

ПІБ студента: Переверза Станіслав Віталійович

ПІБ керівника: Глотка Олександр Анатолійович, доцент

Тема: Удосконалення технології хіміко-термічного оброблення цементованих виробів

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить: с., рис., табл.,джерел.

Метою дипломної роботи є порівняльний аналіз існуючих методів захисту від цементації та розробка нового комплексного методу захисту при використанні високоактивного карбюризатора.

Предметом дослідження є використання захисних антицементацийних покриттів.

Об'єктом дослідження є комплексний захисний антицементацийний шар, що складається з мідного шару та пасти на основі борної кислоти.

Досліджено вплив різних режимів хіміко-термічної обробки на структуру та механічні властивості поверхневих шарів зубчастих коліс. Показана необхідність використання покриттів для захисту поверхонь деталей, що не потрібно піддавати цементації. Найбільш перспективним є використання комплексного захисного шару, що складається з мідного шару та пасти на основі борної кислоти. Досліджено причини сповзання пасти з вертикальних поверхонь та проведено оптимізації хімічного складу зазначеної пасти.

Розраховано економічний ефект від використання комплексного захисного шару. Розглянуті заходи для збереження життя та здоров'я працівників лабораторії.

ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ЦЕМЕНТАЦІЯ,
АНТИЦЕМЕНТАЦІЙНА ПАСТА, ГАЛЬВАНІЧНЕ МІДНЕННЯ, ПРОБОЙ,
НАВУГЛЕЦЮВАННЯ, ПОРИ, МІКРОСТРУКТУРА

ЗМІСТ

<u>ЗАВДАННЯ</u>	<u>2</u>
<u>ВСТУП</u>	<u>7</u>
<u>1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ХАРАКТЕРИСТИК ТА</u> <u>ОСОБЛИВОСТЕЙ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ...</u>	<u>8</u>
<u>1.1 Характеристика та умови експлуатації зубчастих коліс</u> <u>.....</u>	<u>8</u>
1.2 Характеристика матеріалів для зубчастих колес.....	10
1.3 Особливості цементации	16
1.3.1 Проведення цементации сталі в твердому середовищі.....	22
1.3.2 Проведення цементации сталі в газоподібному середовищі.....	23
<u>1.4 _____ Мета та постановка завдання</u> <u>роботи.....</u>	<u>26</u>
<u>2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....</u>	<u>28</u>
<u>2.1 Матеріали та технологія їх отримання.....</u>	<u>28</u>
<u>2.2 Мікроскопічні дослідження</u>	<u>28</u>
<u>2.3 Технологія гальванічного міднення</u>	<u>29</u>
2.4 Дослідження характеристик антицементацийних паст.....	29
<u>3 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ЗАХИСТУ ВІД ЦЕМЕНТАЦІЇ..</u>	<u>31</u>
<u>3.1 Аналіз основних методів захисту від цементации, що застосовуються на</u> <u>виробництві.....</u>	<u>31</u>
3.1.1 Захист за допомогою припусків на подальшу механічну обробку.....	31
3.1.2 Відпал цементованих поверхонь за допомогою індукційного нагріву...	32
3.1.3 Захист з використанням захисних покриттів.....	32
3.1.4 Застосування захисних обмазок.....	33
<u>3.2 Ефективність використання гальванічного міднення в умовах цементации у</u>	

високоактивному газовому карбюризаторі.....	37
<u>3.3 Вибір антицементацийної пасти.....</u>	<u>39</u>
3.4 Поліпшення складу пасти на основі борної кислоти.....	43
3.5 Застосування комплексного захисного покриття	48
4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	50
4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	50
4.2 Планування науково–дослідних робіт.....	51
4.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР.....	59
4.3.1 Розрахунок вартості матеріалів.....	59
4.3.2 Спеціальне устаткування для науково – технічних робіт	60
4.3.3 Розрахунок вартості палива і енергії.....	61
4.3.4 Розрахунок амортизації універсального устаткування.....	62
4.3.5 Розрахунок заробітної плати.....	63
4.3.6 Відрахування на соціальні заходи.....	64
4.3.7 Накладні витрати.....	65
4.3.8 Кошторис витрат.....	65
4.3.9 Бальна оцінка економічної ефективності науково–дослідної роботи.....	66
<u>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</u>	<u>69</u>
<u>5.1 Аналіз потенційних небезпек.....</u>	<u>69</u>
<u>5.2 Заходи по забезпеченню загальної безпеки</u>	<u>70</u>
<u>5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....</u>	<u>74</u>
<u>5.4 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.....</u>	<u>75</u>
<u>5.5 Заходи з цивільної оборони.....</u>	<u>75</u>
<u>ВИСНОВКИ.....</u>	<u>78</u>
<u>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</u>	<u>80</u>

ВСТУП

Хіміко-термічна обробка є одним з ефективних способів поверхневого зміцнення деталей машин та інструментів. Вона полягає в насиченні поверхневого шару сталі заданим елементом (або декількома).

Найбільш поширеними видами ХТО є цементация, азотування, нітроцементация.

Процес газової цементации найбільш затребуваний на промислових підприємствах при масовому виробництві. Серед переваги газової цементации можна виділити: можливість контролю концентрації вуглецю в поверхневому шарі; скорочення тривалості обробки через відсутність необхідності в прогріванні ємності; можливість повної автоматизації; значне спрощення фінішної термообробки, так як загартування виробляють прямо з цементацийній печі.

Крім грамотного підбору робочого середовища, для цементации металу важливо в точності слідувати технології проведення подібної обробки. Найменша помилка здатна негативно вплинути на хімічний склад виробу, що в подальшому може зменшити термін служби конструкції, в складі якої воно буде застосовуватися. З цієї причини необхідно приділяти увагу кожному параметру, не допускаючи відхилень від діючих норм і правил щодо проведення хіміко-термічної обробки металевих деталей.

1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

1.1 Характеристика та умови експлуатації зубчастих коліс

Зубчасті передачі – це механізми, які за допомогою зубчастого зачеплення передають або перетворюють рух зі зміною кутових швидкостей та моментів. Зубчасте колесо або шестерня – основна деталь зубчастої передачі у вигляді диска із зубцями на циліндричній або конічній поверхні, що входять в зачеплення з зубцями іншого зубчастого колеса. У машинобудуванні прийнято менше зубчасте колесо називати шестернею, а більше – колесом. Мінімальна кількість зубців обмежена у зв'язку із зносом шарнірів, нерівномірністю швидкості і шумом при роботі. Для передач зі втулково-роликівими ланцюгами його призначають від 12 до 31, для передач із зубчастими ланцюгами – від 17 до 40 при тих же передавальних числах. В іншому разі не буде дотримано умови плавного і надійного зачеплення [1]. Зубчасті колеса зазвичай використовуються парами з різним числом зубців з метою перетворення крутного моменту і частоти обертання валів на вході і виході. Колесо, до якого крутний момент підводиться ззовні, називається ведучим, а колесо, з якого момент знімається – веденим[2].

Зубчасті колеса (рис. 1.1) є відповідальними деталями, що сприймають великі навантаження, їх передчасний вихід з ладу може призвести до значних економічних втрат, пов'язаних з ремонтом і технічним обслуговуванням.

Зубчасті колеса працюють в важконавантаженому стані при температурах до 400 °С. Це деталі відповідального призначення, до яких висувають вимоги високої міцності та поверхневої твердості в поєднанні із підвищеною в'язкістю серцевини. Такі вироби експлуатуються під впливом вібраційних та ударних навантажень при від'ємних та підвищених температурах.

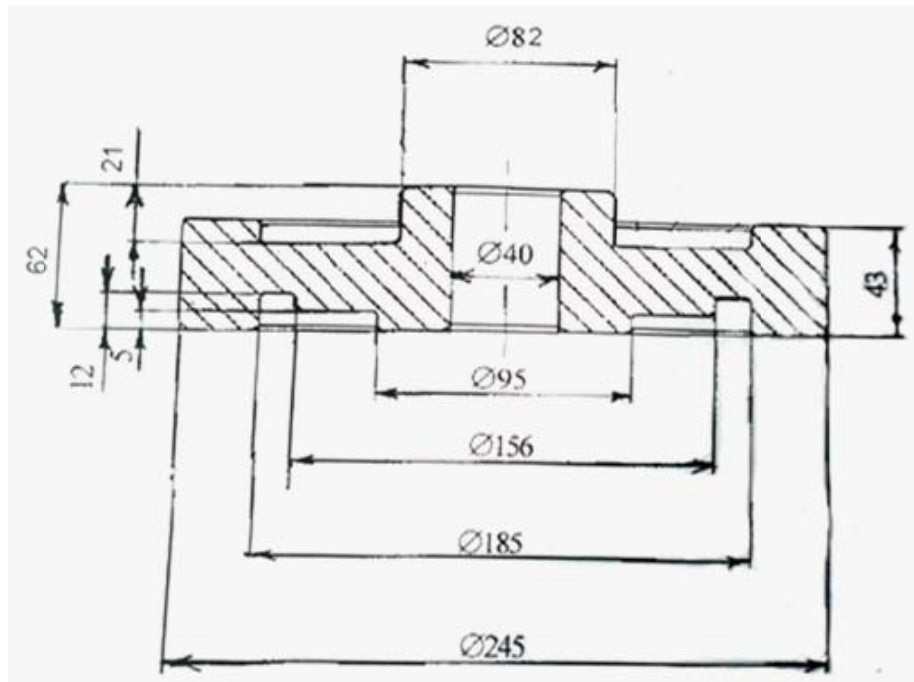


Рисунок 1.1 – Ескіз зубчатого колеса

Основні навантаження в зубчастих колесах зосереджені на їх зубцях. На них діє обертальний момент, який створює навантаження, що розподілені по їх контактних лініях. Найбільш частою причиною виходу з ладу зубчастих коліс є руйнування поверхні зубців внаслідок контактної втоми. Також в зубчастих колесах спостерігається торцевий знос, а довготривалі навантаження призводять до втомного руйнування зубців у небезпечному перерізі. Іноді їх руйнування відбувається і від одноразового навантаження (перевантаження). Серцевина шестерні піддається динамічним напруженням згину [3].

З огляду на умови роботи і можливі причини дострокового виходу виробу з ладу, можна сформулювати наступні вимоги до зубчастих коліс. Серцевина повинна мати високу міцність та в'язкість для сприйняття напружень згину. Зубці шестерні повинні мати високу твердість, зносостійкість та контактну витривалість для запобігання викришуванню та контактній втомі. Досягнути цих властивостей можна шляхом проведення хіміко-термічної обробки (ХТО).

Найпоширенішими видами ХТО є цементация та азотування.

1.2 Характеристика матеріалів для зубчастих коліс

В залежності від виду хіміко-термічної обробки, для виготовлення зубчастих коліс можуть використовуватись різні типи сталей. У випадку, коли для поліпшення властивостей поверхневого шару застосовується цементация – вироби виготовляють з низьковуглецевих цементовних сталей. При використанні азотування застосовуються поліпшувальні з підвищеним вмістом вуглецю.

Основними властивостями цементовних сталей для зубчастих коліс є:

а) достатньо висока прогартовуваність та загартовуваність, що забезпечує необхідну твердість поверхневого шару та серцевини зубців при гартуванні в маслі;

б) технологічність для насичення, яка визначається малою схильністю до надмірного пересичення поверхні вуглецем та внутрішнього окислення;

в) добра оброблюваність різанням, що є важливим в умовах масового виробництва;

г) технологічність для термічної обробки після насичення [4].

Сталі для цементации (табл. 1.1) містять 0,09...0,19% С. Низький вміст вуглецю в цих сталях зумовлений тим, що після термічної обробки виробів буде зберігатися необхідна міцність та в'язкість серцевини при невисокій твердості. Дифузійне насичення поверхні виробу вуглецем збільшує його вміст в поверхневому шарі до 0,8...1,1 %. Гартування та низькотемпературний відпуск забезпечують в поверхневому шарі структуру пересиченого твердого розчину мартенситу, що має твердість 59...64 HRC, аустеніту залишкового та карбідів. Мікроструктура серцевини буде складатися з маловуглецевого мартенситу або нижнього бейніту з твердістю 30...45 HRC, присутність фериту (особливо по межах зерен) різко знижує втомну міцність та ударну в'язкість. В'язкість та міцність, порівняно з поверхневим шаром, вища.

Перевагами такої обробки є можливість отримання дуже високих границь витривалості при згині (до 1000 МПа) та контактних навантаженнях (до 2300 МПа), а також високої зносостійкості.

Мікроструктура цементованої сталі на прикладі 12ХН4А-Ш після подвійного гартування та відпуску зображена на рис. 1.2.

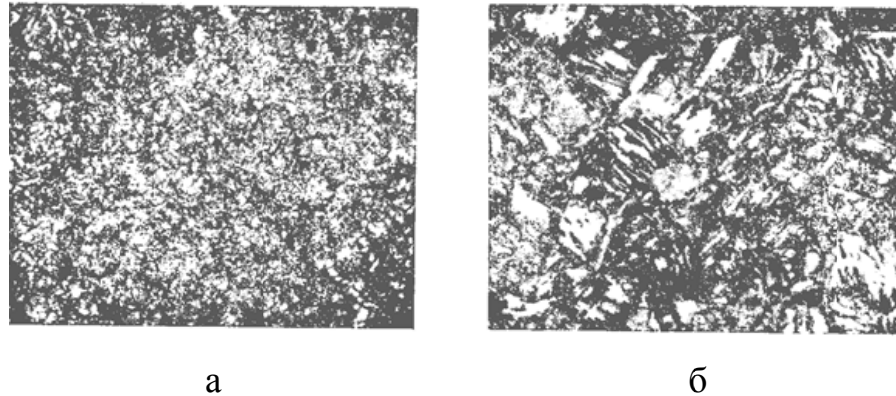


Рисунок 1.2 - Мікроструктура цементованої сталі 12ХН4А-Ш після подвійного гартування та відпускання [5]:

а – поверхневий шар, (×500); б - серцевина, (×500)

Таблиця 1.1 – Хімічний склад деяких цементовних, % (мас.) [6, 7]

Сталь	ГОСТ, ТУ	С	Cr	Ni	W	Mo	V	Nb	Si	Mn	S	P
12Х2Н4А-Ш	ГОСТ 4543-71	0,09 - 0,15	1,25-1,65	3,25-3,65	–	–	–	–	0,17-0,37	0,3 - 0,6	До 0,012	До 0,012
14ХГСН2МА-Ш (ДИЗА)	ТУ 14-11865-76	0,11-0,16	1,2-1,6	1,6-2	–	0,25-0,40	0,03 - 0,06	–	0,45 - 0,7	0,7 - 1,0	До 0,012	До 0,012
16ХЗНВФМБ-Ш (ВКС-5)	ГОСТ 14955-77	0,14 - 0,19	2,6 - 3,0	1,0 - 1,5	1,0 - 1,4	0,4 - 0,6	0,35 - 0,55	0,1-0,2	0,17-0,37	0,4 - 0,7	До 0,02	До 0,03

На властивості (табл. 1.2) сталей для цементації має значний вплив легування. Основними легувальними елементами в цементованих сталях є Cr та Ni, поряд з якими в невеликих кількостях додають V, Mo, W, Nb. Також можуть бути присутніми Mn та Si. Сильні карбідоутворювальні елементи V, Mo, W, Nb знижують схильність сталей до перегріву. Легувальні елементи,

розчиняючись в аустеніті при нагріванні (в основному Cr, Ni, Mn та Si), підвищують стійкість переохолодженого аустеніту, внаслідок чого знижують критичну швидкість гартування та збільшують прогартуваність сталі і дозволяють використовувати як охолоджувальні гартівні середовища масло або повітря, що зменшує термічні напруження та жолоблення деталей. Легувальні елементи, розчиняючись в аустеніті, знижують температури початку $M_{\text{п}}$ та кінця $M_{\text{к}}$ мартенситного перетворення, збільшують кількість залишкового аустеніту в шарі. Необхідно зазначити, що більшість легувальних елементів підвищує стійкість мартенситу проти відпускання, затримує коагуляцію карбідів, а отже і надає сталям теплостійкості [8].

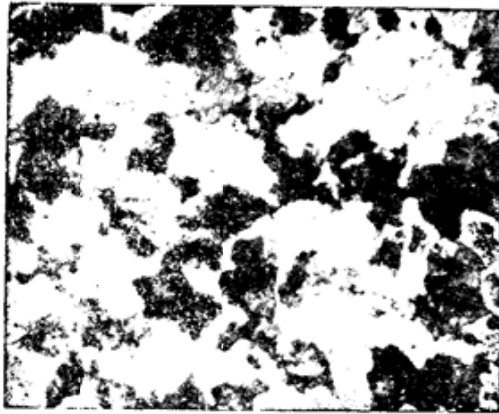
Таблиця 1.2 – Механічні властивості цементовних сталей після рекомендованого режиму термічної обробки [6,7]

Сталь	Рекомендований режим термообробки	Властивості після термообробки						
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCU ₂ , Дж/см ²	HRC (серц.)	HRC (пов.)
12X2H4A-III	Цементация 920-950°C, Відпал 630°C, Гартування 780 – 800°C, масло, Обробка холодом -70...-90°C, Низькотемпературний відпуск 180-200 °C	≥1200	≥950	≥10	≥50	≥80	32,0-42,5	59-62
14XГСН2МА-III (ДИЗА)	Цементация 920°C, Відпал 630°C, Гартування 840°C, масло, Обробка холодом -70...-90°C, Низькотемпературний відпуск 240°C	≥980	≥785	≥8	≥39	≥60	32,0-42,5	59-64
16X3HВФМБ-III (ВКС-5)	Цементация 940°C, Відпал 630°C, Гартування 920°C, масло, Обробка холодом -70...-90°C, Низькотемпературний відпуск 300 °C	≥1000	≥900	≥10	≥40	–	35,0-43,5	59-62

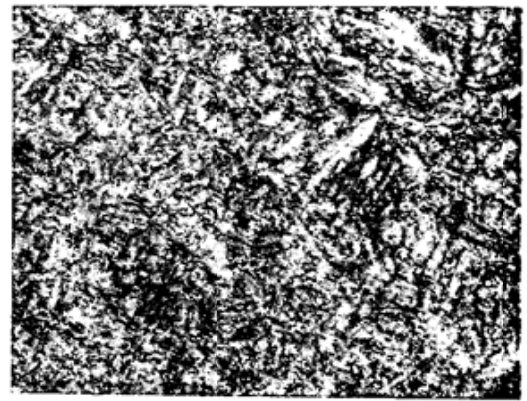
Поліпшувальні сталі для азотування (табл. 1.3) обов'язково є легованими та мають в своєму складі 0,3...0,45% С.

Твердість нітридів заліза відносно невисока: γ' -фази – HV 550 (HRC 50), ϵ -фази – HV 450 (HRC 44). Тому для азотування використовують спеціальні сталі (нітралої), що містять елементи, які мають більшу спорідненість до азоту, ніж залізо (Cr, Mo, W, Al, V, Ti). Азотовані шари можуть мати дуже високу твердість, яка сягає 1000...1200 HV, і суттєво перевищує твердість, яку можна отримати після цементації та гартування (750...950 HV). Однак азотування використовують рідше, ніж цементацію через велику тривалість процесу та меншої товщини зміцненого шару. Але перевагами азотування є більш високий опір зносу при найбільшій міцності в умовах знакозмінних навантажень, а також збереження твердості при нагріванні до 500...600⁰С [9].

Мікроструктура сталі 38ХМЮА зображена на рис. 1.3.



а



б

Рисунок 1.3 - Мікроструктура сталі 38ХМЮА [5]:

а - після відпалу при 860 °С, ($\times 500$); б - після гартування при 860 °С в маслі і відпуску при 520 °С, ($\times 500$)

Таблиця 1.3 – Хімічний склад деяких поліпшуваних сталей, % (мас.)

[6, 7]

Сталь	ГОСТ, ТУ	C	Cr	Ni	W	Mo	V	Al	Si	Mn	S	P
30X2H2BФМА-Ш	ТУ 14-1-2847-79	0,26-0,33	0,6-0,9	1,4-1,8	1,0-1,4	0,25-0,35	0,18-0,28	–	0,17-0,37	0,3-0,6	До 0,012	До 0,020
40XH2МА	ГОСТ 4543-71	0,37-0,44	0,6-0,9	1,25-1,65	–	0,15-0,25	–	–	0,17-0,37	0,5-0,8	До 0,025	До 0,025
38ХМЮА	ГОСТ 4543-71	0,35 – 0,42	1,35-1,65	До 0,30	–	0,15-0,25	–	0,7-1,1	0,20-0,45	0,3-0,6	До 0,025	До 0,025

Після азотування в поверхневому шарі спостерігаються дископодібні дисперсні термічностійкі нітриди легувальних елементів (Cr_2N , Mo_2N , W_2N , AlN , VN , TiN), карбонітриди та азотистий α -твердий розчин із зонами із підвищеними концентраціями азоту та легувальних елементів, які створюють пружні викривлення ґратки α -твердого розчину. Високодисперсні нітриди легувальних елементів та зони, збагачені N, Cr, Mo, W, Al, V, Ti, гальмують рух дислокацій та підвищують твердість азотованого шару легованих сталей. Як правило, при легуванні декількома елементами твердість азотованого шару більша, ніж при легуванні одним елементом [10].

Вказана вимога щодо вмісту вуглецю 0,3...0,45% в азотованих сталях пояснюється таким чином: в сталях з меншим вмістом вуглецю (<0,3%) можливо продавлювання азотованого шару при великих питомих навантаженнях; більший вміст вуглецю (>0,45%) не забезпечує в'язку серцевини. Для отримання в'язкої та достатньо міцної серцевини перед азотуванням вироби піддають термічному поліпшенню для отримання структури сорбіту відпускання. [11]

Найбільш висока поверхнева твердість при азотуванні досягається в хромомолібденових сталях, додатково легованих алюмінієм (табл. 1.4). Для деяких азотованих виробів висока поверхнева твердість є небажаною через окрихчування поверхневого шару, утруднення операції шліфування. Тому розповсюдженим є використання сталей з пониженим вмістом алюмінію або без алюмінію, що мають меншу поверхневу твердість, але більш плавне

зниження твердості за глибиною дифузійного шару. Таким чином, зниження поверхневої твердості азотованого шару з 900...1000 HV до 650...900 HV дозволяє водночас підвищити зносостійкість та опір крихкому руйнуванню.

Легувальні елементи, розчиняючись при гартуванні в аустеніті, збільшують прогартовуваність сталі, а отже, і зменшують критичну швидкість гартування. Присутні в сталях молібден та вольфрам усувають схильність сталей до відпускнуї крихкості другого роду. Ці ж елементи, а також ванадій, утворюють дисперсні термічно стійкі карбіди, що сприяють подрібненню зерна. Такі елементи, як хром, алюміній, нікель переважно розчиняються в твердому розчині, тим самим збільшують міцність та твердість сталі. Більшість легувальних елементів збільшують стійкість сталей до відпускання. [10]

Таблиця 1.4 – Механічні властивості деяких поліпшувальних сталей після рекомендованого режиму термічної обробки [6,7]

Сталь	Рекомендований режим термообробки	Властивості після термообробки					
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCU, Дж/см ²	HB (серц.)	HV (пов.)
30X2H2BFMA-Ш	Гартування 900 ⁰ С, масло, Відпуск високий 660 ⁰ С, повітря, Азотування 540 ⁰ С, з піччю до 200 ⁰ С, далі - повітря	≥ 950	≥ 1100	≥ 10	≥ 70	330 - 355	700 - 750
40XH2MA	Гартування 850 ⁰ С, масло, Відпуск високий 580 ⁰ С, повітря, Азотування 540 ⁰ С, з піччю до 200 ⁰ С, далі - повітря	≥ 950	≥ 1050	≥ 15	≥ 75	275 - 300	600 - 700
38XMЮА	Гартування 940 ⁰ С, масло, Відпуск високий 660 ⁰ С, повітря, Азотування 540 ⁰ С, з піччю до 200 ⁰ С, далі - повітря	≥ 830	≥ 950	≥ 10	≥ 85	285 - 300	850 - 1000

Порівнюючи цементацію і азотування можна відмітити наступне:

- тривалість цементації менша ніж тривалість азотування;
- зміцнений шар отримується більш глибокий і витримує більший питомий тиск при експлуатації;
- твердість цементованого шару в 1,5 – 2 рази менша азотованого;
- твердість при нагріванні цементованого шару зберігається до 180 – 250°C , а азотованого – 400 – 600°C.

1.3 Особливості цементації

Під цементацією прийнято розуміти процес високотемпературного насичення поверхневого шару сталі вуглецем. Так як вуглець в α -фазі практично не розчиняється, то процес цементації здійснюється в інтервалі температур 930-950 °C – тобто вище $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення. Структура поверхневого шару виробу, який піддають цементації являє собою структуру заевтектоїдної сталі (перліт і цементит вторинний), тому для приданні сталі кінцевих (експлуатаційних) властивостей після процесу цементації необхідно виконати режим термічної обробки, що складається з гартування і низькому відпусканні; температурно-часові параметри режиму термічної обробки призначаються в залежності від хімічного складу сталі, відповідальності, призначення і геометричних розмірів виробу, який піддають цементації. Зазвичай застосовується гартування з температури цементації безпосередньо після завершення процесу хіміко-термічної обробки або після підстиження до 800-850 °C і повторного нагріву вище точки A_{c3} центральної (нецементованої) частини виробу. Після гартування слід відпускати виріб при температурах 160-180 °C [12].

Якщо цементацию сталі проводити кваліфіковано, можна не тільки змінити хімічний склад металевого виробу, але також змінити його мікроструктуру і навіть фазовий склад. В результаті вдається значно зміцнити поверхневий шар деталі, надати йому характеристики, подібні з властивостями загартованої сталі.

Зазвичай деталі поміщають в середовище, багате елементом, який дифундує в метал. При цьому відбуваються такі процеси: дисоціація (розподіл) молекул на атоми, адсорбція (осадження) їх на поверхні і дифузія (проникнення) вглиб матеріалу [13].

Дисоціація - хімічна реакція оборотного розпаду молекул і утворення атомів дифундуючого елемента. Термічна дисоціація відбувається при підвищенні температури, електролітична - при розчиненні електролітів (розщеплення молекул електроліту на іони), фотохімічна - при дії світла. Кількісною характеристикою служить ступінь дисоціації - відношення числа молекул, що розпалися до загального числа [14].

Адсорбція. Фізична адсорбція виникає за рахунок ван-дер-ваальсових взаємодій. Характеризується оборотністю і зменшенням адсорбції при підвищенні температури. Хімічна адсорбція (хемосорбція) здійснюється шляхом хімічної взаємодії. Вона зазвичай незворотна. На відміну від фізичної, є локалізованою, молекули не можуть переміщатися по поверхні. Підвищення температури сприяє прискоренню її протікання.

Наприклад, кисень на металах при низьких температурах адсорбується за законами фізичної адсорбції. При підвищенні температури починає протікати хімічна адсорбція. З деякою температури збільшення хімічної адсорбції починає перекривати падіння фізичної адсорбції, тому температурна залежність адсорбції має виражений мінімум (рис. 1.4) [15].

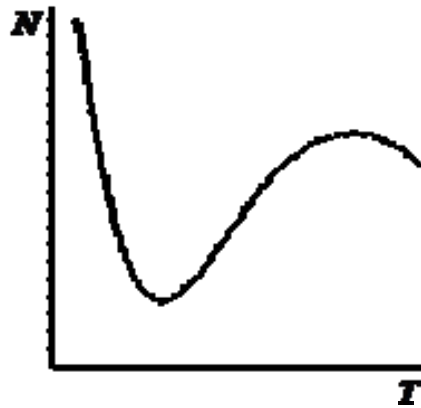


Рисунок 1.4 – Залежність кількості адсорбованих атомів

Дифузія - проникнення атомів вглиб матеріалу. На поверхні концентрація дифундуючого елемента найбільша, в міру віддалення від поверхні концентрація падає. Глибина проникнення атомів - товщина насиченого шару. Кількісно процес дифузії характеризується коефіцієнтом дифузії D (кількістю атомів, продифундованих через площу в 1 см^2 протягом 1 с при перепаді концентрацій по обидві сторони площі, що дорівнює одиниці), що мають розмірність - $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Залежність D від температури має вигляд:

$$D = A \times \exp(-E_a / k T), \quad (1.1)$$

де A - коефіцієнт, що залежить від типу кристалічної решітки;

E_a - енергія активації дифузії (eV);

T - абсолютна температура (K);

k - постійна Больцмана ($0,8617 \cdot 10^{-4} \text{ eV / K}$).

З рівняння випливає, що коефіцієнт дифузії дуже сильно залежить від енергії активації: чим більше E_a , тим менше D .

Тривалість процесу хіміко-термічної обробки визначається необхідною товщиною дифузійного шару (рис. 1.5). При постійних параметрах процесу (температура і ін.) збільшення товщини шару в часі підпорядковується параболічного закону (рис. 1.6): $y \sim (t)^{1/2}$. Де y - товщина

шару, t - тривалість процесу. Чим більше товщина вже наявного шару, тим менше він збільшується за той же час. У приповерхневих шарах концентрація дифундуючого елемента буде зростати повільніше, ніж на глибині. Уже внедрившиися атоми будуть служити гальмом подальшій дифузії наступних атомів.

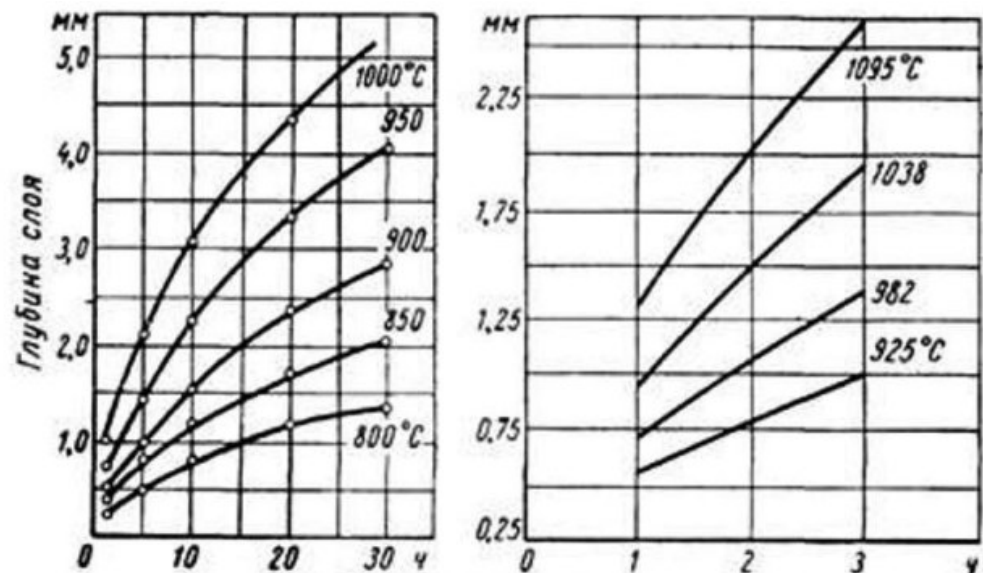


Рисунок 1.5 - Залежність товщини цементованого шару від часу і температури обробки[16]

Особливості дифузії в металах пояснюються кристалічною будовою. Якщо розчинність дифундуючої речовини в металі мала, то дифузія спостерігається переважно по межах зерен. У разі значної розчинності дифундуючого елемента в основному металі роль прикордонних шарів підвищеної розчинності зменшується. У момент фазових перетворень дифузія протікає набагато швидше.

Цементований шар має змінну концентрацію вуглецю по глибині, яка зменшується від поверхні до серцевини деталі. На поверхні деталі концентрація вуглецю після цементації досягає 0,8...1,0 %. Тому в структурі цементованого шару після повільного охолодження можна виділити три зони (рис.1.6): заевтектоїдну, що складається з перліту і цементиту; евтектоїдну, що складається тільки з пластинчастого перліту; і доевтектоїдну, що

складається з перліту і фериту з поступовим зменшенням кількості перліту і збільшенням кількості фериту.

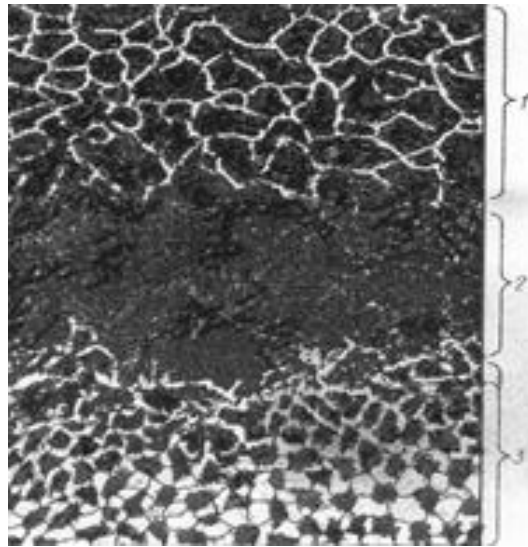


Рисунок 1.6 - Мікроструктура дифузійного шару після цементації низьковуглецевої сталі [17]:

1 – заевтектоїдна зона; 2 – евтектоїдна зона; 3 – доевтектоїдна зона

Дана технологічна операція є досить тривалою за часом, так як процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем проходить дуже повільно (0,1 мм за 60 хвилин). З огляду на той факт, що зміцнений поверхневий шар для більшості виробів повинен становити не менше 0,8 мм, можна розрахувати, що на виконання цементації металу необхідно буде затратити не менше 8 годин. При цьому зі збільшенням температури процесу збільшується і товщина шару виробу. Для забезпечення максимального опору контактній втомі кількість вуглецю на поверхні може бути підвищена до 1,1...1,2%. Але вища його концентрація викликає погіршення механічних властивостей цементованого виробу. Основними типами середовищ для виконання цементації металу (або, як їх правильно називають, карбюризаторами) є [18]:

- газоподібні середовища;
- розчини електролітів;

- пастоподібні середовища;
- киплячий шар;
- тверді середовища.

Найбільш поширеними є газоподібні і тверді карбюрізатори.

Деталі, що підлягають цементації зазвичай подають в термічний цех після попередньої механічної обробки з припуском на грубе і остаточне шліфування до 0,25 мм, або з припуском тільки на залишкове шліфування 0,05 - 0,15 мм. У разі, якщо цементації піддаються довгомірні або тонкостінні вироби, викривлення яких в процесі цементації може бути значним, припуск на механічне доведення може бути збільшений до 0,75 - 1,5 мм з відповідним збільшенням глибини цементованого шару.

Бажано, щоб деталі, які надходять на цементацію не містили на поверхні забруднень (щільна окалина, лакофарбові покриття і т.п.). При цьому присутність на поверхні невеликої кількості масла, тонкого шару або окремих ділянок іржі як правило, не погіршують якість цементації (домішка масла при нагріванні піддається піролізу і виділяючи вільний вуглець може навіть активізувати процес цементації, в той час як оксиди заліза у вигляді слідів корозії швидко відновлюються до губчастого металевого заліза на початковому етапі цементації і не перешкоджають проникненню вуглецю в сталь) [19].

Якщо деталі, які надходять на цементацію мають поверхні, що не підлягають цементації, їх захищають спеціальними покриттями, стійкими в умовах відновлювальних атмосфер, що містять вуглець при температурах 820 - 950 °C (у разі традиційних режимів цементації) і 975 - 1050 °C (у разі високотемпературної цементації). В якості таких покриттів можуть використовуватися:

- Обмазки на основі кварцового піску, окалини і вогнетривкої глини, замішаних на воді або рідкому склі;
- Обмазки на основі хлористої міді і свинцевого сурику, замішані на спиртовому розчині каніфолі;

- Гальванічне малопористе міднення.

Другим, досить технологічним способом, який дозволяє залишити поверхні, що не підлягають цементації в початковому стані, є використання припусків, які перевищують глибину цементованого шару і знімаються після цементації перед гартуванням [20].

1.3.1 Проведення цементації сталі в твердому середовищі

Як твердий карбюризатор застосовують суміш деревного (березового) вугілля (75 %) з вуглекислими солями BaCO_3 , CaCO_3 (25 %).

Вироби, що цементуються, разом із карбюризатором поміщають у металеві ящики (засипають карбюризатором так, щоб деталі не доторкалися між собою, дна і стінок ящика), закривають кришками, ретельно обмазують глиною і в такому вигляді витримують у печі за температури 910...930 °C протягом 5...25 год. При цьому відбуваються такі реакції:



Атомарний вуглець ($\text{C}_{\text{ат}}$), що виділяється, проникає в поверхневі шари сталевих виробів за зазначений час на глибину 0,5...2,5 мм.

Вміст вуглецю в цементованому шарі зменшується в напрямку від поверхні до серцевини виробу. Зміна вмісту вуглецю залежно від глибини приводить до одержання трьох зон: заевтектоїдної (перліт + цементит), евтектоїдної (перліт) і доевтектоїдної (ферит + перліт). Наочне зображення зміни структури після цементації можна спостерігати на рис. 1.7.

Цементацию в твердому карбюризаторі застосовують в умовах ремонтного виробництва.

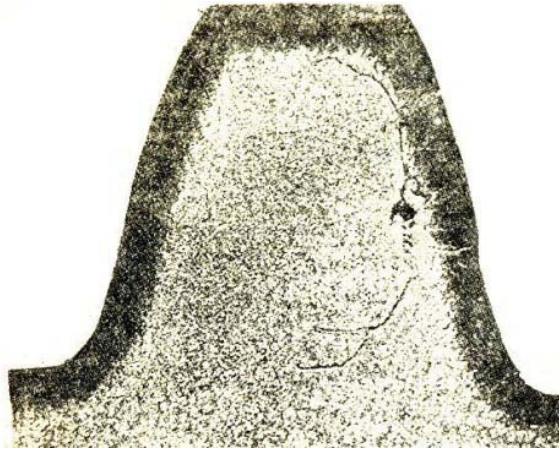


Рисунок 1.7 - Наочне зображення зміни структури після цементації
[21]

1.3.2 Проведення цементації сталі в газоподібному середовищі

Перші успішні досліди по газовій цементації були здійснені ще в 1837 р П.П. Аносовим. Однак широке застосування газової цементації у виробництві почалося лише через 100 років, з появою печей безперервної дії. При цьому першим карбюризатором, застосованим для газової цементації, було середовище отримана при піролізі гасу.

В даний час для газової цементації застосовуються печі безперервної дії з довгими горизонтальними муфелями з окалиностійкого сплаву, шахтні муфельні і безмуфельні печі, а також печі з обертовими ретортами.

Деталі завантажують для цементації на піддонах, в дротяних кошиках, або в спеціальному оснащенні, на якому вони розташовуються з технологічними прорізами 5 - 20 мм між поверхнями, які цементують (для вільної циркуляції газу для цементації). При цьому дрібні деталі можна навантажувати навалом в неглибокі піддони або кошики, які потім збирають в етажерки для збільшення продуктивності процесу [21].

Для газової цементації застосовують найрізноманітніші вуглецьміскісні гази - карбюризатори:

- природний газ (92 - 97% CH_4)
- природний газ розведений для міських потреб (65 - 90% CH_4)
- світильний газ (20 - 35% CH_4 , 5 - 25% CO)
- нафтовий газ (50 - 60% CH_4)
- коксовий газ (20 - 25% CH_4 , 4 - 10% CO)
- зріджені гази (пропан, бутан і пропан-бутанова суміш)

Також поширене використання продуктів газифікації або піролізу гасу, синтину, бензолу, піробензолу, веретенного і трансформаторного масел і т.д. Складні вуглеводні в процесі газифікації і крекінгу при цементації розпадаються в основному до метану. При отриманні еногазу утворюється також CO .

У порівнянні з цементацією сталі з використанням твердого карбюризатора, дана технологія має ряд вагомих переваг:

- забезпечення кращих умов для обслуговуючого персоналу;
- висока швидкість досягнення необхідного ефекту за рахунок того, що деталі в газовому середовищі можуть витримуватися меншу кількість часу (до того ж не потрібен час для приготування твердого карбюризатора).

При застосуванні багатьох карбюризаторів паралельно з процесом цементації відбувається інтенсивне утворення сажі і коксу. Оскільки цей супутній процес небажаний, в карбюризатори вводять додатково 3 - 5% аміаку.

При застосуванні газової цементації був розроблений і набув популярності ступінчастий режим, при якому вуглецевий потенціал атмосфери спочатку підтримується високим (що забезпечує отримання в поверхневому шарі концентрації вуглецю 1,3 - 1,5%), а потім знижується, для того щоб залишкова концентрація вуглецю в поверхневому шарі становила 0,8 - 0,85%. Такий ступінчастий режим газової цементації сталі дозволяє скоротити тривалість процесу, зберігаючи високу якість [22].

В цілому, в залежності від величини садки, щільності укладки, перетину (товщини) деталей, і складу карбюризатора тривалість процесу може змінюватися в широких межах.

Основні дефекти, які виникають при цементації

при цементації найчастіше зустрічаються наступні дефекти:

- глибина цементованого шару не відповідає заданим технічним умовам;
- занадто високе або, навпаки, недостатній вміст вуглецю в поверхневому шарі;
- різкий перехід від цементованого шару до серцевини (за вмістом вуглецю);
- наявність окремих м'яких місць (плям) на поверхні;
- відшарування цементованого шару.

Причиною виникнення зазначених дефектів є найчастіше невиконання технології процесу. Надмірна або недостатня глибина цементованого шару отримується головним чином внаслідок неправильно встановленого часу витримки. Якщо витримка занадто велика, то глибина шару буде більше заданої, і навпаки. Необхідно мати на увазі, що якщо глибина цементованого шару більша за необхідну, то такий брак невиправний.

Занадто високий вміст вуглецю в цементованому шарі отримується головним чином внаслідок застосування дуже сильного карбюризатора, що містить велику кількість вуглекислих солей, і при надто високій температурі цементації.

Понижений вміст вуглецю в цементованому шарі спостерігається в тих випадках, коли карбюризатор містить недостатню кількість вуглекислих солей і тому насичення поверхні продукту вуглецем протікає в'яло. Різкий перехід від цементованої поверхні до серцевини виникає частіше через занадто високу температуру цементації, особливо на початку процесу. При цьому поглинання вуглецю поверхнею протікає швидше, ніж дифузія його в глибину. В результаті виникає різка межа між цементованим шаром та

серцевиною виробів. Цей дефект веде за собою, при подальшому гартуванні, відділення цементованого шару.

М'які плями частіше всього є результатом неякісної підготовки виробів до цементації: вироби були погано очищені і на них залишилися окалини, бруд, масляні плями, або був погано вмонтований карбюризатор і окремі ділянки виробу в процесі цементації не насичувалися вуглецем. Очевидно, що при проведенні цементації та подальшої термічної обробки виробів необхідно дуже уважно дотримуватися технологічного режиму [23].

1.4 Мета та постановка завдання роботи

Розглянуто умови експлуатації, основні характеристики, та види термообробки зубчастих коліс. Найпоширенішими методами підвищення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс є цементація та азотування. Перевагами цементації є набагато менша тривалість процесу, та підвищена міцність дифузійного шару порівняно з азотуванням, що робить цей вид ХТО більш прийнятним в умовах масового виробництва.

Часто деталі, що піддають цементації мають поверхні, в яких отримання дифузійного шару небажано. Серед способів захисту таких поверхонь від науглецювання можна виділити використання припусків, нанесення гальванічного мідного покриття, а також використання різних видів захисних паст.

Метою роботи є порівняльний аналіз існуючих методів захисту від цементації та розробка нового комплексного методу захисту при використанні високоактивного карбюризатора.

Згідно цьому задачами роботи є:

- дослідити сутність процесів, що відбуваються при хіміко-термічній обробці деталей;

- проаналізувати особливості основних методів захисту проти цементациї;
- визначити властивості та дослідити мікроструктуру поверхневих шарів деталей після використання різних типів захисту;
- провести порівняльний аналіз та розробити комплексний метод захисту поверхонь цементованих виробів від науглецювання;
- встановити доцільність використання розробленого методу, визначити економічний ефект від його використання.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали та технологія їх отримання

Для виготовлення зубчастих коліс обрано цементовну високоякісну сталь 12X2H4A ГОСТ 4543 – 71. Хімічний склад сталі (масова частка елементів, %): С – 0,09...0,15; Si – 0,17...0,37; Mn – 0,3...0,6; Ni – 3,25...3,65; S – до 0,025; P – до 0,025.

2.2 Мікроскопічні дослідження

Металографічні дослідження проводили при використанні оптичного мікроскопа KERN OKO-1. EDS-аналіз за допомогою енерго-дисперсійного рентгенівського спектрометра EDS фірми ThermoNoran, використовували для визначення хімічного складу поверхні дифузійних шарів, отриманих на зразках за допомогою характеристичного рентгенівського випромінювання атомів. Мікроструктури записували в цифровому вигляді з використанням фотокамери AxioCam MRc5. Дослідження проводили на зразках у формі куба зі стороною 15 - 20 мм.

Аналіз мікроструктури і вимірювання товщини отриманих дифузійних шарів виконували на металографічному мікроскопі на поперечних шліфах. Вирізані зразки заливали акрилової смолою (DuracrylPlus), а потім шліфували на шліфувальному папері зі зменшенням розміру зерна. Шліфовані поверхні полірували з використанням алмазної пасти. Приготовлені шліфи піддавали хімічному травленню трипроцентним розчином HNO_3 у $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

2.3 Технологія гальванічного міднення

Технологічний процес міднення складався з наступних операцій: кріплення деталі на підвісне пристосування, знежирення, промивання у воді, декапірування, промивання у воді, міднення, промивання у воді і зняття деталі з підвісного пристосування.

Для міднення застосовувався пірофосфорний електроліт, так як в цьому випадку не потрібно попереднього нікелювання. Перед мідненням в пірофосфорному електроліті деталь протягом 5 - 7 хв. піддавалась анодній обробці в розчині, що містила 200 г фосфорної кислоти (пит. вага 1,7), 50 г сірчаної кислоти (пит. вага 1,84), 10 г хромового ангідриду на 1 л води.

Режим обробки був наступний: щільність струму 8 - 10 а/дм³. температура електроліту 18 - 20 °С. При цій обробці застосовувалися катоди з свинцевих пластин.

Пірофосфорний електроліт мав наступний склад: 35 г сірчаноокислої міді $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 140 г пірофосфорного натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; 95 г фосфорнокислого натрію $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ на 1 л води.

Електроліт нагрівали до температури 25 - 35 °С, щільність струму дорівнювала 0,5 - 0,75 а/дм². Аноди виготовляли з пластин червоної міді М1. Вихід металу по струму складав 90 - 95%.

2.4 Дослідження характеристик антицементацийних паст

Досліди проводились на циліндричних зразках зі сталі 12Х2Н4А висотою 50 мм і діаметром 30 мм.

Перед нанесенням пасти поверхня зразків знежирювалась в розчині лугу та промивалась у гарячій воді. Пасти наносились у два шари зануренням. Після нанесення першого шару зразки піддавали сушці при

цеховій температурі впродовж 1 години. Після нанесення другого шару зразки також підсушували протягом 1 години. Після нанесення паст та сушки зразки піддавались газовій цементації при температурі 930 °C протягом 10 годин. Після цементації зразки промивались в гарячій воді та протравлювались в 5% розчині азотної кислоти для виявлення точкової цементації, обумовленої несучільністю ізолюючого шару. На зразках, покритих пастою на основі борної кислоти, визначали площу поверхні сповзання, кількість та площу точкових дефектів цементованої поверхні.

Для дослідження процесів, що проходили при випробуваннях пасти на основі борної кислоти та побудови дериватограм був використаний термогравиметричний аналізатор (дериватограф) TGA/DSC1. Діапазон робочих температур від кімнатної до 1600 °C; швидкості нагріву від 0,01 до 250 °C/хв; відносна похибка вимірювання ентальпії – не більше $\pm 3\%$; використання реакційного газу – до 200 мл/хв.

3 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ЗАХИСТУ ВІД ЦЕМЕНТАЦІЇ

3.1 Аналіз основних методів захисту від цементациї, що застосовуються на виробництві

Для захисту поверхонь деталей, вироби, що не піддаються цементациї, виділяють 4 способи:

- захист за допомогою припусків на подальшу механічну обробку;
- зниження твердості науглецеваних місць за допомогою відпалу
- використання гальванічних покриттів
- використання захисних антицементацийних обмазок

3.1.1 Захист за допомогою припусків на подальшу механічну обробку

При використанні цього способу мається на увазі наявність припусків в місцях, де цементация не потрібна. Їх розмір повинен бути більше або дорівнювати глибині шару цементациї.

В цьому випадку маршрут обробки матиме такий вигляд: токарна обробка основних розмірів деталі із залишенням припусків в місцях, де цементация не потрібна і припусків на короблення деталі при гартуванні, цементация без гартування, зняття припуску на ділянках, де цементация не потрібна, але із залишенням припусків на гартівне короблення, гартування деталі, доведення геометричних розмірів деталі токарною обробкою або шліфуванням.

Як видно, цей процес має високу трудомісткість і пов'язаний із зайвими переміщеннями деталей, що збільшує час циклу і вартість виготовлення деталі.

3.1.2 Відпал цементованих поверхонь за допомогою індукційного нагріву

Після цементації і гартування деталі, поверхні, на яких цементация не допускається, нагрівають за допомогою індукційного обладнання. Цим досягається зниження твердості сталі. При відпалі, як би імітується процес нормалізації сталі з високим вмістом вуглецю. При такому способі зниження твердості, дуже важливо контролювати швидкість охолодження після індукційного нагрівання деталі, тому що високий вміст вуглецю в сталі, отриманий при цементації, може сприяти отриманню мартенситної структури при охолодженні на повітрі. Уникнути випадкового гартування сталі при охолодженні можна застосуванням відпалу без перекристалізації сталі (температура відпалу нижче A_{c1}).

Такий спосіб зниження твердості є більш гнучким, але вимагає капітальних вкладень на додаткове обладнання, що відіб'ється на збільшенні собівартості виготовлення деталей.

3.1.3 Захист з використанням захисних покриттів

Головною вимогою до захисних покриттів є бездоганна якість шару, що визначається безпористою і абсолютною міцністю зчеплення покриття зі сталлю. Ці вимоги якості визначаються тим, що процес цементації проводиться при температурі близько 900 °C в газовому середовищі, де поступово і безупинно виділяється активний вуглець. У цих умовах

недоброякісне покриття безперешкодно пропускає реагент для цементациї внаслідок пористості або відшаровування, і готові деталі з легованих конструкційних марок сталі переходять в брак, відбувається так званий «пробій».

Слід зазначити, що брак при пробії цементациї може мати місце і при високій якості захисного шару за рахунок присутності агресивних домішок в карбюризаторі. Для твердих карбюризаторів такою домішкою є сірка в кількостях, що перевищують 0,12 %, а для рідких карбюризаторів при газовій цементациї агресивними домішками є: сірка, вміст якої також не повинно перевищувати 0,12 %, кисень повітря, що проникає в печі при відсутності надлишкового тиску, і водень, як неминуча складова частина газів, що відходять після розщеплення карбюризатора.

Найбільш повно зазначеним вимогам відповідає мідне покриття, що отримується при мідненні в ціанистих електролітах наступного складу: Ціанистий натрій 12 - 20 г/л; ціаніста мідь 40 - 60 г/л. Технологічні параметри процесу: температура електроліту 50 - 60 °С; час міднення 2,5 - 3,0 год; товщина покриття 30 - 60 мкм.

Недоліком мідного покриття є нерівномірна товщина його на складних поверхнях, висока енергоємність і складність технологічного процесу нанесення безпористого покриття, високі витрати на екологічний захист, пов'язані з нейтралізацією відходів на всіх стадіях технологічного процесу.

3.1.4 Застосування захисних обмазок

Більш простим і доступним способом захисту від цементациї є покриття поверхні спеціальними обмазками. В даний час використовують

різні обмазки, що відрізняються складом, захисними властивостями і технологічністю.

Найпоширенішим видом захисних обмазок є пасти на основі рідкого скла з додаванням оксидів алюмінію (Al_2O_3) і кремнію (SiO_2). Маршаліт являє собою кварцову пудру ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$) і до складу пасти вводиться як тугоплавкий наповнювач для надання покриттю високих ізоляційних властивостей, тому він є одним з основних складових таких паст (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад паст на основі рідкого скла та оксидів алюмінію (Al_2O_3) і кремнію (SiO_2), мас %

Каолін	Тальк	Маршаліт	Бура	Оксид алюмінію	Рідке скло
5,5 – 8,5	9,5 – 12,5	2,8 – 3,6	0,5 – 1,0	0,3 – 0,7	73,7 - 81,4

Каолін - хімічно стійке, вогнетривке з'єднання, що сприяє створенню безпористої захисної плівки на поверхні деталей, що збільшує теплостійкість пасти, однак при високих температурах підвищує схильність до утворення мікротріщин.

Окис алюмінію - одне з найбільш стійких вогнетривких з'єднань. Висока хімічна стійкість окису алюмінію дозволяє використовувати його в покриттях для створення термодифузійного бар'єру.

Рідке скло виконує функцію сполучного компонента.

Ці пасти є найпростішими і дешевими і не забезпечують надійного захисту поверхонь деталей від науглецювання, особливо при високоактивних газових карбюризаторах. Крім того, їх залишки важко видаляються після цементації.

Для підвищення ізолюючих і технологічних властивостей в зазначений склад замість каоліну, тальку і бури додають бентоніт, окис

хрому і полівініловий спирт, також піднімають концентрацію окису алюмінію і маршаліта (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Хімічний склад паст на основі рідкого скла із додаванням бентоніту, окису хрому та полівінілового спирту, мас %

Маршаліт	Оксид алюмінію	Бентоніт	Оксид хрому	Полівініловий спирт	Рідке скло
7,0 - 7,5	13,0 – 14,5	8,5 – 9,0	3,5 – 4,0	6,0 – 7,0	58,0 – 62,0

Бентоніт - природний матеріал, відноситься до білих колоїдних глин, основою яких є мінерал монтморилоніт $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \times nH_2O$. Монтморилонітові глини відрізняються від каолінових більшою пластичністю. Бентоніт вводять як високопластичний тугоплавкий наповнювач, що підвищує суспендуючу здатність пасти.

Окис хрому CrO_3 - тугоплавка хімічна сполука, значно покращує змочуваність і покривну здатність. Паста, що містить окис хрому, має гарну рідкотекучість і протягом тривалого часу зберігає свої технологічні властивості.

Полівінілхлорид (ПВХ) вводиться в пасту з метою поліпшення реологічних властивостей, що пояснюється наявністю полівінілових зв'язків. Крім того, він сприяє наданню покриттю механічної міцності, підвищуючи зчеплення пасти з поверхнею деталі.

Також в складі антицементацийних паст на основі рідкого скла часто використовують азбестовий порошок. Його масова частка у складі пасти може досягати 35 %.

Азбестовий порошок вогнестійкий, хороший ізолятор, має високу тепло- та електроізоляцію. Поліпшує зчеплення захисної пасти з поверхнею.

Недоліком такої пасти є те, що вона швидко покривається кіркою на відкритому повітрі внаслідок з'єднання окису магнію, що входить до складу азбесту, з вуглекислим газом повітря. Вона також недостатньо пластична після висихання. В результаті утворюються пори і мікротріщини, що призводять до пробоїв.

Для підвищення надійності захисту і газонепроникності пасти додатково вводять бентоніт, силікат натрію і абразивний пил (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Хімічний склад паст з підвищеною надійністю захисту і газонепроникністю, мас %

Азбест	Бентоніт	Силікат натрію	Абразивний пил	Рідке скло
9,0 – 13,5	18,5 – 22,0	0,5 – 4,5	0,4 – 4,5	55,5 - 71,6

Абразивний пил з частинками металу (40 - 98 %) надає міцність і високу теплопровідність.

Силікат натрію забезпечує утворення щільного захисного шару, підвищує коефіцієнт лінійного розширення покриття після охолодження.

Із захисних паст, що не містять рідке скло в якості розчинника, можна виділити пасту на основі борної кислоти, полімерного зв'язуючого (полістирол) і суміші хлорпохідних вуглеводнів (наприклад, трихлоретилен) (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Хімічний склад деяких паст на основі борної кислоти, мас %

Варіант	Борна кислота	Полістирол	Трихлоретилен	Перхлоретилен	Чотирихлористий	Пентахлореилен
---------	---------------	------------	---------------	---------------	-----------------	----------------

					вуглець	
1	10	5	80,5	4,5	-	-
2	10	5	83	-	-	2
3	10	5	79	-	6	-

Суміші хлорпохідних вуглеводнів мають велику розчинюючу силу і дозволяють досягнути рівномірного висихання покриття без розтріскування, що дозволяє відмовитися від застосування пластифікаторів.

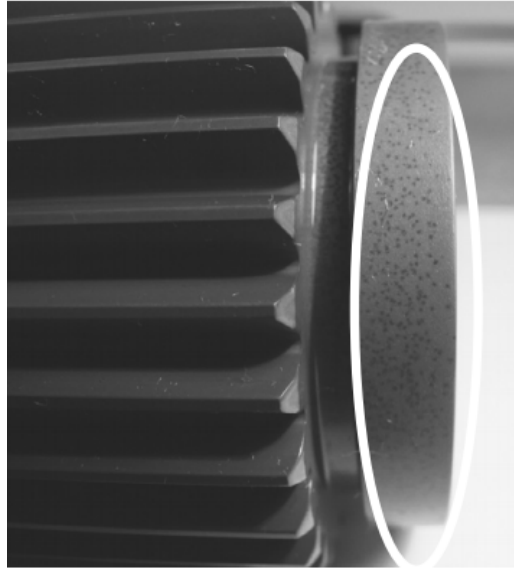
Полістирол є більш доступною речовиною, ніж рідке скло.

Пасти на основі сполук бору і полімерів володіють як високими захисними властивостями, так і технологічністю. До їх складу входить менша кількість компонентів, в порівнянні з обмазками на основі рідкого скла, внаслідок чого зменшується час приготування пасти. Також вона відрізняється підвищеними термінами зберігання, меншим часом сушіння покриття і легко видаляється у водних миючих середовищах.

3.2 Ефективність використання гальванічного міднення в умовах цементації у високоактивному газовому карбюризаторі

Мідні покриття зарекомендували себе на виробництві як надійний спосіб захисту поверхонь від науглецювання при цементації. Проте, дослідження впливу високоактивного газового карбюризатора стан мідного покриття показав їх низьку ефективність.

Після цементації в таких умовах мідні покриття мали велику кількість пор. Як результат, всі дослідні поверхні деталей мали сліди науглецювання (рис. 3.1)



а



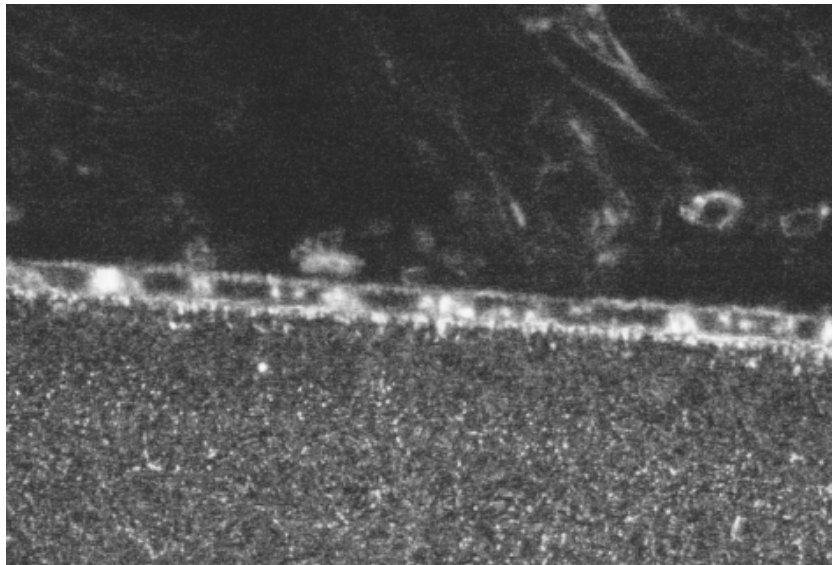
б

Рисунок 3.1 – Поверхні деталей з мідним покриття після цементації у високоактивному газовому карбюризаторі

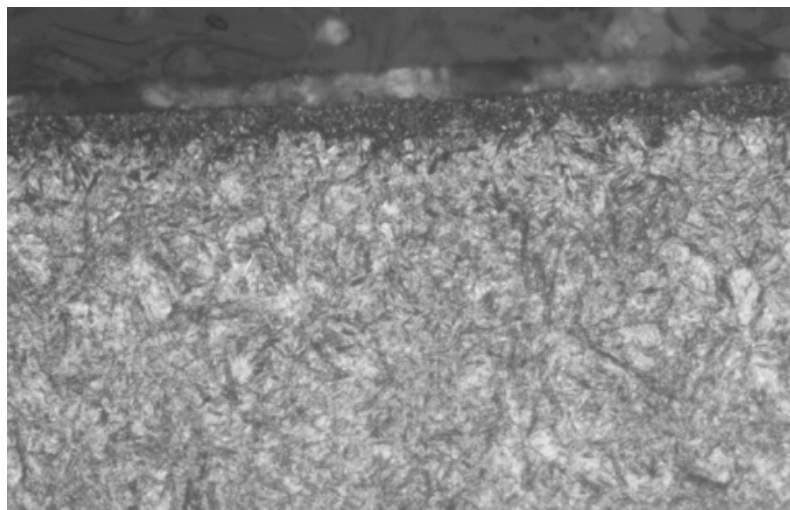
а) науглецьовані плями; б) пори

Аналіз мікроструктури показав наявність науглецьованого шару в місцях пор після цементації (рис. 3.2, а). Після подальшого гартування та

відпуску структура серцевини стає мартенситною, а науглецьований шар стає більш помітним (рис. 3.2, б).



а



б

Рисунок 3.2 – Мікроструктура науглецьованого шару в місці пробою:

а) після цементації; б) після цементації, гартування та відпуску

Отже, при використанні високоактивного газового карбюризатора одного лише мідного покриття недостатньо для того, щоб захистити поверхню деталі від науглецювання.

Зважаючи на це, в умовах масового виробництва і великої номенклатури відповідальних деталей, для захисту поверхонь деталей від небажаного науглецювання доцільним буде використання комплексного методу захисту, що включає нанесення гальванічного мідного покриття та захисних антицементацийних паст.

3.3 Вибір антицементацийної паст

Для порівняння обрано 4 види паст на основі рідкого скла і 1 на основі борної кислоти (табл. 3.5). Порівняння проводили, як за технологічними параметрами (час приготування, час сушіння, час зберігання, легкість видалення), так і за станом захисного шару (наявність пор, науглецюваних плям і пробоїв по цементаций).

Результати випробувань різних типів паст показані в табл. 3.6

Таблиця 3.5 – Хімічний склад обраних антицементацийних паст

Назва складової	Вміст у складі паст, % мас.				
	Склад I	Склад II	Склад III	Склад IV	Склад V
Каолін	6,7	-	-	-	-
Тальк	11,2	-	-	-	-
Маршаліт	3,2	7,3	-	-	-
Бура	0,7	-	-	-	-
Оксид алюмінію	0,4	13,8	-	-	-

Бетоніт	-	8,8	-	21,0	-
Оксид хрому	-	3,7	-	-	-
Полівініловий спирт	-	6,8	-	-	-
Азбест	-	-	36	11,6	-
Силікат натрію	-	-	-	2,8	-
Абразивний пил	-	-	-	3,7	-
Рідке скло	77,8	59,6	74	60,9	-
Борна кислота	-	-	-	-	12
Полістирол	-	-	-	-	7,5
Трихлоретилен	-	-	-	-	80,5

Номер складу (всього компонентів)	Час приготування	Загальний час сушіння 2 шарів	Час зберігання	Легкість видалення після цементації	Стан поверхні	Наявність пробоїв
Склад I (всього 6)	2 – 4 год	4 – 5 год	1 - 2 дня	Залишки пасти важко видаляються з поверхні	Пористе покриття, присутні науглецьовані плями по всій поверхні	Пробої по всій поверхні
Склад II (всього 6)	6 – 8 год	4,5 – 5,5 год	1 - 2 дня	Залишки пасти важко видаляються з поверхні	Безпористе покриття, науглецьованих плям не виявлено	Пробоїв не виявлено
Склад III (всього 2)	30 – 45 хв	2 год	2 - 4 год	Залишки пасти важко видаляються з поверхні	Пористе покриття, в деяких місцях присутні науглецьовані плями	Точкові пробої
Склад IV (всього 5)	4 – 6 год	4,5 – 6 год	2 - 4 год	Залишки пасти важко видаляються з поверхні	Розпухання покриття, присутні науглецьовані плями	Точкові пробої
Склад V (всього 3)	45 – 60 хв	30 – 40 хв	1,5 роки	Паста легко видаляється у водних миючих середовищах	Покриття сповзло з вертикальних площин	Пробої в місцях сповзання

Таблиця 3.6 – Результати дослідження ефективності використання антицементацийних паст різного складу

Паста складу I широко застосовується на для захисту поверхонь багатьох невідповідальних деталей, але після цементації у високоактивному газовому середовищі відбувалось руйнування пасти, в результаті чого вона мала пористе покриття, а науглецьовані плями спостерігались по всій поверхні. Пориста поверхня приводила до утворення пробоїв по цементації. Паста складу III мала кращі технологічні показники, але захисні характеристики виявились такі ж, як і у пасти складу I. Приготування паста складу IV займає більше часу, ніж пасти попередніх складів, але вона має в 2 рази більший час зберігання. Незважаючи на це, при її використання відбувалось розпухання покриття, що приводило до утворення значних пробоїв по цементації. Причиною розпухання виявилось погане зчеплення пасти з поверхнею зразків.

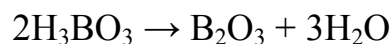
Найкраще себе показала паста складу II. Вона створювала стабільну, однорідну за складом газонепроникну плівку на поверхні деталей, запобігаючи проникненню на неї вуглецю. Проте, паста цього складу мала найгірші серед усіх варіантів технологічні показники (великий час приготування та сушіння і мала тривалість зберігання).

Паста складу V мала найкращі показники технологічності, а також добрі захисні властивості. На горизонтальних площинах не було виявлено науглецьованих плям і слідів пробою. Проте, вона не трималася на вертикальних площинах, утворюючи точкові дефекти в місцях сповзання.

Виходячи з того, що паста складу V володіє привабливими технологічними параметрами, доцільним є проведення пошуку способів поліпшення властивостей пасти даного складу.

3.4 Поліпшення складу пасти на основі борної кислоти

З метою з'ясування причин поганого зчеплення пасти з поверхнею вивчали механізм формування ізолюючого покриття, для чого досліджували властивості пасти при нагріванні. Для цієї мети застосовували термогравіметричний метод в поєднанні з мікроскопічним аналізом покриття. При нагріванні чистих компонентів пасти відбувається розкладання полістиролу і його повна сублімація в інтервалі температур 60...490 °С, розкладання борної кислоти з видаленням вологи в інтервалі температур 80...415 °С і плавлення борного ангідриду при 485 °С. Деструкція полістиролу протікає за складним механізмом – в інтервалі температур 60...187 °С розкладається 10,2 мас.%, В інтервалі температур 278...430 °С – 83,4 мас.%, і в інтервалі температур 430...490 °С - 6,4 мас.% і практично повністю видаляється до початку плавлення борного ангідриду, якому передуює розкладання борної кислоти:



Розкладання борної кислоти і деструкція полістиролу збігаються за часом і найбільш інтенсивно протікають в інтервалі температур 280...430 °С (рис. 3.3). При цьому в покритті зароджуються пори різного розміру, найбільші з яких при плавленні борного ангідриду не затягуються розплавом до початку інтенсивного осадження вуглецю в процесі ХТО.

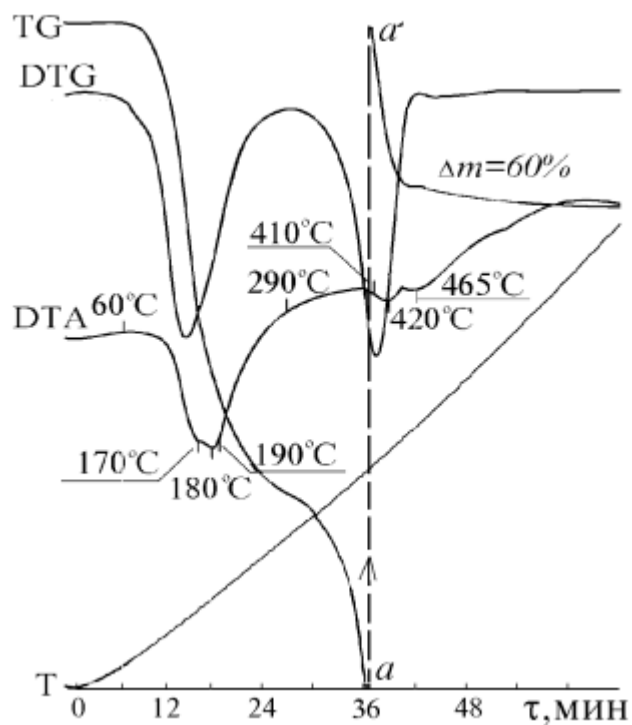
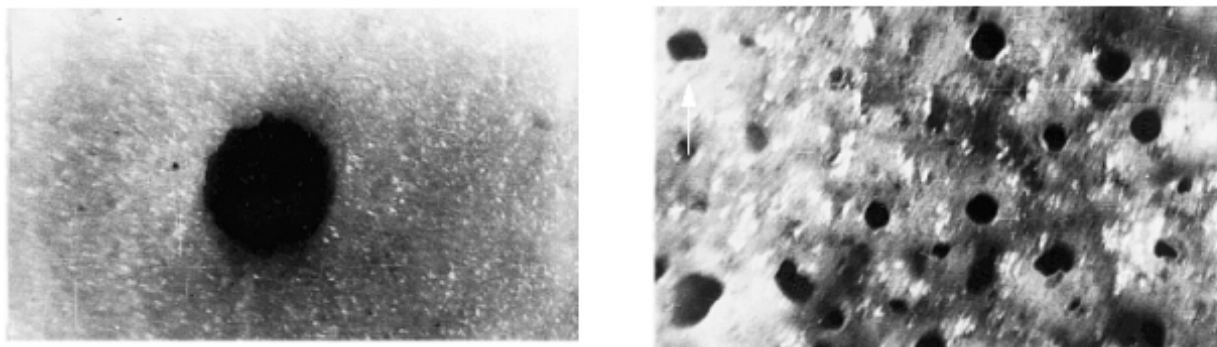


Рисунок 3.3 - Деріватограма пасти складу V:

T - крива температури; TG - крива зміни маси зразки; DTA - крива диференційного термічного аналізу; DTG - крива швидкості зміни маси

Після осадження вуглецю, поверхня металу не змочується розплавом покриття, що і призводить до утворення точкових дефектів. На рис. 3.4 наведено фотографії пасти складу V при різних температурах. Добре видно зародження пор і оголення металу (рис. 3.4, Б). Подальший нагрів (вище температури плавлення) призводить до зниження в'язкості розплаву B_2O_3 , що обумовлює сповзання пасти з вертикальних поверхонь. З огляду на хороші результати, які показала паста складу 2, для запобігання сповзання прийнято рішення ввести в пасту складу V оксиди, які знижують рідкотекучість покриття на основі B_2O_3 .



А

Б

Рисунок 3.4 - Покриття пастою складу V:

А) після сушіння при 25 °С; Б) після нагрівання до 240 °С

Досліджувалися добавки оксиду алюмінію Al_2O_3 і оксиду кремнію SiO_2 . При додаванні його частки рівномірно розподілялися по поверхні деталі, утворюючи своєрідну сітку, в осередках якої знаходиться розплав B_2O_3 . Добавки SiO_2 в розплав B_2O_3 призводять до підвищення в'язкості розплаву, однак при вмісті менше 15 мас.% мало впливають на схильність покриття до сповзання. Зниження температури початку формування покриття до 420 °С (утворення евтектики), схожість властивостей B_2O_3 і SiO_2 дає якісне покриття, хоча і схильне до сповзання.

Аналізуючи вплив зазначених оксидів на властивості пасти, отриманий оптимальний склад:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 - 3,0 \dots 3,5 \text{ мас.}\%,$$

$$\text{SiO}_2 - 3,0 \dots 3,5 \text{ мас.}\%,$$

$$\text{H}_3\text{B}_2\text{O}_3 - 3,0 \dots 3,5 \text{ мас.}\%,$$

$$\text{Полістирол} - 7,5 \dots 8,0 \text{ мас.}\%,$$

$$\text{Трихлоретилен} - 60,0 \dots 62,0 \text{ мас.}\%.$$

Таким чином, склад антицементацийного покриття, що утворюється на деталях при температурах ХТО, з урахуванням розкладання борної кислоти і сублімації полістиролу має склад:

Al_2O_3 – 16,5...16,8 мас.%,

SiO_2 – 17,4...18,0 мас.%,

B_2O_3 – 66,1...65,2 мас.%.

Для того, щоб отримати гомогенний розплав такого складу, слід досягти температури понад 1400 °С, але деталі вище температур цементації (930...950 °С) не нагрівають. Отже, на поверхні деталі фактично знаходиться гетерогенне покриття - розплав SiO_2 - B_2O_3 з включеннями Al_2O_3 , які утворюють тугоплавкий каркас, що виключає сповзання пасти. У перший період після розкладання борної кислоти, деструкції полістиролу і плавлення борного ангідриду йде розчинення SiO_2 в розплаві B_2O_3 (рис. 3.5).

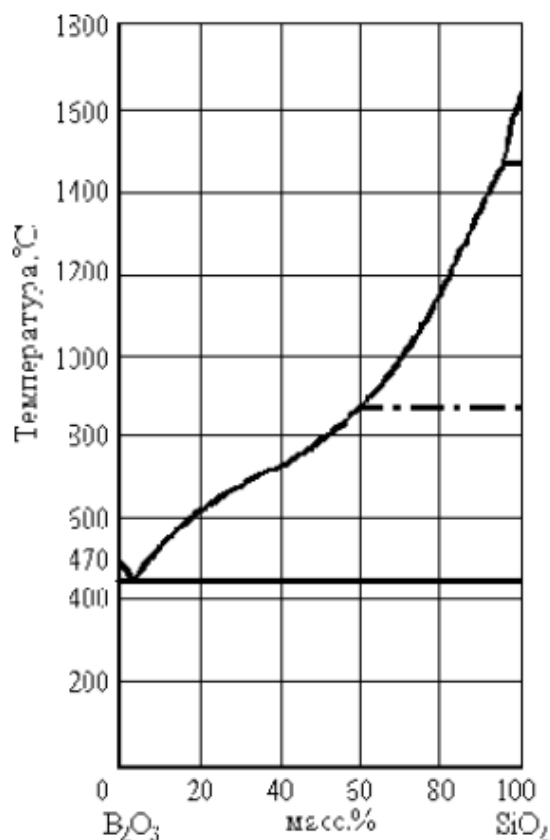


Рисунок 3.5 - Діаграма стану системи B_2O_3 - SiO_2

Після утворення розплаву SiO_2 - B_2O_3 (600 °С) подальша взаємодія Al_2O_3 проходить з розплавом боросилікату. Деріватограммодослідної пасти приведена на рис. 3.6.

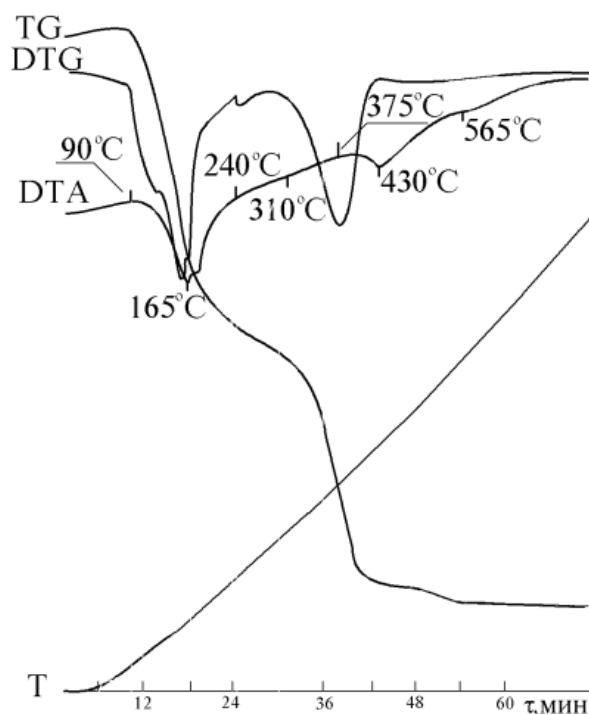
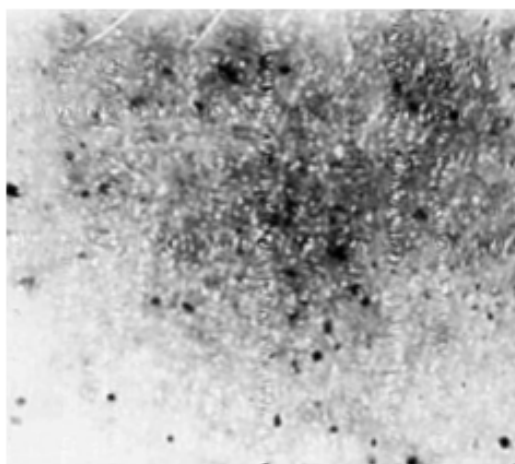
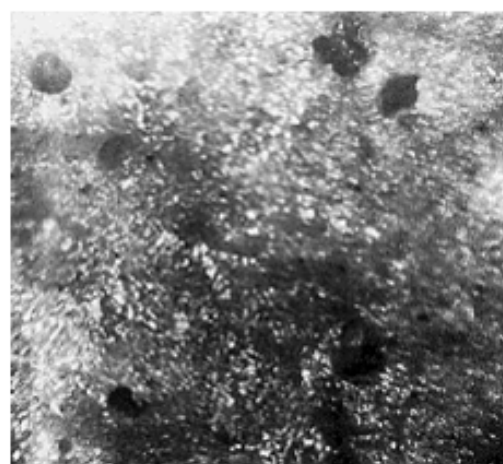


Рисунок 3.6 - Дериватограмма дослідної пасти

Зерна корунду (Al_2O_3) в процесі формування покриття виконують ще одну функцію - на початковій стадії сприяють рівномірному утворенню менших за розміром пор, що легко затягуються, в порівнянні з пастою складу V (рис. 3.7), що при подальшому нагріванні створює умови для утворення на деталі щільного ізолюючого покриття.



А



Б

Рисунок 3.7 - Покриття дослідною пастою:

А) Після сушіння при 25 °С; Б) Після нагріву до 240 °С

3.5 Застосування комплексного захисного покриття

В умовах виробництва виготовляли зубчасте колесо ливарним способом (рис. 3.8).

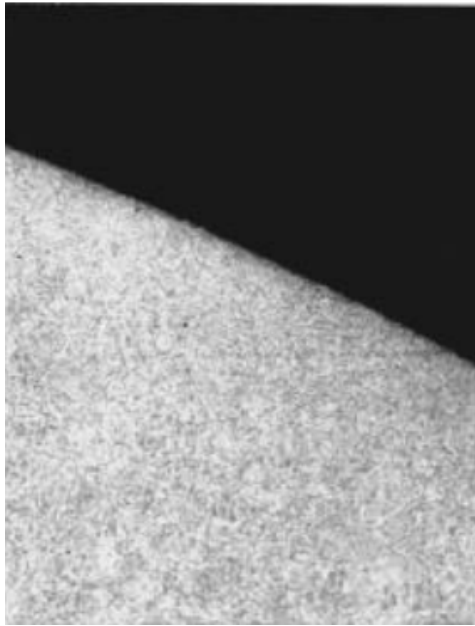
Для подальшої цементації в місцях, де вона не бажана, деталь піддавали гальванічному мідненню, після чого наносили пасту на основі борної кислоти поліпшеного складу.



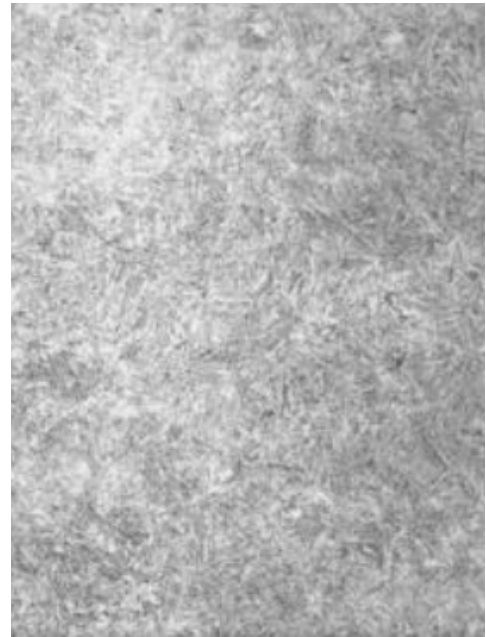
Рисунок 3.8—Зубчасте колесо зі сталі 12Х2Н4А

Після завершення термообробки і видалення решт антицементацийної пости, проведено аналіз структури мідного покриття (рис. 3.9). Шар мідного покриття був однорідним і не мав видимих дефектів. Слідів науглецювання виявлено не було.

Мікроструктура сталі після термообробки мала однорідну мартенситну структуру (рис. 3.10).



а



б

Рисунок 3.9 – Мідне покриття після цементації із застосуванням антицементацийної пасти на основі борної кислоти:

а) структура шару на границі деталі; б) структура шару всередині деталі

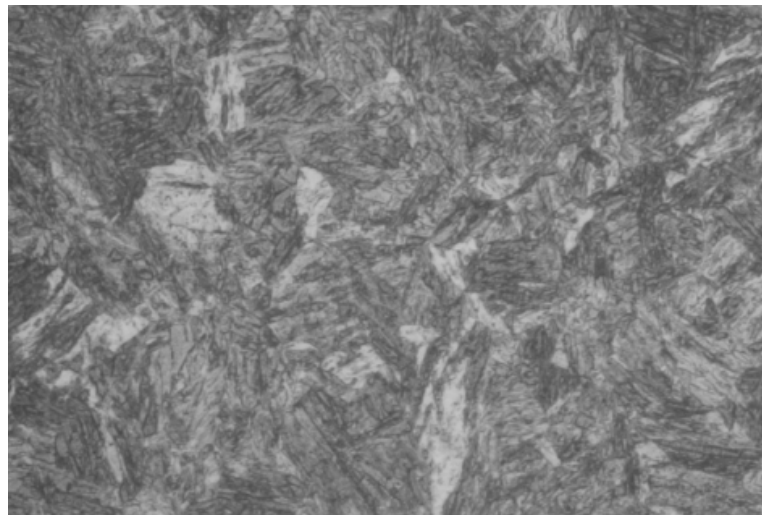


Рисунок 3.10 – Структура серцевини виробу після термічної обробки

Застосування комплексного захисту деталей від цементації, що складається з гальванічного міднення та нанесення антицементацийної пасти

дозволить збільшити ресурс роботи деталей та значно зменшити кількість браку по пробою.

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Цементация - один з головних процесів в термічному зміцненні деталей, поверхні яких працюють на зношення. До таких деталей відносяться шестерні, вал-шестерні, сателіти, півосі, і багато інших виробів. Дуже часто, в процесі виготовлення таких деталей, виникає необхідність виключити науглецювання на певній ділянці. Така необхідність виникає з різних причин: вимоги конструкторської документації, вимоги щодо подальшої механічній обробці і т.д. У зв'язку з цим виникає питання щодо захист цих поверхонь від насичення вуглецем і виключення отримання високої твердості при подальшому гартуванні сталей.

В якості захисного покриття найчастіше використовується гальванічне міднення. Цей спосіб включає додаткову операцію в технологічному процесі виготовлення деталей, додаткові допоміжні матеріали, додаткову механічну обробку для зняття гальванічного покриття. Все це виливається в додаткові статті витрат в структурі собівартості деталі.

Більш простим і доступним способом захисту від цементации є покриття поверхні спеціальними обмазками. В даний час використовують різні обмазки, що відрізняються за складом, захисними властивостями і технологічністю.

Використання вказаних методів захисту від цементации в комплексі дозволить отримати найкращий результат при використанні високоактивного карбюризатора з мінімальною кількістю браку деталей по пробою.

Метою даного дослідження було розроблення методики захисту поверхні деталей від цементации при використанні високоактивного карбюризатора та провести дослідження щодо покращення антицементационної пасты на основі борної кислоти.

Впровадження нової технології дозволить мінімізувати кількість браку деталей по пробою та підвищить загальний строк експлуатації деталей з цементовних та нітроцементовних сталей і дозволить отримати економічний ефект та збільшити рівень конкурентноспроможності деталей.

- 4.2 Планування науково–дослідних робіт

Планування проведення досліджень проводилося за допомогою сіткового графіку.

Система сіткового планування та управління складається з наступних етапів:

- складання переліку етапів і визначення їх тривалості;
- побудова сіткового графіку;
- розрахунок основних параметрів.

Для початку необхідно визначити послідовність проведення науково–дослідної роботи. Будь–яке наукове дослідження розпочинається з аналізу інформаційних матеріалів з обраної теми. Для цього на початковому етапі необхідно здійснити накопичення наукової інформації: бібліографічний пошук, вивчення документів, основних джерел щодо теми, скласти огляд літератури. По завершенню цього етапу необхідно сформулювати і обґрунтувати предмет дослідження. Після визначення напрямку досліджень – необхідно виготовити дослідні зразки, для перевірки гіпотез. Після виготовлення зразків (литвом) необхідно провести механічну обробку, для того, щоб розміри зразка відповідали нормам стандарту. Далі необхідно провести всі необхідні випробування та дослідити структури ливарних та термооброблених зразків. Отримані результати підтверджують прогнозоване підвищення комплексу механічних та жароміцних властивостей, які додатково перевіряються на дослідній деталі, виплавленій з нового сплаву. Більш детально етапи дослідження описані в попередніх розділах.

Сітковий графік являє собою інформаційно–динамічну модель, в якій зображуються взаємозв'язку і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети проектування. При побудові сіткової моделі використовуються два графічних елемента: роботи і події. Робота – це процес, що вимагає витрат часу, наявності виконавців і матеріальних ресурсів. Подіями називаються результати проведених робіт. На графіку подія зображується у вигляді кола з номером. Сітковий графік будується за даними табл. 4.1 і представлений на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Список робіт сіткового графіку

№	Код роботи	Робота	Тривалість, дні
1	2	3	4
1	0 – 1	Теоретична підготовка до проведення дослідження, опрацювання наукової літератури для визначення принципів легування	25
2	1 – 2	Виготовлення дослідних зразків	14
3	2 – 3	Механічна обробка дослідних зразків перед випробуваннями	2
4	2 – 4	Механічна обробка дослідних зразків перед нанесенням мідного покриття	2
5	3 – 7	Проведення випробувань на зразках без покриття	5
6	4 – 5	Гальванічне міднення	3

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
7	5 – 7	Дослідження властивостей на зразках з мідним покриттям	5
8	5 – 6	Нанесення антицементацийної пасти	2

9	6 – 8	Дослідження властивостей на зразках з мідним покриттям та антицементацийною пастою	5
10	7 – 8	Порівняння та вибір найефективнішого способу захисту від цементациї	2
11	8 – 9	Підготовка зразків до нанесення паст	1
12	9 – 10	Нанесення на зразки пасту звичайного та розробленого складу	1
13	10 – 11	Дослідження властивостей на зразках з різними типами паст	5
14	11 - 12	Обробка результатів дослідження. Складання пояснювальної записки	20

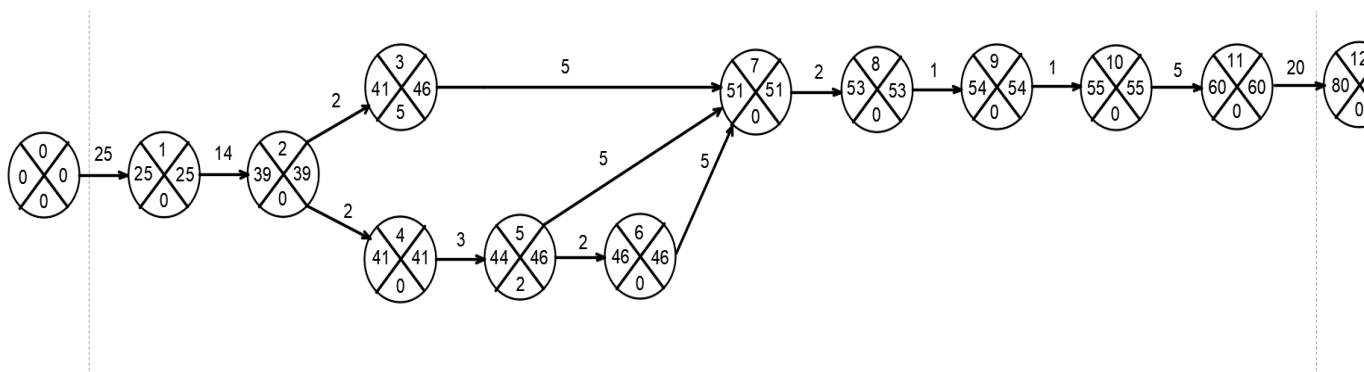


Рисунок 4.1 – Сіткова модель проведення НДР

Над стрілками вказано тривалість виконання етапу у днях. Таке графічне зображення плану виконання процесу показує взаємозв'язок усіх робіт для досягнення кінцевої мети.

Параметри робіт і шляхів представлені в табл. 4.2, 4.3 відповідно.

Таблиця 4.2 – Параметри робіт сіткового графіку

Код роботи	t_{ij}	t_{pn}	t_{po}	t_{nn}	t_{no}	R_n	R_{cv}
0 – 1	25	0	25	0	25	0	0
1 – 2	14	25	39	25	39	0	0

2 – 3	2	39	41	39	44	5	5
2 – 4	2	39	41	39	41	0	0
3 – 7	5	41	51	46	51	0	0
4 – 5	3	41	44	41	46	0	0
5 – 7	5	44	51	46	51	0	0
5 – 6	2	44	46	46	46	2	2
6 – 8	5	46	51	46	51	0	0
7 – 8	2	51	53	51	53	0	0
8 – 9	1	53	54	53	54	0	0
9 – 10	1	54	55	54	55	0	0
10 – 11	5	55	60	55	60	0	0
11 – 12	20	60	80	60	80	0	0

Таблиця 4.3 – Параметри шляхів сіткового графіку

№	№ подій	Тривалість	L_i	Резерв	K_{ni}
1	0 – 1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12	25 – 14 – 2 – 5 – 2 – 1 – 1 – 5 – 20	80	5	0,93
2	0 – 1 – 2 – 4 – 5 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12	25 – 14 – 2 – 3 – 5 – 2 – 1 – 1 – 5 – 20	80	2	0,97
3	0 – 1 – 2 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12	25 – 14 – 2 – 3 – 2 – 5 – 2 – 1 – 1 – 5 – 20	80	0	1

Коефіцієнт напруженості i -го шляху визначають за формулою:

$$K_{ni} = \frac{L_i - L'_{кр}}{L_{кр} - L'_{кр}} \quad (4.1)$$

Чим більше коефіцієнт напруженості шляху K_{ni} до 1, тим меншим відносним резервом володіє шлях. Для даного випадку на першому шляху спостерігається 5 днів резерву для проведення випробувань на зразках без покриття термічної обробки. На другому шляху спостерігається 2 дні резерву для дослідження зразків із мідним покриттям.

У ряді випадків важко установити загальну трудомісткість проведеної НДР. Це пов'язано з елементами невизначеності в процесі виконання більшості робіт. Їхня трудомісткість і тривалість залежить від безлічі факторів, передбачити які неможливо. У таких випадках використовують дві чи три вірогідні оцінки часу, що даються відповідальними виконавцями по кожному етапу робіт. Ці оцінки звичайно виражають в днях і є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання етапу робіт із формули:

$$(4.2) \quad t_{оч} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}$$

де t_{min} – мінімально необхідна кількість днів при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} – максимальні витрати часу на виконання роботи з даного етапу при несприятливих умовах, днів.

Ступінь правильності визначення $t_{оч}$ перевіряють розрахунком дисперсії (розкиду між мінімальними та максимальними оцінками часу виконання робіт).

Дисперсія являє собою середнє значення квадрата відхилення тривалості роботи від її очікуваного значення і визначається по формулі:

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{5} \right)^2 \quad (4.3)$$

Якщо дисперсія менше або дорівнює 1, то це говорить про малий ступінь невизначеності оцінки часу робіт із даного етапу.

На тих етапах, де дисперсія більше 1 завищений максимальний час на виконання етапу.

Результати розрахунків зводяться в табл. 4.4

Таблиця 4.4 – Тривалість НДР

№	Етапи НДР	Тимчасові оцінки, днів			Дисперсія, σ
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{оч}}$	
1	2	3	4	5	6
1	Теоретична підготовка до проведення дослідження, опрацювання наукової літератури для визначення принципів легування	23	27	25	0,8
2	Виготовлення дослідних зразків	12	16	14	0,8
3	Механічна обробка дослідних зразків перед випробуваннями	1	4	2	0,77

4	Механічна обробка дослідних зразків перед нанесенням мідного покриття	1	4	2	0,77
5	Проведення випробувань на зразках без покриття	4	7	5	0,77
6	Гальванічне міднення	2	5	3	0,77
7	Дослідження властивостей на зразках з мідним покриттям	4	7	5	0,77
8	Нанесення антицементацийної пасти	1	4	2	0,77
9	Дослідження властивостей на зразках з мідним покриттям та антицементацийною пастою	4	7	5	0,77

Продовження табл. 4.4

1	2	3	4	5	6
10	Порівняння та вибір найефективнішого способу захисту від цементациї	1	4	2	0,77
11	Підготовка зразків до нанесення паст	1	2	1	0,2
12	Нанесення на зразки пасти звичайного та розробленого складу	1	2	1	0,2
13	Дослідження властивостей на зразках з різними типами паст	4	7	5	0,77
14	Обробка результатів дослідження. Складання пояснювальної записки	18	22	20	0,8

В таблицях використані наступні позначення:

t_{ij} – час виконання роботи;

t_{ij}^{pn} – ранній термін початку роботи;

t_{ij}^{nn} – пізній термін початку роботи;

t_{ij}^{po} – ранній термін завершення роботи;

t_{ij}^{no} – пізній термін завершення роботи;

R_{ij}^n – повний резерв часу роботи;

R_{ij}^{cs} – вільний резерв часу роботи;

L_i – довжина i -го шляху;

$L'_{кр}$ – спільна частина i -го і критичного шляху;

K_{ni} – коефіцієнт напруженості i -го шляху;

$L_{кр}$ – довжина критичного шляху.

Таким чином, побудовано графік подій, сіткова модель, таблиця списку робіт, знайдено критичний шлях, що має довжину 80 днів.

Майже всі роботи виконувалися послідовно. Резерв часу спостерігався на першому та другому (не критичних) шляхах.

•

• 4.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР

До складу витрат на проведення НДР входить вартість усіх ресурсів, які необхідні для реалізації комплексу робіт.

Складаємо кошторис витрат за статтями:

- матеріали та транспортні витрати;
- енергія і паливо;
- спеціальне обладнання і технологічне оснащення;
- амортизація універсального устаткування;
- заробітна плата основна і додаткова;

- відрахування на соціальне страхування;
- накладні витрати.

4.3.1 Розрахунок вартості матеріалів

До цієї статті відносять витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження (табл. 4.5).

Ціни на матеріальні ресурси визначають за відповідними прайс-листами. Транспортно-заготівельні витрати: 2 – 5 % від вартості матеріалів.

Таблиця 4.5 – Розрахунок вартості матеріалів

Матеріал, ГОСТ	Марка	Витрати матеріалу, кг	Ціна за одиницю, грн./т	Сума витрат, грн.
Сталь для цементациї, ГОСТ 2590-88	12X2H4A	25	10500	262,5
Антицементацийна паста	—	5	196000	980
Електроліт для міднення	-	2	250000	500
Фотопапір	—	—	—	30
Реактиви	—	—	—	320
Разом				2092,5
Транспортно-заготівельні витрати				104,63
Всього з урахуванням транспортно-заготівельних витрат				2197,13

•

4.3.2 Спеціальне устаткування для науково – технічних робіт

В цій статті враховуються витрати на закупівлю, доставку і монтаж лабораторних установок, вимірювальних і регулюючих приладів, пристроїв, випробувальної апаратури і тому подібне (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Витрати на спеціальне устаткування

Перелік устаткування	Марка	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Собівартість експлуатації, грн.
Піч термічна	СШЦ 8.12/10	1	157000	3140
Оптичний мікроскоп	KERN OKO-1	1	124542	2630
Разом				5770

- 4.3.3 Розрахунок вартості палива і енергії

Під час проведення дослідів були використані наступні енергоспоживаючі ресурси:

- Оптичний мікроскоп KERN OKO-1;
- термічна піч СШЦ 8.12/10.

Витрати на енергію E_c визначаємо за формулою:

$$(4.4) \quad E_c = \frac{P_y \cdot \Phi_{ef} \cdot K_v \cdot C_e}{\text{ККД}},$$

де P_y – установлена потужність енергетичних струмоприймачів устаткування, кВт;

$\Phi_{\text{эф}}$ – ефективний фонд часу роботи даного виду устаткування, годин;

K_v – коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу ($K_v = 0,8$);

C_e – ціна 1 кВт година електроенергії, $C_e = 2,57$ грн/ кВт година;

$ККД = 0,6$.

Для термічної печі СШЦ 8.12/10:

$E_c = 112 \times 28 \times 0,8 \times 2,57 / 0,6 = 7359$ грн.

Для оптичного мікроскопу KERN OKO-1:

$K_v = 0,7$, $ККД = 0,7$;

$E_c = 1 \times 24 \times 0,7 \times 2,57 / 0,7 = 42,72$ грн.

Розрахунок витрат на енергію заносимо у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Устаткування	Вид енергоресурсів	Ефективний фонд часу роботи, год	Вартість, грн	Вартість енергоресурсів, грн
Термічна піч СШЦ 8.12/10	Електроенергія	28	2,18	10746
Оптичний мікроскоп KERN OKO-1	Електроенергія	24	2,18	61,68
Разом				10807,68

•

• 4.3.4 Розрахунок амортизації універсального устаткування

Суму амортизаційних відрахувань від балансової вартості універсального устаткування, що відносяться до основних фондів, розраховується у відповідності їх зайнятості для НДР.

Для печі термічної (тризмінний графік роботи):

$$(157000 / 1860 \times 3) \times 28 = 787,81 \text{ грн.}$$

Для оптичного мікроскопу:

$$(124542 / 1860 \times 2) \times 24 = 803,50 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку зводимо у таблицю 4.8.

Таблиця 4.8 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Устаткування	Балансова вартість, грн	Норма аморти за ції, %	Зайнятість устаткування, год	Річний ефективний фонд часу, год	Сума амортизації, грн
Піч термічна	157000	24	28	5580	787,81
Оптичний мікроскоп	124542	24	24	1860	803,50
Разом					1591,31

4.3.5 Розрахунок заробітної плати

Витрати по цій статті складаються з планового фонду заробітної плати усіх категорій працівників, зайнятих в проведенні наукових досліджень.

Розрахунок заробітної плати робиться на підставі даних про трудомісткість (табл. 4.9).

Кількість місяців роботи науково–дослідної групи задається на підставі терміну виконання дипломної роботи.

В даному випадку не більше 10 місяців. Результати розрахунків зводяться в

таблиці.

Додаткова заробітна плата складає 10 % від основної заробітної плати.

Основна й додаткова заробітна плата по кошторису не повинна перевищувати 40 % кошторисної вартості.

Таблиця 4.9 – Розрахунок основної заробітної плати

№	Посада виконавця	Кількість, Людей	Місячний оклад, грн	Середньо –денна зарплата, грн	Зайнятість, днів	Сума, грн
1	Головний науковий співробітник	1	6200	310	60	18600
2	Молодший науковий співробітник	1	4057	202,85	60	12171
3	Лаборант	4	2320	116	20	9280
4	Верстатник	1	4100	205	5	1025
Разом						41076

4.3.6 Відрахування на соціальні заходи

Ці витрати визначаються в розмірі 22 % від основної й додаткової заробітної плати: $(41076 + 4107) \times 0,22 = 9940$ грн.

4.3.7 Накладні витрати

Накладні витрати по проведенню науково–дослідницької роботи визначаються у відсотках від основної заробітної плати її виконавців (у межах 80 – 100 %). До них відносяться витрати, пов'язані з управлінням, утриманням і експлуатацією устаткування й приміщень, створенням необхідних санітарно–гігієнічних умов. Накладні витрати для НДР складають 90 % від суми основної заробітної плати, а саме 36960 грн.

- 4.3.8 Кошторис витрат

У складі витрат на проведення НДР враховується вартість всіх ресурсів, необхідних для реалізації комплексу робіт.

З метою визначення витрат на проведення науково–дослідницької роботи слід скласти кошторис витрат (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Кошторис витрат на виконання НДР

Статті витрат	Сума, грн
1	2
Матеріали, покупні вироби і напівфабрикати (за відрахуванням відходів, що реалізуються)	2197,13
Енергія	7401,72

Продовження табл. 4.10

1	2
Спеціальне устаткування для наукових (експериментальних) робіт	5770
Основна і додаткова заробітна плата виробничого персоналу	45183
Відрахування на соціальне страхування (від суми основної і додаткової заробітної плати)	9940
Накладні витрати	36960
Всього витрати на проведення НДР	107451,85

4.3.9 Бальна оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи

Наукові дослідження, прямий підрахунок економічної ефективності по яких не можливий, оцінюють за допомогою бальної системи (табл. 4.11).

Бальна оцінка проводиться по наступних найважливіших показниках:

- важливість розроблення K_1 ;
- можливість використання результатів розроблення K_2 ;
- теоретична значимість і рівень новизни дослідження K_3 ;
- складність розроблення K_4 .

За допомогою характеристик даних показників визначається кількість балів.

Таблиця 4.11 – Шкала для оцінки ефективності

Показник	Характеристика	Бали
K_1	Робота ініціативна і не є завданням відомчих органів	1

K_2	У масштабах країни	8
K_3	Одержання нової інформації, що доповнює знання про сутність досліджуваних процесів, не відомої в досліджуваній області	3
K_4	Робота виконується одним підрозділом, витрати 10000 – 50000 грн	3

Загальна оцінка встановлюється за добутком коефіцієнтів:

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

Питомий ефект (ПЕ) на кожний бал – 2 500 грн.

Загальний ефект (Е) від розробки складає:

$$E = 2500 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 180000 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність науково–дослідницької роботи визначається за допомогою коефіцієнта ефективності, що характеризує частку загального ефекту від розробки, що приходить на одну грн. витрат (собівартості НДР):

$$K_e = \frac{E}{K_{\text{ндр}}} = \frac{180\,000}{107\,451,85} = 1,68$$

Строк окупності $T_{\text{ок}}$ проекту розраховується за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{K_e} = 0,6 \text{ р.}$$

На підставі проведених розрахунків можна стверджувати, що робота є економічно доцільною. Витрачені кошти на наукову розробку дозволять в подальшому підвищити ресурс роботи і надійність деталей, зростає також

конкурентноспроможність поліпшеного складу антицементацийної пасти порівняно зі стандартним і дорожчими аналогами.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

- Ураження електричним струмом в результаті порушення правил електробезпеки, несправності обладнання для підготовки дослідницьких зразків може призвести до електричних травм або летального наслідку.

- Термічні опіки внаслідок торкання нагрітих поверхонь обладнання або зразків, знехтування індивідуальними захисними засобами.

- Хімічні опіки внаслідок необережного поводження з травильниками при травленні мікрошліфів.

- Механічні травми при виготовленні зразків для металографічних досліджень структури при використанні обладнання з частинами, що обертаються.

- Незадовільні параметри повітряного середовища на робочому місці через неправильну систему кондиціювання призводять до захворювання органів дихальних шляхів та легенів, а також негативно впливають на шкіру та очі.

- Напруженість праці-характеристика трудового процесу, що пов'язана з навантаженням переважно на центральну нервову систему, органи чуття, емоційну сферу працівника - монотонність, емоційні перевантаження, що може призвести до роздратованості, зниження насаги на дотримання правил безпеки, втоми та перевтоми, втрати працездатності.

- Незадовільні ергономічні умови робочого місця , внаслідок використання застарілого офісного обладнання, не відповідності параметрів робочого місця антропометричним характеристикам виконавця., що може призвести до зниження працездатності та

пошкоджень опорно-рухового апарату.

- Недостатнє освітлення через вихід з ладу освітлювальних приладів та неправильного їх розміщення впливає на функціонування зорового апарату, тобто визначає зорову працездатність, на психіку людини, її емоційний стан, викликає втому центральної нервової системи, що виникає в результаті докладених зусиль для впізнання чітких чи сумнівних сигналів.

- Можливість загоряння внаслідок порушення правил безпеки чи виходу з ладу обладнання може призвести до пожежі.

- Не правильні дії в надзвичайних ситуаціях через недотримання правил дії при надзвичайних ситуаціях може призвести до паніки.

5.2 Заходи по забезпеченню загальної безпеки

Для запобігання ураження електричним струмом електрообладнання має відповідати ГОСТ 12.2.007.0-75 «Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки», ГОСТ 12.2.003-91 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки» и ПУЕ-2007. Експлуатація електрообладнання та електроустановок має проводитися відповідно «Правила технічної експлуатації електроустановок» (ПТЕ), «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачем» та «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем».

Для забезпечення захисту від випадкового торкання до струмопровідних частин необхідно прийняти наступні способи і засоби: захисне огородження; ізоляція струмопровідних частин; захисне відключення; блокування; знаки безпеки. Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при торканні до металевих не

струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, застосовують захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалу системи захисних дротів, захисне відключення, ізоляцію не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою вище 24 В. засоби індивідуального захисту та ін. Всі металеві частини виробничого обладнання (станини, корпуси, електродвигуни, каркаси пультів керування та ін.), якщо вони можуть опинитися під напругою вище 42 В, мають бути заземлені згідно ПУЕ-2007.

Для цього їх оснащують легко оглядним пристроєм заземлення $K < 4 \text{ Ом}$ або з'єднують з нульовим дротом.

Для уникнення хімічних опіків передбачено:

- зберігання кислот у місцях, де можливе їх стикання з деревиною, та іншими речовинами органічного походження (для нейтралізації випадково розлитих кислот місця їх зберігання необхідно забезпечувати готовими розчинами крейди, вапна або соди);

- під час зберігання азотної та сірчаної кислот треба вжити заходів до недопущення стикання їх з деревиною, та іншими речовинами органічного походження. Концентровану азотну кислоту не дозволяється розливати у скляні сулії.

- під час роботи використовувати гумові рукавиці ГОСТ 20010-93 «Перчатки резиновые технические. Технические условия», окуляри «Очки защитные» ГОСТ Р 12.4.013-97, респіратор ГОСТ 12.4.028-76 ССБТ. Респираторы ШБ-1 "Лепесток". Технические условия (с Изменениями N 1, 2), спеціальний одяг ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих»;

- мати поблизу нейтралізуючі речовини, аптечку, джерело проточної води;

Заходи безпеки при роботі на шліфувальних і заточувальних верстатах: - установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки спеціально проінструктований наладчиками;

- перед установкою коло ретельно оглянути на відсутність тріщин;
- користуватися колами, мають тріщини або вибоїни, забороняється. Круги абразивні повинні мати штамп або наклейку про випробування - порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування. Використання кіл без відмітки про випробування забороняється. Дані про випробування кожного кола записуються в журнал випробувань кола;

- у кожного верстата вивішати табличку із зазначенням допустимої роботи окружної швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину;

- обертається абразивний круг , виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами;

- підручники повинні мати достатню за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм;

- при заточуванні інструменту не ставати проти поворотного круга. Стояти дозволяється поза небезпекою обертання кола (каменя);

- при роботі на верстаті підводити деталь необхідно плавно , не допускати ударів деталі про коло;

- при виявленні биття кола необхідно зупинити верстат і встановити несправність;

- при заточуванні інструмент надійно тримати в руках , щоб не допустити заклинювання його між підручником і кругом.

Під час роботи заточувальних верстатів не допускається: зачищати коло і торкатися його руками ;

- користуватися несправними і невипробуваними колами ;

- відкривати захисні кожухи кола , вала, шпинделя, шківа, ременя;

- одягати, знімати і перекладати ролики;

- працювати без підручника , захисного екрана або окулярів, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для

відсмоктування абразивного пилю. ГОСТ 12.3.028-82
«Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом».

Напруженість праці визначається згідно ГН 3.3.5-8-6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Для профілактики в томи застосовують скорочену тривалість робочого дня, враховують засоби механізації, автоматизації, застосовують раціональну організацію трудового процесу, максимально скорочують статичні операції, усувають зайві прийоми у роботі і т. ін.

Важливе значення для профілактики в томи має режим праці та відпочинку, що передбачено в КЗпП. Завдяки періодам відпочинку, що регламентується законодавством, працездатність відновлюється, що є функціональною властивістю організму людини.

При обладнанні робочого місця для проведення дослідницьких робіт необхідно враховувати, що конструкція всіх елементів виробничого обладнання, з якими людина в процесі трудової діяльності здійснює безпосередній контакт, повинна відповідати його антропометричним характеристикам, при виконанні робіт в сидячому положенні в конструкцію робочого місця слід включити крісло і підставку для ніг, а також передбачити в конструкції виробничого обладнання простір для розміщення ніг, що дозволяють виконувати роботи при високій посадці працюючого згідно 12.2.049-80 ССБТ

«Оборудование производственное. Общие эргономические требования».

Робоче місце при виконанні робіт в положенні сидячі повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования», в положенні стоячи – ГОСТ 12.2.033-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».

5.3 Заходи із забезпечення виробничої санітарії і гігієни праці

Для забезпечення задовільних параметрів повітряного середовища робочого простору (температура, вологість, швидкість переміщення повітряних мас) обов'язковим є кондиціонування приміщення згідно ГОСТ 2.2.137-96 «Оборудование для кондиционирования воздуха и вентиляции. Общие требования безопасности», СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование», ГОСТ 30646-99 «Кондиционеры центрального назначения. Общие технические условия», ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт і визначається за Державними будівельними нормами України ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення», ГОСТ 12.2.007.13-2000 ССБТ «Лампы электрические. Требования безопасности», ГОСТ МОК 60598-2-2-2002 «Светильники. Часть 2. Частные требования. Раздел 2. Светильники встраиваемые».

При цьому враховується вимога, що при виконанні в приміщеннях робіт I—III, IVa, IVб, IVв, Va розрядів слід застосовувати систему комбінованого освітлення. Використання системи загального освітлення передбачено при технічній неможливості або недоцільності влаштування місцевого освітлення при узгодженні з органами державного санітарного нагляду. При комбінованому освітленні доля загального повинна складати не менше 10%.

Для освітлення приміщення необхідно використати 6 світильників типу НПБ по одній лампі КСЛ у кожному, світловий потік кожної лампи $\Phi_{\text{л}} = 400$, загальна потужність світильників 42 Вт. Освітленість у

приміщенні за таких умов 272,6 лк.

5.4 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно дотримуватися вимог СНиП 2.01.02-85 «Протипожежні норми проектування будинків та споруд».

Вибір типу та визначення необхідної кількості вогнегасників виконується згідно з залежністю від протипожежної здатності вогнегасників, обмежувальної площі дії, класу пожежі в захищуваному приміщенні.

Розташування обладнання повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.1.00491 "Пожежна безпека. Загальні вимоги".

Для гасіння загорянь первичний засіб пожежогасіння передбачає один вогнегасник ОУ-5.

5.5 Заходи з цивільної оборони

Найбільшу небезпеку для життєдіяльності виробничого персоналу представляють аварії технічних систем. Причинами аварій можуть бути стихійні лиха, порушення режимів технологічних процесів (недотримання технологічної дисципліни) або правил експлуатації виробничого, енергетичного, транспортного та інше обладнання, а також правил техніки безпеки.

З особливостей небезпечних аварій слідуює: захисні заходи і, перш за все, прогнозування, виявлення і періодичний контроль за змінами

обстановки, оповіщення персоналу підприємства повинні проводитися з надзвичайно високою оперативністю. Локалізація джерела надходження СДОР в навколишнє середовище має вирішальну роль в попередженні масової поразки людей. Швидке здійснення цієї задачі може направити аварійну ситуацію в контрольоване русло, зменшити викид СДОР і істотно знизити збитки.

Захист від СДОР являє собою комплекс заходів, що здійснюються з метою виключення або максимального послаблення поразки персоналу і збереження його працездатності.

Комплекс заходів по захисту від СДОР включає:

- Інженерно-технічні заходи щодо зберігання і використання СДОР;
- Підготовку сил і засобів для ліквідації хімічно небезпечних аварій ;
- Навчання їх порядку і правилам поведінки в умовах виникнення аварій;
- Оповіщення про безпосередню загрозу поразки СДОР;
- Тимчасову евакуацію з небезпечних районів;
- Хімічну розвідку району аварії ;
- Пошук і надання медичної допомоги постраждалим ;
- Локалізацію та ліквідацію наслідків аварії .

Обсяг і порядок здійснення заходів щодо захисту багато в чому залежать від конкретної обстановки, яка може скластися в результаті аварії, наявність часу, сил і засобів для здійснення заходів з захисту та інших факторів.

Всі заходи щодо захисту відображаються в плані захисту об'єкта, який розробляється завчасно з участю всіх головних фахівців об'єкту. План розробляється, як правило, текстуально з додатком необхідних схем, що вказують розміщення об'єкту, сил і засобів ліквідації наслідків аварії, їх організацію і т.д. Він складається з декількох розділів і визначає

підготовку об'єкту до захисту та порядок ліквідації наслідків аварії згідно з ДБН В.1.2-4- 2006 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони)».

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз характеристик та особливостей експлуатації зубчастих коліс. Розглянуто основні матеріали для зубчастих коліс, вплив легувальних елементів на їх структуру та властивості та основні методи їх хіміко-термічної обробки.

2. Проведено аналіз технологічних процесів цементації, структурних перетворень в металах та можливих дефектів.

3. Проаналізовано основні методи захисту від цементації, що застосовуються на виробництві.

4. Дослідження використання гальванічного міднення для захисту деталі в умовах цементації у високоактивному газовому карбюризаторі показало, що одного лише мідного покриття недостатньо для того, щоб захистити поверхню деталі від науглецювання. Зважаючи на це, доцільним буде застосування антицементацийної пасти після міднення.

5. Проведено порівняльний аналіз антицементацийних паст 5-ти різних складів. Найкраще себе показала паста складу II. Вона створювала стабільну, однорідну за складом газонепроникну плівку на поверхні деталей, запобігаючи проникненню на неї вуглецю. Але паста складу V мала найкращі показники технологічності, а також добрі захисні властивості і тому була більш перспективною.

6. Виявлено, що недоліком пасти складу V був той факт, що вона не трималася на вертикальних площинах, утворюючи точкові дефекти в місцях сповзання.

7. Проведено оптимізацію складу пасти на основі борної кислоти (складу V). отриманий оптимальний склад: Al_2O_3 – 3,0...3,5 мас.%; SiO_2 – 3,0...3,5 мас.%; $\text{H}_3\text{B}_2\text{O}_3$ – 3,0...3,5 мас.%; Полістирол – 7,5...8,0 мас.%; Трихлоретилен – 60,0...62,0 мас.%.

8. Проведені випробування комплексного захисного покриття, що складається з мідного шару та антицементацийної пасти на основі борної кислоти. Захисний шар був однорідним і не мав видимих дефектів. Слідів науглецювання виявлено не було.

9. Показано доцільність провадження комплексної технології захисту деталей від науглецювання. Економічний ефект від проведеної роботи складає 1,68 гривні на одну гривню витрат.

10. Для збереження життя та здоров'я працівників лабораторії під час проведення досліджень були запропоновані заходи по забезпеченню техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, з пожежної безпеки та у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волков Д.Р. Строительные машины [текст] / Д.Р. Волков. – М.: Высшая школа, 1988. – 319 с.
2. Иванов М.Н. Детали машин [текст] / М.: Высш. школа, 2000. - 383 с. - 6-е изд., перераб.
3. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя [текст] / А.Г. Косилова, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
4. Б.Н. Арзамасов. Материаловедение [текст] / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
5. Журавлев В.Н. Машиностроительные стали: справочник [текст] / В.Н. Журавлев, О.И. Николаев. – М.: Машиностроение, 1981. – 379 с.
6. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов [текст] / В.Г. Сорокин. – М.: Машиностроение, 1989. – 640с.
7. Арзамасов Б.Н. Справочник по конструкционным материалам [текст] / Б.Н. Арзамасов, Т.В.В. Соловьева. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 632 с.\
8. Башнин Ю.А. Технология термической обработки [текст] / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
9. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка стали [текст] / А.Н. Минкевич. – М.: Машгиз, 1950. – 417 с.
10. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [текст] / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 465 с.
11. Натапов Б.С. Термическая обработка металлов [текст] / Б.С. Натапов. – Киев: Вища школа, 1980. – 282 с.
12. Лахтин Ю.М. Термическая обработка в машиностроении: справочник [текст] / Ю.М. Лахтин, А.Г. Рахштадт. – М.: Машиностроение, 1980. – 776 с.
13. Самохоцкий А.И. Технология термической обработки металлов / А.И.

- Самохоцкий, Н.Г. Парфеновская. – М.: Машиностроение, 1976. – 310 с.
14. Сидорин И.И. Основы материаловедения [текст] / И.И. Сидорина. – М.: Машиностроение, 1976. – 436 с.
 15. Новиков И.И. Теория термической обработки / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1978. – 386 с.
 16. Рослякова Л.И. Диффузионные и кинетические процессы на поверхности стали при цементации [текст] / Л.И. Рослякова, И.Н. Росляков // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва, 2014. - № 4. – С. 32 - 33.
 17. Архипов И. Я. Повышение прочности зубьев цементованных и нитроцементованных колес [текст] / М.С. Полоцкий, А.Я. Новикова и др. // МиТОМ. – Москва, 1970. - № 10. - С. 56 - 61.
 18. Рыжов Н.М. Циклическая прочность стали 16ХЗНВФБМ-Ш (ВКС-5) после вакуумной цементации [текст] / Н.М. Рыжов, Р.С. Фахуртдинов, А.Е. Смирнов // МиТОМ. – Москва, 2010. - № 2. – С. 23 – 28.
 19. Козловский И. С. Химико-термическая обработка шестерен [текст] / И.С. Козловский. - М.: Машиностроение, 1970. - 380 с.
 20. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения цементованных зубчатых колес из стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш [текст] / С.А. Пахомова, М.Ю. Рыжова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2018. - № 1. – С. 66 – 72.
 21. Кусманов С.А. Влияние оксидного слоя на характеристики анодной цементации малоуглеродистых сталей [текст] / С.А. Кусманов, А.В. Жиров, И.Г. Дьяков и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва, 2011. - № 4. – С. 15 – 21.
 22. Рослякова Л.И. Моделирование комплекса легирования стали при цементации, влияющей на образование карбидной фазы [текст] / Л.И. Рослякова, И.Н. Росляков // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва, 2015. - № 10. – С. 32 - 34.

23. Семенов М.Ю. Оптимизация технологических режимов вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойкой стали ВКС-7 на основе расчетного метода проектирования / М.Ю. Семенов, А.Е. Смирнов, Р.С. Фахуртдинов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – Москва, 2015. - № 1. – С. 27 - 30.