

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Дослідження та розробка нових підходів до термічної обробки для підвищення продуктивності автомобільних двигунів**

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ-212м
Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Прикладне матеріалознавство»

АНТОН МИРОШНІЧЕНКО
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник Дар'я ТКАЧ
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

РЕФЕРАТ

ПЗ: 99 стор., 32 рис., 13 табл., 20 джерел

КЛАПАНИ ДВИГУНІВ, АЗОТУВАННЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ В ANSYS, РЕСУРС РОБОТИ, ОХОРОНА ПРАЦІ

У роботі проведено детальний аналіз літературних даних щодо вибору конструкційних матеріалів та режимів їх термічної обробки для випускних клапанів. На основі порівняльного аналізу обґрунтовано оптимальний вибір сталі 4X10C2M для забезпечення високої міцності та термостійкості клапанів.

За допомогою програмного комплексу ANSYS виконано статичний аналіз напружено-деформованого стану випускного клапана та підтверджено переваги застосування жароміцних і корозійностійких сталей і нікелевих сплавів в умовах підвищених температур.

Розроблено та техніко-економічно обґрунтовано впровадження додаткової операції азотування випускних клапанів, яка дозволяє підвищити зносостійкість поверхні та подовжити ресурс їх роботи у 2 рази.

Передбачено комплекс заходів з охорони праці та промислової безпеки на дільниці азотування для усунення небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Літературний огляд	7
1.1 Умови роботи клапанів ДВЗ	7
1.2 Матеріали для виробництва клапанів ДВЗ	16
1.3 Вплив технології термічної обробки на довговічність клапанів ДВЗ	23
1.4 Вплив азотування на експлуатаційні властивості конструкційних сталей ...	29
1.5 Вибір та обґрунтування термічної обробки клапанів ДВЗ	38
2 Матеріали та методи дослідження.....	42
2.1 Матеріали дослідження	42
2.2 Дослідження мікроструктури.....	44
2.3 Дослідження мікротвердості	45
2.4 Моделювання в середовищі ANSYS	45
3 Результати дослідження	47
3.1 Розробка технології хіміко-термічної обробки клапану двигуна внутрішнього згорання	47
3.1.1 Розробка режимів термічної обробки	47
3.1.2 Вибір обладнання	53
3.1.3 Технічний контроль, попередження та виправлення браку	55
3.1.4 Структура та мікротвердість азотованого шару	58
3.2 Моделювання, статичний і тепловий аналіз випускного клапана двигуна внутрішнього згорання	60
4 Економіко-організаційна частина.....	75
4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу	75
4.2 Послідовний аналіз	77
5 Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	90
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	90

5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	91
5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	93
5.4 Заходи з пожежної безпеки	95
Висновки	98
Перелік посилань.....	100

ВСТУП

На даний момент в автомобільній промисловості, в області двигунів внутрішнього згоряння проводяться різні дослідження, спрямовані на досягнення технологічних інновацій, які матимуть своїм результатом як зниження витрати на виробництво та обслуговування двигуна, так і зниження споживання палива. Сьогодні більшість вироблених автомобілів все ще базується на звичайних двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ). Хоча гібридизація різного ступеня стає новим стандартом, нехтування технологічним прогресом для ДВЗ матиме серйозний вплив на навколишнє середовище. Відомо, що двигун є найбільш схильною до жорстких умов експлуатації системою, що піддається механічним, тепловим і хімічним впливам, механічних, теплових і хімічних впливів. Характер експлуатації змінний, з послідовними і дуже різкими переходами від високих температур до більш низьких, в робочих режимах при пуску, зупинці, прискоренні, зупинці, під час функціонування. З цих причин термічний удар є найбільш важливим фактором зношування з усього спектру факторів зношування, що діють одночасно в процесі експлуатації [1].

Клапани двигуна внутрішнього згоряння - це прецизійні компоненти двигуна. Вони відкриваються і закриваються в міру необхідності. Свіжий заряд (паливно-повітряна суміш у двигунах з іскровим запалюванням або лише повітря у двигунах з компресійним запалюванням) впорскується через впускні клапани, а продукти згоряння виводяться в атмосферу через випускні клапани. Вони також використовуються для ущільнення робочого простору всередині циліндра від колекторів. Клапани працюють в дуже складних умовах: вони повинні витримувати агресивну атмосферу за надзвичайно високих температур (особливо випускний клапан) і змінні в часі механічні навантаження. Одне з важливих навантажень, яке має витримувати клапан, - це вплив навантаження в момент закриття, який генерує змінні в часі напруження на високих частотах.

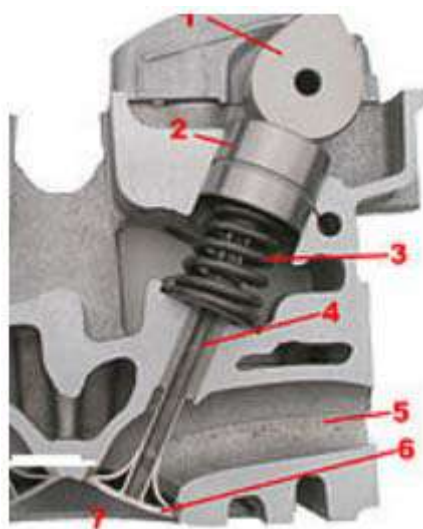
Цей клапан називається сідловим і його конструкція досить відома. Швидкість удару контролюється конструкцією кулачка, який керує рухом; таким чином, швидкість закриття, задана рампою кулачка, вибирається таким чином, щоб мінімізувати наслідки удару.

В даний час інженерія поверхні стає все більш життєздатною альтернативою конструктивним модифікаціям, розробленим з метою підвищення ефективності двигунів внутрішнього згорання. Так, були запропоновано і вже випробувано різні типи покриттів, що наносяться на деякі органи двигунів внутрішнього згорання з метою збільшення терміну служби в експлуатації, зменшення витрат на технічне обслуговування, відновлення зношених ділянок, підвищення паливної економічності зношених ділянок, підвищення паливної ефективності за рахунок підвищення температури в камері згорання. Досягнення цих цілей можливе завдяки тому, що покриття, отримані методом термічного осадження, забезпечують функціональну поверхню із захисною функцією або навіть модифікацію поведінки основного матеріалу.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Умови роботи клапанів ДВЗ

Клапан двигуна внутрішнього згоряння - це механізм, який відкриває і закриває отвори в блоці циліндрів, щоб контролювати подачу і випуск палива і газів. Клапан двигуна внутрішнього згоряння може бути впускним або випускним, залежно від того, чи потребується зменшити або збільшити кількість палива і газів, що проникають до камери згоряння. Клапан двигуна внутрішнього згоряння складається з (рис. 1.1): валу трамблера, який контролює відкриття і закриття клапанів; плунжеру клапана, що забезпечує його рух вгору і вниз; пружини клапана, яка забезпечує повернення клапана в закрите положення після його відкриття; штоку клапана, який з'єднує клапан з механізмом керування; газоходу, через який проходять гази при відкритті і закритті клапанів; тарілки клапана, яка відкриває і закриває отвір для газів. Ці компоненти взаємодіють, щоб забезпечити ефективне згоряння палива і перетворення цього енергії на силу руху.



1 - вал трамблера, 2 - плунжер клапана, 3 - пружина клапана, 4 - шток клапана, 5 - газохід, 6 - тарілка клапана, 7 – зона згоряння

Рисунок 1.1 – Розріз системи розподілу [1]

У зв'язку з режимом роботи клапани двигуна піддаються комбінованим навантаженням: тепловим, механічним, корозійним та зношувальним. Середні температури експлуатації клапанів знаходяться в межах 300-400°C для впускних клапанів і 500-900°C для випускних клапанів, як показано на рисунку 1.2 [1]. Двигуни Otto і Diesel працюють при температурі 550°C всередині впускного клапана; відповідні значення всередині випускного клапана становлять 700°C і 800°C, відповідно. Температура випускного клапана може досягати 900°C [3].

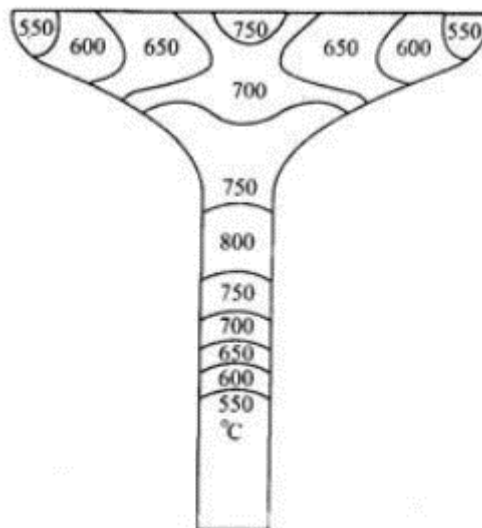
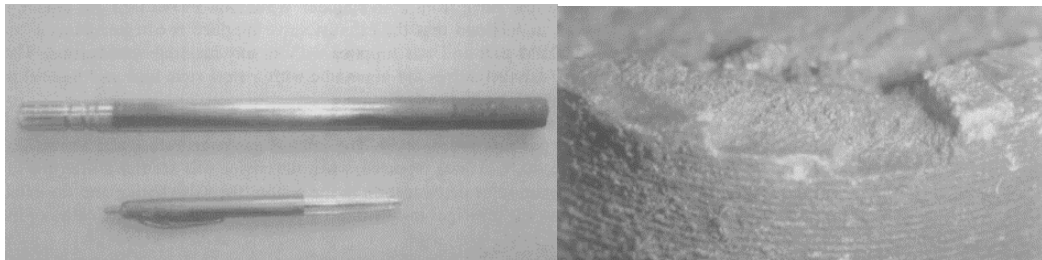


Рисунок 1.2 – Температурні поля всередині випускного клапана [1]

Шток випускного клапана зазвичай виходить з ладу через перегрів, оскільки температура випускного клапана становить близько 720 °C. Поверхня зламу штока клапана покрита чорним оксидним нальотом; поверхня зламу в зоні втоми гладка і покрита товстим оксидом або відкладеннями, які неможливо задовільно видалити. У середній частині штока спостерігається поздовжнє фреттинг-пошкодження. Деякі невеликі тріщини зароджуються і поширюються по всьому перерізу. При високому навантаженні виникають множинні тріщини, якщо клапани піддаються впливу високих температур, і за таких умов експлуа-

тації логічно було б очікувати, що поломка станеться протягом декількох мільйонів циклів. Зламаний шток клапана показаний на рис. 1.3 [3].



а

б

Рисунок 1.3 – Зламаний шток випускного клапана (а) та край поверхні зламу штока клапана (б) [3]

Твердість значно втрачається, а поверхневе окислення і фреттинг/задирки на штоку клапана виникають через перегрів. Втомні властивості сплаву погіршуються через високу температуру. Це є причиною виникнення численних втомних тріщин. Випускні клапани, що вийшли з ладу, показані на рис. 1.4, клапан № 4 - новий випускний клапан, який порівнюється з несправними клапанами № 1, № 2 і № 3. Руйнування відбулося на тарілках випускних клапанів, як видно на рис. 1.4. У клапанах № 1 і № 2 тріщини починалися від конічної площини тарілки і поширювалися в напрямку до нижньої площини під кутом 45° до нижньої площини.



Рисунок 1.4 –Зовнішні вигляд несправних випускних клапанів [3]

У випадку клапана № 3 серйозні втрати відбулися з одного боку пластини (рис. 1.5). У пластині є дві основні радіальні тріщини, обидва краї яких обгоріли. На конічній площині по обидва боки від розколів є невеликі кільцеві тріщини. Було виявлено, що на поверхні пластини з'являється багато вуглецевих відкладень [3].



Рисунок 1.5 – Зламана пластина клапана №3 [3]

Також з механічної точки зору до клапанів пред'являються високі вимоги, оскільки вони працюють на дуже високих швидкостях, які можуть досягати 600 м/с. Вимоги до корозії є найбільш важливими, оскільки високі теплові умо-

ви роботи сприяють утворенню кислот, які діють на мікроструктуру матеріалів. До цих вимог додаються явища абразивного зносу, спричинені твердими частинками, що захоплюються робочою рідиною, та адгезійного зносу, спричиненого тертям між штоком і напрямною [1].

Знос, як правило, відбувається на посадковій поверхні клапанів і штока, в тій частині, яка ковзає по направляючій штока клапана. Знос в основному відбувається через два основних фактори, перший - це сила удару між притискною поверхнею клапана і сідлом, а другий - ковзання клапана по сідлу під дією тиску згоряння. Дія тертя та удару призводить до зношування торця клапана. Типові механізми зносу включають адгезійний, абразивний, фреттинг, ерозію, кавітацію та втому від контактного кочення [3].

Клапани газових двигунів більш схильні до зносу. На рис. 1.6 показана залежність втрати маси від часу. Видно, що при навантаженні 1,0 кН втрата маси зносу більша, ніж при навантаженні 0,7 кН.

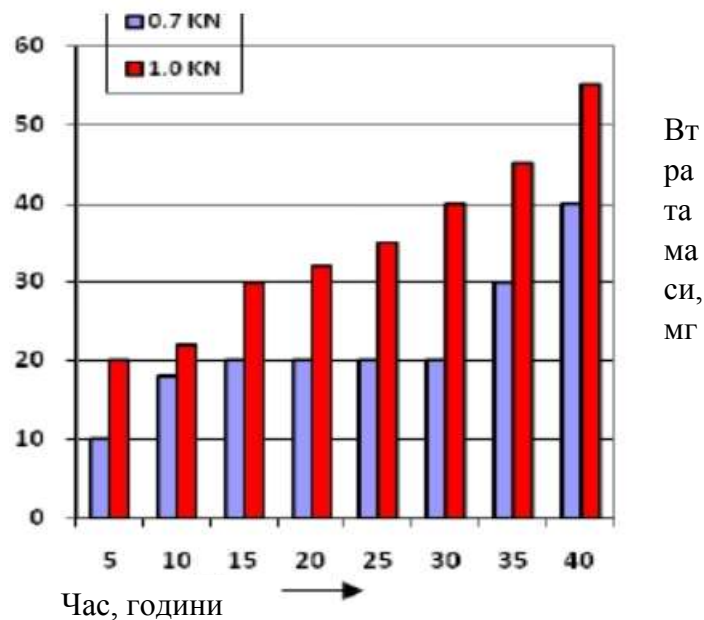


Рисунок 1.6 – Залежність втрати маси зносу від часу [3]

Знос поділяється на три стадії: стадія експлуатації, стадія стабільного зносу та стадія різкого зносу. На стадії зносу температура висока. Під дією високих ударних змінних навантажень міцність і твердість поверхневого матеріа-

лу газового клапана знижується через високу температуру, починається пластична деформація, тому поверхня сідла клапана зношується, а втрата маси зносу різко прискорюється з плином часу. Зі збільшенням кількості витіснення шорсткість поверхні зменшується, а практична площа контакту газ - клапан збільшується.

Інший запит - це запит, викликаний дуже високим робочим тиском, який разом з іншими вимогами може викликати деформацію тарілок клапанів і, таким чином, вивести їх з експлуатації (рис. 1.7) [2]. Закритий клапан навантажений силою пружини і тиском всередині циліндра, який періодично змінюється під час роботи двигуна і досягає пікового значення близько 15 МПа. Такий високий тиск всередині циліндра спричиняє згинання конуса клапана, що призводить до ковзання та неналежного контакту між тарілкою клапана та сідлом, що в кінцевому підсумку призводить до зносу [3].

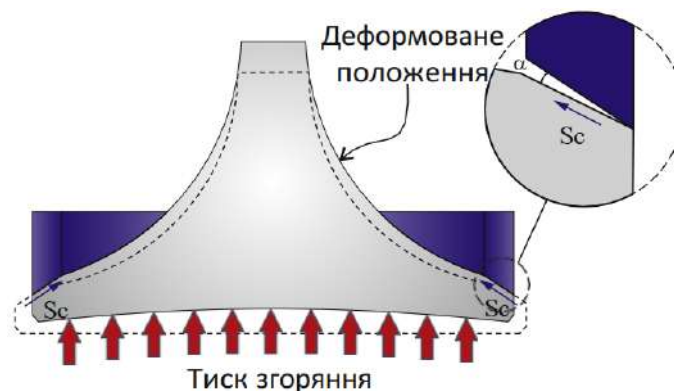


Рисунок 1.7 - Деформація тарілки клапана двигуна внутрішнього згоряння; деформація диска під дією тиску згоряння та відносного ковзання між контактними поверхнями [2]

Оскільки випускні клапани працюють при високих температурах, вони піддаються тепловому навантаженню і хімічній корозії. Впускні клапани, які не піддаються такому екстремальному тепловому навантаженню, охолоджуються газами, що надходять, теплопередачею на сідлі та іншими способами.

Клапани піддаються циклічному навантаженню через динаміку роботи клапанного механізму. Шток клапана зазнає осьового повторюваного навантаження, він може вийти з ладу через осьову втому. Зона канавки утримувача зазнає розтягуючих напружень і стає критичним перерізом через геометричну концентрацію напружень [3].

Клапани двигунів піддаються багаторазовому циклічному навантаженню через динаміку роботи клапанного механізму. Повторне навантаження призводить до того, що матеріал руйнується при навантаженнях набагато нижче границі плинності. Коли матеріал піддається втомі, в ньому зазвичай починає розвиватися одна або кілька крихітних тріщин, які ростуть до повного руйнування. Втомні тріщини в нітридному шарі нержавіючої сталі показані на рис. 1.8. У дифузійному шарі починається поширення тріщини, яке призводить до остаточного розриву [2]. На рис. 1.8 показано різницю в поширенні тріщин між областями з вищим і нижчим вмістом азоту.

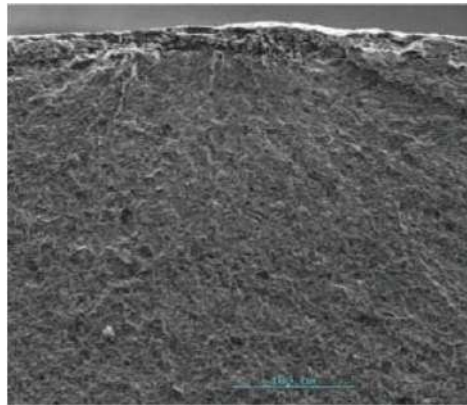


Рисунок 1.8 - Початок поширення втомної тріщини [3]

Існують різні типи механізмів втоми: термічна втома, багатоциклова втома, малоциклова втома, поверхнева втома, втома при згині, корозійна втома, втома при крученні та втома від фретингу. Найпоширенішими причинами відмов клапанів є теплова втома, корозійна втома, мало- і багатоциклова втома.

На рис. 1.9 показані криві втоми для різних матеріалів, нітридний шар на нержавіючій сталі X45CrBi93 руйнується при максимальному напруженні

900 МПа після 10^4 циклів і при напруженні 600 МПа після 10^6 циклів. Аналогічно, інші матеріали, такі як аустенітна сталь при 700°C , руйнуються при напруженні 380 МПа після 10^3 циклів і при напруженні 300 МПа після 10^9 циклів.

Клапани двигунів внутрішнього згорання зазвичай розраховані на 10^6 циклів навантажень, щоб запобігти виходу з ладу клапанів, але в даний час існують різні матеріали, які не виходять з ладу навіть після 10^7 або 10^8 циклів. При високій температурі втомна міцність значно знижується, але керамічні матеріали мають хорошу втомну міцність навіть при високих температурах і можуть працювати без руйнування до 10^9 циклів, але їх можна використовувати тільки для високоциклових застосувань. Сплави на основі нікелю мають низьку втомну міцність, але можуть працювати при дуже високій температурі близько 1027°C .

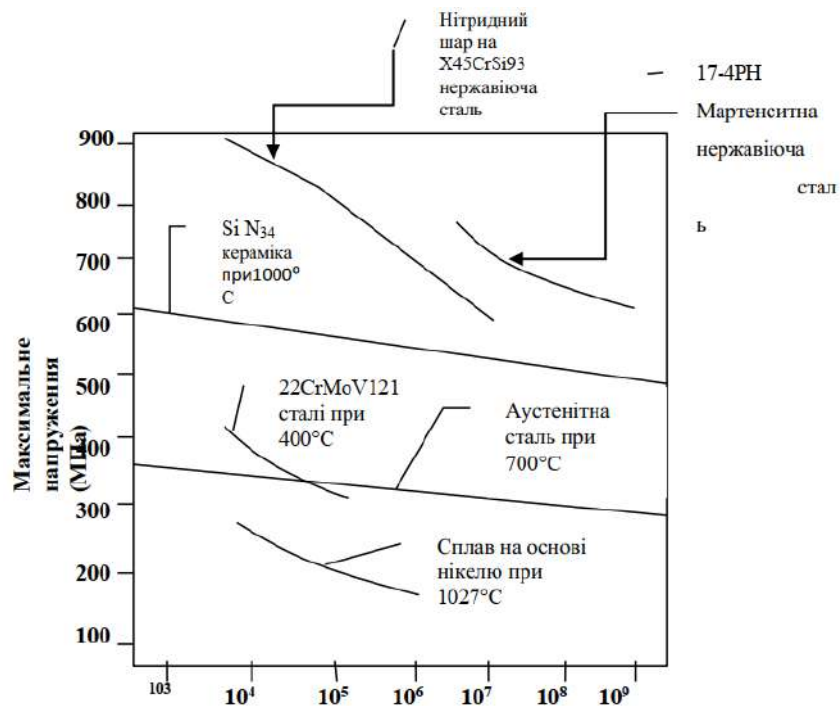


Рисунок 1.9 – Криві втоми для матеріалів з яких виготовляють клапани ДВЗ [3]

Отже умови роботи клапанів двигуна внутрішнього згорання є такими:

- високі температури - впускні клапани працюють при 300-400°C, тоді як випускні - при 500-900°C.

- високі швидкості - клапани можуть працювати на швидкостях до 600 м/с через високу частоту обертання двигунів внутрішнього згоряння.

- високий тиск всередині камер згоряння в поєднанні з повторюваними рухами відкривання/закривання призводить до втомних навантажень на клапани.

- високі температури сприяють утворенню кислот, які роз'їдають мікроструктуру клапанів.

- абразивний знос, спричинений твердими частинками робочої рідини, що руйнують поверхні, таадгезійний знос, викликаний тертям між штоком і напрямною.

Ключова відмінність між впускними і випускними клапанами полягає в температурі, при якій вони працюють. Випускний клапан - це компонент для управління потоком відпрацьованих газів шляхом безперервного відкриття і закриття. Впускні клапани працюють при більш низьких температурах і омиваються парами палива, які, як правило, змивають мастило зі стрижня клапана. Тому для впускних клапанів зносостійкість може бути більш важливою, ніж міцність при високих температурах або корозійна стійкість, якщо двигун буде задіяний в будь-яких перегонах на витривалість. Випускні клапани, з іншого боку, працюють при набагато вищих температурах, ніж впускні, і повинні витримувати корозійну дію гарячих вихлопних газів. Сталі, що використовуються для виготовлення випускних клапанів двигунів внутрішнього згоряння, повинні мати високу міцність і корозійну стійкість до продуктів згоряння при високих температурах. Це дві найважливіші вимоги до сталей для випускних клапанів.

Таким чином, високі температури, навантаження, корозія і зношування змушують клапани двигунів працювати в екстремальних умовах, що вимагають особливого підходу до вибору матеріалів та технології виготовлення клапанів ДВЗ.

1.2 Матеріали для виробництва клапанів ДВЗ

Через складні умови роботи клапани часто виготовляються з жароміцних матеріалів з антикорозійними властивостями, таких як середньолеговані сталі з хромом, мартенситні та аустенітні нержавіючі сталі, титанові сплави, суперсплави на основі нікелю (інконель, німонік, ніхром та ін.). Для виготовлення високонавантажених деталей сталі часто легують значно дорожчими і дефіцитнішими елементами, такими як нікель, молібден, вольфрам, ніобій та ін. Для підвищення зносостійкості тарілки та/або штока клапана в деяких випадках на їх поверхню наносять шари твердих матеріалів зі сплавів на основі Co, W і Cr (стеліт), ніхрому (сплав на основі Cr, Ni, Co, W та ін.) або інших матеріалів, за допомогою відомих процесів: хромування, азотування, алюмініювання або фосфатування. Прогартовуваність залежить від критичної швидкості гартування, тобто від хімічного складу сталі. Прогартовуваність збільшується при введенні в сталь легувальних елементів (Cr, Ni, Mo, V). Для досягнення високої прогартовуваності сталь частіше легують нікелем та молібденом. Проте слід мати на увазі, що після досягнення необхідної для даного перерізу прогартовуваності подальше збільшення вмісту в сталі легувальних елементів може не поліпшити, а навіть погіршити механічні і технологічні (обробку різанням, зварюваність і т. д.) властивості сталі. При цьому підвищується поріг холодноламкості.

На сьогодні для виробництва клапанів двигунів внутрішнього згорання застосовують леговані сталі. Використовується два основних типи сталі: мартенситна та аустенітна сталь. Різниця полягає в мікроструктурі сталі і в тому, як різні інгредієнти сплаву взаємодіють між собою, коли розплавлена сталь відливається і охолоджується. Сталеві сплави з мартенситною структурою зерна зазвичай мають високу твердість при кімнатній температурі (від 35 до 55 HRC) після відпуску, що підвищує їх міцність і зносостійкість. Ці характеристики роблять цей тип сталі гарним вибором для таких застосувань, як клапани двигу-

нів. Але при підвищенні температури мартенситна сталь втрачає свою твердість і міцність. При температурі вище 773 К (500° С) мартенситна сталь з низьковуглецевого сплаву втрачає твердість і міцність. З цієї причини низьковуглецева легована мартенситна сталь використовується лише для впускних клапанів. Для випускних. Впускні клапани охолоджуються паливно-повітряною сумішшю, що надходить, і зазвичай працюють при температурі від 673 К до 773 К (від 400° С до 500° С), тоді як випускні клапани постійно піддаються впливу гарячих вихлопних газів і зазвичай працюють при температурі від 923 К до 1073 К (від 650° С до 800°С) або вище. Матеріали, які можуть бути використані для цих клапанів, включають сплави вуглецевої сталі, нержавіючі сталі, високоміцні нікель-хром-залізні сплави і титан.

Хоча аустенітна нержавіюча сталь дуже добре витримує високі температури, вона пластичніша за мартенситну сталь при низьких температурах і не піддається термічній обробці. Щоб підвищити зносостійкість, до кінчика штока клапана можна приварити загартований пластинчастий наконечник, або, в деяких випадках, головку клапана з аустенітної нержавіючої сталі можна приварити до мартенситного штока, щоб створити двокомпонентний клапан, який має довговічний шток і жаростійку головку. Єдиним недоліком двокомпонентного клапана є те, що він не охолоджується так добре, як однокомпонентний клапан. Місце з'єднання двох різних сталей, зварених разом, утворює бар'єр, який сповільнює теплопередачу вгору по штоку. Отже, високоякісний матеріал клапана є абсолютно необхідним для випускної частини - особливо в двигунах з турбонаддувом і наддувом, а також у двигунах з інжекторним впорскуванням.

Класи матеріалів для виготовлення клапанів включають нелеговані та леговані сталі, нікелеві та титанові сплави. В різних регіонах світу застосовуються різні марки сталей для виготовлення клапанів. Наприклад, в Україні використовуються сталі 40Х, 38ХГМ, в Європі - Х45CrSi9-3, Х53CrMnNiN219, а в США - 21-4N. Для виготовлення клапанів двигуна використовуються матеріали 23-814, 21-214, 21-414, En 51, En 52, En 24 та 21-1214. Серед цих матеріалів En 52 зазвичай використовується для виготовлення впускних клапанів, а 21-414 -

для виготовлення випускних клапанів. Для виготовлення випускних клапанів широко застосовують окалиностійкі і жароміцні сталі - сильхроми - марок 4X9C2 і 4X10C2M, з яких в основному і виготовляють випускні клапани. Впускні клапани виготовляють в основному із сталі 40X і 40XH. Сталі застосовуються в тих випадках, коли потрібна висока міцність та стійкість до зносу, наприклад, для двигунів, що працюють при великих температурах та тисках.

Більшість клапанів виготовляються з нержавіючих сплавів 21-2N або 21-4N, хоча деякі постачальники також пропонують клапани зі сплаву 23-8N або власні запатентовані сплави для високотемпературних вихлопних клапанів. Існує багато таємниць щодо особливостей деяких з цих сплавів, але ми можемо сказати вам, що нержавіюча сталь 21-2N містить 21% хрому і 2% нікелю. 21-4N має такий самий вміст хрому, але містить майже вдвічі більше нікелю (3,75%) для більшої термостійкості. Марка 23-8N містить 23% хрому і 8% нікелю. Чим вищий вміст нікелю, тим дорожчий сплав, і тим більше тепла він може безпечно витримати в складних умовах перегонів. Клапани з 21-4N витримують температуру до 850 °C. 21-4N зазвичай вважається матеріалом преміум-класу для високопродуктивних випускних клапанів. Сталь 21-4N також відповідає специфікації "EV8" Товариства автомобільних інженерів (SAE) для випускних клапанів.

Сплав 23-8N є покращеним сплавом на основі 21-4N. Було показано, що додавання азоту понад 0,2 мас.%, разом з достатніми добавками вуглецю, призводять до значного збільшення твердості при 760 °C у сталі 21Cr-9Mn-4Ni0,6C-0,1Si, частково за рахунок осадження карбонітридів [197,198].

Механізми, за допомогою яких добавки азоту впливають на мікроструктуру і механічні властивості нержавіючих сталей при підвищених температурах, були досліджені багатьма дослідниками [200]. Було досліджено зростання границі міцності та повзучості нержавіючої сталі 316LN, обробленої в розчині, зі збільшенням вмісту азоту з 0,07 до 0,22 мас. %, що автори частково пояснили осадженням дрібнодисперсних карбонітридів у сталях з 0,14 і 0,22 мас. % азоту. Також повідомлялося, що добавки азоту покращують термодинамічну стабіль-

ність мікроструктури, затримуючи виділення карбідів $M_{23}C_6$ [201,202]. Хоча виділення карбиду $M_{23}C_6$ може надати твердості, карбід, як правило, дуже збагачений Cr, що може призвести до виснаження Cr в об'ємі, що оточує карбід, що призводить до появи ділянок зі зниженою корозійною стійкістю. Додавання азоту також вважається корисним для довготривалої термічної стабільності та опору втомі [203].

Автори повідомили про підвищення границі плинності при збільшенні вмісту азоту, як показано на рисунку 1.10, що є корисним в діапазоні робочих температур випускних клапанів. Автори припустили, що ближнє впорядкування, як внаслідок сильної спорідненості між Cr і N, і, можливо, взаємодії N з Mn і/або Mo, є, ймовірно, основним фактором, що сприяє збільшенню границі плинності зі збільшенням вмісту N. Додавання N також вважається корисним для довготривалої термічної стабільності та опору втомі.

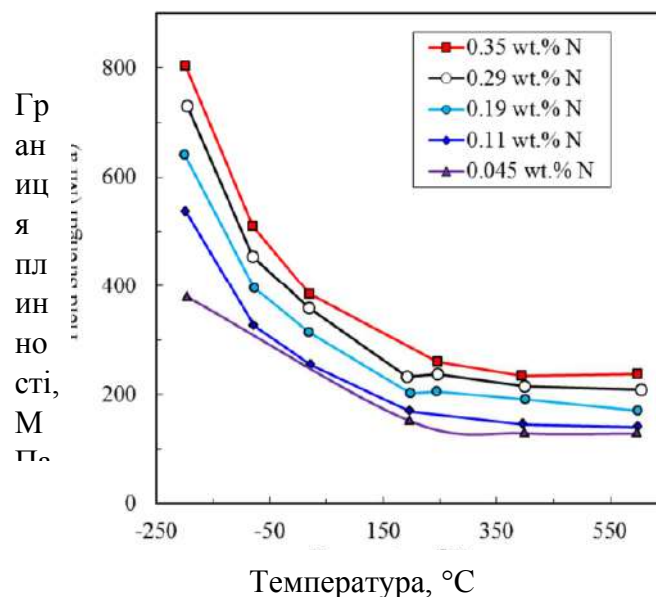


Рисунок 1.10 - Вплив температури та доз азоту на границю плинності при 0,2% зсуві аустенітної нержавіючої сталі з номінальним базовим складом 0,016C-26Cr-1,7Mn-32Ni-3,3Mo-0,45Si, мас. % [199,204].

Нікелеві сплави також широко застосовуються в умовах високих температур та агресивних середовищ. Деякі популярні нікелеві сплави включають

Inconel 751, Nimonic 80A (Європа), Inconel 718 (США), та ЖН65МВЮ (Україна). Inconel включає в себе ряд високотемпературних сплавів, які зазвичай містять 15% - 16% хрому і 2,4% - 3,0% титану. Нікелеві сплави широко застосовуються в умовах високих температур та агресивних середовищ, що дозволяє досягти високої стійкості до окислення та зносу.

Титанові сплави використовуються в ситуаціях, де важлива низька вага матеріалу, а також висока міцність та корозійна стійкість, що важливо для оптимізації ваги елементів. Титанові клапани є дорогою альтернативою клапанам з нержавіючої сталі, але це одна з найкращих модернізацій, яку можна зробити для стабільності та продуктивності клапанного механізму на високих обертах. Титан зменшує масу клапана майже на 40 відсотків, а це означає, що ви можете використовувати набагато менший тиск пружини для тих самих обертів двигуна або для більшої кількості обертів, використовуючи ті самі пружини, що й раніше. Зменшення ваги клапанів збільшує термін служби пружин і зменшує навантаження на коромисла, штовхачі, підйомники, кулачки і привід кулачків. Довговічність титану подібна до довговічності нержавіючої сталі. Але з точки зору вартості, титан значно перевершує будь-який сталевий сплав. Один титановий клапан може коштувати від \$70 до \$90 і більше. Тим не менш, титанові клапани використовуються в деяких серійних мотоциклетних двигунах.

Відомо, що деякі виробники титанових клапанів використовують один і той самий сплав для впускних і випускних клапанів. Зокрема, сплав 6242, який містить 6 відсотків алюмінію, 2 відсотки молі, 4 відсотки цирконію і 2 відсотки олова. Але для впускних і випускних клапанів використовується різна термічна обробка. Отже, саме термічна обробка визначає кінцеву міцність і твердість металу.

Титанові клапани, як правило, утримують більше тепла, ніж клапани з нержавіючої сталі, тому вони потребують модернізації сидел до певного типу мідного сплаву. Мідь забезпечує хорошу теплопровідність, що дозволяє виводити тепло з клапана, коли він закритий. Протягом багатьох років сидла з мідноберилієвого сплаву використовувалися з титановими клапанами. Мідно-

берилієві сплави зазвичай містять менше 3% берилію. Незважаючи на це, берилієвий пил є небезпечним і вимагає особливих запобіжних заходів при обробці сідел. Рекомендується використовувати мастильно-охолоджувальну рідину або разом з протипиловою маскою. В останні роки були розроблені безберилієві мідні сплави, які містять додатковий нікель і кремній, що забезпечують такі ж характеристики без ризику для здоров'я. Moldstar 90 - це безберилієвий мідний сплав, який можна використовувати з будь-яким типом клапана (титановим або нержавіючим) і будь-яким паливом, де необхідна висока тепловіддача.

Очевидно, що, внаслідок особливостей умов роботи, для впускних і випускних клапанів потрібні різні типи сплавів. Для впускних і випускних клапанів можна використовувати один і той же сплав (наприклад, 21-2N або 21-4N), але найкращі результати зазвичай досягаються, коли для впускних і випускних клапанів обрані різні сплави. Тому що випускний сплав, який має хорошу високотемпературну міцність і корозійну стійкість, насправді не потрібен на впускному клапані, і він може не мати такої твердості і зносостійкості, як впускний сплав при більш низьких температурах. Незважаючи на це, деякі компанії продають один і той самий сплав для впускних і випускних клапанів, тоді як інші пропонують різні сплави для впускних і випускних клапанів.

У результаті ретельного аналізу властивостей різних класів матеріалів для клапанів двигунів внутрішнього згорання можна зробити висновок, що вибір конкретного матеріалу повинен базуватися на конкретних умовах експлуатації та функціональних вимогах. Оптимальний вибір матеріалу сприятиме покращенню роботи двигуна та забезпечить високий рівень ефективності та надійності автомобільних агрегатів.

Азотування є процесом термічної обробки, під час якого азот вводиться у поверхневий шар металу. Це може покращити властивості сталі, зокрема її зносостійкість та теплостійкість. Важливо враховувати, що властивості сталей можуть варіювати в залежності від конкретного процесу азотування та умов термічної обробки.

Для підвищення експлуатаційних властивостей клапанів двигунів внутрішнього згорання застосовують різноманітні покриття. Клапани часто мають покриття штока та/або тарілки для покращення експлуатаційних характеристик. Стандартні клапани, як і клапани підвищеної продуктивності, зазвичай мають хромовані штоки, щоб захистити шток від задирання під час першого запуску двигуна. Хромоване покриття також допомагає зменшити знос ущільнень клапанів у двигунах, які використовують притискні ущільнення клапанів. Товщина хромованого покриття може варіюватися від тонкого шару від 0,0002 до 0,0007 мм до твердого покриття товщиною 0,001 мм. Саме покриття створює більш шорстку поверхню, що дозволяє утримувати масло на поверхні хрому і покращити змащення, зменшуючи знос.

При виробництві клапанів використовують також нітридні покриття замість хромування. Такі покриття наносяться в соляній ванні і захищають штоки від стирання і зносу. Азотування створює тонший, але твердіший поверхневий шар, який також дозволяє зменшити знос.

Для підвищення жаростійкості та зносостійкості клапанів зі сталі або інконелю можуть використовуватися різні покриття торців клапанів. Наприклад, стеліт - твердий наплавлений матеріал, який часто потрібен для випускних клапанів дизельних і бензинових двигунів, що працюють у важких умовах, а також може використовуватися в деяких системах з використанням високооктанового палива. Стеліт - це матеріал на основі кобальту з високим вмістом хрому. Хром (20-30 мас. %) у стелітних сплавах забезпечує стійкість до окислення/корозії, і виділяється у вигляді карбідів (переважно M_7C_3 у стелітах з високим вмістом вуглецю або типе M_6C і $M_{23}C$ у низьковуглецевих стелітах). Ці карбіди надають значної твердості мікроструктурі стеліту. Наприклад, значення твердості 1000 HV при 650 °C було виміряно для самого карбіду типу M_7C_3 (а не для об'ємної мікроструктури).

Він наноситься на поверхню клапана для захисту від окислення та корозії. Він також може бути використаний на наконечнику штока для додаткового підвищення зносостійкості.

Керамічні термобар'єрні покриття можуть також наноситися на сторону згоряння головки клапана, щоб відбивати тепло назад у камеру згоряння. Теорія полягає в тому, що тепловідбивне покриття допомагає клапанам працювати в більш м'яких умовах. Це допомагає випускним клапанам працювати довше, а також зменшує передачу тепла від впускних клапанів до вхідної повітряно-паливної суміші, що забезпечує більш щільну і потужну суміш. Тепло, що відбивається назад у камеру згоряння, також покращує ефективність згоряння та потужність.

1.3 Вплив технології термічної обробки на довговічність клапанів ДВЗ

Термічна обробка передбачає зміну механічних властивостей матеріалу шляхом стратегічного впливу на виріб процесу нагрівання або охолодження. Термічна обробка може мати багато цілей, включаючи підвищення міцності і пластичності, зниження залишкових напружень або поліпшення в'язкості матеріалу, і все це робиться з головною метою - поліпшити експлуатаційні характеристики і максимально продовжити термін служби виробу. Усі основні процеси термічної обробки сталі передбачають перетворення або розпад аустеніту.

Робочі характеристики клапанної сталі критично пов'язані з її термічною обробкою. Усі сталі - це сплави заліза та вуглецю, до яких додають інші легуючі елементи для надання певних властивостей. Сталі можуть бути пом'якшені або загартовані, а їх властивості можуть бути змінені за допомогою термічної обробки. Основне призначення термічної обробки полягає в тому, щоб полегшити або зробити можливими подальші технологічні операції. Першим етапом термічної обробки сталі є нагрівання сировини до температури вище температури аустенізації з метою утворення аустеніту, а потім швидке охолодження. Гартування та відпуск розвивають відповідні об'ємні та поверхневі властивості. Керування реакцією на термічну обробку є основною причиною додавання ле-

гуючих елементів до сталі. Звичайний цикл термічної обробки варіюється залежно від матеріалу. Мартенситні нержавіючі сталі зазвичай загартовують шляхом нагрівання до температури аустенізації від 925 до 1065° С, а потім охолоджують на повітрі або в маслі (ASM Handbook 2001). Час витримки, що застосовується для профілів товщиною 13 мм і нижче. При гартуванні мартенситних нержавіючих сталей час витримки становить від 30 до 60 хвилин, причому на кожен додатковий дюйм товщини достатньо 30 хвилин. Мартенситні нержавіючі сталі можна гартувати в маслі або на повітрі. Хоча гартування в маслі є кращим, для великих або складних секцій може знадобитися повітряне охолодження, щоб запобігти деформації або зартуванню тріщин. Аустенітні сплави для клапанів найчастіше обробляють розчином і старять. Процеси термічної обробки клапанних сталей En 52 і 21-4N показані на рисунку 1.10.

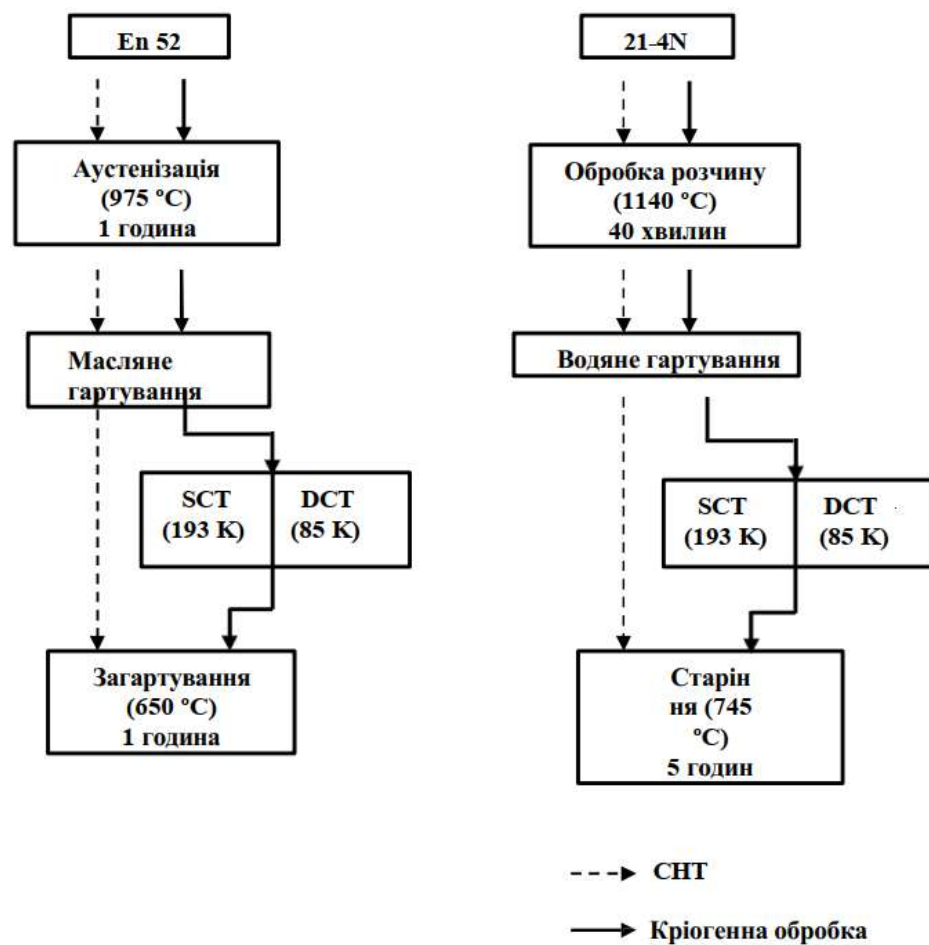


Рисунок 1.10 - Процеси термічної обробки для клапанних сталей En 52 та 21-4N

Типові аустенітні сплави клапанів, такі як 21-4N, 21-2N або 23-8N, обробляються розчином при температурі приблизно 1050-1200° С протягом 30-90 хвилин, поки карбіди та нітриди не розчиняться. Потім вони гартуються в холодній воді до набуття твердості 22-35 HRC. Згодом для цих сплавів проводять вікове загартування при температурі 700-850° С протягом 1-16 годин.

Для клапанної сталі En 52 процедура термічної обробки складається з аустенізації з наступним загартуванням в маслі (гартування) і відпуском. У процесі загартування клапанної сталі En 52 зразки нагрівають до 1248 К (975 °С), витримують протягом 1 години, а потім загартовують в маслі. Таке швидке охолодження від температури аустенізації викликає перетворення аустеніту, який є м'яким і пластичним, в мартенсит, який є дуже твердим і крихким. Це також пригнічує перетворення аустеніту на ферит і цементит. Таким чином, структура загартованої сталі складається в основному з тетрагонального мартенситу і деякої кількості збереженого аустеніту, що залежить від хімічного складу сталі. Це перетворення відбувається без дифузії і не залежить від часу, а хімічний склад не змінюється. Зміцнення сталі повністю залежить від утворення мартенситу. Він підвищує міцність на стиск і зносостійкість сталі, але сам по собі робить сталь дуже крихкою. Тому після гартування зразки одразу піддають відпуску. Це процес повторного нагрівання загартованої сталі до 923 К (650 °С) і витримки протягом 1 години, а потім охолодження на повітрі для надання їй в'язкості. Відпуск проводять для зменшення крихкості, навіть жертвуючи деякою твердістю і міцністю на розрив, для зняття внутрішніх напружень, а також для підвищення в'язкості і пластичності.

Аустенітна клапанна сталь (21-4N) - це аустенітна нержавіюча сталь на основі заліза, загартована осадовим методом. Тому її обробляють у розчині та гартують у воді, після чого відбувається загартування осадом. Процеси з нагріванням у розчині зазвичай застосовуються для металів, які мають спорідненість до вуглецю: заліза, алюмінію, титану, ніобію, молібдену і навіть азоту, а також низки інших металів. У цьому процесі матеріали нагрівають до температури

аустенізації і витримують протягом короткого періоду, поки ці сполуки розчиняються, а потім зразки загартовують у воді. При розчиненні зразки клапанної сталі нагрівають до 1413 К (1140 °С) і витримують протягом 40 хвилин, після чого охолоджують у воді. Після нагріву в розчині зразки піддаються процесу старіння. Це процес повторного нагріву нагрітої в розчині клапанної сталі до 1018 К (745 °С) і витримки протягом 5 годин з подальшим охолодженням на повітрі. У процесі старіння легуючі елементи дифундують через мікроструктуру і утворюють міжметалеві частинки. Ці міжметалеві частинки зароджуються і випадають з розчину і діють як зміцнююча фаза, тим самим збільшуючи міцність сплаву.

Кріогенна обробка виконується як додатковий процес до звичайної термічної обробки клапанної сталі з метою покращення її властивостей. Кріогенна обробка є продовженням звичайної термічної обробки для досягнення 100% мартенситу. Ця обробка змінює мікроструктуру матеріалу, що підвищує його міцність і зносостійкість. Кріогенна обробка - це процес охолодження матеріалу до екстремально низьких температур для отримання покращених механічних і фізичних властивостей. Для досягнення максимального ефекту кріогенну обробку слід проводити між процесами гартування та відпуску.

Після гартування зразків клапанної сталі En 52 за традиційною технологією, зразки поміщають безпосередньо в механічну морозильну камеру за температури 193К (-80° С) і витримують протягом години. Зразки виймають з морозильної камери і дають їм досягти температури навколишнього середовища. Потім вони загартовуються при 923 К (650° С) протягом години. Для клапанної сталі 21-4N розчинені зразки тримають у механічній морозильній камері при 193 К (-80° С) і витримують протягом години, а потім виймають і витримують при 1018 К (745° С) протягом 5 годин.

Матеріал випускного клапана повинен зберігати свої механічні властивості при високих температурах, володіти жаростійкістю і міцністю, не піддаватися місцевому гартуванню при охолодженні, не давати залишкових деформацій, не піддаватися корозії при високих температурах, мати високий опір зносу

і знімання. Для забезпечення вимог до забезпечення задовільної окалиностійкості і жароміцності сталі марок 4X9C2 і 4X10C2M в основному використовуються для виготовлення випускних клапанів. Ці сталі мають високі критичні точки, що важливо для клапанної сталі (сталь 4X9C2, температура точки A_{c1} - 900°C , а точки A_{c3} - 970°C ; сталь 4X10C2M, температура точки A_{c1} - 900°C , а точки A_{c3} - 950°C). Після штампування клапани піддають відпалу при $850\text{-}900^{\circ}\text{C}$ (НВ 197-241). Гартування клапанів проводиться подвійне – всього клапана і потім кінця стержня. Перше гартування (всього клапана) – від $1050\text{-}1100^{\circ}\text{C}$ з охолодженням в маслі, потім відпуск при $800\text{-}850^{\circ}\text{C}$ з охолодженням у воді (для запобігання відпускнуї крихкості), HRC 30-36.

Друге гартування (кінця стержня клапана на довжину 4-7 мм) від $1050\text{-}1100^{\circ}\text{C}$ з охолодженням в маслі, а потім відпуск $720\text{-}750^{\circ}\text{C}$ (HRC \geq 40). Нагрівання кінця стержня клапана для гартування проводиться струмами високої частоти або в установці для кінцевого нагрівання в електроліті. Для підвищення жаростійкості головку клапана доцільно піддавати алітуванню [5].

У зв'язку з тим, що умови роботи головки і стержня клапана різні, а стержень у процесі роботи не нагрівається, для економії жароміцної сталі клапани іноді виготовляють зварні: головка із сталі сильхром, а стержень з менш легваної сталі (як правило, із сталі, використовуваної для клапанів впускань).

Впускні клапани працюють при невисоких температурах. Вони повинні бути зносостійкі, а кінець стержня не повинен зніматись.

Впускні клапани виготовляють в основному із сталі 40X і 40XH. Клапани із сталі 40X гартують в маслі від $850\text{-}870^{\circ}\text{C}$ і відпускають при $600\text{-}630^{\circ}\text{C}$ протягом двох годин (HRC 30-36). Потім проводять гартування кінця стержня клапана від 820°C з охолодженням в маслі (HRC 40-45).

Іноді термічну обробку впускних клапанів проводить з використанням тепла після штампування.

При такому способі можуть бути два режими:

- безпосереднє гартування в маслі після штампування з попереднім підстужуванням до 800-850°C або без підстужування і відпуск при 600-630°C протягом двох годин;

- ізотермічне гартування за режимом: штампування поковок, перенесення їх в ізотермічне середовище (луг або селітра) з температурою 390-500°C, витримка 15 хв., охолодження у воді, промивка в розчині хромпіка і остаточна промивка у проточній воді.

1.4 Вплив азотування на експлуатаційні властивості конструкційних сталей

Азотування - це процес, в якому поверхневий шар сталі насичується азотом через дифузію. Цей процес значно підвищує твердість поверхневого шару, його зносостійкість, границю текучості та опір корозії в різних середовищах, таких як атмосфера, вода, пара тощо. Твердість азотованого шару значно перевищує твердість цементованого і зберігається при нагріванні до високих температур (450-500 °C).

Якщо основними вимогами до азотованого шару є висока твердість на поверхні та зносостійкість, то використовують сталь 38X2MЮА, яка містить 0,35-0,45% С; 1,35-1,65% Cr; 0,7-1,10% Al та 0,15-0,25% Мо, решта - Fe. Спільна присутність алюмінію, хрому та молібдену дозволяє збільшити твердість азотованого шару на поверхні до 1200 HV. Молібден усуває відпускну крихкість, яка може виникнути при повільному охолодженні від температури азотування. Алюміній надає азотованому шару підвищену крихкість. Тому все частіше використовують сталі, леговані Cr (1-3%), Мо (0,2-0,4%), V (до 1,0-1,2%). Ці сталі мають знижену твердість на поверхні 700-950 HV.

Під час азотування легувальні елементи сталі змінюють розчинність азоту в α -фазі, розчиняються в γ та ϵ -фазах, а також формують незалежні нітриди. Перехідні елементи вольфрам, молібден, хром, титан, ванадій, розчиняючись в фериті, підвищують розчинність азоту в α -фазі. Наприклад, при температурі 550°C, при вмісті в фериті молібдену 1,2% по масі вмісту азоту в α -фазі досягає 0,62%, а при 6,54% Мо - 0,73%. Азотування фериту, який містить 2,39% ванадію, при 500°C дозволяє отримати α -фазу з концентрацією 1,5% N, а при вмісті 8 % V - 3,0% N. Розчинність азоту в фериті легованої конструкційної сталі

38ХМЮА складає 0,2-0,5 %. Алюміній при низьких температурах азотування практично не змінює розчинність азоту в α -фазі.

Азотована сталь відрізняється високою зносостійкістю, навіть у порівнянні з цементованою та загартованою сталлю. В процесі азотування на поверхні створюються залишкові напруження стиснення, які досягають 600-800 МПа. Це сприяє збільшенню границі витривалості і переміщенню центру втомного руйнування під азотований шар. Границя витривалості гладких зразків збільшується на 30-40%, а при наявності концентрацій напружень - більше ніж на 100%. Сталь активно використовують для виробництва зубчастих коліс, гільз циліндрів, втулок, діафрагм та інших деталей. Технологічний процес азотування включає кілька етапів, які описані нижче.

Передбачається попередня термічна обробка заготовки, яка включає гартування та високотемпературний відпуск сталі для забезпечення підвищеної надійності та в'язкості в серцевині виробу. Відпуск проводять при температурі 600-700 °С, яка перевищує максимальну температуру наступного азотування та забезпечує отримання твердості, при якій сталь можна обробляти різанням. Структура сталі після цього відпуску - сорбіт.

При проведенні термічної обробки сталі 38ХМЮА необхідно враховувати, що вона схильна до знеуглецювання. В результаті цього заготовки повинні мати достатні припуски на оброблення (2-3 мм), які б гарантували повне знеуглецювання шару. Наявність знеуглецьованого шару недопустима, оскільки він служить причиною "лущення" азотованої поверхні. Гартування проводять при температурі 930-950 °С в воді (для великих виробів) або в маслі.

Для деталей з низькою жорсткістю перед фінальною механічною обробкою проводять стабілізаційний відпуск протягом 3-10 годин при 550-600°C з наступним повільним охолодженням. Сталь 38ХМЮА забезпечує найвищу твердість азотованого шару до HV 1100-1200. При азотуванні сталі 38ХМЮА при температурах нижче евтектоїдної на поверхні дифузійного шару утворю-

ється ϵ - фаза, яка при охолодженні перетерплює розпад з виділенням легованої γ -фази (Fe, M) N (рис. 1.11).

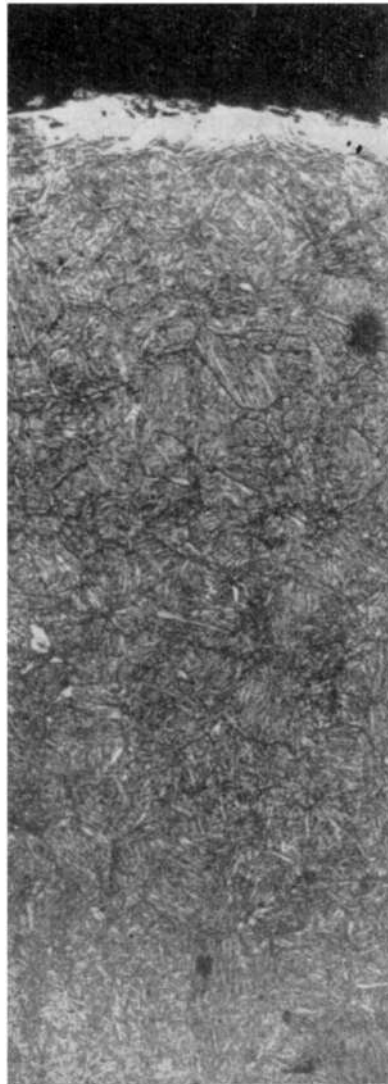


Рисунок 1.11 - Мікроструктура азотованого шару сталі 38ХМЮА, $\times 200$.

Неподалік від нітридного шару, який можна побачити під мікроскопом у вигляді білого нетравленого шару, знаходиться область, де рентгенівський аналіз виявляє трьохфазний стан $\epsilon + \gamma + \alpha$. Співіснування ϵ та α можна пояснити рухом ϵ - фази вздовж границь зерен. Більша частина шару, яка виявляється як більш сильно травлена зона, складається з азотної α -фази, збідненої легованими елементами, карбідів М С, залишкової γ -фази [(Fe,M) N] і, можливо, твердого нітрида легувальних елементів з решіткою В1. Це пов'язано з утворенням мета-

стабільного нітрида алюмінію, оскільки стабільний нітрид Al N має гексагональну структуру. Утворення нітрида зі структурою B1, навіть якщо стабільний нітрид має іншу решітку, пояснюється кристало-геометричним співвідношенням і пов'язаною з ним кінетикою формування нітридів. Концентрація азоту в α -фазі становить 0,3-0,5%. Дисперсні нітриди легувальних елементів при звичайних прийнятих збільшеннях мікроструктури не видно (рис. 1.12 та 1.13).

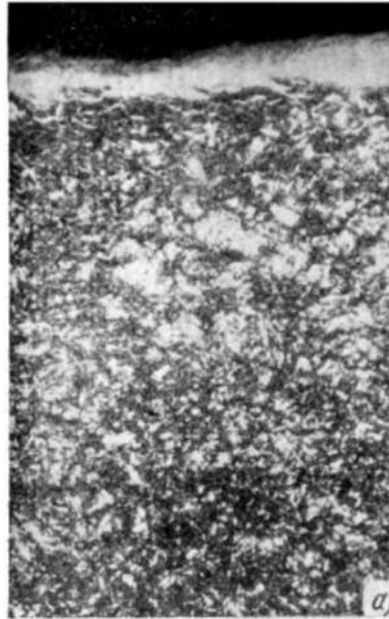


Рисунок 1.12 - Мікроструктура азотованого шару сталі 38XМЮА

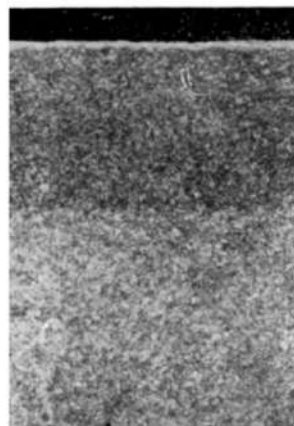


Рисунок 1.13 - Мікроструктура зони азотованого шару сталі з 38XМЮА з нітридною корочкою.

Температура і час азотування впливають на глибину азотованого шару (рис. 1.14, а) та його твердість (рис. 1.4,б). Максимальна твердість HV 1100-

1200 досягається при температурі 500-520°C. Зі зростанням температури твердість значно зменшується, і при температурі 600 °C вона становить HV 750-800. Висока твердість на поверхні азотованого шару досягається за короткий проміжок часу (15-30 хв), але варто врахувати, що при тестуванні на приладі Віккерса навіть при невеликому навантаженні (5МПа) твердість при коротких витримках виявляється зниженою. Це пояснюється тим, що алмазний індентор проникає в тонкий дифузійний шар. При практичному застосуванні процесу азотування не рекомендується використовувати дуже короткі витримки, оскільки завжди потрібно забезпечити розповсюдження високої твердості на певну глибину. Чим вища температура дифузії, тим менше часу потрібно для азотування, щоб отримати зміцнений шар. Мінімальна витримка при температурі 520°C повинна бути 8 - 10 годин, при 550°C – 5 - 6 год, при 600°C – 1 - 3 год.

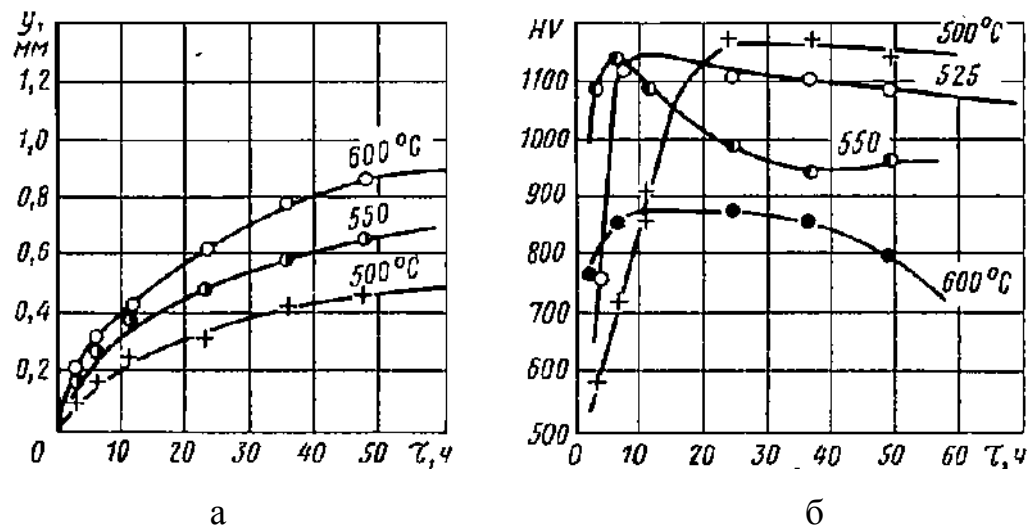
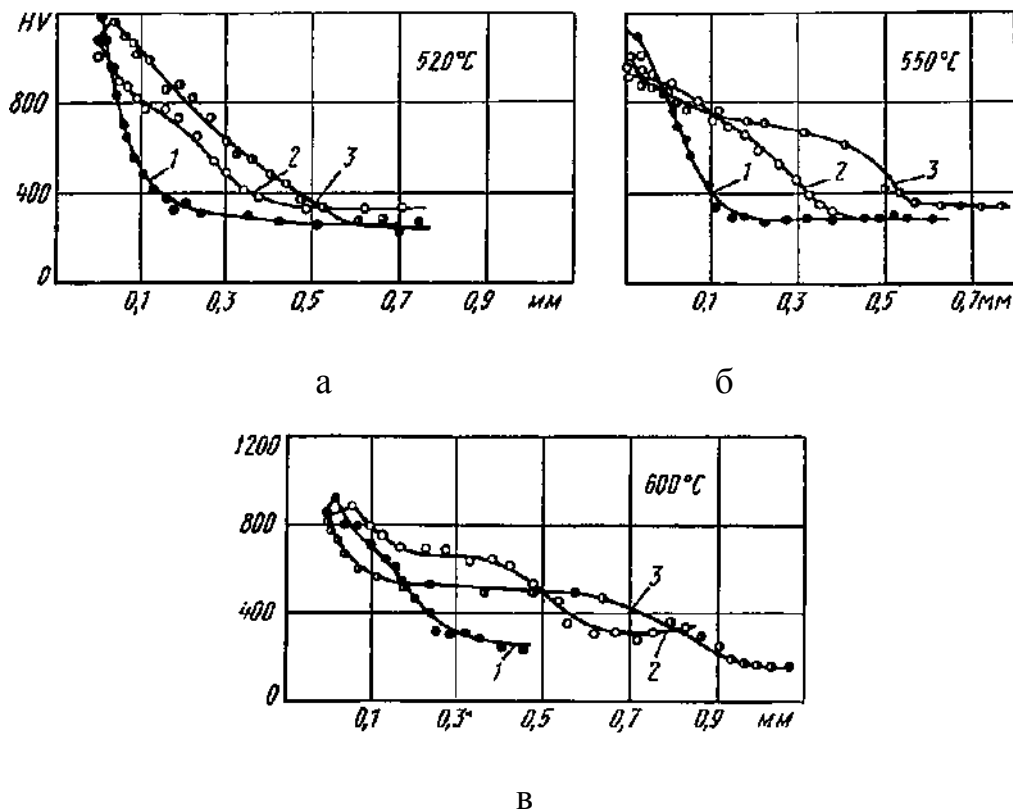


Рисунок 1.14 - Вплив температури і тривалість азотування на твердість і глибину азотованого шару на сталі 38ХМЮА

Загальна товщина шару при певній температурі змінюється відповідно до параболічного закону. Подовження тривалості більше ніж на 90 - 100 годин фактично не призводить до збільшення технічної товщини шару. Максимальна товщина шару для сталі 38ХМЮА не перевищує 1,0 мм. Товщина зони сумісних нітрідів при 520 °C не перевищує 0,02-0,025 мм, збільшуючись до 0,03-0,05

мм при азотуванні до 600°C. Розробка зони сумісних нітридів і особливо нітридної сітки є небажаною, оскільки вона супроводжується крихкістю шару. Однак слід врахувати, що при збільшенні температури азотування до 560-600°C, незважаючи на збільшення зони ϵ -фази, крихкість зменшується. Це пов'язано зі зменшенням вмісту азоту в ϵ -фазі з 9,5-11,0% при азотуванні при 500-520°C до 7-7,5% N при 600°C через інтенсивну дифузію його з поверхні в глибину матриці при високих температурах. Характеристика зміни твердості по глибині азотованого шару після насичення азотом при різних температурах представлена на (рис. 1.15).



а – 520 °C; б – 550 °C; в – 600 °C;

Рисунок 1.15 - Розподілення твердості по глибині дифузійного шару сталі 38XМЮА при різних режимах азотування

Вища температура азотування призводить до менш вираженого спаду твердості вздовж товщини азотованого шару. Результати азотування (твердість

і глибина шару) слабо залежать від попередньої термічної обробки. Як вже згадувалося, азотований шар на сталі 38ХМЮА має найвищу зносостійкість після насичення азотом при температурі, що перевищує евтектоїдну. Тому, щоб скоротити тривалість процесу та підвищити зносостійкість виробу зі сталі 38ХМЮА, рекомендується проводити азотування при температурі 620°C. Однак цей процес можна рекомендувати лише для виробів простої форми, які не схильні до деформації і не працюють в умовах втоми. Особливість азотованого шару полягає в тому, що він зберігає високу твердість при нагріванні до високих температур. Ця властивість азотованого шару розширює область його застосування і дає хороші результати у боротьбі зі зносом деталей, які працюють при підвищених температурах. Твердість по глибині азотованого шару зменшується з підвищенням температури випробування (рис. 1.16).

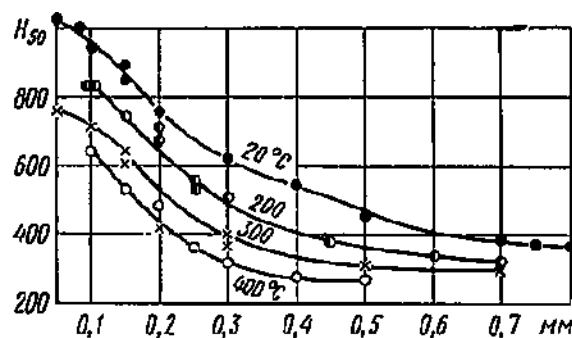


Рисунок 1.16 - Зміна мікротвердості по глибині дифузійного шару сталі 38ХМЮА в залежності від температури випробування

Вища температура азотування сталі 38ХМЮА призводить до менш вираженого спаду твердості по глибині азотованого шару. Хоча нагрівання сталі до 400°C супроводжується зниженням твердості, вона все ще зберігається на достатньо високому рівні $HV\ 600$. Подальше підвищення температури призводить до різкого падіння твердості, що не дозволяє використовувати азотовану сталь 38ХМЮА при температурах вище 400-450°C.

Коефіцієнт тертя азотованої сталі зменшується з 0,7 при 20°C до 0,1 при 600 °C, а знос є незначним і складає при 560°C на сталі 38ХМЮА 1,7 мг/м · см².

В результаті азотування значно підвищується задиростійкість як при кімнатній, так і при підвищених температурах (400-500°C). Азотування сталі 38ХМЮА при умовах видалення шліфуванням з поверхні крихкої ϵ -фази значно підвищує кавітаційну стійкість.

Для виготовлення дуже навантажених крупних деталей сталь 38ХМЮА не використовують. Повна прогартуваність цієї сталі досягається при діаметрі, який не перевищує 50 мм. Крім того, механічні властивості сталі 38ХМЮА порівняно невисокі.

Наявність в сталі 38ХМЮА алюмінію ускладнює технологію виробництва обробки та азотування сталі. Сталям з високим вмістом алюмінію властиві наступні дефекти металургійного характеру: стовбчатий злом, забрудненість неметалічними включеннями, утворення дрібних тріщин і волосовин в протаті. При гарячій механічній обробці сталі типу 38ХМЮА іноді проявляють схильність до перегріву, який викликає зниження опору крихкому руйнуванню.

Висока якість азотованого шару досягається в сталі, яка не містить доевтектоїдного фериту. При термічній обробці сталь 38ХМЮА досить чутлива до зміни вмісту в границях рамки. В залежності від співвідношення між вмістом вуглецю, хрому, молібдену та алюмінію сталь 38ХМЮА володіє недостатньою прогартуваністю або проявляє схильність до утворення тріщин при гартуванні у воді. Обумовлені підвищеним критичним інтервалом високі температури нагріву (950-970°C) при термічній обробці викликають інтенсивне знеуглецювання, а як наслідок цього - збільшення припусків, які видаляються при обробці різанням. Азотований шар на сталі 38ХМЮА, який містить алюміній на верхній границі, володіє більшою крихкістю. Після шліфування на азотованій поверхні сталі 38ХМЮА нерідко можна спостерігати точкове викришування шару на глибину до 0,05 мм. Частіше викришування утворюється по грубій нітридній сітці, яка виникає, якщо сталь має крупне зерно. Зниження температури гартування з 950 до 900°C зменшує схильність до утворення викришування, шліфо-

ваних тріщин та зколу шару. Чим менша твердість і вміст азоту в дифузійному шарі, тим вищий опір його крихкому руйнуванню.

Високочастотний нагрів, який веде до утворення дрібного зерна (8-12 балів), видаляє викришування на шліфованій поверхні. Чим менші стискаючі напруження, тим менша вірогідність утворення викришування.

Вироби із сталі 38ХМЮА в процесі азотування знаходять більшу схильність до деформації.

В тих випадках, коли вироби підлягають фінішній механічній обробці після азотування, може бути вигідним отримати дифузійний шар з пониженою твердістю на поверхні, але більш плавно спадаючій по його товщині твердістю.

Максимальне зміцнення (твердість HV 1000-1100) в сталі 38ХМЮА досягається при азотуванні при 500°C, коли утворюються одношарові по азоту виділення, повністю когерентні з решіткою твердого розчину.

При азотуванні при температурі 560°C твердість знижується до HV 900-950, а структура характеризується збільшенням розмірів нітридів до 50-100 Å. Легування сталі декількома елементами призводить до спотворення матриці азотованого шару, що в результаті призводить до досягнення більшої твердості азотованого шару, ніж при легуванні одним елементом. Комплексне легування дозволяє отримати високу твердість на аустенітних сталях. Висока твердість азотованого шару пов'язана не тільки з процесами виділення та утворення нітридів при азотуванні, але й з великою розчинністю азоту в фериті, легуваному перехідним металом. Чим вища ступінь насичення фериту азотом, тим більша його твердість. Розчинений азот призводить до розвитку високого рівня мікронапружень. Експериментально показано, що в період охолодження після азотування відбувається помітне підвищення твердості. Прийнято вважати, що чим вища твердість азотованого шару, тим краща зносостійкість. Найбільша зносостійкість не співпадає з максимальною твердістю (рис. 1.17).

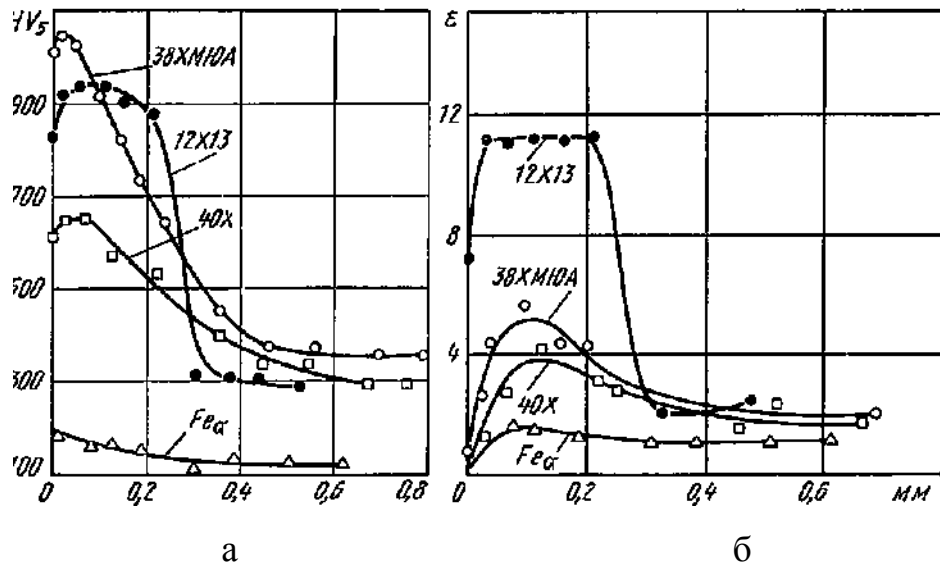


Рисунок 1.17 - Зміна твердості HV (а) та відносної зносостійкості ϵ (б) по глибині азотованого шару сталі 38ХМЮА та технічно чистого заліза.

Дослідження зносостійкості азотованого шару сталі 38ХМЮА показало, що найбільша зносостійкість не співпадає з максимальною твердістю і знаходиться на більшій глибині. З підвищенням температури насичення та тривалості процесу ця невідповідність зростає. Зносостійкість сталі 38ХМЮА, азотованої при більш високих температурах (620°C), значно перевищує зносостійкість тих сталей при 560°C , незважаючи на меншу твердість. Це свідчить про те, що процес азотування при вищих температурах може бути більш ефективним для підвищення зносостійкості, незважаючи на зниження твердості.

1.5 Вибір та обґрунтування термічної обробки клапанів ДВЗ

Розробка режимів основних та допоміжних операцій ТО. Режим ТО складається з наступних параметрів: швидкість, температура та час нагрівання, час витримки та швидкість охолодження. Правильний вибір основних параметрів

режимів ТО забезпечує отримання необхідної структури, властивостей та якості виробів при відповідній операції.

В процесі вибору оптимальних режимів термічної обробки для випускних клапанів двигуна, ключовим етапом є визначення матеріалу, з якого вони виготовлені. Зокрема, серед ряду доступних матеріалів, таких як 38ХГМ, Х45CrSi9-3, 21-4N, En 52, 4Х9С2, 4Х10С2М, важливо ретельно розглянути їхні хімічний склад та властивості. Аналіз хімічного складу матеріалів є ключовим кроком у визначенні їхньої придатності для використання в якості випускних клапанів двигуна. Наявність високоякісних сталей, відповідних міжнародним та національним стандартам на вітчизняному ринку надає можливість обирати в першу чергу серед вітчизняних марок (табл. 1.1). Такий підхід до вибору матеріалу для виготовлення випускних клапанів не тільки забезпечує використання відповідних режимів термічної обробки, але й сприяє розвитку вітчизняної промисловості та забезпеченню високих стандартів якості.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей, що застосовуються для виготовлення клапанів

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
38ХГМ	0.35- 0.42%	0.40-0.70%	0.17- 0.37%	0.80-1.10%	0.30-0.60%	0.15-0.25%
Х45CrSi9-3	0.42- 0.50%	≤1.00%	1.00- 2.00%	8.00-10.00%	≤1.00%	≤1.00%
21-4N	0.18- 0.25%	8.00-10.00%	2.30- 2.70%	20.00- 22.00%	3.50-4.50%	≤1.00%
En 52	0.10- 0.20%	1.00-2.00%	1.50- 2.50%	11.00- 13.00%	0.50-1.00%	≤1.00%
4Х9С2	0.35- 0.45%	0.20-0.50%	1.80- 2.20%	8.50-10.50%	≤1.00%	≤1.00%
4Х10С2М	0.35- 0.45%	0.20-0.50%	1.80- 2.20%	9.50-11.50%	≤1.00%	0.40-0.60%

Проаналізуємо механічні властивості даних сталей (табл. 1.2). Механічні характеристики сталей, які використовуються для виготовлення випускних клапанів у двигунах внутрішнього згорання, мають вирішальне значення для забезпечення надійності та довговічності в умовах високих температур.

Таблиця 1.2 – Порівняння механічних властивостей сталей, що застосовуються для виготовлення клапанів

Матеріал	Твердість (HRC)	Границя міцності (МПа)	Границя плинності (МПа)	Модуль пружності (ГПа)	Пластичність (%)	Ударна в'язкість (Дж/см ²)
38ХГМ	50-55	800-1000	650-800	210	15-20	20-30
Х45CrSi9-3	45-50	800-1000	650-800	210	12-15	15-25
21-4N	35-40	600-800	400-600	200	20-25	25-35
En 52	30-35	400-600	250-400	190	25-30	30-40
4Х9С2	60-65	1000-1200	800-1000	220	8-12	10-20
4Х10С2М	60-65	1000-1200	800-1000	220	8-12	10-20

Після докладного аналізу механічних характеристик різних сталей, з особливим акцентом на їхню придатність для використання в умовах високих температур, виявлено, що сталь 4Х10С2М виходить на передовий план та визначається як оптимальний матеріал для виготовлення випускних клапанів двигунів внутрішнього згорання. Сталь 4Х10С2М демонструє високий рівень міцності та стійкості при високих температурах, що робить її ідеальним вибором для компонентів, які експлуатуються в умовах високотемпературних режимів. Її механічні властивості враховують особливості роботи випускних клапанів, де важливо забезпечити не лише високий рівень міцності, але й стійкість до термічних впливів. Придатність сталі 4Х10С2М для використання в умовах високих температур підтверджує її висока термостійкість та здатність зберігати стабільні

механічні характеристики при екстремальних умовах. Крім того, враховуючи українське виробництво та доступність цього матеріалу на внутрішньому ринку, вибір сталі 4X10C2M забезпечує не лише високу якість, але й сприяє розвитку вітчизняної промисловості.

Отже, обираємо сталь 4X10C2M для виготовлення випускних клапанів двигунів, оскільки вона найбільше відповідає вимогам щодо міцності, термічної стійкості та доступності на ринку.

Азотування виробів із конструкційних, корозійностійких і жароміцних сталей частіше проводять за температури 500-600°C. Рекомендовані режими азотування різних деталей наведено в [15]. Вибір температури процесу азотування для виробів із конструкційних сталей визначається вимогами до товщини і твердості шару: за високої твердості та невеликої товщини шару рекомендується застосовувати низьку температуру, за великої товщини та меншої твердості застосовують вищу температуру; за великої товщини та високої твердості застосовують двоступеневий режим, спочатку за температури 500-520 °C і далі за 540-600 °C, що дає змогу різко скоротити тривалість процесу.

Азотування в бінарних атмосферах аміаку, розбавленого вуглець- і кисневмісними газами, зазвичай проводиться в інтервалі 550-570°C за короткочасним циклом протягом 1-12 год. Ці газові процеси (зокрема, нітрок, нікотирозування тощо) відтворюють будову і властивості дифузійного шару, характерні для рідких методів азотування в ціанідних і ціанід-ціанатних ваннах (зокрема, теніферпроцес) і застосовуються як замітники токсичних рідинних методів.

Найкраще поєднання міцності, в'язкості та розгаростійкості азотовані сталі такого типу мають після гартування з температури 1000 - 1050°C і відпускуна 560 - 580°C. Після гартування з температури 1100 - 1120°C і відпуску за 560 - 580°C твердість і міцність підвищуються, а в'язкість знижується.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Сталь 4X10C2M має високий вміст вуглецю (0.35-0.45%), що забезпечує високу твердість і міцність. Марганець (0.20-0.50%) покращує зварюваність сталі та її витривалість при високих температурах. Силіцій (1.80-2.20%) допомагає збільшити міцність сталі. Хром (9.50-11.50%) забезпечує високу корозійну стійкість, а також підвищує твердість і зносостійкість. Нікель ($\leq 1.00\%$) покращує загальну міцність сталі, а молібден (0.40-0.60%) допомагає збільшити твердість при високих температурах. Ці характеристики роблять 4X10C2M перспективною для виготовлення випускних клапанів.

Сталь 4X10C2M має високі механічні характеристики. Вона має високу міцність і твердість, що робить її стійкою до механічного зносу. Це особливо важливо для клапанів, які піддаються значному механічному навантаженню. Високий вміст хрому (9.50-11.50%) в 4X10C2M забезпечує відмінну стійкість до корозії. Сталь може витримувати вплив корозійних середовищ, таких як вода або вологе повітря, без значного пошкодження. Високий вміст вуглецю (0.35-0.45%) та хрому (9.50-11.50%) в 4X10C2M забезпечує високу зносостійкість, що дозволяє сталі витримувати тривале використання без значного зносу. Молібден (0.40-0.60%) в 4X10C2M допомагає збільшити твердість при високих температурах. Це робить її задовільною для використання в умовах високих температур, таких як клапани двигунів.

Для дослідження напружено-деформованого стану випускних клапанів було обрано чотири матеріали з бібліотеки Ansys, що найбільш відповідають реальним умовам експлуатації: сірий чавун, корозійностійкі сталі 316 та SS-304, жароміцний нікелевий сплав Inconel 718. Сірий чавун широко застосовується при виробництві випускних клапанів завдяки гарній ливарній здатності, теплопровідності та опору корозійному розтріскуванню. Нержавіючі сталі та

сплави на основі нікелю забезпечують поєднання міцності, пластичності і стійкості до корозії та окислення. Вибір матеріалів був обмежений наявністю їх у стандартній бібліотеці Ansys, однак відібрані марки є репрезентативними і дозволяють адекватно моделювати поведінку реальних конструкцій клапанів.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад матеріалів, що обрано для моделювання в середовищі Ansys

	Gray Cast Iron	316 Stainless Steel	Inconel 718	SS-304
C	2.7-4.0%	≤0.08%	≤0.08%	≤0.08%
Si	1.0-3.0%	≤1.00%	≤0.35%	≤1.00%
Mn	0.5-1.0%	≤2.00%	≤0.35%	≤2.00%
P	≤0.3%	≤0.045%	≤0.015%	≤0.045%
S	≤0.2%	≤0.030%	≤0.015%	≤0.030%
Cr	-	16.0-18.0%	17.0-21.0%	18.0-20.0%
Ni	-	10.0-14.0%	50.0-55.0%	8.0-10.5%
Mo	-	2.0-3.0%	2.80-3.30%	-
Co	-	-	1.00%	-
Ti	-	-	4.75-5.50%	-
Al	-	-	0.65-1.15%	-
Fe	Решта	Решта	≤0.20%	Решта

Зв'язок між хімічним складом, структурою і властивостями сталей є ключовим аспектом їхнього розуміння та інженерного використання. Хімічний склад визначає основні елементи, які утворюють сплав, такі як вуглець, кремній, марганець, хром, нікель і інші легуючі елементи. Ці елементи впливають на термодинамічні та кінетичні процеси при виготовленні сталі, формуючи її

структуру і, відповідно, властивості. В таблиці 2.2 представлено Механічні властивості матеріалів, що обрано для моделювання в середовищі Ansys.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості матеріалів, що обрано для моделювання в середовищі Ansys

Матеріал	Твердість (НВ)	Межа текучості (МПа)	Межа міцності	Відносне видовження	Модуль Юнга (GPa)	Ударна в'язкість (J/cm ²)
Gray Cast Iron	170-220	150 (макс.)	270 (макс.)	-	83	2.0
316 Stainless Steel	-	205 (мін.)	515	40	193	50.0
Inconel 718	-	-	930	-	200	-
SS-304	-	205 (мін.)	515	40	193	50.0

2.2 Дослідження мікроструктури

Вивчався азотовий шар на поверхні матеріалу за використання оптичного мікроскопу. Для проведення досліджень використовувалися зразки азотоваїої сталі, піддані процесам гартування та відпускання, включаючи азотування як етап термічної обробки. Оптичний мікроскоп Carl Zeiss був використаний для вивчення структури азотового шару на мікрорівні.

Дослідження включало аналіз товщини та розподілу азотового шару, виявлення еволюції мікроструктури під впливом термічної обробки та азотування. Використання оптичного мікроскопу дозволило отримати високороздільні зображення, які використовувалися для кількісної та якісної оцінки властивостей азотового шару, враховуючи його глибину та структурні особливості.

Методи дослідження включали попередню підготовку зразків, реалізацію процесів термічної обробки та азотування, а також мікроскопічний аналіз результатів. Ці дослідження спрямовані на отримання детального розуміння впливу термічної обробки та азотування на структуру азотого шару, що важливо для оптимізації властивостей матеріалу для конкретних технічних застосувань.

2.3 Дослідження мікротвердості

Для оцінки мікротвердості азотованого шару та серцевини матеріалу сталі використовувався метод Віккерса, за допомогою алмазного індентора.

Тестування здійснювалося на зразках, які піддавалися попередньому процесу азотування та термічної обробки. Зразки були ретельно підготовлені та розташовані так, щоб можна було провести вимірювання мікротвердості як у поверхневому азотованому шарі, так і в серцевині матеріалу.

В зоні азотованого шару проводилося профільне вимірювання мікротвердості для аналізу градієнта мікротвердості вздовж глибини шару. Це дозволило визначити ефективність азотування та встановити оптимальні параметри для досягнення бажаних механічних властивостей в азотованому шарі.

Отримані результати виявляються ключовими для розуміння впливу азотування на мікротвердість матеріалу, що може бути визначальним фактором у виборі оптимальних параметрів термічної обробки для досягнення певних механічних характеристик в азотованому шарі та серцевині матеріалу.

2.4 Моделювання в середовищі ANSYS

Для дослідження напружено-деформованого стану та теплових процесів у випускному клапані під час роботи двигуна внутрішнього згоряння було створено скінченно-елементну модель клапана в середовищі Ansys. Для дослідження впливу матеріалу на міцнісні характеристики випускних клапанів було проведено статичний структурний аналіз моделей у програмному комплексі Ansys з використанням таких матеріалів: сірий чавун, корозійностійкі сталі SS-304 та 316, жароміцний нікелевий сплав Inconel 718.

Геометрія моделі відповідає реальній конструкції випускного клапана і враховує усі особливості його форми. Для спрощення розрахунків не моделювалися дрібні деталі, такі як канавки під ущільнюючі кільця.

Модель клапана побудована з наступних типів скінченних елементів: тетраедричні елементи другого порядку для об'ємного моделювання тіла клапана; поверхневі елементи в зонах контакту та теплообміну.

Задано такі граничні умови: закріплення клапана; тиск газів з боку циліндрів по робочим поверхням клапана, конвективний теплообмін з газами і охолодженням по поверхням, початкова температура клапана.

Проведено статичний аналіз для визначення напружень та деформацій клапана від тиску газів при максимальному навантаженні. Виконано нестационарний тепловий аналіз для дослідження розподілу температур в клапані протягом циклу роботи двигуна та визначення максимальної температури.

Результати розрахунків дозволяють визначити найбільш навантажені зони клапана та оцінити вплив термічної обробки на його міцність і довговічність.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка технології хіміко-термічної обробки клапану двигуна внутрішнього згорання

3.1.1 Розробка режимів термічної обробки

Розробка режимів основних та допоміжних операцій ТО. Режим ТО складається з наступних параметрів: швидкість, температура та час нагрівання, час витримки та швидкість охолодження. Правильний вибір основних параметрів режимів ТО забезпечує отримання необхідної структури, властивостей та якості виробів при відповідній операції.

Розрахуємо час кожної операції технологічного процесу.

Розрахуємо час проведення гартування за наступною формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{охол}}$$

де $\tau_{\text{н}}$ – час нагрівання до заданої температури гартування, хв.;

$\tau_{\text{в}}$ – час витримки при технологічній температурі гартування, хв.;

$\tau_{\text{охол}}$ – тривалість охолодження після витримки при гартуванні.

Гартування проводять при температурі $1060 \pm 10^{\circ}\text{C}$ для сталі 4X10C2Mв печі СНЗА 5.10.32/10. Таким чином час витрачений на гартування розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{загГарт}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{охол}}$$

де $\tau_{\text{загГарт}}$ – час проведення операції гартування, хв.;

$\tau_{\text{н}}$ – час нагрівання до заданої температури гартування, хв.;

$\tau_{\text{в}}$ – час витримки при технологічній температурі гартування, хв.;

$\tau_{\text{охол}}$ – тривалість охолодження, хв.

Розрахуємо час нагрівання :

$$\tau_{\text{н}} = 44 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 0,96 = 0,98$$

Далі розрахуємо час який затрачено для охолодження виробу після гартування . Після витримки виріб охолоджується в олії. Швидкість складає 50°C/с.

Визначимо тривалість витримки при гартуванні із розрахунку: 85хв виробу. Звідси згідно довідковим даним $\tau_{\text{в}}$ дорівнює:

$$\tau_{\text{в}} = 1,48 \text{ год}$$

Тоді час витрачений на охолодження дорівнює:

$$\tau_{\text{охол}} = (1060 - 20)/50 = 0,0055 \text{ год.}$$

Загальний час, витрачений на гартування:

$$\tau_{\text{загГарт}} = 0,98 + 1,48 + 0,0055 = 2,47 \text{ год}$$

Відпускання проводять при температурі 600±10°C в печі СНЗА 5.10.32/7. Таким чином час витрачений на високотемпературний відпал розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{загВнт}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{охол}}$$

де $\tau_{\text{загВнт}}$ – час проведення операції високотемпературного відпалу, хв;

$\tau_{\text{н}}$ – час нагрівання до заданої температури відпуску, хв.;

$\tau_{\text{в}}$ – час витримки при технологічній температурі відпуску, хв;

$\tau_{\text{охол}}$ – тривалість охолодження, хв.

Розрахуємо час нагрівання :

$$\tau_{\text{н}} = 44 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 0,96 = 0,98 \text{ год}$$

Визначимо тривалість витримки при відпусканні із розрахунку 85хв виробу. Звідси згідно довідковим даним $\tau_{\text{в}}$ дорівнює:

$$\tau_{\text{в}} = 1,58 \text{ год}$$

Далі розрахуємо час який затрачено для охолодження виробу після високотемпературного відпалу. Після витримки виріб охолоджується на повітрі. Охолодження відбувається до кімнатної температури, і його швидкість складає $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Тоді час витрачений на охолодження дорівнює:

$$\tau_{\text{охол}} = (600 - 20)/5 = 0,032 \text{ год.}$$

Загальний час, витрачений на відпускання

$$\tau_{\text{загВнт}} = 0,98 + 1,58 + 0,032 = 2,59 \text{ год}$$

Азотування проводять при температурі $570 \pm 10^{\circ}\text{C}$ в печі СШАМ 6.12/7.

Таким чином час витрачений на азотування розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{загВнт}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{охол}}$$

де $\tau_{\text{загВнт}}$ – час проведення операції високотемпературного відпалу, хв;

$\tau_{\text{н}}$ – час нагрівання до заданої температури відпуску, хв.;

τ_B – час витримки при технологічній температурі відпуску, хв;

$\tau_{\text{охол}}$ – тривалість охолодження, хв.

Розрахуємо час нагрівання :

$$\tau_H = 44 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 0,96 = 0,98 \text{ год}$$

Визначимо тривалість витримки при азотуванні, згідно довідковим даним τ_B дорівнює:

$$\tau_B = 10 \text{ год}$$

Далі розрахуємо час який затрачено для охолодження виробу після азотування. Після витримки виріб охолоджується на повітрі. Охолодження відбувається до кімнатної температури, і його швидкість складає $5^\circ\text{C} / \text{с}$.

Тоді час витрачений на охолодження дорівнює:

$$\tau_{\text{охол}} = (560 - 20) / 5 = 0,027 \text{ год.}$$

Загальний час, витрачений на азотування

$$\tau_{\text{загВвт}} = 0,98 + 10 + 0,027 = 11 \text{ год}$$

На основі детального аналізу та розрахунків, було визначено оптимальний час термообробки для сталі 4X10C2M. Враховуючи цей час, було розроблено технологічну карту термічної обробки (табл. 3.1). Ця карта включає всі необхідні параметри: температуру гартування, швидкість охолодження, температуру відпускання та час тримання. Використання цієї технологічної карти дозволяє забезпечити високу якість обробки, що, в свою чергу, покращує механічні властивості сталі та її стійкість до зносу. Таким чином, розробка технологі-

чної карти на основі розрахованого часу термообробки є важливим кроком у покращенні якості кінцевого продукту.

Таблиця 3.1 -Технологічна карта технологічного процесу термічної обробки клапану ДВЗ зі сталі 4X10C2M

Ескіз виробу			Технічні вимоги			
			Матеріал		Мікроструктура	
			4X10C2M		Поверхня	M+A _{зал} +нітриди
					Серцевина	Сорбіт
№ операції	Назва операції	Обладнання	Режим нагріву температура, °C; час. хв. середовище та його витрати	Режим охолодження середовище, його температура, склад; тривалість, хв.	Умови обробки і контролю	
1	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, лінійка			Хімічний склад, розміри, 3% от партії	
2	Очищення виробів перед термічною обробкою (промивання просушування)	Мийна машина	Промити деталі у водному розчині кальціно-ванної соди, t=60°C			
3	Гартування	СНЗА-8.16.5/10 Діапазон 0...1300 °C Термопара ТПП	t=(1060±10)°C ендогаз τ _г =1,48год.	t=20°C τ _{охол} =0,0048 год Олія індустріальна І-20	Контроль температури і часу витримки за термограммою, витрати і склад середовища, контроль садки	
4	Промивка	Мийна машина, термометр ТН-4		Заготовки промити в водному розчині кальцінової соди, t=60°C		

Продовження таблиці 3.1

5	Контроль	Твердомір ТК-2М, мік- роскоп			Перевірити тве- рдість на 1-2 деталях, контроль мікро- структури.
6	Відпускання	СНЗА- 8.16.5/7 Прибор КСП-3 Діапазон 0...1000 °С Термопара ХА	$t=(600\pm 10)^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{г}}=1,58\text{год.}$ Ен- догаз	$t=20^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{охол}}=0,032$ год, на повітрі	Контроль темпе- ратури і часу витримки за термограммою, витрати і склад середовища, ко- нтроль садки
7	Промивка	Мийна ма- шина, тер- мометр ТН-4		Заготовки про- мити в водно- му розчині ка- льцінованої соди,	
8	Зачистка	Наждачний станок			Зачистити 10% деталей для пе- ревірки твердос- ті. Глибина зачист- ки -0,1мм
9	Контроль	Твердомір ТК-2М, ви- мірюва- льний ін- струмент			Перевірка тве- рдості на 10% деталей, конт- роль геометрії деталей.
10	Азотування	СШАМ 6.12/7	$t=(570\pm 10)^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{г}}=10$ год., ро- боче середови- ще- дисоціова- ний аміак 25- 30%	до 200 °С охо- лодження з піччю, далі на повітрі	Контроль темпе- ратури і часу витримки за термограммою, витрати і склад середовища, ко- нтроль садки
11	Зачистка	Наждачний станок			Зачистити 100% деталей для пе- ревірки твердос- ті. Глибина зачист- ки -0,1мм
12	Контроль	Твердомір ТК-2М, мік- роскоп			Перевірити тве- рдість на 100% мікроструктура, глибина шару

Графік термічної обробки клапану ДВЗ представлений на рисунку 3.1.

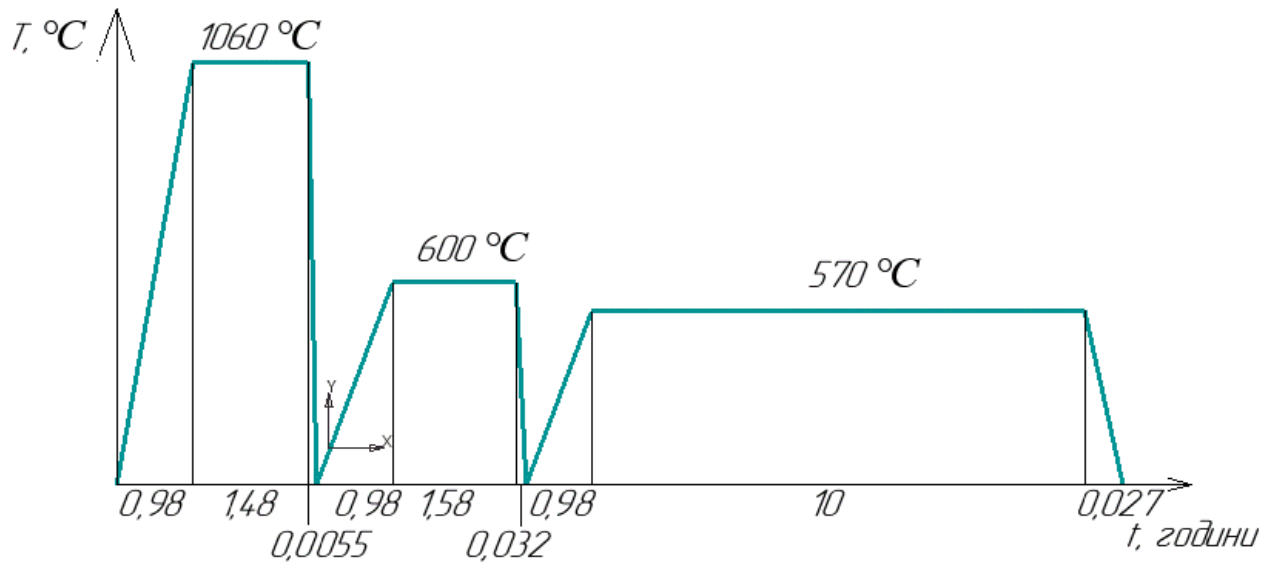


Рисунок 3.1 - Графік термічної обробки клапану ДВЗ

3.1.2 Вибір обладнання

Обладнання термічного відділення поділяється на основне та допоміжне.

До основного відносяться обладнання, яке застосовується для виконання технологічних операцій, пов'язаних з нагріванням: печі; мийна машина; гартівний бак.

До допоміжного обладнання відносяться: установки для приготування контрольованих атмосфер; засоби механізації – кран-балки, тельфери, тощо.

У відділенні, де буде проходити хіміко-термічна обробка клапанів ДВЗ буде використовуватись декілька видів обладнання (печі СНЗА, СШАМ, мийна машина, гартівний бак), передбачено встановлювати дане обладнання згідно порядку термічної обробки.

Агрегат СНЗА створений на основі електричної камерної печі, який використовується для здійснення операцій гартування. В агрегаті передбачена до-

даткова камера (форкамера), в якій знаходиться гартівний бак. Вироби безпосередньо після нагрівання потрапляють на операцію охолодження з необхідною швидкістю. В форкамерах підтримується захисна атмосфера під час завантаження та вивантаження садки, що дозволяє захистити поверхню нагрітих виробів від окислення. Також в цих печах передбачена система роликів на поду печі, на підйомному столі форкамери, а також механізм проштовхування виробів.

Піч СШАМ використовується для азотування. Піч уявляє собою циліндричний муфель, зроблений з жаростійкої сталі, що обігривається зовні електричними нагрівальними елементами. Муфель зверху закривається кришкою, яка має товстий шар ізоляції.

Печі складаються з наступних вузлів:кожух;футеровка;циркуляційний вентилятор;роликові напрямні;теплогенеруючі вузли;механізм підйому заслінки.Футеровка печі знаходиться всередині кожуха. Складається вона з одного шару товщиною 250мм. На поду печі знаходяться ролики та опори роликowego ходу. Роликовий хід призначений для пересування піддона з садкою в відповідному положенні під час термообробки, а також для полегшення завантаження та вивантаження садки з виробами.Циркуляційний вентилятор складається з корпусу, валу, системи водяного охолодження підшипників, приводу та захисного щитка приводу. Нагрівальна частина виготовлена з вогнетривких матеріалів, в яких знаходяться нагрівачі. Стіл переміщається за допомогою гідравлічного циліндру. Форкамера призначена для повного очищення садки від повітря перед завантаженням в нагрівальну камеру. Очищення садки здійснюють для попередження забруднення робочої атмосфери. Також форкамера призначена для охолодження садки без контакту з повітрям.

В термічному відділенні для підйому, завантаження і розвантаження важких виробів і деталей застосовуються кран-балки. Кран-балки є основним вантажопідйомним устаткуванням виробничих цехів, відкритих і закритих складів, загального призначення з електричним приводом, являє собою різновид підйомного мостового типу кранів. По конструкції вони одно балочні. Вони використовуються також для внутрішнього цехового транспортування вантажів і для під-

йому устаткування при монтажі і ремонті. Іноді за допомогою кран-балок виконують транспортні операції при термічній обробці (наприклад, вивантаження виробів і деталей з печі, занурення їх в гартівний бак).

В однобалочних кранах замість візка зазвичай встановлюється тельфер. В деяких конструкціях управління тельфером і пересування крана проводиться підвісним кнопковим механізмом з підлоги цеху. Такі крани називаються електричними кран – балками. Тельфер - підвісний вантажопідйомний пристрій (таль) з електричним приводом, забезпечує значну швидкість як підйому вантажу по вертикалі, так і переміщення його уздовж балок.

3.1.3 Технічний контроль, попередження та виправлення браку

Технічний контроль виявляється не лише як оцінка якості термічної обробки виробів, але також як систематичне спостереження за додержанням технологічних параметрів на всіх етапах виробничого процесу. Необхідність тщательної розробки засобів контролю та визначення періодичності його проведення стає істотним аспектом. Під час моніторингу температурних режимів з використанням спеціальних приладів, важливим є встановлення інтервалу часу, протягом якого реєструються показники цих приладів. Періодичному контролю також підлягає розташування виробів під час завантаження, рівномірність прогрівання садки, якість ізоляції, та стан поверхні під час хіміко-термічного оброблення, а також склад атмосфери, температура рідини для гартування, в'язкість олії для гартування тощо. Кожен аспект контролю якості термічної обробки виробів вимагає докладного опису, включаючи методи здійснення контрольних операцій, складання ескізів, визначення глибини зачищення при контролі твердості та точне вказання місця проведення контролю на ескізі виробу або на зразках-свідках.

Детальний аналіз областей, які піддаються хіміко-термічній обробці, передбачає установлення глибини шару насичення та вивчення структури для виявлення карбідної сітки в поверхневому шарі, розміру і місць виділення карбідних включень, а також присутності аустеніту залишкового та інших параметрів. Після цементації, додатковий аналіз залучає оцінку якості виробу на основі виявлення "темної складової", яка свідчить про наявність невивітого дефекту виробу та інших параметрів.

Таблиця 3.2 - Види дефектів при термічній обробці деталей з алюмінієвих сплавів, та заходи по їх попередженню і усуненню

№ п/п	Вид дефекту	Причина виникнення дефекту	Заходи по запобіганню появи дефекту	Заходи по усуненню дефекту
1	Перепал і високотемпературне окислення	1.Перевищення заданої температури гартування. 2.Порушення складу пічної атмосфери.	1.Перевіряти температуру в різних зонах печі. 2.Знижувати швидкість нагріву. 3.Використовувати ступінчастий нагрів під гартування.	Дефект не виправний.
2	Неповне і нерівномірне гартування	1.Нерівномірний нагрів. 2. Недостатній час витримки.	Контроль за дотриманням параметрів технології термічної обробки	Дефект може бути усунен після проведення повторної термічної обробки.
3	Короблення	1.Нерівномірний і швидкий нагрів. 2.Незадовільне укладання деталей в печі. 3.Дія залишкових напружень.	1.Використання спеціальних пристосувань для гартування деталей. 2. Зміна гартівного середовища.	Рихтування виробів з наступною термічною обробкою по раціональному режиму.
4	Гартівні тріщини	1) нагрівання із високими швидкостями в наслідок яких виникає великий перепад температур за перетином; 2) різке охолодження із завищеною швидкістю; 3)конструкційні	1) дотримання технології підігріву; 2)використання м'яких гартівних середовищ;	3)аналіз технологічності виробу при конструкційній розробці

		особливості виробів		
--	--	---------------------	--	--

Таблиця 3.3 – Види дефектів при термічній обробці деталей з поліпшуваних сталей, та заходи по їх попередженню і усуненню

Вид дефекту	Спосіб виявлення	Можлива причина	Заходи попередження	Способи усунення
Тріщини	Візуально чи спеціальними методами	Швидке охолодження	Зменшити швидкість охолодження за рахунок вибору середовища охолодження	Дефект невірний
		Значне перегрівання при гартуванні	Дотримуватися режимів технологічного процесу, наладити обладнання.	
Знеуглецювання	Контроль мікротвердості та структури поверхні	Нагрівання в знеуглецьованому середовищі	Проводити нагрівання в захисних атмосфера	Дефект невірний
Сильне окислення (окалина на поверхні деталі)	Візуально	Нагрівання в окислювальній атмосфері	Проводити нагрівання в захисних атмосфера	Дефект невірний (змінюється розмір та геометрія)
		Підвищений час витримки при нагріванні	Дотримуватися режимів технологічного процесу	
Крупнозерниста структура	Контроль мікроструктури	Перегрів або завищений час витримки	Дотримуватися режимів технологічного процесу. Провести наладку чи ремонт устаткування	Відпал для подрібнення зерна та гарт з дотриманням режимів
Оплавлення	Візуально	Перегрів	Дотримуватися режимів технологічного процесу. Наладити устаткування	Дефект невірний
		Неправильне розташування виробів при нагріванні	Не розташовувати вироби близько до нагрівачів	

Продовження таблиці 3.3

Плямиста твердість	Контроль мікроструктурі та твердості	Неоднорідна температура аустенізації	Забезпечення рівномірності температури в робочому просторі печі. Рациональне розташування виробів в садці	Високотемпературне відпускання з наступною термообробкою за технологією
		Нераціональне розташування виробів в садці	Використання гартівних баків з пристроєм для забезпечення необхідної циркуляції масла	
Підвищен твердість	Контроль твердості	Занижена температура відпуску. Недостатній час витримки при відпуску	Дотримуватися режимів технологічного процесу	Повторити відпуск за технологією
Занижена твердість	Контроль твердості, перевірка на наявність залишкового аустеніту	Недогрів або мала витримка при гартуванні	Дотримуватися режимів технологічного процесу	Провести відпал та повторити термічну обробку

3.1.4 Структура та мікротвердість азотованого шару

У процесі азотування на поверхні деталей сформувалися дифузійний поверхневий шар і нітридна зона, для яких характерні висока твердість, задиростійкість і зносостійкість. Дифузійний шар характеризується відсутністю тендітної нітридної сітки і має дрібнодисперсні нітридні включення в зміцненій матриці (рис. 3.2). Загальна глибина шару 0,36 - 0,4 мм, поверхнева твердість становить 1010 – 1050 МПа.

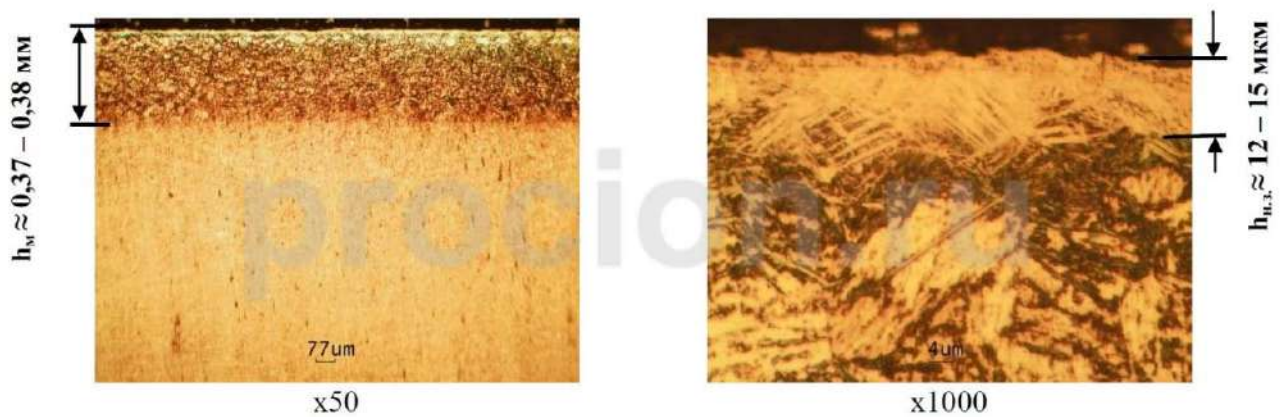


Рисунок 3.2–Мікроструктура азотованого шару

Таблиця 3.4 - Характеристики азотованого шару

Твердість поверхні, МПа	1010 - 1050
Глибина азотованого шару за мікроструктурою, h_m , мм.	0,36 - 0,37
Глибина азотованого шару за мікротвердістю, h_c , мм.	0,40
Товщина нітридної зони $h_{н.з.}$, мкм.	12 - 15

Отже, в результаті азотування на поверхні деталей сформувався дифузійний шар завтовшки 0,36-0,4 мм з дрібнодисперсними нітридними включеннями без крихкої нітридної сітки, а також нітридна зона товщиною 12-15 мкм. Це забезпечило високу поверхневу твердість 1010-1050 МПа, зносостійкість та задиростійкість деталей. Таким чином, азотування дозволило суттєво покращити

експлуатаційні характеристики поверхневого шару деталей за рахунок оптимізації товщини та структури дифузійної та нітридної зон.

3.2 Моделювання, статичний і тепловий аналіз випускного клапана двигуна внутрішнього згоряння

Для аналізу напружено-деформованого стану та теплових процесів було побудовано скінченно-елементну модель випускного клапана в середовищі Ansys з використанням експериментальних даних щодо геометрії та матеріалу реальної конструкції. Модель адекватно відображає форму клапана та враховує такі деталі, як профіль робочих фасок, кути фасок сідла, радіуси галтелей та закруглень (рис. 3.3). Для спрощення розрахунків в моделі не відтворювалися дрібні елементи - канавки під ущільнюючі кільця, отвори під болти тощо. Їх відсутність не впливає на загальну картину напружено-деформованого стану та розподіл температур.

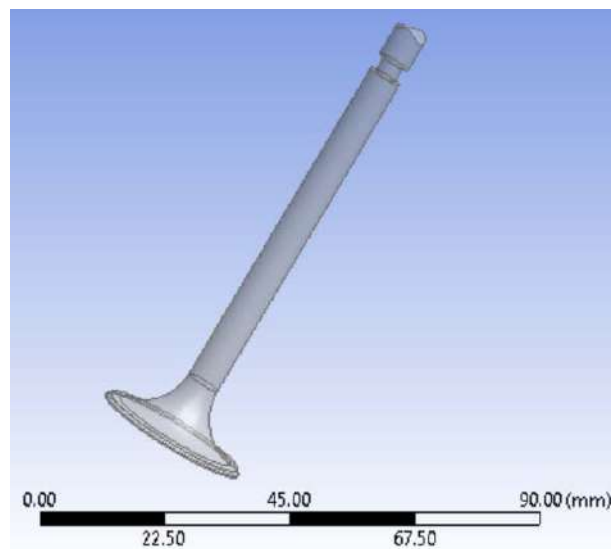


Рисунок 3.3 – Модель клапана випускного

Для дискретизації моделі було побудовано сітку скінченних елементів з використанням тетраедричних елементів другого порядку для об'ємного моделювання тіла клапана та поверхневих елементів у зонах контактної взаємодії

(рис. 3.4). Розмір елементів підібрано з урахуванням складної геометрії моделі та особливостей навантаження окремих ділянок під час роботи клапана. Щільність сітки збільшена в області фасок, що контактують з сідлом, оскільки саме ці ділянки є найбільш навантаженими. Загальна кількість елементів склала 10992, що забезпечує необхідну точність розрахунків.

Для моделювання реальних умов роботи випускного клапана було задано такі граничні умови:

- до верхньої поверхні головки клапана прикладено рівномірно розподілений тиск газів у циліндрі, що становить 6 МПа, на верхню частину клапану відбувається тиск величиною 1354 Н. Це максимальне навантаження в робочому циклі двигуна.

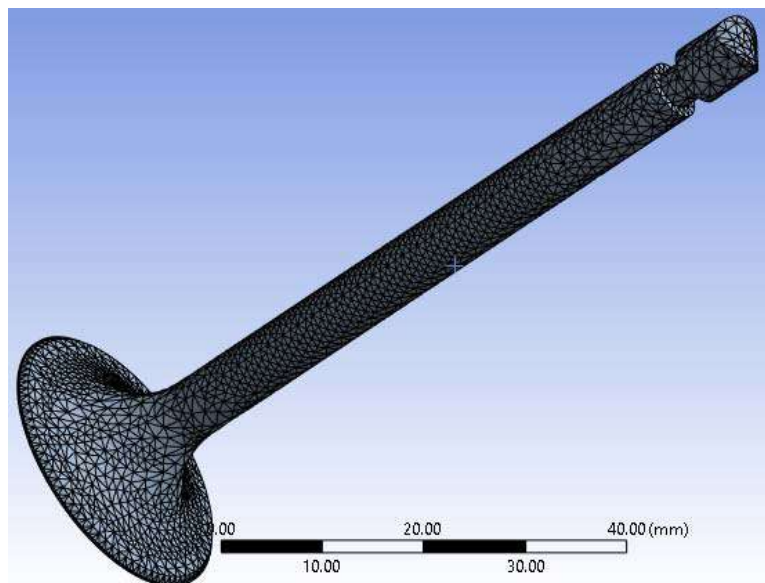


Рисунок 3.4 – Згенерована сітка

- на тій самій поверхні головки задано розподіл температур, що відповідає реальним - 750°C в центрі зі зниженням 500°C на краю штоку.

- середня частина стрижня клапана жорстко закріплена, що моделюється шарнірним затисканням: $dX = dY = dZ = 0$.

Після задання граничних умов було проведено статичний аналіз для визначення полів напружень та деформацій у клапані від дії заданих навантажень.

Для задання граничних умов використано такі інструменти в Ansys Mechanical: закріплення верхньої частини стрижня клапана реалізовано за допомогою опції Fixed Support, яка фіксує всі ступені вільності відповідних вузлів сітки. Рівномірно розподілене навантаження 1034,8 Н на торцеву поверхню головки створено інструментом Force з заданим значенням сили та прикладеним до відповідної поверхні в дереві моделі (рис. 3.5).

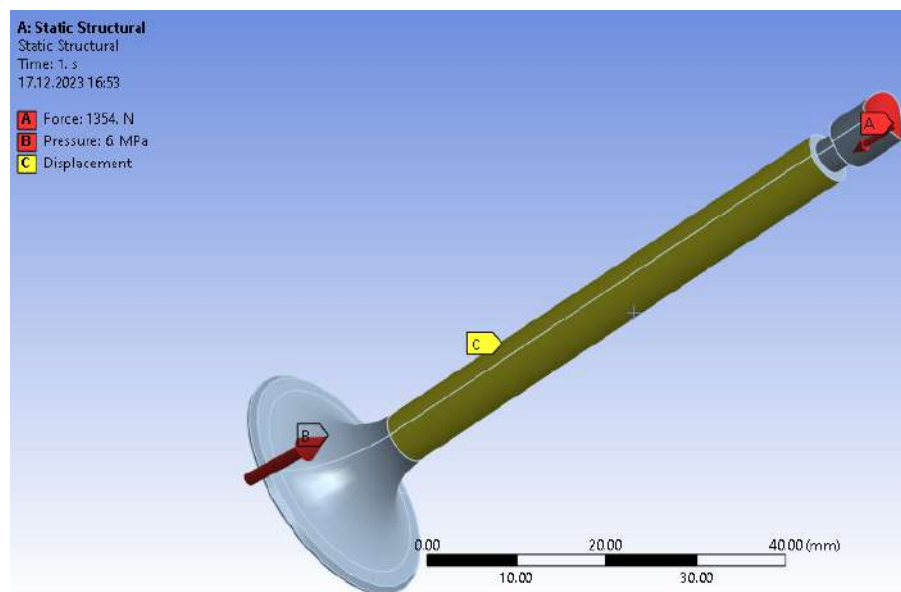
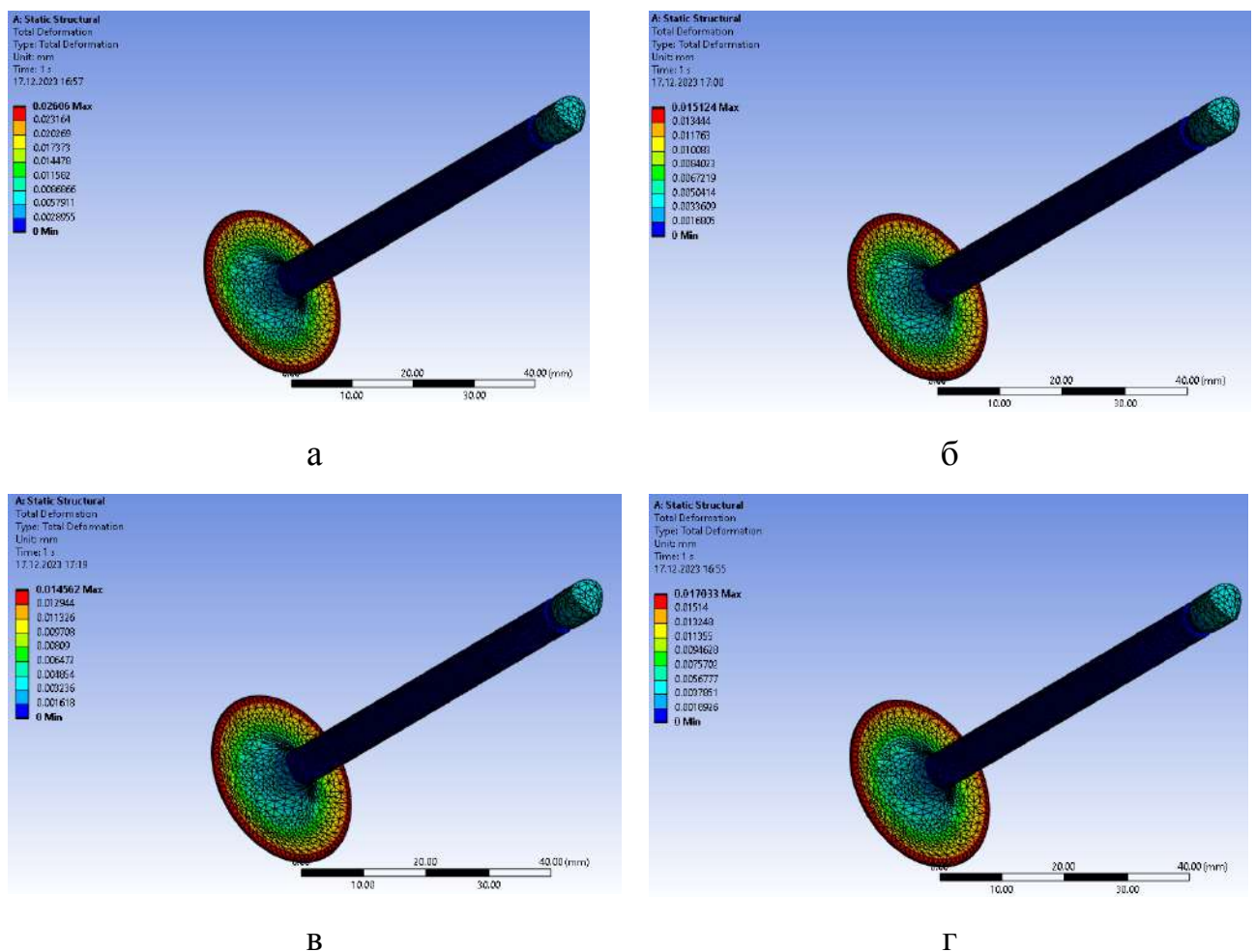


Рисунок 3.5 – Прикладені граничні умови

Для адекватного моделювання напружено-деформованого стану випускного клапана було використано стандартні бібліотеки матеріалів в середовищі Ansys. Зокрема розглядалися такі матеріали, що застосовуються при виробництві випускних клапанів: Gray Cast Iron, 316 Stainless Steel, Inconel 718, SS-304. Температура навколишнього середовища була задана як постійне значення 650°C, що відповідає температурі випускного тракту двигуна при максимальних навантаженнях. Така методика дозволила вивчити вплив матеріалу клапана на його міцнісні характеристики (рис. 3.6-3.8).

У процесі статичного аналізу в Ansys ми зосереджувалися на детальному вивченні різноманітних аспектів напружено-деформованого стану випускного клапана. Основними параметрами, які були враховані в аналізі, є види дефор-

мацій та розподіл напружень в структурних елементах клапана. Зокрема, ми звертали увагу на критичні зони, такі як області фасок, контакт з сідлом та точки кріплення, де передбачалося найбільше зусиль та де можлива виникнення втомних пошкоджень. Результати аналізу дозволять визначити оптимальний матеріал для виготовлення випускного клапана, а також спроектувати оптимальну геометрію, що мінімізує ризики виникнення деформацій та втомних пошкоджень при експлуатації в реальних умовах.



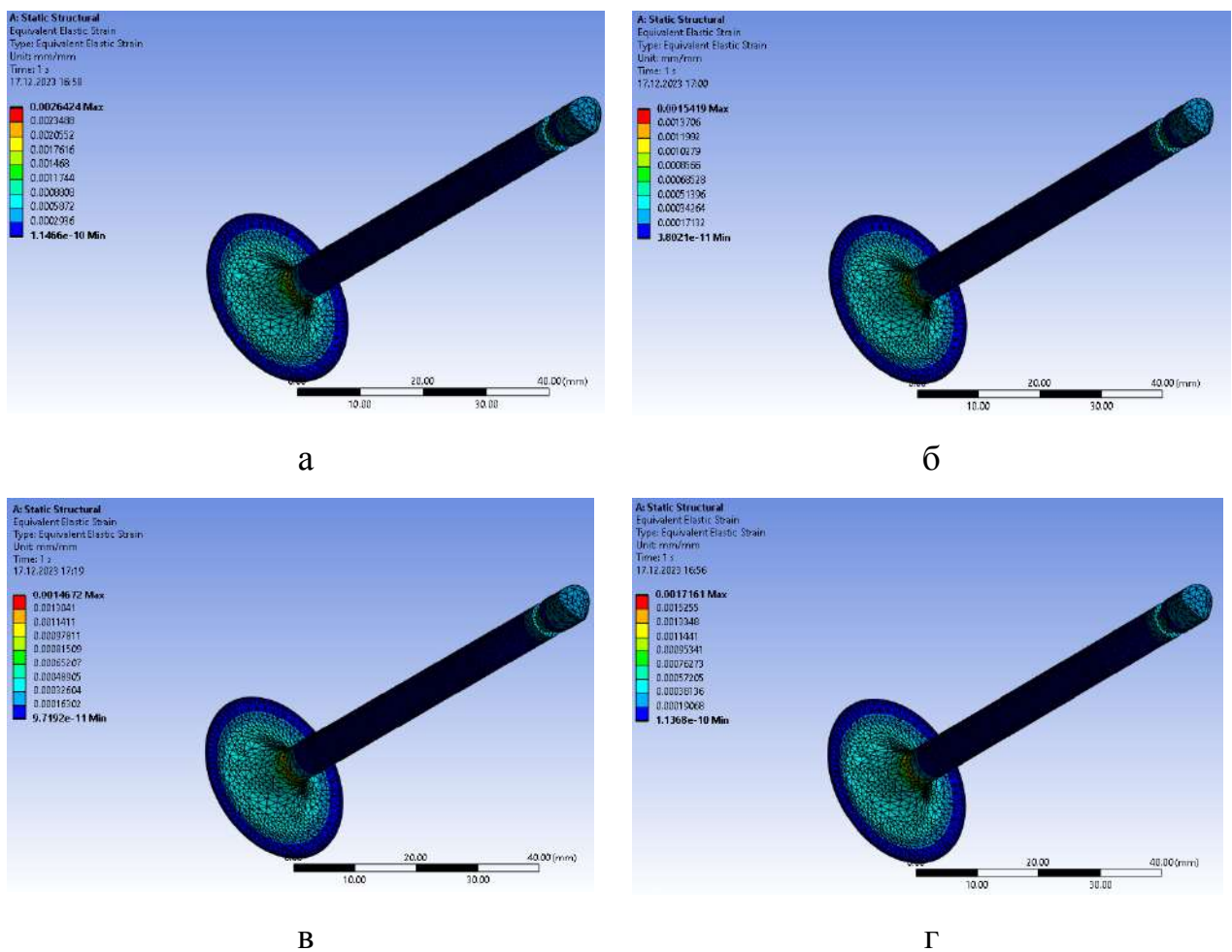
а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.6 - Загальний розподіл деформацій на штоку та головці клапана при кімнатній температурі

Жорстке закріплення верхньої частини стрижня клапана в моделі Ansys призводить до деяких погрешностей розрахунків в зоні закріплення через над-

мірні напруження. Тому для аналізу напружень та деформацій беруться результати в зоні робочої частини клапана, віддаленій від ділянки шарнірного затиску. Це дозволяє уникнути впливу граничних ефектів та отримати найбільш коректні значення (табл. 3.5).

Сенс полягає в тому, що через особливості закріплення розглядаємо напружено-деформований стан не біля самого закріплення, а на деякій відстані від нього.

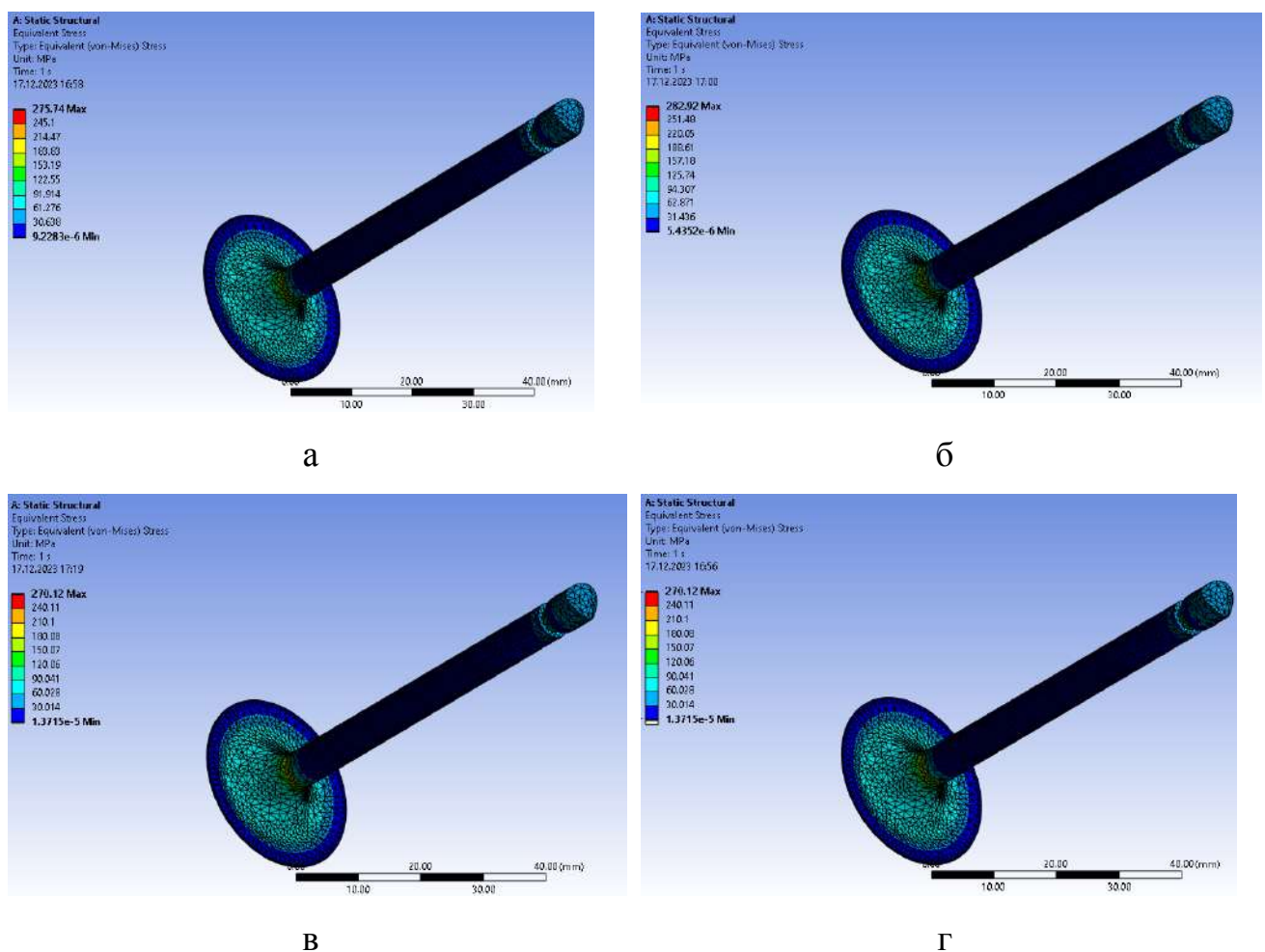


а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.7 - Загальний розподіл еквівалентної пружної деформації на штовку та головці клапана при кімнатній температурі

На основі наведених в таблиці результатів статичного структурного аналізу випускних клапанів з різних матеріалів можна зробити наступні висновки:

найбільші значення максимальної сумарної деформації спостерігаються у випадку використання сірого чавуну (0,026 мм) та сталі 316 (0,015 мм). Найменші деформації притаманні клапанам із сталі SS-304 та сплаву Інконель 718 (0,0145-0,017 мм). Тенденція аналогічна і для показника еквівалентної пружної деформації - чавун демонструє найвищі значення (0,00088), сталь SS-304 - найнижчі (0,00049). Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом майже не відрізняються для різних матеріалів і становлять 60-63 МПа. Це свідчить про достатній запас міцності в усіх випадках.



а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.8 - Загальний розподіл еквівалентного напруження за Мізесом на штоку та головці клапана при кімнатній температурі

За результатами моделювання встановлено, що найбільші значення деформацій і найнижчі показники жорсткості притаманні клапану з сірого чавуну через його порівняно невисокі характеристики міцності та пластичності. Натомість сталі SS-304, 316 та сплав Inconel 718 з легуючими елементами Ni, Cr, Mo демонструють вищу міцність при збереженні пластичності завдяки формуванню аустенітної структури зміцненої твердого розчину.

Таблиця 3.5 - Результати статичного структурного аналізу для чотирьох різних матеріалів при кімнатній температурі

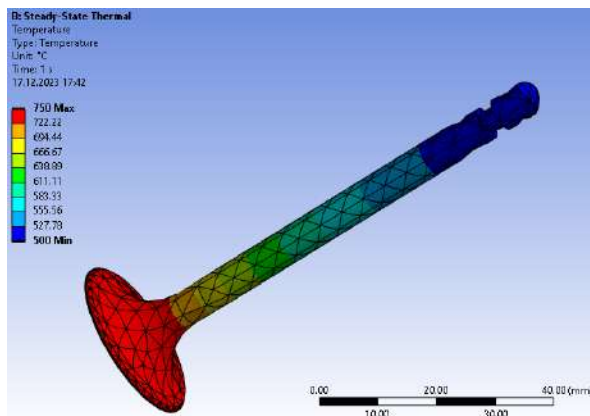
Матеріал	Максимальна сумарна деформація, мм	Максимальна еквівалентна пружна деформація	Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Grey Cast Iron	0,026	0,00088	61
316 Stainless Steel	0,015	0,00051	63
SS-304	0,0145	0,00049	60
Inconel 718	0,017	0,00057	60

Отже, оптимальним матеріалом для випускних клапанів є корозійностійкі сталі та нікелеві сплави, міцнісні переваги яких зумовлені особливостями хімічного складу та мікроструктури.

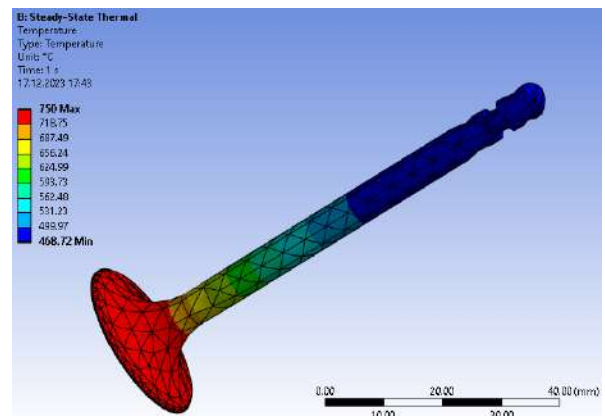
Проведений аналіз дозволив виявити особливості механічної поведінки випускних клапанів з різних матеріалів за кімнатної температури та встановити оптимальний варіант. Проте реальні умови експлуатації клапанів пов'язані зі значним термічним навантаженням від гарячих газів. Тому наступним етапом дослідження є проведення аналізу впливу підвищених температур на напружено-деформований стан випускних клапанів та порівняння характеристик різних матеріалів з точки зору термостійкості та жароміцності при експлуатації в складних температурних умовах.

Таким чином визначатиметься не лише статична міцність, але й роботоздатність клапанів в реальних режимах навантаження (рис. 3.9-3.11).

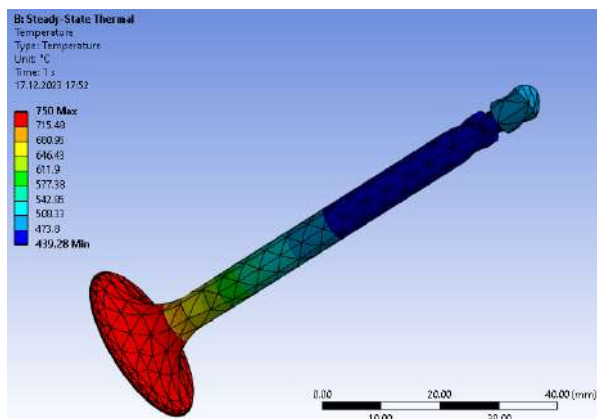
Ефективність роботи випускних клапанів двигунів внутрішнього згоряння суттєво залежить від їх теплового стану, оскільки конструкція зазнає значних термічних навантажень. Тому важливим етапом дослідження був аналіз впливу матеріалу клапана на його теплові характеристики за допомогою моделювання в середовищі Ansys. Розглядалися такі матеріали: сірий чавун, сталі SS-304, 316 та сплав Інконель 718. За результатами аналізу повного та направленого теплових потоків побудовано порівняльну таблицю, яка дозволяє зробити висновки щодо оптимального матеріалу з точки зору теплового навантаження (табл. 3.6).



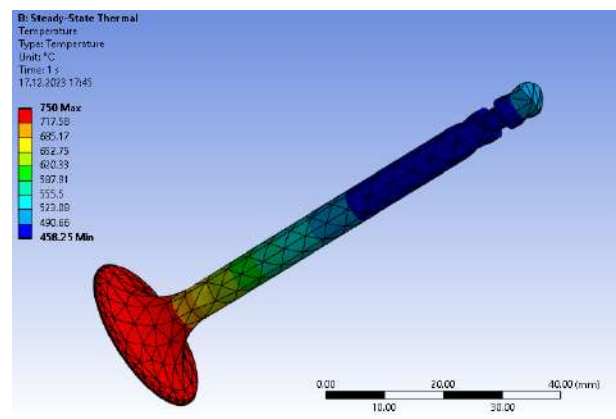
а



б



в

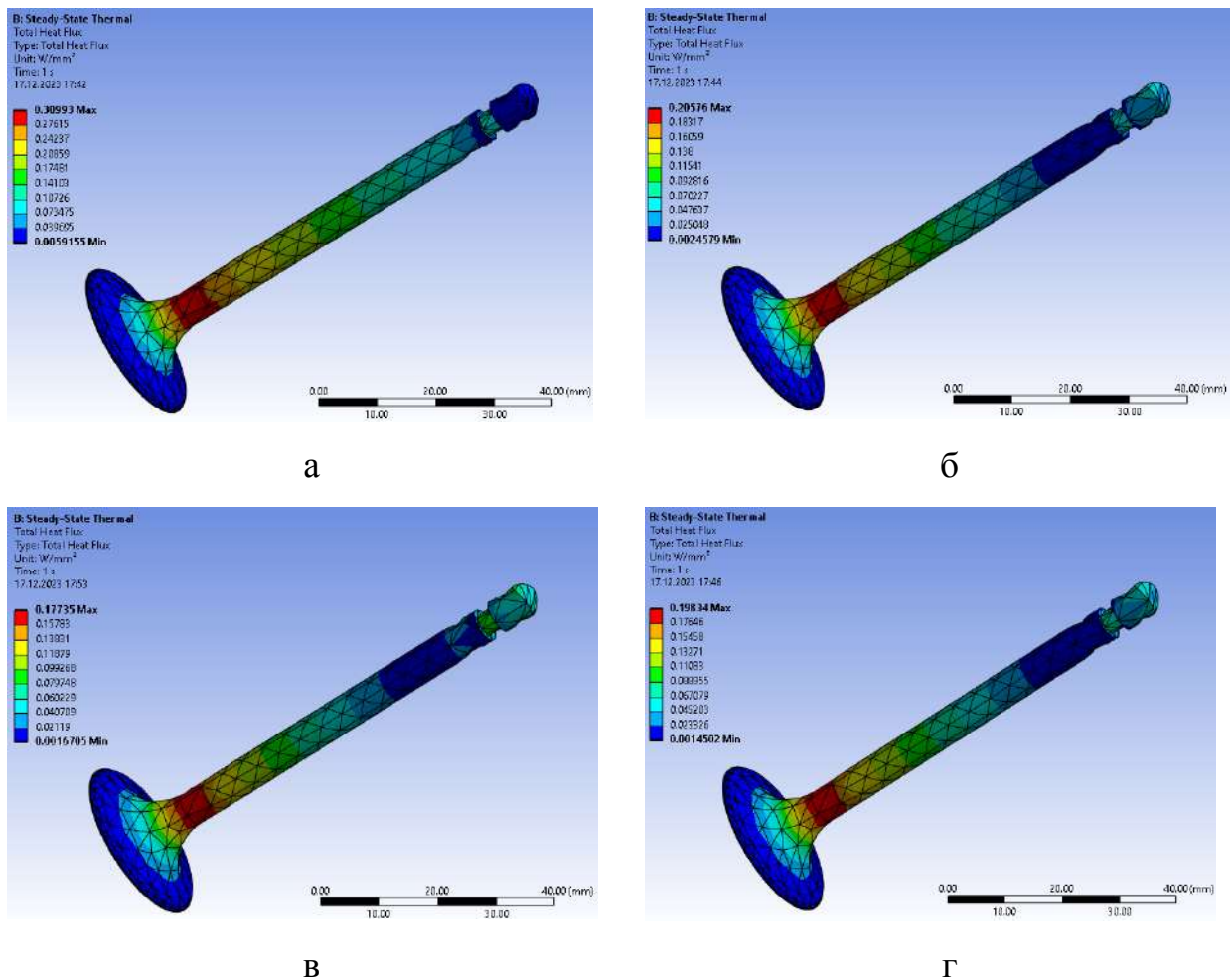


г

а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.9 - Загальний розподіл температури на штоку та головці клапана

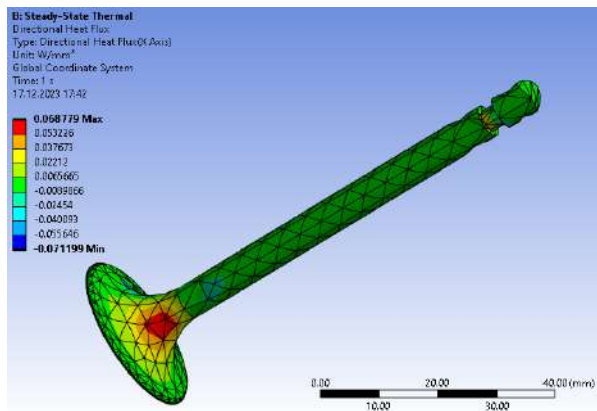
Для комплексної оцінки теплового стану випускних клапанів слід аналізувати як загальну величину теплового потоку через поверхню, так і його складову, що проходить перпендикулярно цій поверхні. Повний тепловий потік характеризує сумарне термічне навантаження на деталь та необхідну інтенсивність охолодження. В той же час направлена (перпендикулярна) складова потоку визначає глибину прогріву матеріалу та градієнти температури, що впливають на термічні напруження. Отже, для вибору оптимального матеріалу клапана та режимів його експлуатації доцільно дослідити обидві ці характеристики.



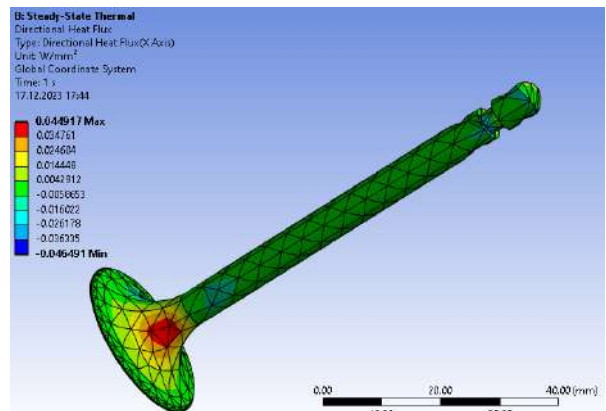
а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.10 – Повний тепловий потік на штоку та головці клапана

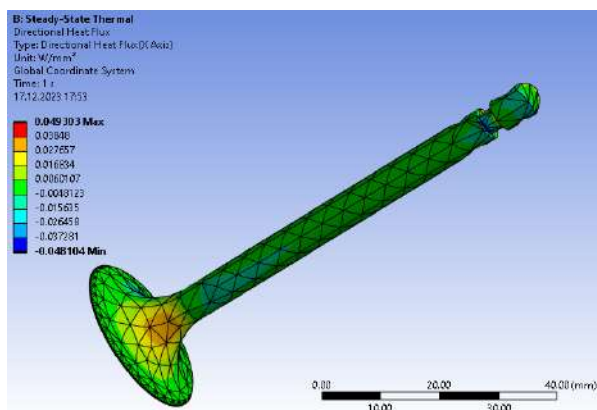
Проаналізувавши наведені результати термічного аналізу випускних клапанів з різних матеріалів, можна зробити наступні висновки: сірий чавун демонструє найвищі значення як повного теплового потоку ($0,31 \text{ Вт/мм}^2$), так і направленного теплового потоку ($0,069 \text{ Вт/мм}^2$).



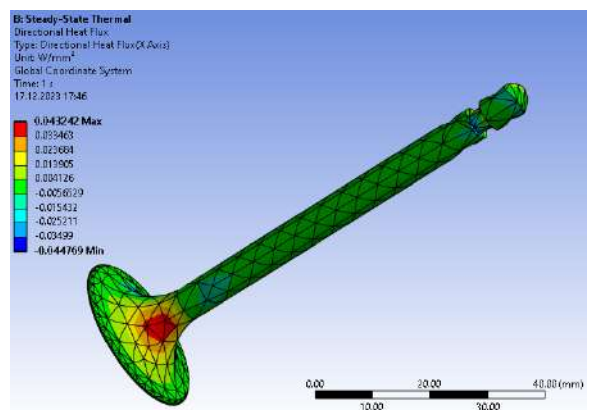
а



б



в



г

а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.11 – Направлений тепловий потік на штоку та головці клапана

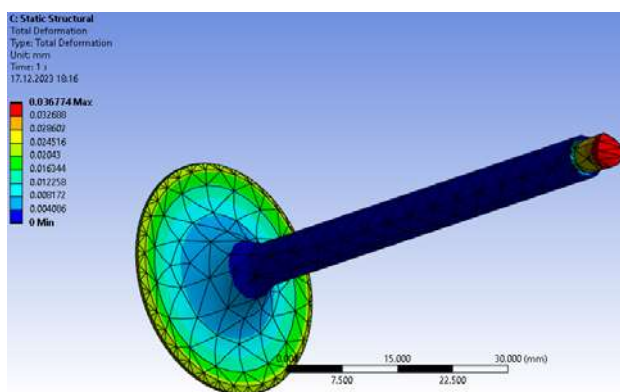
Таблиця 3.6 - Результати термічного аналізу для чотирьох різних матеріалів

Матеріал	Повний тепловий потік, Вт/мм^2	Направлений тепловий потік, Вт/мм^2
Grey Cast Iron	0,31	0,069

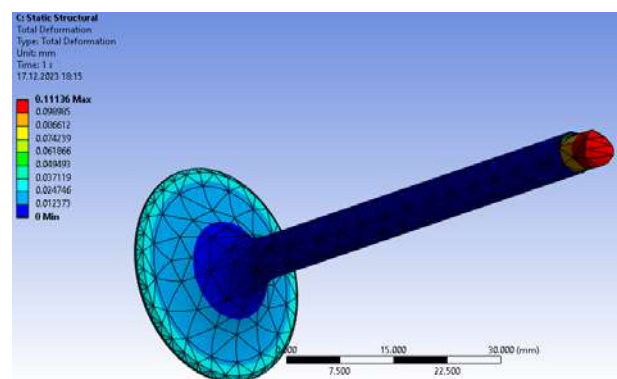
316 Stainless Steel	0,21	0,045
SS-304	0,18	0,049
Inconel 718	0,20	0,043

Це свідчить про гірші теплоізоляційні властивості чавуну порівняно з іншими матеріалами. Найменші теплові потоки спостерігаються для сталі SS-304 (0,18 та 0,049 Вт/мм²), що вказує на її кращу здатність протистояти тепловим навантаженням. Сталь 316 та сплав Інконель 718 показують близькі помірні значення теплових потоків. Отже, за термостійкістю виділяється сталь SS-304. В той час як сірий чавун є найгіршим матеріалом для роботи в умовах підвищених температур.

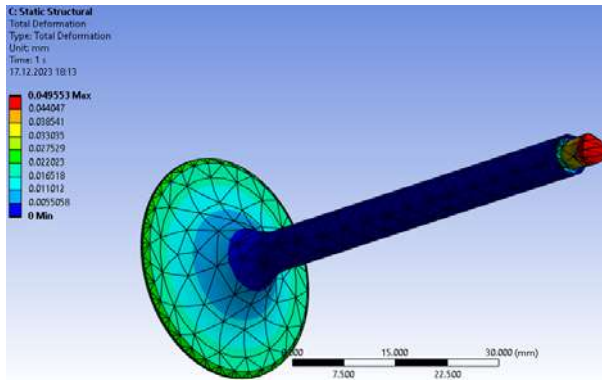
Проведене моделювання термічної поведінки дозволило встановити переваги сталі SS-304 за теплостійкістю в умовах експлуатації випускних клапанів. Наступним кроком є дослідження міцнісних характеристик клапанів з цього матеріалу з урахуванням впливу температури. Для цього на основі побудованої скінченно-елементної моделі буде проведено статичний структурний аналіз клапана зі сталі SS-304 з температурою головки 750°C (рис. 3.12-3.14).



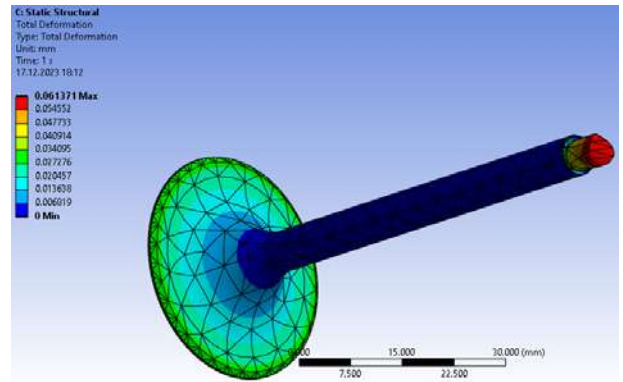
а



б



В

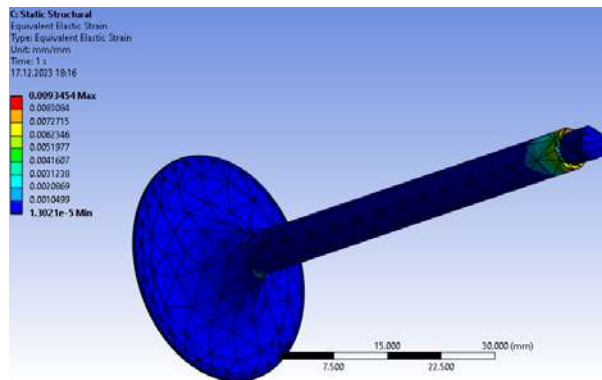


Г

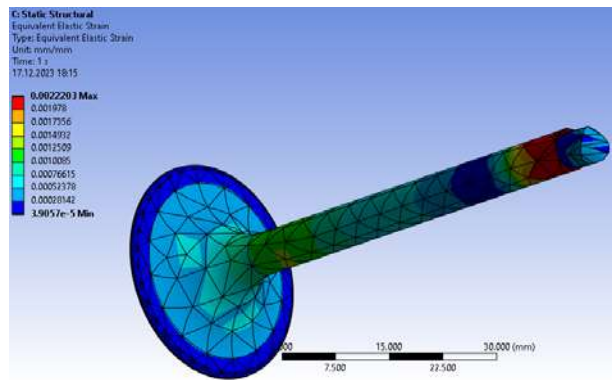
а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.12 - Загальний розподіл деформацій на штоку та головці клапана при підвищеній температурі

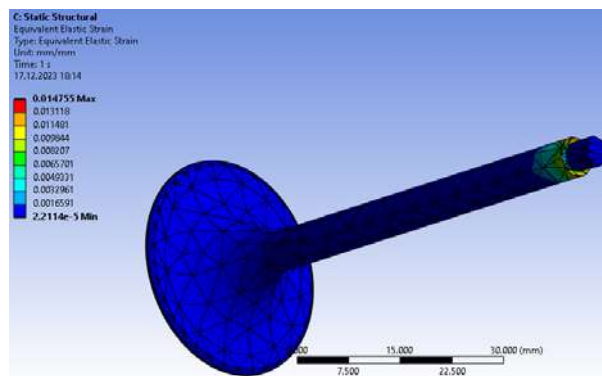
Отримані напруження та деформації порівняємо з результатами «холодного» розрахунку, що дозволить зробити висновки про міцність конструкції в реальних умовах роботи з урахуванням нагріву.



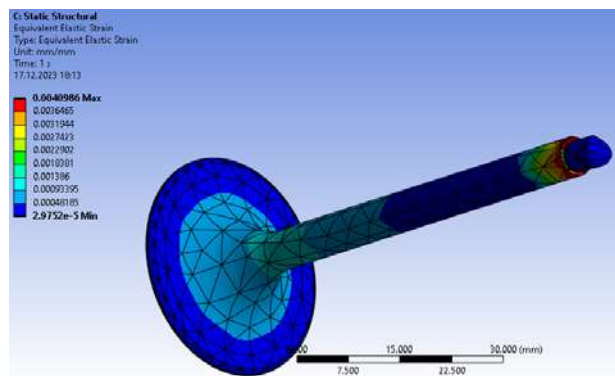
а



б



В

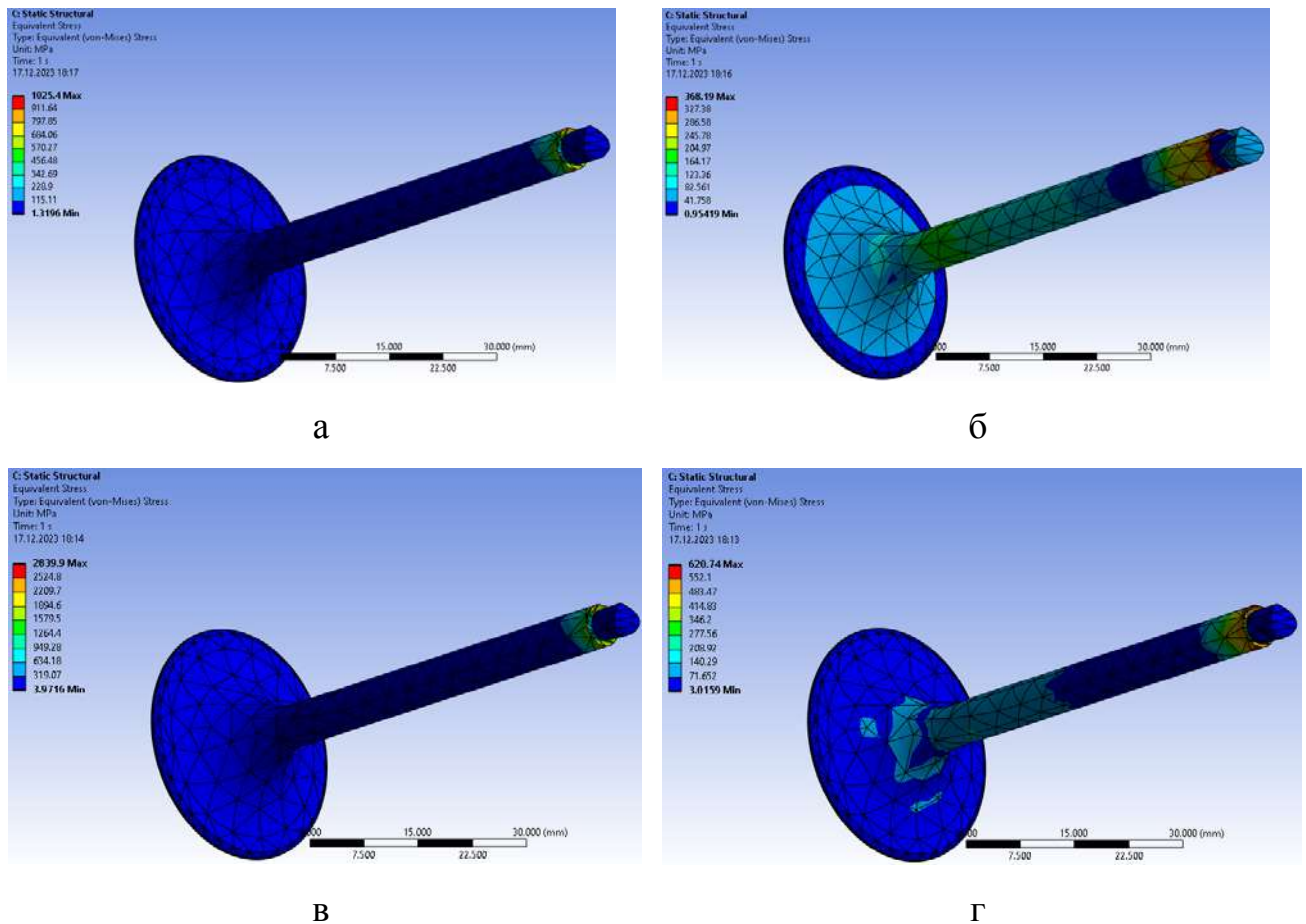


Г

а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.13 - Загальний розподіл еквівалентної пружної деформації на штоку та головці клапана при підвищеній температурі

Результати проведеного статичного структурного аналізу випускних клапанів з сірого чавуну, сталей SS-304, 316 та сплаву Інконель 718 за температури їх роботи 750°C у вигляді максимальних значень еквівалентних напружень та пружних деформацій відібрано до порівняльної таблиці 3.6. Це дозволяє наочно представити вплив матеріалу та температури на міцнісні характеристики клапанів в умовах експлуатації.



а - Grey Cast Iron; б - 316 Stainless Steel; в - SS-304; г - Inconel 718

Рисунок 3.14 - Загальний розподіл еквівалентного напруження за Мізесом на штоку та головці клапана при підвищеній температурі

У результаті статичного структурного аналізу чотирьох різних матеріалів, які використовуються для виготовлення випускних клапанів при температурі роботи, виявлено наступне. Сірий чавун проявив велику сумарну деформацію (0,024 мм) та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом на рівні 115 МПа. Це свідчить про його обмежену міцність та жорсткість, що може обмежувати ефективність у вимогливих умовах експлуатації.

Нержавіюча сталь 316 відзначилася великою сумарною деформацією (0,037 мм), що може бути пов'язано з мікроструктурними особливостями чи термічним впливом. Однак максимальні еквівалентні напруження за Мізесом знижені до 82 МПа, вказуючи на добру стійкість матеріалу при деформації. Нержавіюча сталь SS-304 відзначилася високою міцністю та стійкістю, демонструючи меншу деформацію (0,028 мм) при високих еквівалентних напруженнях за Мізесом (319 МПа). Це свідчить про високу стійкість до механічних навантажень. Inconel 718 показав добрі міцнісні характеристики при обмеженій деформації (0,034 мм), вказуючи на високий рівень міцності при стійкості до пластичної деформації.

Таблиця 3.7 - Результати статичного структурного аналізу для чотирьох різних матеріалів при температурі роботи клапанів

Матеріал	Максимальна сумарна деформація, мм	Максимальна еквівалентна пружна деформація	Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Grey Cast Iron	0,024	0,001	115
316 Stainless Steel	0,037	0,001	82
SS-304	0,028	0,0017	319
Inconel 718	0,034	0,00093	140

Отже, враховуючи розглянуті аспекти механічної поведінки матеріалів, нержавіюча сталь SS-304 видається оптимальним вибором для виготовлення

випускних клапанів, надаючи баланс між міцністю та стійкістю при мінімальній деформації. Тим не менш, Inconel 718 також є конкурентоспроможним в умовах високих температур чи агресивного середовища, тоді як нержавіюча сталь 316 і сірий чавун можуть бути менш відповідними через великі деформації або обмежену міцність.

4 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Ринок автомобілів на сьогоднішній день є динамічним та відкритим для нових технологій. У сучасному автомобільному виробництві, де конкуренція на ринку надзвичайно висока, використання іноваційних технологій стає стратегічно важливим елементом для досягнення конкурентних переваг. За великим попитом спостерігається як на традиційні автомобілі з двигунами внутрішнього згорання, так і на електромобілі, які набувають все більшої популярності через підвищений інтерес до екологічних аспектів та розвиток альтернативних джерел енергії.

Впровадження іноваційних технологій термічної обробки вигідне як для традиційних двигунів, так і для електромобілів. Однією з ключових складових таких технологій є термічна обробка, яка визначає міцність і довговічність важливих деталей, зокрема, клапанів двигунів внутрішнього згорання. У випадку традиційних автомобілів, нові процес термічної обробки дозволяють підвищити продуктивність та знизити ризик поломок високонавантажених деталей. З іншого боку, у виробництві електромобілів, де важливий кожен грам ваги для підвищення дальності їхньої подорожі, оптимізація та зміцнення деталей є критичними факторами. Новий технологічний процес азотування клапанів відкриває перед автомобільними виробниками широкі можливості підвищення ефективності та якості їхніх продуктів. Ця інноваційна технологія дозволяє збільшити твердість поверхні клапанів, підвищуючи їхню стійкість до зносу та високих температур, що надзвичайно важливо для роботи двигунів під великим тиском та температурою.

Актуальність впровадження цієї технології полягає в тому, що вона сприяє покращенню експлуатаційних характеристик автомобільних двигунів. Збільшена довговічність та оптимізація робочих параметрів клапанів дозволяють

автомобільним виробникам створювати більш ефективні та екологічно чисті транспортні засоби.

Урахування та впровадження нових технологій термічної обробки відкриває нові горизонти для автомобільної промисловості, допомагаючи виробникам стати більш конкурентоспроможними та відповідати високим стандартам екологічної та технічної безпеки.

За даними аналітичного звіту Green Chemicals, світовий ринок термічної обробки металів досяг \$7.3 млрд у 2022 році і, за прогнозами, досягне \$10.2 млрд до 2027 року [16].Що стосується автомобільної промисловості, то за оцінками CognitiveMarket Research сегмент термічної обробки до 2030 року зросте майже в 1,5 рази, в тому числі і завдяки зростаючому попиту на автомобілі [17].Згідно з дослідженням, у 2020 році в ЄС та Великобританії було зареєстровано близько 11,7 мільйона нових автомобілів. За останні кілька місяців Іспанія, Німеччина, Великобританія та Франція стрімко відновлюються після пандемії. У 2021 році в Німеччині було вироблено близько 3,1 мільйона легкових автомобілів, а в Іспанії - 1,7 мільйона легкових автомобілів. Аналогічно, у березні 2021 року продажі нових автомобілів у Європі зросли на 63% порівняно з березнем 2020 року.Згідно зі статистикою JATO для 26 європейських ринків, обсяг продажів автомобілів збільшився з 842 094 одиниць у березні 2020 року до 1 374 313 одиниць у березні 2021 року. Загальний обсяг продажів у 1 кварталі 2021 року збільшився на 1% до 3 045 703 автомобілів.Незважаючи на величезні спроби будувати автомобілі з повністю алюмінієвим кузовом, більшість компонентів в автомобілі (в тому числі і кузов) на сьогодні будуються зі сталі (70%), алюмінію (6%), пластмас (9%), гуми (4%), скла (3%) та інших матеріалів. Таким чином, попит на методи термічної обробки металів стрімко зростає, оскільки вони відіграють значну роль у досягненні бажаних властивостей деталей транспортних засобів. Процес термічної обробки широко використовується в автомобільній промисловості для двигунів і трансмісії, коліс і трансмісії, гальм, шасі, підвіски, рульового управління та багатьох інших.

Компоненти двигунів, трансмісії, коліс і трансмісії піддаються впливу високих температур, агресивних хімічних речовин і постійному зносу, який виникає в процесі нормальної роботи двигуна. У цьому випадку процес термічної обробки металу допомагає досягти цієї мети. Зокрема, застосування азотування та інших процесів термічного зміцнення поверхні для клапанів, поршнів, шатунів та інших навантажених деталей двигунів дозволяє підвищити міцність, зносостійкість, втомну міцність та інші властивості, що безпосередньо впливає на продуктивність і надійність двигунів.

Тож термічна обробка є ключовою технологією оптимізації характеристик сучасних двигунів, ринок якої активно зростає в автомобільній галузі, і нові процеси матимуть значний попит.

4.2 Послідовний аналіз

В даній роботі виконали аналіз напрямків застосування продукції та вигоди для споживачів (табл. 4.1). Надано цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів

Таким чином, запропонована технологія дозволить отримати значні конкурентні переваги на ринку транспортних засобів та енергетичного обладнання.

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 4.2).

Отже, існує потенційний попит на ринку з боку виробників двигунів та транспортних засобів. При цьому для виходу на ринок потрібні інвестиції в обладнання та сертифікацію послуг для забезпечення конкурентоспроможності.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка та впровадження технології азотування клапанів двигунів внутрішнього згоряння для підвищення їхньої зносостійкості, опірності до корозії та покращення експлуатаційних характеристик.	1. Автомобілебудування - Виробництво двигунів легкових і вантажних автомобілів, автобусів, спецтехніки. 2. Суднобудування - Виробництво судових двигунів та їх комплектуючих. 3. Залізничний транспорт - Виробництво тепловозних та дизельних двигунів. 4. Енергетичне машинобудування - Газопоршневі двигуни та двигуни внутрішнього згоряння на біопаливі.	Підвищення ресурсу та надійності двигунів Зниження витрат на ремонт та обслуговування Поліпшення паливної ефективності Відповідність нормам екологічності та безпеки

Таблиця 4.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (на йменування)	Характеристика
Головні конкуренти	1. Підприємства, що пропонують різні види термічної обробки в Україні 2. Зарубіжні компанії, що пропонують процеси зміцнення поверхні термічною обробкою
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає з огляду на попит на підвищення ресурсу та ефективності ДВЗ

Продовження таблиці 4.2

Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потрібні інвестиції в обладнання та сертифікацію
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	1. Стандартизація процесів термообробки 2. Вимоги автовиробників до якості деталей

Вивчені та визначені потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Підвищення довговічності та ефективності двигунів	Авовиробники Виробники двигунів Ремонтні підприємства	Авовиробники потребують великих обсягів і стандартизації. Виробники двигунів фокусуються на якості. Ремонтні підприємства - гнучкі обсяги за нижчими цінами.	Твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, тріщиностійкість, ціна

Таким чином, існують різні вимоги та поведінка основних груп потенційних клієнтів на ринку термообробки деталей ДВЗ.

Виконаний аналіз SWOT- аналіз середовища реалізації інноваційного проект. Результати аналізу приведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Ефективна технологія підвищення зносостійкості клапанів Потенціал суттєвого збільшення ресурсу роботи ДВЗ Можливість впровадження малозатратним шляхом	Потреба в сертифікації процесу Конкуренція з боку альтернативних методів поверхневого зміцнення Потенційний опір автовиробників до нових технологій
Можливості:	Загрози:
Попит на підвищення ефективності ДВЗ Партнерство з виробниками двигунів Вихід на ринок запчастин та сервісу	Поява суттєво ефективніших альтернативних технологій Конкуренція з боку великих постачальників термообробки Тривалий процес освоєння технології у виробників

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Ринкові загрози: зростання цін на комплектуючі та матеріали, необхідні для виробництва азотованих клапанів (фактор загрози - інфляція); посилення конкуренції з боку компаній, що використовують альтернативні технології обробки клапанів (фактор - наявність заміни-

ків); зниження попиту на двигуни внутрішнього згоряння внаслідок переходу на електромобілі (фактор - технологічні зміни).

Ринкові можливості: зростання попиту на більш надійні та довговічні двигуни (фактор - підвищення вимог споживачів); розширення експорту азотованих клапанів на ринки країн, що розвиваються (фактор - глобалізація); отримання держзамовлень на поставку клапанів для двигунів військової та спеціальної техніки (фактор - підтримка держави).

Сильні і слабкі сторони для інноваційної технології азотування клапанів двигунів внутрішнього згоряння. Сильні сторони: підвищена зносостійкість і довговічність азотованих клапанів; можливість застосування для широкого спектру двигунів; економічна ефективність технології порівняно з існуючими аналогами. Слабкі сторони: потреба в додаткових інвестиціях в устаткування для азотування; відносно тривалий цикл обробки деталей; складність отримання міжнародних сертифікатів на нову технологію на перших етапах. Аналіз сильних і слабких сторін технології азотування дає уявлення про її переваги та можливі перешкоди для впровадження. Це допомагає сформулювати стратегію просування на ринок з урахуванням конкурентних позицій та загроз. Мінімізація слабких сторін посилює загальну конкурентоспроможність технології.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.5).

Це дозволяє визначити пріоритетні сегменти ринку та розробити адресну маркетингову стратегію для просування технології азотування з урахуванням специфіки цільових груп споживачів.

Виконана ідентифікація стейкхолдерів, виконана їх пріоритизація та побудована Карта стейкхолдерів, яка дозволить візуалізувати картину взаємозв'язків стейкхолдерів. З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на Kartі виокремлено три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених осіб інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту.

Таблиця 4.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники двигунів для легкових автомобілів	Висока	500 000 шт. на рік	Помірна	Потребує сертифікації
Виробники двигунів для вантажного транспорту	Середня	300 000 шт. на рік	Висока	Потребує сертифікації
Виробники сільськогосподарської техніки	Низька	50 000 шт. на рік	Низька	Не потребує сертифікації

Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони знаходяться в прямій підлеглості ініціатора, що дозволяє використовувати досить прості методи адміністрування проекту (рис. 4.1).

Під час виконання даної роботи залучено такі трудові ресурси: науковий керівник, старший науковий співробітник, який здійснює безпосередній контроль і приймає участь в усіх етапах дослідження, інженер дослідник відповідальний за проведення експериментів, обробку та аналіз результатів, та лаборант, що приймає участь в дослідженні. До їх обов'язків входить забезпечення технічної бази дослідження, налаштування та допомога в експлуатації обладнання, попередній аналіз результатів, консультації.

Визначили витрати на оплату праці з урахуванням балансу робочого часу одного працівника. Витрати за цією статтею складаються із планового фонду зарплати усіх категорій працівників, які задіяні у проведенні досліджень (табл. 4.6).

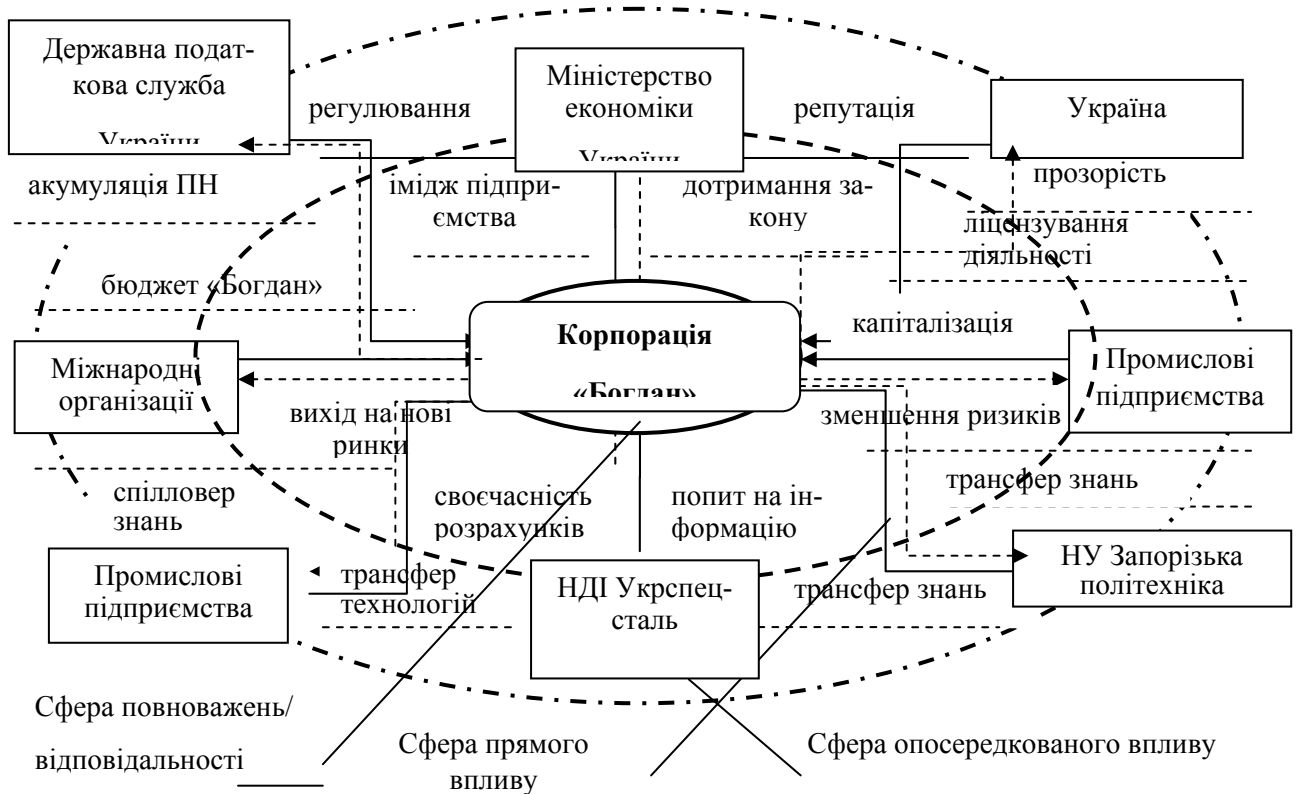


Рисунок 4.1 - Карта стейкхолдерів

Таблиця 4.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	20000	20	4000	24000	288000	63360
Провідний інженер	2	16000	20	3200	19200	230400	50768

Продовження таблиці 4.6

Інженер-технолог	3	14000	20	2800	16800	201600	44432
Лаборант	2	12000	20	2400	14400	172800	38016
Разом	8	62000	-	12400	74400	892800	196576

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 4.7)

Таблиця 4.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Азот	м ³	500	280	140000
Клапани двигунів	шт	50	1500	75000
Тара для клапанів	шт	50	100	5000
Гази	м ³	100	1200	120000
Масло	л	5	750	3750
Запчастини до устанку	комплект	2	85000	170000
Реактиви для аналізу	комплект	3	5000	15000
Препарати	набір	2	11000	22000
Витратні матеріали	-	-	-	10000
Разом	-	-	-	497750

Розрахунок вартості послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл.4.8).

Таблиця 4.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Одиниця виміру	Кількість	Тариф, грн	Сума, грн
Електропостачання	кВт·год	2500	5,5	13750
Водопостачання	м ³	10	28	280
Теплопостачання	Гкал	5	1850	9250
Азот	м ³	500	320	160000
Сертифікація	послуга	1	65000	65000
Утилізація відходів	тонна	0,5	3700	1850
Охоронна сигналізація	місяць	12	1350	16200
Разом	-	-	-	248380

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Розрахунок амортизації

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація (20%), грн	Поточний ремонт (2%), грн
Установка азотування	1	2 500 000	2 500 000	500 000	50 000
Піч газова	1	850 000	850 000	170 000	17 000
Твердомір	2	65 000	130 000	26 000	2 600
Мікроскоп	1	250 000	250 000	50 000	5 000
Комп'ютер	3	32 000	96 000	19 200	1 920
Разом	-	-	3 826 000	765 200	76 520

Враховано основне устаткування: установку для азотування, газову піч, твердоміри, мікроскоп та комп'ютери. Загальна річна сума амортизації з урахуванням ремонту складає 841 720 грн.

Відображаємо кошторис витрат на основі даних, вказаних в табл. 4.6-4.9. В табл. 4.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 4.10 – Кошторис витрат

Стаття витрат	Сума, грн
Фонд заробітної плати	878400
ЄСВ	193338
Матеріальні витрати	497750
Вартість послуг	248380
Амортизація обладнання	765200
Поточний ремонт	76520
Виробнича собівартість	2 577 588
Адміністративні витрати (20%)	515 518
Повна собівартість	3 093 106

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що порівнювався економічний ефект від застосування додаткового азотування в порівнянні з серійною технологією термічної обробки клапанів двигунів внутрішнього згорання (табл. 4.11).

Розроблена технологія азотування клапанів має вищу собівартість порівняно зі стандартною термообробкою, але забезпечує подовження ресурсу роботи клапанів у 2 рази.

Тому економічний ефект тут буде виражатися в економії на кількості замін клапанів протягом строку служби двигуна завдяки їх підвищеній зносостійкості після азотування.

Таблиця 4.11 - Порівняння технологій обробки клапанів без деталізації матеріалів

Показник	Од. виміру	Стандартна технологія	Технологія з азотуванням
Собівартість обробки одного клапана	грн	380	420
Ресурс клапана	тис. км	150	250
Кількість заміни клапанів за 15 років експлуатації	шт	2	1
Витрати на заміни клапанів за 15 років для одного авто	грн	760	420
Економія витрат на 1 авто	грн	-	340
Річний економічний ефект для 1 млн авто	млн грн	-	340

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці у термічному відділенні при азотуванні.

5.1 Аналіз потенційних небезпек

Розглянемо потенційні небезпеки в процесі хіміко-термічної обробки:

- можливість отримання механічних травм, що може бути пов'язано з порушенням правил з охорони праці при підготовці деталей до термополіпшення.
- надлишкова напруженість та інтенсивність праці.
- негативний вплив теплового випромінювання при завантаженні садки в піч, що може бути пов'язано з відсутністю індивідуальних засобів захисту.
- можливість отримання термічних опіків внаслідок виплесків гартувального мастила при гартуванні.
- можливість отримання механічних травм внаслідок порушень правил з охорони праці при підготовці зразків для випробування твердості.
- небезпеки, які пов'язані з використанням аміаку в процесі азотування, зокрема при підготовці насичувальної атмосфери.
- можливість ураження електричним струмом. Головними причинами можуть бути порушення правил електробезпеки, несправність енергоспоживачого обладнання. Відсутність групових або індивідуальних засобів захисту.
- підвищена загазованість шкідливими речовинами в процесі азотування, що є специфікою цього процесу та може призвести до отруєння.
- незадовільне освітлення, через вихід з ладу чи забрудненість приладів освітлення, що призводить до погіршення зору.

- можливість загорянь, причиною яких є порушення правил пожежної безпеки, що може призвести до пожеж.

5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Для виключення механічних травм передбачено:

Організаційні заходи дотримання чистоти і порядку на робочих місцях: використання індивідуальних засобів захисту, а саме брезентові захисні костюми, рукавиці брезентові, спеціальне взуття з металевим битком, на носку; при роботі з нагрітими матеріалами використовуються волочені костюми, азбестові фартухи і рукавиці згідно із ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ «Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия».

Технічні: використання тільки справного інструменту та їх пристосувань. Пересування оброблювальних деталей по дільниці, як правило виконується за допомогою кран – балки, в зв'язку з цим існують вимоги, дозачеплення тари з деталями яке не повинно призвести до повороту цієї тари. Пересування повинно виконуватись тільки за схемою переміщення, одночасний рух в напрямках суворо забороняється. Перед початком роботи доцільно перевірити працездатність блокуючи кінцевих перемикачів та гальмівної системи.

Для мінімалізації негативного впливу напруження та інтенсивної праці передбачено: оптимальний розподіл робочого часу (10 хв на 1 годину) та використання засобів автоматизації та механізації.

Основним захистом від теплових потоків підвищеною інтенсивністю використовують спеціальний одяг, для захисту від підвищених температур (суконний одяг) згідно із ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения», в тому числі з азбестовими накладками, на головних щитків згідно із ГОСТ 12.4.035-78 ССБТ «Щитки защитные лицевые. Технические условия».

Для виключення можливості опіків при виплесках гартувального мастила при гартуванні використовують спеціальний одяг (суконний чи брезентовий)

згідно із ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения» та інструктажі по техніці безпеки при роботі із гартувальним мастилом.

Для виключення механічних травм при підготовці зразків для випробування на твердість використовують тільки справне обладнання, а також не допускають працівників, які не пройшли інструктажі з правил безпеки. Відбалансований вал на точно шліфувальному станці. Перед установкою абразивного круга ретельно оглянути і перевірити на відсутність тріщин легким постукуванням (в підвішеному стані) дерев'яним молотком масою 200-300 г. Справний круг при постукуванні дає чистий дзвінкий звук, несправний - глухий. При обробці абразивними кругами виробів, утримуваних в руках, застосовують підручники. Підручники повинні бути пересувними, які забезпечують можливість установки їх в необхідне положення по мірі обертання круга НПАОП 28.52-1.22-64 «Правила и нормы безопасной работы с абразивным инструментом.» Не приступати до роботи при відсутності захисного екрана або бічних стінок.

Для виключення можливості витічки при підготовці та використанні аміаку слідкують за герметичністю судин, по яким транспортується газ. Балони з аміаком не мають підп'ятника. Зберігання повинно бути тільки в аміачній рампі, яка має ємність з водою, балони можуть бути скинуті у воду. Нагрівання балонів не більше 40⁰С – недопустимо.

Для виключення ураження електричним струмом в проекті передбачені основні заходи електробезпеки:

Організаційні. До роботи допускаються особи які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки та отримали допуск до певної групи електробезпеки згідно ПУЕЗ 2013 або ПТБЕ. Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціально підготовлений персонал.

Технічні. розташування не ізольованих струмопровідних ліній на недоступній висоті (до 1000 Вт, не менше 3,5 м, а вище 1000 Вт, не менше 6м), також передбачене заземлення. Спуски шинопроводів повинні бути надійно огороженні суцільним огороженням, відкриття якого можливе для спеціальних

пристроїв. Кабельні мережі повинні мати надійну ізоляцію опір якої не менше 0,5 МОм. Усе технологічне обладнання надійно заземлене ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ «Защитное заземление, зануление». Обов'язковим є використання блокуючих і ізолюючих пристроїв.

5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Для виключення підвищеної загазованості шкідливими речовинами в процесі азотування над пічками потрібно розміщувати місцеву вентиляцію, яка буде всмоктувати шкідливі гази.

При освітленні виробничих приміщень використовують природне освітлення та штучне, здійснюване електричними лампами, і комбіноване, при якому в світлий час доби недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним. До складу системи штучного загального рівномірного освітлення рекомендовані дугорозрядні лампи типу ДРЛ 250 – 400 Вт, які встановлені в світильники типу РСП по одній шт.

Виробничу будівлю проектуємо з урахуванням можливості максимального використання природного освітлення, що дозволить отримати значну економію електроенергії. Виробниче освітлення в проектуваному цеху передбачає як природне, через скло стін прольоту і на дасі будівлі - крізь світлові вставки ліхтарі, так і штучне. Освітлення робочого місця виконана відповідно с ДНБ В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне та штучне освітлення».

Норма освітлення для цеху 200лк. При верхньому і боковому природному освітленні коефіцієнт природної освітленості буде не менше 2, а при верхньому і боковому буде не менше 1.2. Світильники місцевого освітлення оснащені відбивачами, виготовленими з матеріалу, що не просвічує та із захисним кутом не менше 30 градусів, а при розташуванні світильників нижче рівня очей працюю-

чого - не менше 10 градусів. Крім робочого освітлення в цеху передбачено аварійне освітлення, яке необхідно для освітлення в випадку аварій і надзвичайних ситуацій.

Для приведення параметрів повітряного середовища до норм, вказаних в таблиці 5.1, на ділянці встановлюється система загальнозмінної вентиляції. Проект вентиляції виконується відповідно до СНіП 20485-86 «Опалювання, вентиляція і кондиціонування. Норми проектування». При проектуванні враховуються вимоги ГОСТу 121005-88 «Загальних санітарно-гігієнічних вимог до повітря робочої зони» і СН 245-71 «Санітарні норми проектування промислових підприємств». У холодний період використовується калорифер.

Таблиця 5.1 – Оптимальні норми температури, відносній вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Сезон року	Температура, °С (оптимально-допустима)	Відносна вологість, % (оптимальна)	Швидкість руху, м/с (оптимальна)
Холодний період	16-19	40-60	<0,3
Теплий період	18-26	40-60	<0,4

Розрахунок продуктивності природної вентиляції:

$$L=K \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{ГОД}$$

де K – кратність повітряобміну ($K=2$)

V_n – об'єм приміщення

$$S = 850\text{м}^2 \quad h=7$$

$$L= K \cdot V_n=2 \cdot (850 \cdot 7)=11900 \text{ м}^3$$

Розрахунок кількості зовнішнього повітря, необхідного для асиміляції надлишкового тепла у приміщенні:

$$L = \frac{Q}{c \cdot \gamma (t_{\text{вн.}} - t_{\text{зовн.}})} \text{ м}^3/\text{год}$$

де Q – загальна кількість тепловиділення, кДж/год

c – питома теплоємність повітря, що дорівнює 1 кДж/(кг °С)

γ – густина зовнішнього повітря

$$Q = 38000 \text{ кДж/год}$$

$$t_{\text{вн.}} = 37, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{зовн.}} = 27, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\gamma = \frac{353}{273 + 27} = 1,17 \text{ кг/м}^3$$

$$L = 3247,8 \text{ м}^3/\text{год}$$

5.4 Заходи з пожежної безпеки

Згідно із ДНБ В.1.1.7. - 2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» ступінь вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі - II, тобто воно зібрано в основному з важкозаймистих матеріалів.

Основні причини пожеж в цеху: порушення технологічного режиму; несправність електрообладнання (коротке замикання, перевантаження); конструктивні недоліки обладнання; ремонт обладнання на ходу.

Заходи з пожежної профілактики поділяються на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні. Організаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин і внутрішньозаводського транспорту, правильне утримання будівель, території, протипожежний інструктаж працівників, і т.д. До технічних

заходів належать, дотримання протипожежних правил, норм при проектуванні будинків, при влаштуванні електромереж і устаткування, опалення, вентиляції, освітлення, правильне освітлення обладнання. Заходи режимного характеру - це заборона куріння в невстановлених місцях, виробництва зварювальних та інших вогневих робіт в пожежонебезпечних приміщеннях.

Кількість первинних засобів пожежогасіння визначаються відповідно до НАПБ 03.001 - 2004 «Типові норми належності вогнегасників». Площа цеху 1815 м². Виходячи з цього обираємо 2 порошкових вогнегасника, ємністю по 5 кг кожен.

При проектуванні передбачені шляхи евакуації на випадок пожежі - по проходах, проїздах, аварійні виходи. Оскільки будівля одноповерхова, то евакуаційним вважається вихід, що веде з приміщень цеху назовні через коридор (вестибюль). Шляхи евакуацій розосереджені, і найбільша відстань від найвіддаленішого робочого місця до найближчого виходу не перевищує 50 м.

Ширина пожежних проїздів дорівнює 4 м. Ширина проходів, службовців для евакуації людей, 1 м, коридорів 1,4 м, дверей 2 м. Всі ворота і двері, службові для евакуації людей, відкриваються назовні.

Будівля забезпечена різним протипожежним інвентарем і вогнегасниками, є внутрішній пожежний водопровід,

Згідно з НАПБ 03.001 - 2004 «Типові норми належності вогнегасників» в цеху встановлено пожежний щит. У таблиці 5.2 наведено інвентар пожежного щита.

Таблиця 5.2 – Інвентар пожежного щита

№	Назва	Кількість
1	Вогнегасник	3
2	Ящик з піском	1
3	Сокира / Лом	2
4	Лопата	2

5	Відро	2
6	Багор	2

7.5 Організація дослідження стійкості роботи промислового об'єкта

Небезпеки, які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях, зокрема порушенням порядку проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

Під стійкістю роботи промислового об'єкта приймають в умовах надзвичайних ситуацій випуск продукції у визначених об'ємах і номенклатурі, а при отриманні слабких і середніх руйнуваннях в мінімальні терміни відновлюється виробництва.

Під стійкістю роботи не промислових об'єктів приймають їх властивість частково виконувати свої функції.

Умови стійкості об'єктів закладаються на стадії розміщення та проектування. На цьому етапі враховується категоричність тієї території, де планується розмістити об'єкт. Всього є три категорії:

- столиці та обласні центри, а також території де є особливо небезпечні об'єкти.
- населені пункти із населенням 100 тис. жителів.
- інші населені пункти.

В особливий період 1 категорія може бути використана по всій території країни.

Розміщення об'єктів повинно виконуватись з урахуванням категорій та зон можливих руйнувань при виникненні надзвичайних небезпек.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз літературних даних щодо вибору матеріалу та режимів термічної обробки випускних клапанів двигунів. На основі порівняння хімічного складу та механічних властивостей ряду сталей обрано оптимальний матеріал - 4X10C2M. Також розглянуто основні режими азотування та показано, що найкращі характеристики азотованих сталей досягаються після попередньої термообробки.

На основі проведених розрахунків оптимального часу термообробки для сталі 4X10C2M розроблено технологічну карту, що враховує температуру гартування, швидкість охолодження, температуру відпуску та час тримання. Використання цієї карти дозволяє забезпечити необхідну якість термічної обробки для покращення механічних властивостей та зносостійкості сталі.

В ході статичного аналізу в ANSYS досліджено напружено-деформований стан випускного клапана, зосереджуючись на різноманітних аспектах, щоб забезпечити докладне розуміння його механічної поведінки. Ми аналізували види деформацій та розподіл напружень в структурних елементах клапана, особливо у критичних зонах, таких як області фасок, контакт з сідлом та точки кріплення. Це дозволило виявити потенційні місця найвищого навантаження та ризику виникнення втомних пошкоджень.

Результати аналізу статичного структурного аналізу випускних клапанів з різних матеріалів під час температур роботи свідчать про те, що оптимальними матеріалами є корозійностійкі сталі та нікелеві сплави, такі як SS-304, 316 та Inconel 718. Ці матеріали демонструють найменші деформації та вищу міцність при зазначених температурних умовах.

Однак, оскільки реальні умови експлуатації клапанів пов'язані з великими термічними навантаженнями, наступні дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу підвищених температур на напружено-деформований стан випу-

скних клапанів. Це дозволить порівняти характеристики різних матеріалів з точки зору термостійкості та жароміцності, що є ключовим для забезпечення ефективності та надійності роботи клапанів в умовах змінюючогося температурного середовища.

За результатами моделювання можна зробити висновок, що високоміцні корозійностійкі сталі та нікелеві сплави є оптимальним вибором для виготовлення випускних клапанів при роботі в умовах підвищених температур. Такий вибір матеріалу забезпечить не тільки стійкість до механічних навантажень, але й збереже ефективність роботи клапанів при експлуатації в екстремальних термічних умовах.

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що порівнювався економічний ефект від застосування додаткового азотування в порівнянні з серійною технологією термічної обробки клапанів двигунів внутрішнього згорання. Розроблена технологія азотування клапанів має вищу собівартість порівняно зі стандартною термообробкою, але забезпечує подовження ресурсу роботи клапанів у 2 рази.

У розділі з охорони праці проведено аналіз потенційних небезпек на ділянці азотування та запропоновано організаційні і технічні заходи для їх усунення, зокрема: забезпечення засобами індивідуального захисту, дотримання правил електро- і пожежної безпеки, вентиляція приміщень, первинні засоби пожежогасіння, аварійні шляхи евакуації. Реалізація цих заходів дозволить мінімізувати вплив небезпечних і шкідливих факторів та забезпечити безпечні умови праці на ділянці азотування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Panțuru, M., Chicet, D., Paulin, C., Alexandru, A., & Munteanu, C. (2016). Wear aspects of internal combustion engine valves. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 147, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/147/1/012036>
2. J. Cavalieri, F., Zenklusen, F., & Cardona, A. (2016). Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests. Mechanism and Machine Theory, 104, 81–99. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.017
3. Raghuwanshi, N.K., Pandey, A., & Mandloi, R.K. (2012). Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 1(2), 173-181.
4. Э.В.Корнилов, П.В.Бойко, Э.И.Голофастов, В.П.Смирнов. Выпускные клапаны дизелей. Учебное пособие. — Одесса: — 110 с.
5. Сігова В.І., Руденко Л.Ф. С 34 Технологічні процеси зміцнення та АСУ ТП: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 197 с
6. <https://www.enginebuildermag.com/2016/03/valves-and-seats/>
7. <https://www.enginebuildermag.com/2005/12/valve-selection-hot-valve-materials-for-hot-engines/>
8. Arockia Jaswin Impact Behavior of Cryogenically Treated En 52 and 21-4N Valve Steels
9. Chenna Krishna, S., Srinath, J., Jha, A.K. et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 12Cr–10Ni–0.25Ti–0.7Mo Stainless Steel. Metallogr. Microstruct. Anal. 2, 234–241 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0079-3>
10. Jaegu Choi, Chang-Sung Seok, Soo Park, Gayeon Kim, Effect of high-temperature degradation on microstructure evolution and mechanical properties of

austenitic heat-resistant steel, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 8, Issue 2, 2019, Pages 2011-2020 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.017>

11. X. L. Xu, Z. W. Yu & J. Wang (2007) Influences of microstructure on service properties of 5Cr21Mn9Ni4N heat resistant alloy, *Materials Science and Technology*, 23:8, 903-909, DOI: 10.1179/174328407X192804

12. Kumar A, Tripathi G, Hamilton A, Sharma A (2016) Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Erosion Behaviour of Cast 21-4-N Nitronic Steel. *SOJ Mater Sci Eng* 4(2): 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.15226/sojmse.2016.00122>

13. Z.W. Yu; X.L. Xu (2006). Failure analysis and metallurgical investigation of diesel engine exhaust valves. , 13(4), 673–682. doi:10.1016/j.engfailanal.2004.10.018

14. Ji H, Huang X, Ma C, Pei W, Liu J, Wang B. Predicting the Microstructure of a Valve Head during the Hot Forging of Steel 21-4N. *Metals*. 2018; 8(6):391. <https://doi.org/10.3390/met8060391>

15. Лахтін Азотування

16. Metal Heat Treatment Market Size, Capacity, Demand & Supply 2023 <https://www.24chemicalresearch.com/reports/201429/metal-heat-treatment-market-2023-2030-942>

17. Metal Heat Treatment Market Report 2023 (Global Edition) <https://www.cognitivemarketresearch.com/metal-heat-treatment-market-report>