклічних навантажень, особливо в присутності концентраторів напружень, режим відпуску повинен забезпечувати не тільки високу границю пружності, але й достатній рівень пластичності та ударної

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкості. Одночасно має бути підвищений опір крихкому руйнуванню, що особливо важливо для відповідальних деталей ходових частин. З цієї причини необхідний жорсткий контроль як температури відпуску, так і тривалості витримки, оскільки відхилення будь-якого з цих параметрів призводить до деградації комплексу механічних властивостей.

Для високоміцної кремнієво-легованої сталі марки 60С2ХФА найбільш ефективним вважається режим термічної обробки, що включає ізотермічне гартування з формуванням нижнього бейніту з подальшим відпуском. Такий підхід забезпечує оптимальне поєднання міцності, пластичності та релаксаційної стійкості. Рекомендований технологічний режим передбачає нагрівання сталі до температури 880–900 °С з наступною ізотермічною витримкою пружин (для діаметра прутка до 40 мм) при температурі 290–330 °С упродовж 45–60 хвилин. Після цього здійснюється відпуск при температурі 300–325 °С з витримкою близько однієї години. Вплив температури відпуску на зміну механічних і пружних характеристик сталі наочно представлений на рисунку 3.6.

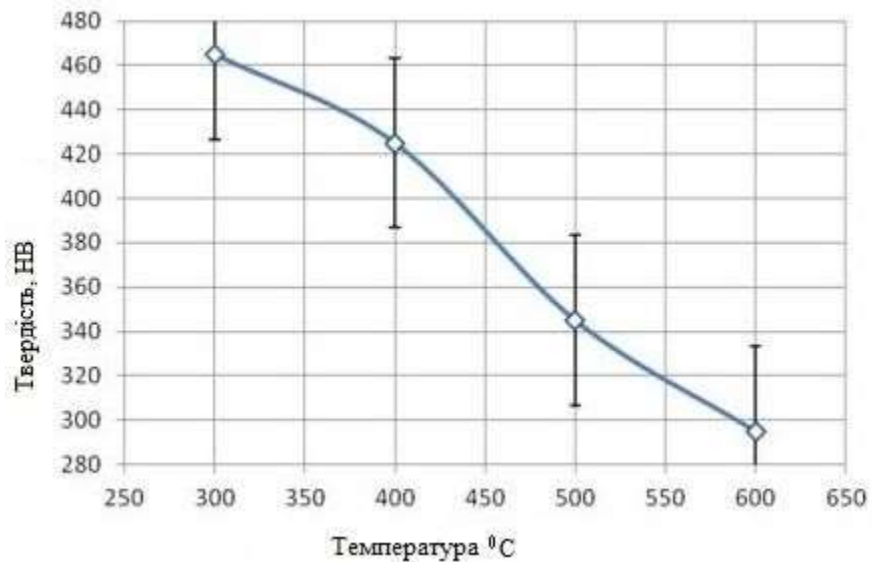


Рис. 3.6 – Вплив температури відпускання на твердість

Після реалізації зазначеного режиму термічної обробки матеріал набуває стабільного рівня твердості в межах HRC 45–51, що відповідає вимогам до високоміцних пружинних сталей, призначених для роботи в умовах значних статичних і циклічних навантажень. Досягнення такого діапазону твердості свідчить про формування оптимальної структурно-фазової рівноваги між міцністю, пружністю та достатньою пластичністю, необхідною для запобігання крихкому руйнуванню.

Температурно-часові характеристики обраного процесу термічної обробки, зокрема етапи нагрівання, ізотермічної витримки, охолодження та подальшого відпуску, детально наведені на рисунку 3.6. Дотримання цих параметрів забезпечує відтворюваність результатів і стабільність механічних властивостей по всьому перерізу виробу, що є особливо важливим для пружин великого діаметра.

Сформована в результаті обробки мікроструктура сталі, представлена на рисунку 3.7, характеризується переважанням дрібнодисперсних структурних складових (нижній бейніт або відпущений мартенсит залежно від конкретної ділянки), рівномірним розподілом карбідних частинок та мінімальним вмістом залишкового аустеніту. Така мікроструктура є підтвердженням ефективності обраного режиму термообробки та безпосередньо зумовлює високі експлуатаційні показники матеріалу, зокрема підвищену втомну міцність, релаксаційну стійкість і довговічність пружинних елементів.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

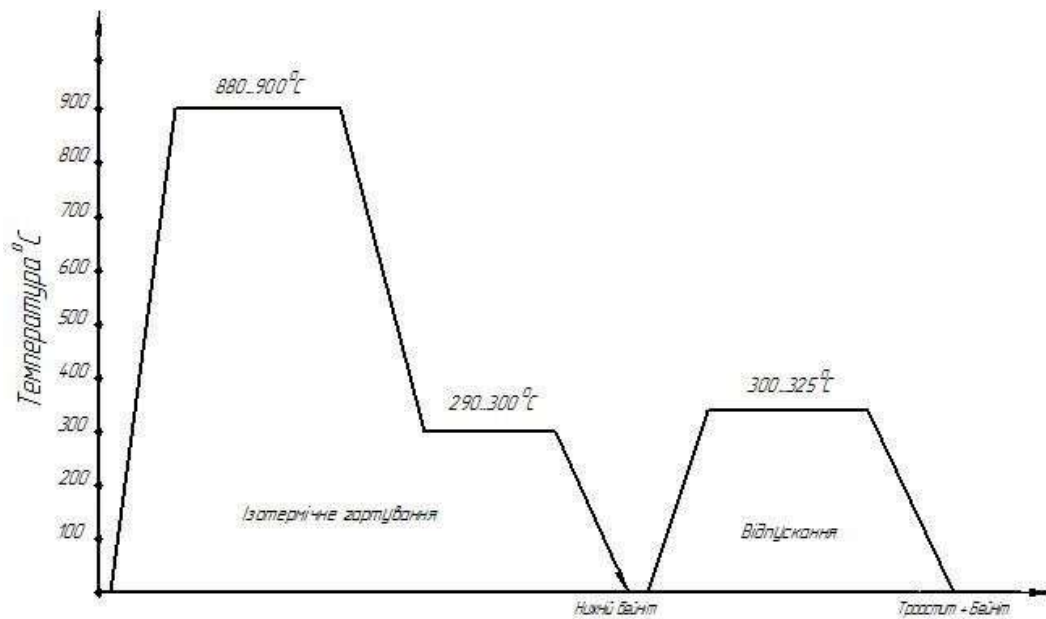


Рис. 3.7 – Термічна обробка пружин зі сталі 60С2ХФА

За умов ізотермічного гартування формування бейнітної структури відбувається в такому температурному діапазоні, за якого атоми заліза практично втрачають здатність до інтенсивної дифузії в кристалічній ґратці, тоді як атоми вуглецю зберігають порівняно високу рухливість. Саме ця відмінність у дифузійній активності компонентів визначає специфіку фазових перетворень у сталі під час витримки при сталій температурі.

Режим охолодження при ізотермічному гартуванні має проміжний характер. Його швидкість є вищою, ніж та, за якої формується троостит або інші перлітні різновиди структури, однак вона недостатня для реалізації повністю бездифузійного мартенситного перетворення. Унаслідок цього в матеріалі не утворюється ані класичний пластинчастий перліт, ані пересичений вуглецем мартенсит.

Таким чином, бейнітне перетворення поєднує в собі ознаки двох різних механізмів фазової перебудови: з одного боку, воно має дифузійну складову,

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пов'язану з перерозподілом вуглецю, а з іншого — містить елементи зсувної перебудови ґратки, характерні для мартенситного перетворення. Поєднання цих особливостей забезпечує формування дрібнодисперсної та структурно стабільної мікроструктури, яка відзначається вигідним співвідношенням міцності, пластичності та експлуатаційної надійності.



Рис. 3.8 – Структура сталі 60С2ХФА після термічної обробки

Після проведення відпускання сформована мікроструктура матеріалу характеризується переважанням нижнього бейніту з наявністю окремих ділянок трооститної складової. Така структурна комбінація свідчить про неповне завершення бейнітного перетворення та відображає особливості попереднього режиму гартування і наступного теплового впливу.

З метою покращення експлуатаційних показників, зокрема втомної міцності, стабільності пружних властивостей і опору релаксації напружень, а також для формування більш однорідної та керованої структури, доцільно застосовувати комплексний підхід до термічної обробки пружин залізничного

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначення зі сталі 60С2ХФА. Найбільш ефективним у цьому випадку є поєднання кількох технологічних стадій.

Рекомендована схема обробки передбачає виконання ізотермічного гартування безпосередньо після операції гарячого навивання пружин, що дозволяє зафіксувати сприятливий структурний стан деформованого аустеніту. Подальше середньотемпературне відпускання забезпечує зниження рівня внутрішніх напружень, стабілізацію бейнітної структури та досягнення оптимального балансу між міцністю, пластичністю й довговічністю. Такий комбінований режим термічної обробки є технологічно доцільним і найбільш повно відповідає вимогам, що висуваються до пружних елементів залізничного транспорту.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						65
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Потенційні небезпеки

Небезпечні фактори, що виникають у разі недотримання роботодавцем вимог нормативного документа НПАОП 0.00–7.11–12 «Загальні вимоги щодо забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» [28], можуть мати комплексний характер і негативно впливати як на безпеку, так і на стан здоров'я персоналу. До основних груп таких небезпек належать наступні.

По-перше, ризики, обумовлені порушенням ергономічних вимог при організації робочих місць у приміщеннях дослідницьких лабораторій. Йдеться про невідповідність геометричних розмірів робочих зон встановленим нормам, перевищення допустимої кількості осіб, які одночасно перебувають у приміщенні, а також нераціональне розміщення лабораторного обладнання, вимірювальних приладів і офісної техніки. Такі порушення призводять до підвищеного фізичного та психоемоційного навантаження, зростання ймовірності травм і зниження ефективності праці.

По-друге, суттєву небезпеку становить можливість ураження електричним струмом під час виконання службових обов'язків. Причинами цього можуть бути недотримання вимог електробезпеки, експлуатація несправного або зношеного електрообладнання, відсутність або неналежний стан колективних і індивідуальних засобів захисту. Такі фактори здатні призвести не лише до електротравм різного ступеня тяжкості, але й до смертельних випадків.

По-третє, небезпеки, пов'язані з обробленням результатів досліджень із використанням персональних комп'ютерів. Тривала робота в статичній,

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одноманітній позі без дотримання режимів праці та відпочинку спричиняє перевантаження опорно-рухового апарату, що з часом може викликати професійні захворювання, зниження працездатності та хронічні порушення здоров'я.

По-четверте, існує ризик отримання механічних травм під час підготовки зразків або дослідних виробів до термічної обробки. Такі небезпеки зазвичай пов'язані з недотриманням вимог охорони праці при роботі з абразивним інструментом, зокрема використанням обладнання, що не пройшло обов'язкові випробування, або порушенням правил його експлуатації. Наслідком можуть бути тяжкі травми рук, обличчя та інших частин тіла.

По-п'яте, під час дослідження структури металів методами електронної металографії із застосуванням електронних мікроскопів виникають специфічні ризики. Вони пов'язані з потенційно шкідливим впливом інтенсивного електронного випромінювання, яке на клітинному рівні може негативно впливати на організм, сприяючи ослабленню імунної системи та розвитку імунних порушень.

По-шосте, небезпечним фактором є незадовільні параметри мікроклімату робочих приміщень, які не відповідають фізіологічним потребам працівників з урахуванням рівня енергетичних витрат під час виконання робіт. Недостатня ефективність систем опалення, вентиляції та повітрообміну може призводити до переохолодження або перегріву організму, що підвищує ризик загальних і простудних захворювань.

По-сьоме, порушення вимог до освітлення робочих зон дослідницької лабораторії, зумовлені несправністю світильників або помилками у розрахунку їх кількості й потужності, створюють умови для перенапруження зорового аналізатора. Це, у свою чергу, може викликати погіршення зору,

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищену втому та зниження точності виконання робіт.

По-восьме, серйозну загрозу становить можливість виникнення пожеж унаслідок порушень правил пожежної безпеки. Зокрема, неправильне визначення типів і кількості первинних засобів пожежогасіння з урахуванням пожежної категорії приміщень може унеможливити своєчасну ліквідацію займання та призвести до розвитку пожежі з важкими наслідками.

По-дев'яте, небезпеку створює невиконання інженерно-технічних заходів цивільного захисту, спрямованих на забезпечення стабільної та безперервної роботи виробничих і дослідницьких підрозділів у особливий період, зокрема у воєнний час [29]. Відсутність таких заходів знижує рівень захищеності персоналу та стійкість об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій.

4.2 Заходи попередження небезпеки

а) Організація робочого місця наукового працівника повинна відповідати актуальним ергономічним стандартам і забезпечувати раціональне, безпечне та зручне розміщення всіх технічних засобів, приладів і документації, необхідних для проведення досліджень. Робоча поверхня столу для роботи з відеодисплейними терміналами має регулюватися по висоті в діапазоні 680–800 мм, що дозволяє адаптувати її до антропометричних особливостей користувача. Ширина та глибина столу повинні забезпечувати виконання всіх операцій у межах моторного поля досяжності; рекомендовані значення ширини становлять 600–1400 мм, а глибини — 800–1000 мм. Окрему увагу слід приділяти простору для ніг: висота не менше 600 мм, ширина — щонайменше 500 мм, глибина на рівні колін — не менше 450 мм, а на рівні витягнутої ноги — не менше 650 мм. Дотримання цих вимог сприяє зниженню

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

втомі, профілактиці професійних захворювань та підвищенню ефективності праці.

б) Комплекс заходів щодо захисту персоналу від ураження електричним струмом включає технічні, організаційні та експлуатаційні рішення. До основних належать: унеможливлення випадкового контакту зі струмоведучими частинами, що перебувають під напругою; раціональний електричний поділ мережі; усунення небезпеки появи напруги на металевих корпусах і кожухах електрообладнання шляхом застосування захисного заземлення, занулення та пристроїв захисного відключення. Додатково застосовуються малі безпечні напруги, подвійна або посилена ізоляція, огороження струмоведучих елементів, а також захист від переносу напруги з боку високої напруги на низьковольтні кола. Важливими є регулярний контроль стану ізоляції, компенсація ємнісних струмів замикання на землю, використання електрозахисних засобів, блокувальних і сигнальних пристроїв.

Заземлення поділяється на:

- робоче, яке забезпечує нормальне функціонування електроустановок (наприклад, заземлення нейтралі трансформатора);
- заземлення блискавкозахисту, призначене для відведення струмів блискавки;
- захисне заземлення, що використовується виключно з метою електробезпеки та полягає у з'єднанні відкритих провідних частин обладнання із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та наведеної напруги.

в) У процесі роботи за комп'ютером орган зору зазнає значного навантаження через постійну зміну об'єктів з позитивним контрастом (світлі елементи на темному фоні) та негативним контрастом (темні елементи на світлому фоні). Це викликає безперервну переадаптацію зорового апарату. За стандартну восьмигодинну зміну користувач здійснює близько 30 000 зорових

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фіксацій на екран, що перевищує фізіологічні можливості ока. У результаті виникає перенапруження м'язів очей та світлосприймаючого апарату, яке проявляється астенопічними симптомами: різью, болем в очах, ломотою в надбрівній ділянці, нечіткістю контурів і розпливчастістю зображення.

Тривале фокусування погляду на матовій поверхні екрана знижує частоту кліпання, що призводить до пересихання рогівки та розвитку синдрому «сухого ока» (синдром Сікка). Додатковий негативний вплив спричиняє пульсація (блимання) екрана, якщо вона перевищує нормативні значення, а також дзеркально-відбивна або нерівна поверхня монітора з численними світловими відблисками. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, коли периферійні поверхні освітлені інтенсивніше за центральну зону, та засліплююча дія світильників також погіршують функціональний стан зору. Застосування кольорового шрифту додатково підвищує зорове навантаження, оскільки різні довжини хвиль кольорів потребують складнішої адаптації ока порівняно з чорно-білим зображенням.

г) З метою запобігання механічним травмам під час виготовлення та оброблення зразків необхідно експлуатувати лише справне технологічне обладнання, своєчасно замінювати зношені деталі та інструменти, а також обов'язково використовувати засоби індивідуального захисту. До них належать захисні окуляри та рукавиці, що запобігають ушкодженню очей і рук частками абразивних матеріалів, які можуть відлітати в різних напрямках. Для додаткового захисту органів зору доцільно застосовувати прозорі захисні екрани та окуляри з відкидними фігурними боковинами, які забезпечують захист спереду, знизу і з боків.

д) Оптичні системи мікроскопів також мають свої особливості з точки зору безпеки та якості спостережень. Об'єктиви-ахромати коригують лише середню частину видимого спектра, тому при роботі з білим світлом формують

					<i>KPM MTBA 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зображення з недостатньо чіткими, кольорово забарвленими краями. Для усунення некоригованих спектральних складових застосовують жовто-зелені світлофільтри, які покращують контраст і різкість зображення. Об'єктиви-апохромати, на відміну від ахроматів, мають корекцію практично для всіх довжин хвиль видимого спектра, тому використання таких фільтрів для них, як правило, не є необхідним.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі три основні аварійні ситуації: раптове знеструмлення, припинення водопостачання та порушення герметичності вакуумної системи. У всіх випадках першочерговим завданням є відключення високої напруги, печі дифузійного насоса та головного автомата, а також забезпечення охолодження дифузійного насоса і, за можливості, збереження вакууму. При відсутності води піч насоса необхідно охолоджувати мокрими тканинами з одночасним примусовим обдуванням вентилятором, періодично замінюючи нагріті матеріали. У разі прориву повітря в колоні мікроскопа зазвичай спрацьовує автоматичний захист, який ізолює дифузійний насос і вимикає напругу. Оператор повинен проконтролювати, щоб форвакуумний насос не працював на атмосферне повітря, а був переключений на замкнений об'єм, наприклад на відкачування боксу з фотопластинками [24].

4.3 Виробнича санітарія

а) Параметри мікроклімату та повітряного середовища

Показники мікроклімату й чистоти повітря в робочих приміщеннях встановлюються з урахуванням категорії фізичного навантаження працівників

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та типу робочих місць — постійних або непостійних.

До постійних робочих місць відносять такі, на яких працівник перебуває понад 50 % тривалості робочого часу або більше ніж 2 години безперервно. У разі виконання робіт у межах декількох точок однієї робочої зони постійним робочим місцем вважається вся зона загалом.

Непостійними робочими місцями вважаються ті, де перебування працівника не перевищує 50 % робочого часу або 2 години поспіль.

Під час нормування мікроклімату необхідно враховувати такі принципові положення:

- для постійних робочих місць встановлюються як оптимальні, так і допустимі значення параметрів мікроклімату в холодний і теплий періоди року;
- для непостійних робочих місць нормуються лише допустимі параметри мікроклімату незалежно від сезону.

У холодний період року для постійних робочих місць нормативами передбачено:

- оптимальну температуру повітря в межах 18–20 °С, допустиму — 17–23 °С;
- оптимальну відносну вологість 40–60 %, при максимально допустимому значенні до 75 %;
- швидкість руху повітря в оптимальних умовах не більше 0,2 м/с, а в допустимих — до 0,3 м/с.

Для непостійних робочих місць у холодний період року допускається температура повітря в діапазоні 15–24 °С, відносна вологість до 75 %, а швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,3 м/с.

У теплий період року на постійних робочих місцях оптимальні

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурні умови становлять 21–23 °С, допустимі — 18–27 °С;

- відносна вологість повітря в оптимальних і допустимих умовах підтримується в межах 40–60 %;
- швидкість повітряного потоку в оптимальних умовах не перевищує 0,3 м/с, а в допустимих може становити 0,2–0,4 м/с.

Для непостійних робочих місць у теплий період року допускається температура повітря 17–29 °С, відносна вологість до 65 % (або 45 % при температурі 26 °С), а швидкість руху повітря — у межах 0,2–0,4 м/с.

б) Організація та нормування виробничого освітлення

Система виробничого освітлення формується та нормується залежно від умов зорової діяльності та особливостей виконуваних робіт. Основними критеріями при цьому є:

- розряд зорової роботи, що визначається мінімальним розміром об'єкта розрізнення, яскравістю фону та ступенем контрасту об'єкта з фоном;
- тип і система освітлення, що застосовуються у виробничому приміщенні.

При проєктуванні робочих зон передбачається забезпечення оптимального, фізіологічно обґрунтованого рівня освітленості, який може реалізовуватися за рахунок:

- природного освітлення (бокового або верхнього);
- штучного освітлення, яке поділяється на робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне та чергове.

Комплексне використання різних систем освітлення дозволяє знизити зорове навантаження, підвищити продуктивність праці та мінімізувати ризик розвитку професійних захворювань органів зору.

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У виконаній роботі здійснено комплексний аналіз основних типів пружин, особливостей їх функціонування в реальних умовах експлуатації, а також вимог до матеріалів, що використовуються для виготовлення пружинних елементів. Розглянуто вплив хімічного складу сталі та ролі легуючих елементів на механічні, експлуатаційні та трибологічні характеристики пружин, зокрема на їхню зносостійкість і довговічність. У результаті досліджень визначено ключові чинники, які формують опір зношуванню та забезпечують стабільність параметрів пружин упродовж тривалого строку служби.

Проведено порівняльний аналіз пружин, що застосовуються в залізничному транспорті, виготовлених зі сталей марок 60С2 та 60С2ХА. Встановлено, що зазначені матеріали характеризуються раціональним поєднанням міцності, пружності, в'язкості та втомної витривалості, що робить їх придатними для використання в умовах значних статичних і динамічних навантажень. Проаналізовано технологічну схему виготовлення пружин, яка включає гаряче навивання заготовок з подальшою термічною обробкою. Показано, що застосування ізотермічного гартування у поєднанні з відпуском сприяє формуванню дрібнодисперсної трооститної структури, яка забезпечує оптимальний комплекс експлуатаційних властивостей.

Окрему увагу в роботі приділено питанням охорони праці, промислової та екологічної безпеки на етапах виготовлення пружинних виробів. Розглянуто потенційні небезпеки виробничого процесу та запропоновано заходи щодо зниження негативного впливу технологічних факторів на персонал і навколишнє середовище. Виконані економічні розрахунки підтвердили техніко-економічну ефективність та доцільність впровадження

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запропонованих технологічних рішень у серійне виробництво.

У ході дослідження також:

- здійснено детальний аналіз впливу основних параметрів термічної обробки на формування мікроструктури та кінцеві механічні властивості пружин;
- вивчено закономірності структурних перетворень у пружинних сталях та їхній вплив на надійність і ресурс роботи виробів;
- розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації режимів гартування та відпуску з метою підвищення експлуатаційних характеристик;
- окреслено перспективні напрями подальших наукових досліджень, спрямованих на вдосконалення матеріалів і технологій виробництва пружин для відповідальних галузей машинобудування.

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						75
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bobyr, M., Havrushkevych, N., & Trembach, B. (2022). Modeling of spring material behavior under cyclic loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7), 6-14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251968>
2. *Spring Manufacturing Handbook* / Harald Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch. - Springer, 2019. - 456 p.
3. Макаров А.В., Гаврилова О.С. Технологія виготовлення пружин: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 186 с.
4. Пружинні сталі та сплави: довідник / За ред. В.М. Коваленка. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 328 с.
5. Kyrychok, P., & Trishchuk, R. (2021). Investigation of the influence of heat treatment modes on the properties of spring steels. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1), 23-28.
6. *Advanced Spring Manufacturing: Technology and Materials* / Ed. by George E. Totten. - CRC Press, 2023. - 624 p.
7. Kostenko, O., & Pavlenko, V. (2023). Improvement of spring manufacturing technologies for railway transport. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 8(1), 6-16.
8. Термічна обробка пружин: теорія і практика / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, В.В. Клімін. Київ: НАУ, 2022. 244 с.
9. *Mechanical Properties of Spring Materials and Manufacturing Methods* / William D. Callister Jr., David G. Rethwisch. - Wiley, 2021. - 392 p.
10. Пешков О. Г. Свойства рессорно-пружинных сталей и область их применения. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова*. 2015. С. 1470-1473.

					КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Дослідження властивостей пружинних сталей / О.І. Балицький, В.М. Гвоздецький. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2021. №4. С. 43-51.
12. Chen, X., & Zhang, Y. (2023). Modern Technologies in Spring Manufacturing: A Comprehensive Review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 123-130.
13. Підвищення довговічності пружин залізничного транспорту / В.Г. Могильний, О.В. Тимошенко. *Залізничний транспорт України*. 2022. №3. С. 28-35.
14. *Spring Design and Manufacturing: Engineering Principles* / Michael F. Ashby. - Butterworth-Heinemann, 2023. - 544 p.
15. Термічна обробка пружинних сталей: монографія / І.О. Вакуленко, В.Г. Єфременко. Дніпро: Ліра, 2023. 276 с.
16. *Surface Engineering of Springs* / Peter J. Blau. - ASM International, 2022. - 428 p.
17. Optimization of Heat Treatment Parameters for Railway Springs / M. Zhuravlev, K. Schmidt. *International Journal of Materials Engineering*. 2023. Vol. 13(2). P. 45-52.
18. Сучасні методи виготовлення та зміцнення пружин / За ред. В.В. Панасюка. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2022. 312 с.
19. Improvement of Spring Steel Properties through Innovative Heat Treatment / D. Porter, K. Easterling, M. Sherif. *Materials Science and Technology*. 2024. Vol. 40(3). P. 234-242.

					<i>KPM МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					<i>КРМ МТВА 25 24447. 000 ПЗ</i>	Арк.
						78
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

**Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства**

Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Тема:

**«Підвищення експлуатаційних властивостей
пружин»**

Виконав: ст.гр. МТВАм 24-1 МАРУСІЙ О. О.

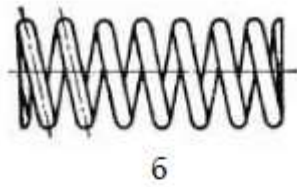
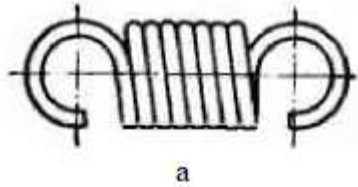
Керівник: доц. Гончар В.А.

Метою роботи Дослідження експлуатаційних характеристик та технологічних особливостей пружин спрямоване на визначення оптимальних умов їх виробництва та експлуатації.

Основні завдання роботи:

- На основі літературного огляду проаналізувати різновиди пружин, специфіку їх роботи в експлуатаційних умовах
- Провести аналіз впливу технологічних параметрів термообробки на кінцеві властивості виробів
- Досліджено механізми формування структури та її вплив на експлуатаційні характеристики;

Основні види пружин



а, б – циліндричні;

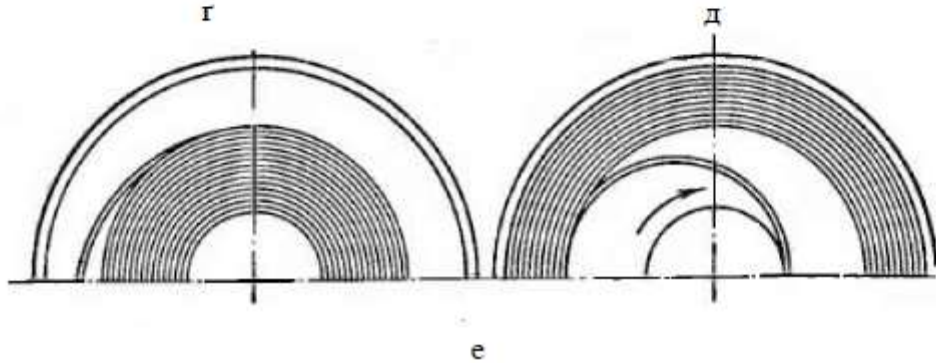
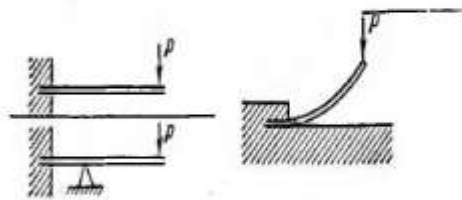
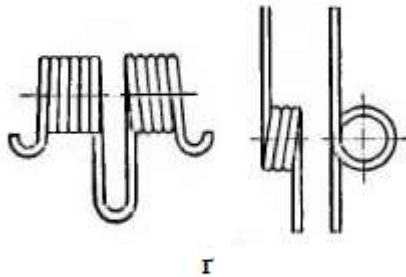
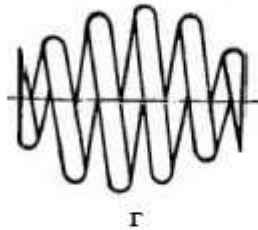
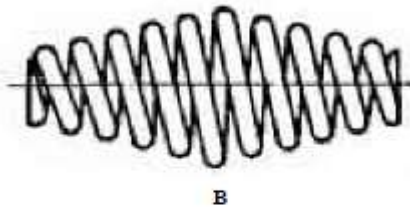
в – конічні;

г – бочкоподібні;

г – фасонні;

д – плоскі;

е - спіральні



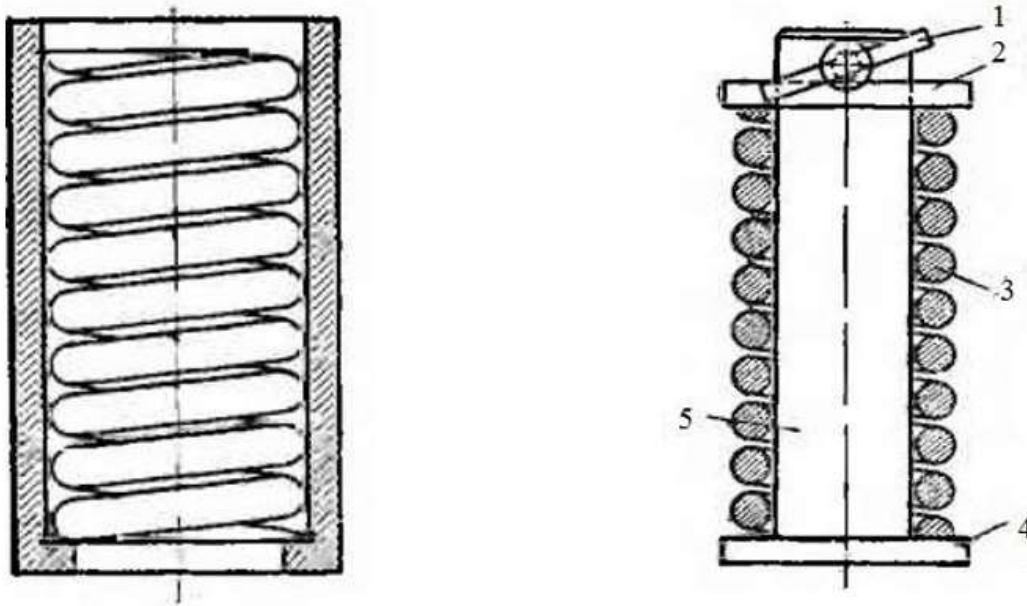
Ресорно-пружинні сталі

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni
Пружини загальних механізмів і машин					
65	0,62...0,70	0,17...0,37	0,50...0,80	≤0,25	≤0,25
60Г	0,62...0,65	0,17...0,37	0,70...1,00	≤0,25	≤0,20
70	0,67...0,75	0,17...0,37	0,50...0,80	≤0,25	≤0,25
Пружини автомашин і рухомого складу залізничного транспорту					
60С2	0,57...0,65	1,50...2,00	0,60...0,90	≤0,30	≤0,25
60С2Г	0,55...0,65	1,80...2,20	0,70...1,00	≤0,30	≤0,25
50ХГА	0,47...0,52	0,17...0,37	0,80...1,00	0,95...1,20	≤0,25
55ХГР	0,52...0,60	0,17...0,37	0,90...1,20	0,90...1,20	≤0,25
Пружини відповідального призначення					
50ХФА	0,46...0,54	0,17...0,37	0,50...0,80	0,80..1,10	≤0,25
55С2ГФ	0,52...0,60	1,50...2,00	0,95...1,25	0,30...0,70	≤0,25
60С2ХА	0,56...0,64	1,40...1,80	0,40...0,70	0,70...1,00	≤0,25
60С2Н2А	0,56...0,64	1,40...1,80	0,40...0,70	0,30	1,40...1,70

Термічна обробка пружин

Марка сталі	Навивання пружин	Відпал перед волочінням, °C	Гаряче навивання пружин, °C	Гартування, °C	Відпуск	НВ
50ХФА	Навивання з дроту діаметром 4 мм			850-870	350-420	500
60С2	Навивання холодне	—	—	—	370-400	444
	Гаряче	730-850	850-950	850-870	430-460	387- 477
50С2, 55С2, 60С2Н2А	Гаряче навивання (високо напружені пружини відповідального призначення)	850	850-900	830-860	420-450	340-444
60С2ХФА 60С2ВА	Гаряче навивання (високо-напружені пружини відповідального призначення)	860	850-900	850-860	410-420	415-477
60С2	Гаряче навивання	750	800-900	860-870	350-250	HRC 45-48

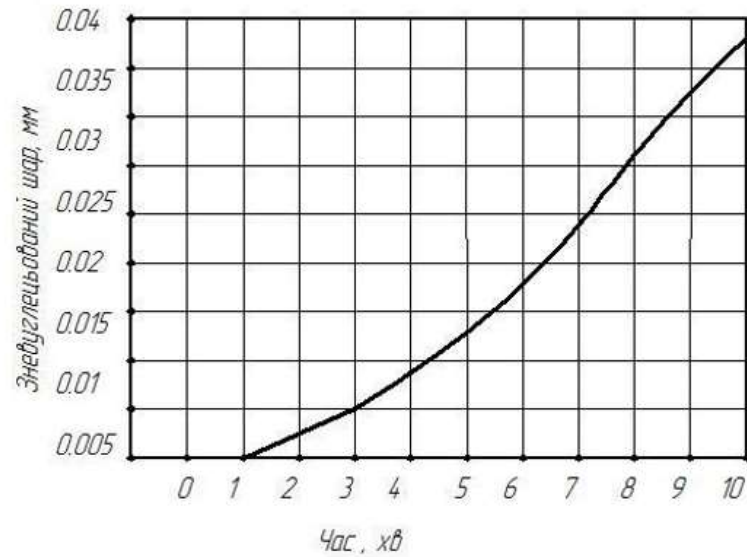
Пристрій для гартування пружин



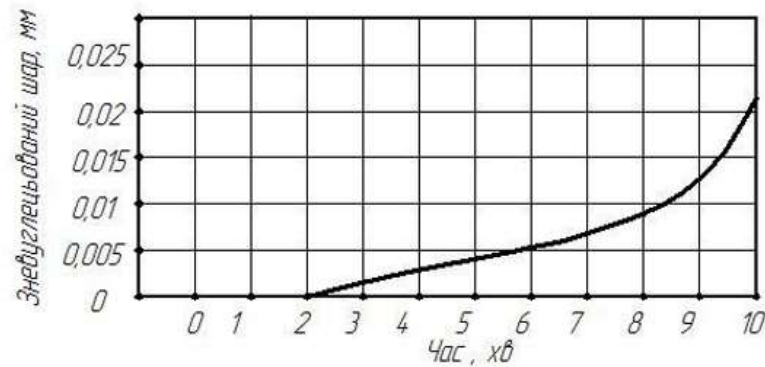
а - з посадкою пружини в склянку, б - з посадкою пружини на оправлення;

1 - обмежувач, 2 - знімний верхній опорний майданчик, 3 - пружина, 4 - нижній опорний майданчик, 5
- оправлення

Вплив легуючих елементів на знеуглецювання сталей при гартуванні



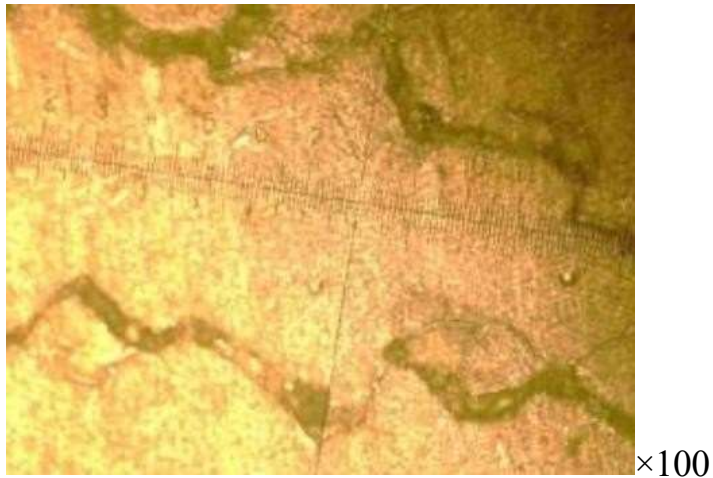
а



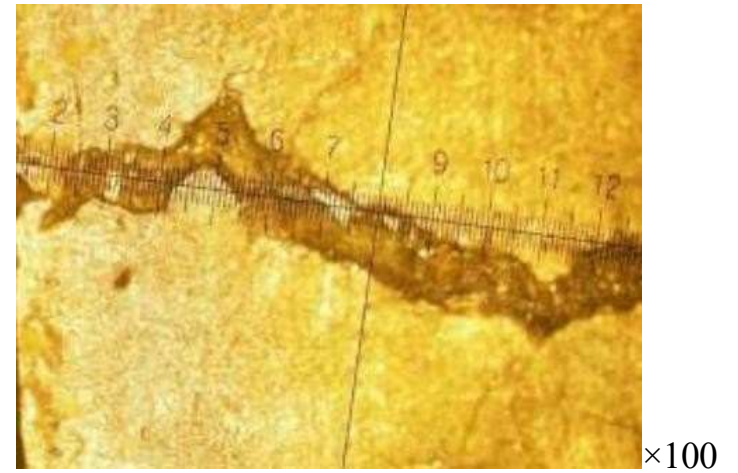
б

а) – сталь 60C2XA; б) – сталь 60C2A

Можливі дефекти при виробництві

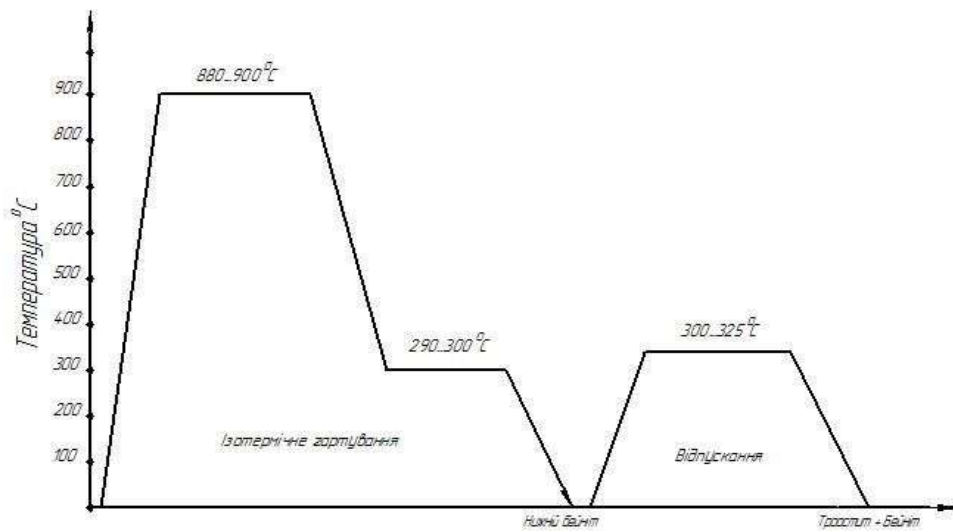


Тріщини від вальцювання



Розкриття тріщини після гартування

Запропонований режим обробки



Режим термічної обробки пружин зі сталі 60С2ХА



Мікроструктура сталі 60С2ХА після термічної обробки

ВИСНОВКИ

- В роботі проаналізовано різновиди пружин, специфіку їх роботи в експлуатаційних умовах;
- Критерії підбору матеріалів та вплив легуючих елементів на експлуатаційні характеристики та зносостійкість
- Проведено порівняльне дослідження матеріалів пружин, виготовлених зі сталей марок 60С2А та 60С2ХА, які демонструють оптимальний комплекс властивостей для даного застосування. Технологічний процес виробництва включає гаряче навивання з подальшою термічною обробкою - ізотермічним гартуванням та відпуском для формування трооститної структури.
- Проведено аналіз впливу технологічних параметрів термообробки на кінцеві властивості виробів
- Розроблено рекомендації щодо оптимізації режимів термічної обробки

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!