

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О. П. Гапонова
«__» _____ 2022 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

Тема: «Аналіз впливу хімічного складу та термічної обробки на структуру та властивості жароміцних титанових сплавів»

Студент гр. МТ.м-11 _____

Яненко В.В.

Керівник _____

Юскаєв В. Б.

Консультант
з економічної частини _____

Берладір Х. В.

Консультант
з охорони праці _____

Говорун Т.П.

Нормоконтроль _____

Дегула А. І.

Суми 2022

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних
матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. П. Гапонова

«___» _____ 2022 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Яненка Вадима Вадимовича

1. Тема проекту (роботи) «Аналіз хімічного складу та термічної обробки на структуру та властивості жароміцних титанових сплавів» затверджена наказом по університету від “___” _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження

2. Загальна методика та основні методи дослідження

3. Експериментальні дослідження та загальні результати

4. Економічна частина

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки

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

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.		
Економічна частина	Берладір Х. В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження		
2	Загальна методика та основні методи дослідження		
3	Експериментальні дослідження та загальні результати		
4	Економічна частина		
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки		

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з 85 сторінок, які містять 22 таблиць, 25 рисунків, список із 27 використаних джерел на 3 сторінках.

Мета роботи – дослідити вплив легуючих елементів та режимів термічної обробки жароміцних титанових сплавів на їх фазові перетворення, механічні властивості, зміну кількості фаз при зміні температур випробувань.

Методи дослідження: експериментальні дані, які отримувались з використанням стандартизованих методів визначення властивостей та структури титанових сплавів. Використовувались методи макро- і мікроаналізів, для визначення механічних властивостей сплавів застосовувались вимірювання твердості.

Об'єкт дослідження – процес легування та термічна обробка жароміцних титанових сплавів.

Предмет дослідження – структуроутворення та фізико-механічні властивості жароміцних титанових сплавів.

Практичне значення одержаних результатів. в результаті проведених досліджень було з'ясовано вплив окремих легуючих елементів на певні титанові сплави. Вплив температур на механічні властивості титанових сплавів та їх фазові перетворення.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено вплив різних температур, а також вмісту легуючих елементів на властивості ряду жароміцних титанових сплавів під час проведення зміцнюючої термічної обробки. Проведено аналіз їх механічних та технологічних властивостей. Після термічних операцій проведено ряд досліджень: дослідження макроструктури (макроаналіз); дослідження мікроструктури (мікроаналіз); випробування матеріалу на багатоциклічну втому; випробування механічних властивостей. Після ряду досліджень у відповідних розділах були наведені їх результати.

Ключові слова: ЖАРОМІЦНІСТЬ, ТВЕРДІСТЬ, МІЦНІСТЬ, УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ЛЕГУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ.

ABSTRACT

Yanenko V.V. Analysis of the chemical composition and heat treatment effect on structure and properties of heat-resistant titanium alloys. – The manuscript.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – materials science. – Sumy State University, Sumy, 2022.

In the qualification work was investigated the influence of different temperatures, as well as the content of alloying elements on the properties of a number of heat-resistant titanium alloys during strengthening heat treatment.

An analysis of their mechanical and technological properties was carried out. After thermal operations, a number of studies were conducted: macrostructure study (macroanalysis); microstructure research (microanalysis); material testing for multicycle fatigue; testing of mechanical properties. After a number of studies, their results were presented in the relevant sections.

The goal was to increase the operational properties, namely increase the heat resistance of the material. As it was established, this can be done in several ways.

The paper proves that the continuation of experimental studies for the improvement of heat-resistant titanium alloys is still appropriate.

Key words: heat resistance, hardness, strength, impact toughness, heat treatment, alloying elements.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР	9
НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Аналіз впливу хімічного складу на властивості жароміцних титанових сплавів	9
1.2. Аналіз впливу термічної обробки на властивості жароміцних титанових сплавів	20
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	29
2.1 Вибір матеріалу дослідження.....	29
2.2 Дослідження на багатоциклічну втому.....	30
2.3 Металографічний аналіз	37
2.4 Дослідження мікротвердості.....	39
2.5 Висновки	40
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	42
3.1 Дослідження впливу легувальних елементів на жароміцні титанові сплави.....	42
3.2 Дослідження впливу термічної обробки на жароміцні титанові сплави.....	50
3.3 Висновок	66
РОЗДІЛ 4.....	68
4.1 Економічна ефективність наукових досліджень.....	68
4.2 Оцінка ефективності прикладних досліджень	69
4.3 Висновок	73
РОЗДІЛ 5	74
5.1 Безпека праці людей в цехах і на ділянках термічної обробки.....	74
5.2 Засоби індивідуального захисту робітників.....	77
5.3 Освітлення в термічних цехах	78
5.4 Контрольно - вимірювальні прилади термічних цехів.....	79

5.5 Висновок	82
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

С У М І Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ТО – термічна обробка

σ_b – границя міцності

δ – відносне подовження при розтягуванні

Ψ – відносне звуження

KCU – ударна в'язкість

HRV – твердість по Віккерсу, шкала V

С У М Д Д

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасна промисловість швидко розвивається в сторону використання більш доцільних матеріалів. З появою таких матеріалів в різних галузях з'явилась можливість удосконалити конструкцію багатьох відповідальних агрегатів, вузлів, деталей, конструкцій, знизивши їх загальну вагу і при цьому в деяких випадках підвищити надійність відповідальних елементів конструкцій. Все це сприяє збільшенню довговічності таких виробів.

Мета роботи – дослідити вплив леуючих елементів та режимів термічної обробки жароміцних титанових сплавів на їх фазові перетворення, механічні властивості, зміну кількості фаз при зміні температур випробувань.

Методи дослідження: експериментальні дані, які отримувались з використанням стандартизованих методів визначення властивостей та структури титанових сплавів. Використовувалися методи макро- і мікроаналізів, для визначення механічних властивостей сплавів застосовувались вимірювання твердості.

Практичне значення одержаних результатів. В результаті проведених досліджень було з'ясовано вплив окремих леуючих елементів на певні титанові сплави. Вплив температур на механічні властивості титанових сплавів та їх фазові перетворення.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз впливу хімічного складу на властивості жароміцних титанових сплавів

Титанові сплави широко використовуються в різних галузях сучасної промисловості. Це пояснюється поєднанням таких цінних властивостей титану, як мала щільність, висока питома міцність, корозійна стійкість, технологічність при обробці тиском та зварюваність, холодостійкість.

Механічні властивості титану суттєво залежать від вмісту домішок у металі. Розрізняють домішки застосування - кисень, азот, вуглець, водень та домішки заміщення, до яких належать залізо і кремній. Хоча домішки підвищують міцність, але одночасно різко знижують пластичність, причому найбільш сильну негативну дію надають домішки застосування, особливо гази[1]:

Основною метою легування титанових сплавів є підвищення міцності, жароміцності та корозійної стійкості. Широке застосування знайшли сплави титану з алюмінієм, хромом, молібденом, ванадієм, марганцем, оловом та ін. Легуючі елементи дуже впливають на поліморфні перетворення титану. При виготовленні жароміцних титанових сплавів переважно вибирати такі легуючі компоненти, які не знижували б, а підвищували температуру перетворення.

Залежно від характеру впливу на поліморфізм титану легуючі елементи ділять на три групи [2]:

- α - стабілізатори, що підвищують температуру поліморфного перетворення; до них відносяться алюміній, галій, індій, кисень, азот і вуглець;
- β - стабілізатори, що знижують температуру поліморфного перетворення. Залежно від характеру впливу на поліморфізм титану легуючі елементи ділять на три підгрупи: евтектоїдоутворюючі

стабілізатори: марганець, хром, залізо, кремній, кобальт, нікель, мідь; ізоморфні β - стабілізатори: ванадій, молібден, ніобій, тантал, вольфрам; квазіізоморфні β - стабілізатори: реній, родій, осмій, іридій;

- нейтральні зміцнювачі, мало впливають на температуру поліморфного перетворення; до них відносяться олово, цирконій, гафній, германій, торій.

Залежно від природи легуючих елементів і їх змісту, структура титанових сплавів у відпаленому стані може бути представлена α -фазою, β -фазою і двома фазами α і β при різному їх кількісному поєднанні. Тому за структурою у відпаленому стані титанові сплави поділяють на такі класи: α - сплави; псевдо α -сплави; $(\alpha + \beta)$ – сплави, псевдо β - сплави і β - сплави; іноді виділяють сплави перехідного класу, проміжні між $(\alpha + \beta)$ – сплавами і псевдо β -сплавами [2].

Жароміцність - це здатність металів і сплавів працювати під напругою в умовах підвищених температур без помітної залишкової деформації та руйнування. Тривала міцність та повзучість – основні характеристики жароміцності. Межа тривалої міцності характеризує умовне напруження, під дією якого матеріал за заданої температури руйнується через певний проміжок часу. Межа повзучості - це умовна розтягуюча напруження, при якій швидкість або деформація повзучості за певний час досягають заданої величини [3].

Головною проблемою створення жароміцного матеріалу є вимога збереження високих властивостей міцності з підвищенням температури при задовільній пластичності в широкому інтервалі температур. Досягнення цих вимог можливе лише при створенні термічно стабільних структур. В якості жароміцних прийнято використовувати малолеговані за β -стабілізаторами двофазні $(\alpha+\beta)$ -сплави та псевдо- α -сплави титану [3].

Термічна стабільність двофазної структури визначається значеннями коефіцієнтів дифузії легуючих елементів, енергією міжфазних меж розділу і шириною області гомогенності твердого розчину, на базі якого створений

сплав. Чим менші всі ці параметри, тим більша термічна стабільність сплаву і тим вище характеристики жароміцності.

Титан має відносно високу температуру плавлення (1668 °C), і з загальних позицій можна було б припускати його відносно високу жароміцність. Багато авторів вплив легування на жароміцні властивості пояснюють виходячи з міцності хімічного зв'язку: чим сильніше ці елементи підвищують сили зв'язку, тим більша жароміцність сплаву [3]. Про сили зв'язку побічно судять за характеристичною температурою і величиною середньоквадратичних відхилень атомів від положення рівноваги в ґратах. Однак його характеристики жароміцності невисокі в порівнянні зі сплавами на нікелевій основі або навіть легованими сталями з феритною або аустенітною матрицею. Така суперечність пов'язана з наявністю у титану поліморфного перетворення при відносно низькій температурі – 882 °C, завдяки якому сили зв'язку, що визначають дифузійну рухливість, малі.

Дослідження жароміцних сплавів показали, що необхідною умовою для створення високого опору повзучості при підвищених температурах є використання як основи α -фази, в достатньо ступеня зміцненого легуванням твердого розчину. Найбільш перспективним вважається введення в α -твердий розчин елементів, які розширюють область його існування та підвищують температуру поліморфного перетворення. До таких елементів в першу чергу відносяться алюміній, який істотно збільшує сили зв'язку в твердому розчині і сприяє зростанню відношення періодів c/a гексагональної щільноупакованої решітки-фази з 1,587 для нелегованого титану до 1,593 при 6 мас. % алюмінію. Збільшення c/a зменшує можливість призматичного та пірамідального ковзання і тим самим гальмує розвиток процесів знеміцнення [3].

Крім того, жароміцність підвищують добавки олова, цирконію та галію. Вплив олова, цирконію та алюмінію на жароміцність показано на рис. 1.1 [4].

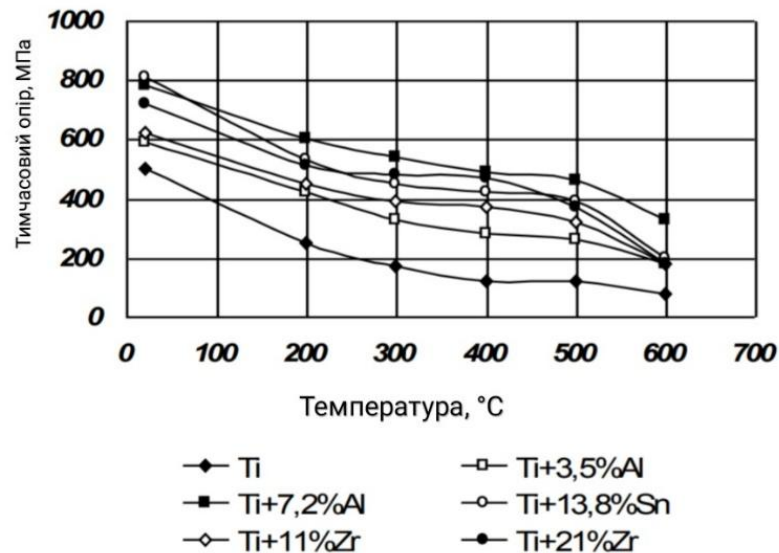


Рисунок 1.1 - Температурна залежність міцності бінарних титанових сплавів у порівнянні з міцністю титану технічної чистоти [4]

Згідно до графіка видно, що підвищення міцності при кімнатній температурі більше всього у сплаву, легуваного оловом. Крім того, олово збільшує прожарювання сплавів, може входити до складу інтерметалідних фаз і сприяє підвищенню в'язкості. З підвищенням температури випробувань вище 400 °C найбільш висока міцність спостерігається у сплавів з підвищеним вмістом алюмінію, що обумовлено утворенням надструктурної фази Ti_3Al (2-фази). Ця фаза викликає окрихчування сплавів при низьких температурах і тому необхідно правильно призначати режими обробки сплаву, які були б здатні забезпечувати або її відсутність, або відповідний розподіл частинок, що не надає катастрофічного впливу на пластичні характеристики.

Розглянемо характеристики основних легуючих елементів і їх вплив на властивості сплавів титану.

Цирконій вважають найближчим аналогом титану. Він має дещо наближену температуру плавлення та в додаток володіє поліморфізмом. З відповідними модифікаціями цирконію α - і β -модифікації титану утворюють безперервні ряди твердих розчинів. При будь-якій концентрації β -модифікація не фіксується гартуванням, а зазнає мартенситних перетворення в α -фазу. Цирконій, якщо порівнювати його з іншими легуючими домішками, являється

для титану слабким зміцнювачем. І тільки лише при підвищених температурах починає проявлятися зміцнююча дія цирконію. Це причина згідно якої цирконій включають до складу жароміцних титанових сплавів. Окалиностійкість титану при добавці цирконію майже не змінюється при температурах нагріву до 600 °С, але при 700 °С і вище різко падає. З огляду на порівняно малий вплив на температуру алотропічного перетворення титану цирконій відноситься до групи так званих нейтральних зміцнювачів [5].

Ніобій. Про вплив ніобію повідомили автори роботи [6]. З додаванням Nb як ОЦК β -стабілізатора як в α_2 -Ti₃Al, так і в γ -TiAl сприяло розвитку впорядкованих фаз B2-Ti (Al, Nb) або орторомбічних O-Ti₂AlNb. Крім того, Nb і Mo як β -стабілізуючі елементи додають у сплави на основі TiAl для підвищення пластичності шляхом утворення незначних кількостей β/β_2 фази.

Ванадій відноситься до групи елементів, що стабілізують β -фазу титану і різко знижує температуру поліморфного перетворення титану зі збільшенням концентрації. При вмісті більше 15% ванадію можна закріпити β -фазу за допомогою гартування, навіть при кімнатній температурі. При меншому вмісті ванадію в залежності від температури нагріву під гартування можна отримати в структурі різні співвідношення α - і β -фаз, а також зафіксувати і метастабільні фази (α' , α'' і ω) [2].

Важливе значення для створення промислових титанових сплавів має порівняно велика розчинність ванадію в титані (більше 3%), оскільки це дає можливість створювати сплави, що поєднують переваги однофазних α -сплавів (хороша зварюваність) і двофазних ($\alpha + \beta$) – сплавів – (здатність до зміцнюючої термічної обробки та підвищена в порівнянні з α -сплавами технологічна пластичність) [2].

Ще однією перевагою ванадію, як легуючої домішки в титанових сплавах є неприсутність евтектоїдних реакцій і металоїдних фаз у системі Ti-V [2]. Цим майже виключається виникнення крихкості при будь-яких помилках в проведенні технологічних процесів, пов'язаних з нагріванням. Перевага сплавів Ti-V – дуже вузький інтервал кристалізації.

Молибден. Він не тільки збільшує міцнісні і жароміцні властивості сплаву, але і ускладнює евтектоїдний розпад β -фази, підвищуючи термічну стабільність.

Щодо розчинності в α -Ti, вважається, що вона не перевищує навіть 1%. Для закріплення β -структури операцією гартування може вистачити 11% Mo. Домішка молибдену ефективно підвищує міцність сплавів при високих температурах. Молибден може підвищити термічну стабільність сплавів, які у своєму складі мають залізо та хром. Недоліком молибдену можна назвати його високу температуру плавлення. Це може скласти труднощі в отриманні гомогенних титанових сплавів. Ще до недоліків молибдену можна віднести його високу щільність [2].

Хром. У сплаві системи Ti-Cr утворюється з'єднання $TiCr_2$, що має дві поліморфні модифікації, тверді розчини на основі яких позначаються δ і γ . За впливом на поліморфне перетворення титану хром відноситься до сильних β -стабілізаторів, як молибден. Розчинність в α -Ti не перевищує 0,5. Для гарту з фіксацією однофазної β -структури в сплаві досить 9% Cr. Хром забезпечує в сплавах з титаном високу міцність при хорошій пластичності і ефективність термічної обробки. Однак при підвищених температурах відбувається евтектоїдний розпад β -фази, що супроводжується виділенням $TiCr_2$ і внаслідок цього втратою пластичності. З цієї причини перевага віддається β -стабілізаторам, які не мають евтектоїдної реакції, - ванадію і молибдену. Введення рівного або дещо більшої кількості молибдену дозволяє загальмувати евтектоїдну реакцію в системі Ti-Cr [2].

Кремній. У технічному титані і конструкційних титанових сплавах, де потрібна висока ударна в'язкість, кремній вважається шкідливою домішкою, тому що, коли він присутній навіть в невеликих кількостях, різко знижує цю характеристику. Однак в жароміцних титанових сплавах кремній - одна з важливих легуючих домішок, що забезпечують підвищення жароміцності і жаростійкості. Оптимальний вміст кремнію – 0,15-0,35%, що відповідає його межі розчинності в α -Ti. Однак при цих концентраціях можна спостерігати

дрібні включення силіциду титану Ti_5Si_3 , які грають деяку роль в підвищенні жароміцності. При гартуванні сплавів Ti-Si внаслідок мартенситного перетворення β -фаза не фіксується [2].

Кремній відноситься до елементів, які мають великий параметр розмірної невідповідності з титаном. Це призводить до блокування дислокацій при досить високих температурах, а також перешкоджає їх переповзанню і поперечному ковзанню. Вміст кремнію повинен бути обмежений межею його розчинності в α -фазі.

Залізо. Розчинність заліза в α -Ti при кімнатній температурі дуже мала, при евтектоїдній температурі не перевищує 0,5%. Залізо – один з найсильніших β -стабілізаторів і для фіксації 100% β -структури загартуванням досить 6% Fe. Сплави Ti-Fe термічно нестабільні, і β -твердий розчин може розпадатися навіть при кімнатній температурі. У нелегованому (технічному) титані невелика кількість заліза може викликати локальні виділення β -фази, що в деяких випадках знижує корозійну стійкість, а також сприяє виникненню холодноломкості при криогенних температурах. Завдяки сильній зміцнюючій дії залізо використовується в деяких титанових сплавах як легуюча добавка зазвичай в кількостях 0,5-1,5%, хоча відомий сплав на основі β -структури, що містить 5% Fe, 8% V і 1% Al. Можна замість порівняно дорогого ванадію використовувати дешевий ферованадій [7].

Азот. Шкідлива домішка в титанових сплавах, що сильно знижує пластичність, тому його вміст у технічному титані і титанових сплавах жорстко регламентується і складає 0,04-0,05%. Деяке застосування знаходить азотування для підвищення зносостійкості [7].

Кисень. Ще одна шкідлива домішка, що викликає крихкість титану, разом з тим при вмісті кисню до 0,1-0,2% його можна розглядати як природну легуючу домішку, яка визначає рівень міцності технічного титану і всіх промислових титанових сплавів. На відміну від азоту кисень – м'якший зміцнювач α -Ti і його вміст в допустимих межах забезпечує не тільки необхідний рівень міцності, але і досить високу пластичність. Більш низька

межа вмісту кисню (менше 0,1%) потрібно лише в деяких спеціальних сплавах (наприклад, для криогенної техніки). На відміну від водню кисень, як і азот, не можна видалити з титану вакуумним відпалом. Як наслідок дуже сильної хімічної спорідненості титану та кисню спроби знизити вміст кисню в титанових сплавах металургійним шляхом не мали успіху. Це ускладнює використання титанового брухту та відходів при виплавці титанових сплавів відповідального призначення [7].

Вуглець - шкідлива домішка в титанових сплавах, так як вже при концентрації більше 0,2% C утворюються дуже тверді карбіди, що знижують ударну в'язкість і ускладнюють механічну обробку. Для жароміцних титанових сплавів може представляти інтерес легування вуглецем в межах його розчинності в α -Ti [2].

Алюміній. З введенням алюмінію підвищується жароміцність титану, знижується його густина, зростає корозійна стійкість. Крім того, алюміній сприятливо впливає на ливарні та технологічні характеристики титану: зростає рідкоплинність, сплави добре зварюються. Вміст алюмінію в титані не має перевищувати 6-8 %; в іншому випадку пластичні характеристики титану різко падають.

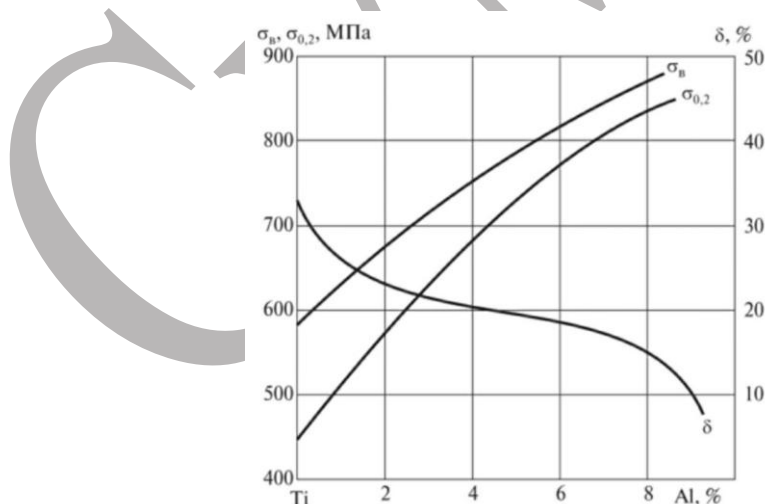


Рисунок 1.2 – Вплив алюмінію на механічні властивості титану [1].

В інтервалі концентрацій 5-25% Al встановлено існування впорядкованої α_2 -фази (Ti_3Al) на заміну раніше передбачуваної області α -твердого розчину.

Саме ця фаза викликає втрату термічної стабільності при утриманні алюмінію більше 6-8% [7]. Зниження властивостей (підвищення крихкості) пов'язане з виділенням фази α_2 . Введення в титан невеликої кількості елементів β -стабілізаторів перешкоджає утворенню сплаву фази α_2 , що дозволяє збільшити вміст алюмінію в титані до 9%. β -стабілізатори, що знижують температуру поліморфного перетворення.

В роботі [8] високий вміст Al в γ -фазі забезпечує більшу стійкість проти окислення, ніж α_2 -фаза. Автори повідомили, що α_2 -фаза показує міцний металевий зв'язок з низькою механічною анізотропією; тоді як γ -фаза має ковалентний зв'язок із сильною універсальною механічною анізотропією.

У дослідженні [9] було зроблено висновок, що W, Ta, Mo, Cr і V розділяють α_2 або α -фазу в фазових рівновагах α/γ і α_2/γ , тоді як Zr робить те саме в γ -фазі; але Nb, Cu, Ni, Co, Fe та Mn перетворюються на α -утворювачі з γ -утворювачів із підвищенням температури. Ці явища змін у поведінці розподілу пояснювали різницею структурної стабільності решітки ГЦК (гранецентрична решітка) і ГПК (гексагональна щільноупакована решітка) між легуючими елементами. Однак для фазових рівноваг (β/α_2 , β/α та β/γ) лише Zr поділяє β -фазу, на відміну від інших елементів, що поділяються на γ , α_2 або α -фази.

Вплив основних легуючих елементів на механічні властивості титану наведено на рис. 1.3 [1].

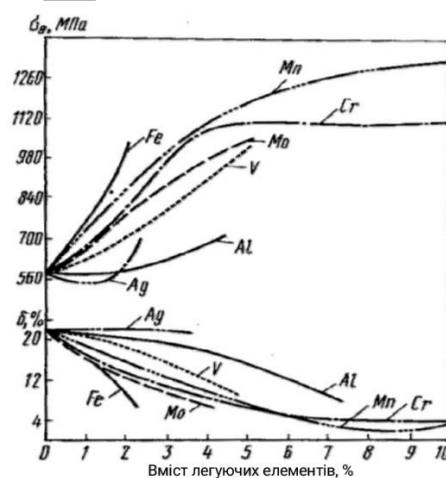


Рисунок 1.3 - Вплив легуючих елементів на механічні властивості титану[1]

Ще перспективнішим є багатокомпонентне легування. Так, наприклад, жароміцність потрібних сплавів титан-цирконій-олово значно вище, ніж подвійних. Однак у більшості випадків гранична кількість стабілізаторів все-таки намагаються обмежити за алюмінієвим еквівалентом, запропонованим Розенбергом:

$$\%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10\% (O + C + 2N) < 9 \text{ мас. \%}$$

для запобігання виділенню частинок α_2 -фази [3].

Роботами багатьох авторів показано, що для створення високого опору повзучості при високих температурах необхідно, поряд з легованою основою – α -фазою, мати деяку кількість стабільного твердого розчину, в який введені атоми з низькою дифузійною. Як наслідок цього, як жароміцні переважно використовують псевдо- α та двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави з відносно низьким коефіцієнтом β -стабілізації (менше 0,5).

Жароміцні титанові сплави використовуються для виготовлення авіаційних двигунів, дисків, робочих і направляючих лопаток вентилятора і компресора, іноді кожуха компресора. При цьому при роботі до температури 550 °С краще використання двофазних сплавів, які володіють вищою міцністю в холодному стані, а при необхідності роботи при температурах до 600 °С найкращі псевдо- α -сплави.

На прикладі титанових жароміцних сплавів, які знаходять застосування в авіаційних двигунах різних країн у табл. 1.1 та 1.2 представлені їх марки, хімічний склад, а також їх механічні властивості.

Таблиця 1.1

Хімічний склад жароміцних титанових сплавів [4]

Марка сплаву	Основні компоненти, мас. % (основа)						
	Al	Sn	Zr	Mo	V	Si	Інші
Вітчизняні титанові сплави							
BT3-1	5,5–7,0	-	-	2,0–3,0	-	0,15–0,40	Cr 0,8–2,0
BT8	5,8–7,0	-	-	2,8–3,8	-	0,20–0,40	Fe 0,2–0,4

Продовження таблиці 1.1

BT8-1	5,8–6,8	0,4–1,5	0,5–1,5	2,8–3,8	-	0,10–0,25	-
BT8M	5,2–5,8	-	-	3,5–4,5	-	0,10–0,30	-
BT8M-1	4,8–6,0	0,3–1,5	0,3–1,5	3,5–4,5	-	0,08–0,25	Cr 0,5–1,5
BT9	5,5–7,0	-	1,5–2,5	0,5–2,0	0,8–2,5	0,10– 0,30	-
BT25y	6,0–7,0	1,0–2,5	3,0–4,5	3,5–4,5	-	0,10–0,25	W 0,4–1,5
BT25	6,2–7,2	0,8–2,5	3,5–4,5	1,5–2,5	-	0,10–0,25	W 0,5–1,5
BT18y	6,2–7,2	2,0–3,0	3,5–4,5	0,4–1,0	-	-	Nb 0,5–1,5
Закордонні титанові сплави							
Ti6242S	5,5–6,5	1,8–2,2	3,5–4,5	1,8–2,2	-	0,10	-
Ti6246	5,5–6,5	1,8–2,2	3,5–4,5	5,5–6,5	-	-	Fe ≤ 0,15
Ti-17	4,5–5,5	1,6–2,4	1,6–2,4	3,5–4,5	-	-	Cr 3,5–4,5
Ti811	7,5–8,5	-	-	0,8–1,2	0,8–1,2	-	-
IMI318	5,5–6,75	-	3,0–4,5	3,5–4,5	3,5–4,5	-	-
IMI550	3,0–5,0	1,5–2,0	-	3,0–5,0	-	0,30–0,70	-
IMI685	5,7–6,3	-	4,5–6,0	0,3–0,8	-	0,15–0,30	Nb 0,7–1,3
IMI829	5,2–5,7	3,0–4,0	2,5–3,5	0,2–0,4	-	0,20–0,60	Nb 0,5–1,0
IMI834	5,5–6,1	3,0–5,0	3,0–5,0	0,3–0,8	-	0,20–0,60	C 0,04–0,08

Таблиця 1.2

Механічні властивості жароміцних титанових сплавів [4]

Марка сплаву	Механічні властивості при 20 С			Відношення тимчасового опору при різних температурах (°С) до тимчасового опору при 20 °С					
	σв, МПа	δ, %	ψ, %	100	200	300	400	500	600
Вітчизняні титанові сплави									
BT3-1	1060	14	40	0,91	0,84	0,81	0,74	0,65	-
BT8	1060	14	40	0,91	0,85	0,80	0,74	0,68	-
BT8-1	1070	13	35	0,91	0,82	0,78	0,75	0,70	-

Продовження таблиці 1.2

BT8M-1	1060	14	40	0,91	0,82	0,76	0,71	0,67	-
BT9	1110	13	35	0,92	0,86	0,81	0,75	0,70	-
BT25y	1160	12	30	0,92	0,85	0,82	0,77	0,74	0,56
BT18y	990	11	30	0,94	0,86	0,81	0,73	0,71	0,60
Закордонні титанові сплави									
Ti6242S	980	14	35	0,92	0,82	0,76	0,73	0,68	-
Ti6246	1230	13	30	0,94	0,87	0,83	0,81	0,74	-
Ti-17	1170	12	25	0,91	0,84	0,83	0,75	-	-
IMI829	1010	13	30	0,89	0,80	0,73	0,68	0,66	-

Аналізуючи хімічний склад вітчизняних та зарубіжних жароміцних сплавів, неважко помітити, що більшість з них містить у своєму складі алюміній, цирконій, олово та кремній, а як основний β -стабілізатор використовують молібден, більш рідше ванадій і ніобій.

1.2. Аналіз впливу термічної обробки на властивості жароміцних титанових сплавів

Титан і його сплави широко використовуються для конструкцій в аерокосмічній промисловості, автомобільній промисловості, обороні, спортивному обладнанні та охороні здоров'я через їх високу міцність, малу вагу, чудову корозійну стійкість і загалом стабільні властивості при високих і низьких температурах. Однак унікальні термічні властивості титану роблять його непридатним для певних застосувань, тоді як він перевершує в інших [10].

Титан поводиться дещо інакше, ніж більшість металів при екстремальних температурах, тому важливо зрозуміти термічні властивості титану, перш ніж використовувати його в такому середовищі. Наприклад, хоча титан залишається міцним за високих температур, він не легко розсіює тепло, що може призвести

до накопичення тепла в металі. Однак деякі титанові сплави також можуть працювати надзвичайно добре при криогенних температурах.

Стійкість виробів при експлуатації залежить від багатьох факторів, головним серед яких є хімічний склад і вихідна структура сплаву даного виробу; склад, структура і механічні властивості оброблюваного матеріалу. Але особливу увагу ми приділимо аналізу застосування режиму термічної обробки жароміцних титанових сплавів.

При термічній обробці титану отримують його необхідні властивості, змінюючи структуру без зміни хімічного складу. Напівфабрикати піддають термічній обробці для покращення структури матеріалу, зниження твердості, що поліпшує механічну обробку, а деталі – для надання необхідних властивостей (міцності, твердості, в'язкості, зносостійкості та ін.) [10].

Титан може добре працювати в екстремальних температурах завдяки своїй високій температурі плавлення та довготривалій втомній міцності. Йому віддають перевагу в таких застосуваннях, як авіаційні двигуни, військово-морські кораблі, космічні кораблі, ракети та труби для електростанцій через його чудову стійкість до корозії, спричинену захисним процесом окислення, який відбувається під час впливу високих температур. Ця температура окислення знижується в атмосферах чистого кисню [10].

Чистий титан має високе співвідношення міцності до ваги та є чудовим вибором для використання в компонентах, які працюють при високих температурах, оскільки він має температуру плавлення близько 1668 °C і щільність приблизно 4,5 г/см³. Однак іноді його застосування може бути обмеженим, оскільки титан може сильно розігрітись та завдати надзвичайної шкоди, якщо піддаватися ситуаціям, коли відбувається тертя об інші метали при підвищених температурах [10].

Термічною обробкою зміцнюються ($\alpha+\beta$) та β - сплави. Титанові сплави піддають рекристалізаційному відпалу та відпалу з фазовою перекристалізацією, загартуванню та старінню. Для підвищення зносостійкості титанові сплави

піддають хіміко-термічній обробці (азотуванню, цементації або окисненню) [10].

Відпал проводиться для всіх титанових сплавів з метою завершення формування структури, вирівнювання структурної та концентраційної неоднорідності, а також механічних властивостей. Температура відпалу повинна бути вище температури рекристалізації, але нижче температури переходу в β -стан ($T_{\text{пп}} = 882 \text{ }^\circ\text{C}$), щоб уникнути зростання зерна. Застосовують звичайний відпал, подвійний або ізотермічний (для стабілізації структури і властивостей), неповний (для зняття внутрішніх напружень) [10].

Рекристалізаційний відпал застосовують для титану та α -сплавів для зняття наклепу після їх холодної обробки тиском. Температура рекристалізації відпалу $520 - 850 \text{ }^\circ\text{C}$ в залежності від хімічного складу сплаву (легуючі елементи підвищують температуру рекристалізації) і виду напівфабрикату (нижча температура для листів, більш висока для прутків, поковок, штампованих деталей) [10].

Гартування і старіння (зміцнююча термообробка) застосовується до жароміцних титанових сплавів з $(\alpha + \beta)$ - структурою. Принцип зміцнюючої термообробки полягає в отриманні при загартуванні метастабільних фаз β , α' , α'' і подальшому їх розпаді з виділенням дисперсних частинок α - і β - фаз при штучному старінні. При цьому ефект зміцнення залежить від типу, кількості і складу метастабільних фаз, а також дисперсності частинок α - і β -фаз, що утворилися після старіння [10].

Хіміко-термічна обробка проводиться для підвищення твердості і зносостійкості, стійкості до «схоплювання» при роботі в умовах тертя, втомної міцності, а також поліпшення корозійної стійкості, жаростійкості та жароміцності. Практичне застосування мають азотування, силікування і деякі види дифузійної металізації [10].

З точки зору Р. Е. Шалина і В. М. Ільєнко, жароміцні титанові сплави слід розділити на наступні групи [3]:

- сплави для виготовлення деталей вентилятора та компресора низького тиску (до температур 300–350 °С) VT6, VT22, Ti-6-4, Ti6246, Ti-17;
- сплави для виробництва деталей компресора високого тиску для температур до 450–500 °С – VT8-1, VT9, Ti6242S, IMI550, IMI685;
- сплави, призначені для виготовлення деталей компресора високого тиску для температур до 550 °С – VT25y, IMI829, IMI834; температури 600 °С, – VT18y, IMI829, IMI834.

Крім хімічного складу величезну роль формуванні комплексу службових властивостей грає термічна обробка металу. До основних вимог, що пред'являються до жароміцних сплавів, відноситься опір повзучості.

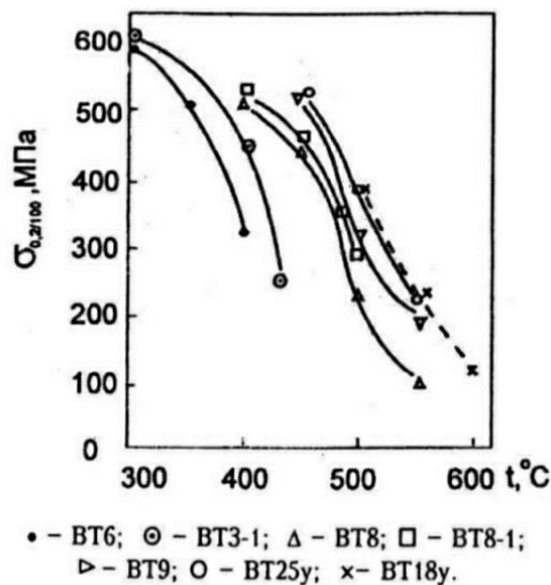


Рисунок 1.3 – Вплив температури на межу плинності титанових сплавів [4].

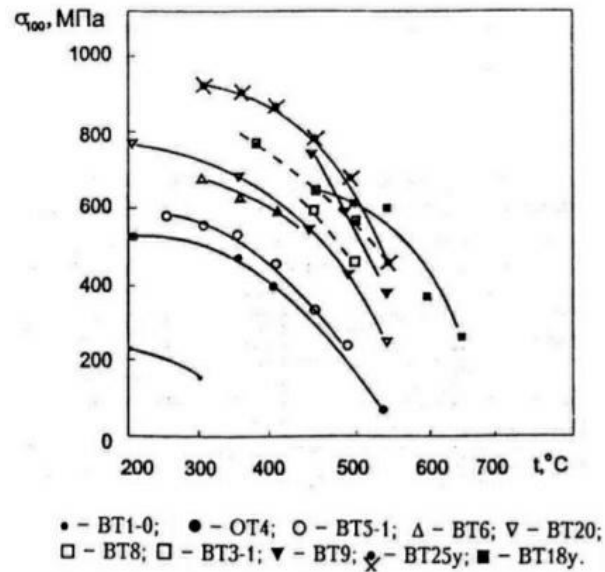


Рисунок 1.4 – Вплив температури на стогодинну довготривалу міцність [4].

При цьому сплави однієї групи мають близький рівень міцності, що дає можливість зіставлення сплавів між собою у межах своєї групи. Однак такий поділ не враховує різний фазовий склад порівнюваних сплавів і тому його не можна використовувати як універсальне, хоча воно зручне для початкового порівняння використовуваних сплавів.

Крім хімічного складу величезну роль формуванні комплексу службових властивостей грає термічна обробка металу. До основних вимог, що пред'являються до жароміцних сплавів, відноситься опір повзучості. До середини 1970-х років термообробку сплавів здійснювали в $(\alpha+\beta)$ -області, проте вимога поліпшення опору повзучості призвела до β -обробки, в результаті якої виникає двофазна пластинчаста (іноді голчаста) структура, що забезпечує підвищення опору повзучості [3]. Як приклад, приведено жароміцний титановий сплав BT8.

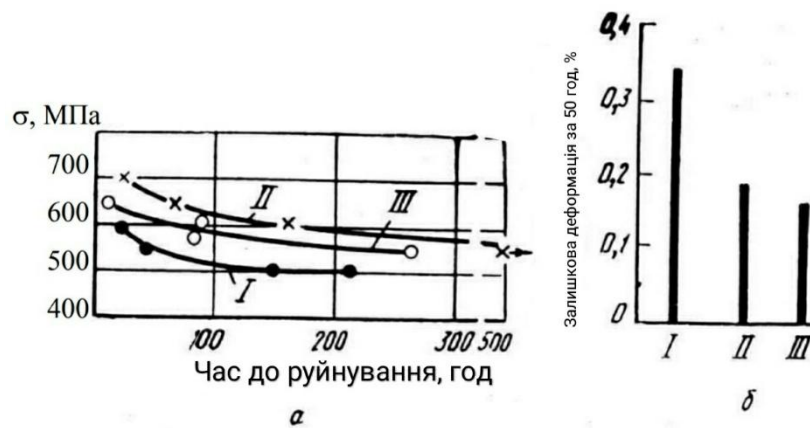


Рисунок 1.5 - Вплив структури на властивості при 500 °С сплаву ВТ8:

а - тривала міцність; б - повзучість

(I - рівноосна структура, II - пластинчаста структура кошикового плетіння, III - пластинчаста пакетна структура) [1]

Сплав ВТ8 забезпечує високі міцнісні та жароміцні властивості за рахунок високого вмісту алюмінію та легуванням кремнію. Максимальна робоча температура 480 °С. Сплави ВТ8-1 і ВТ8-1М перевершують своїх найближчих конкурентів таких, як сплави ВТ3-1 і ВТ9, з термічної стабільності, пластичності, технологічності та характеристик тріщиностійкості. Подвійний та ізотермічний відпал забезпечують оптимальне поєднання властивостей; вміст β - фази у відпаленому сплаві приблизно 10%. Сплав термічно зміцнюється. Основними видами напівфабрикату є прутки, поковки, штампування та плити. Задовільно деформується у гарячому стані. Зварювання не рекомендується. В основному застосовується у деталях ВМД (дисках, лопатках компресора низького тиску, деталях кріплення вентилятора) [1].

Однак подібна обробка не забезпечує високої пластичності в холодному стані і, головне, опору втоми. Межа втоми сплавів вища після обробки у двофазній ділянці, коли у сплавах формується глобулярна структура. Протилежний вплив зазначених факторів на властивості призвело до створення режимів обробки для отримання глобулярно-пластинчастої (бімодальної) структури, яка має найбільш сприятливе поєднання аналізованих властивостей. Однак, коли необхідно застосовувати сплави при максимально можливих

температурах, найбільш переважна пластинчаста структура, рівень жароміцності якої дещо вище, ніж у глобулярно-пластинчастої структури [1].

За тривалою міцністю і опором повзучості перевага пластинчастої структури перед глобулярною тим більша, чим вище температура і більше тривалість випробувань. Разом з тим, при температурах нижче 400 °С та обмеженому часі глобулярна структура може забезпечувати таку або навіть вищу жароміцність, як пластинчаста структура. Очевидно, в умовах низьких швидкостей повзучості за таких температурах це пов'язано з більш високою межею плинності матеріалу з глобулярною структурою.

Діапазони зміни різних властивостей за зміни параметрів кожного типу структури дуже значні. Підвищення короткочасної міцності, тривалої міцності (при $t \leq 450$ °С) та межі витривалості при обох структурах може бути забезпечене шляхом зменшення величини будь-якого параметра структури (розміру зерна, вторинних виділень тощо) та збільшення об'ємної частки тонких пластин вторинної α -фази [3].

Підвищення характеристик пластичності, в'язкості руйнування, опору повзучості і тривалої міцності (при $t > 450\text{--}500$ °С) може бути досягнуто в глобулярній структурі за рахунок укрупнення всіх елементів структури, зменшення об'ємної частки тонких або збільшення об'ємної частки α -фази, а в пластинчастій структурі шляхом збільшення розмірів α -колоній (для δ і ψ до 25–40 мкм), товщини пластин первинної α -фази (до 2,5–3,5 мкм), подрібнення (для δ та ψ) або укрупнення величини β -зерен (для δ_{100} до 50–200 мкм), зменшення об'ємної частки тонких пластин α -фази [3].

З жароміцних властивостей титанових сплавів найбільш широко досліджено короткочасну міцність, тривалу міцність і опір повзучості при підвищених температурах. При змішаній глобулярно -пластинчастій структурі тривала міцність і опір повзучості залежать від співвідношення площ займаних зазначеними типами структур. Збільшення частки пластинчастої структури призводить до підвищення цих характеристик.

У титанових сплавах з глобулярно -пластинчастою структурою досягається найкраще поєднання пластичності, в'язкості руйнування, жароміцності і витривалості, коли частка пластинчастої структури 70-80%. Таким чином, є можливість підвищення комплексу механічних властивостей напівфабрикатів з дрібнозернистою глобулярною структурою термообробкою при температурах, відповідних $(\alpha+\beta)$ - області близьких до температури $(\alpha+\beta)$ - β -переходу.

Істотний вплив на жароміцні властивості мають розміри частинок α - фази. Їх укрупнення в структурі глобулярного типу призводить до деякого підвищення тривалої міцності і опору повзучості [1]. Разом з тим, потовщення пластин α -фази пластинчастої структури, що досягається підвищенням температури і зменшенням швидкості охолодження, викликає зниження тривалої міцності. Подрібнення колоній α - пластин, що забезпечується прискоренням охолодження при попередній термічній обробці, призводить до збільшення тривалої міцності.

Для досягнення необхідного комплексу службових властивостей після створення вихідної двофазної структури необхідно провести зміцнюючу обробку, при якій виділяється вторинна-фаза, а в деяких випадках - інтерметаліди. При виділенні інтерметалідів зміцнення має бути дисперсійним. Основними інтерметалідами, які можуть виділятися в жароміцних сплавах, є алюмінії та силіциди титану та або цирконію.

1.3 Висновок

Так як різні титанові сплави проявляють свої переваги у властивостях в різних температурних діапазонах, то при підборі марки сплаву для проектування деталей (як приклад можна привести двигуни, диски і лопатки компресора) необхідно вибирати сплав з кращим комплексом функціональних характеристик в конкретному робочому температурному інтервалі.

У зв'язку зі зростанням вимог до виробів, які працюють в екстремальних температурах набуває необхідності раціональне структурування сплавів, яке залежить від багатьох факторів: хімічного складу, способів модифікації і мікролегування, вмісту шкідливих домішок, способів і режимів термічної обробки.

В результаті проаналізованих літературних джерел виявлена проблематика використання жароміцних титанових сплавів. В наслідок високих температур, які пагубно впливають на властивості титану дослідники продовжують експериментувати з мікролегуванням титанових жароміцних сплавів. Також було розглянуто вплив температур на титанові сплави та зміни їх механічних властивостей.

Відомо, що захисні покриття, отримані внаслідок ТО, при високих температурах та наявності повітряних суспензій або розчиняються в матеріалі деталей, що погіршує його властивості, або здуваються з нього за рахунок ерозійного зношування. Саме тому в даній роботі буде розглянуто декілька варіантів ТО з різними сплавами аби з'ясувати конкретні зміни властивостей титанових жароміцних сплавів.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір матеріалу дослідження

У всьому світі протягом досить тривалого часу спостерігається стійка тенденція збільшення частки жароміцних титанових сплавів у конструкціях всіх типів і призначень. Завдяки поєднанню технологічних та експлуатаційних характеристик жароміцні титанові сплави знайшли широке застосування у сучасному виробництві. Жароміцні титанові сплави застосовують при виготовленні виробів, які відчувають статичні, циклічні, повторно-статичні навантаження, а також схильні до негативного впливу процесів газової корозії.

Все завдяки їх хімічним та фізико-хімічним властивостям [11]. Звичайно все це обумовлено властивостями титанових сплавів: висока корозійна стійкість в різних середовищах, висока питома міцність, висока температура плавлення, низький коефіцієнт термічного розширення.

Однак, титанові сплави мають і ряд недоліків. Однією з основних причин невпевненості у використанні титану у сучасному виробництві є його висока вартість. Проте, це обумовлено високими показниками протидії руйнуванню. «Основною причиною руйнування титанових деталей є втома, яка, як правило, супроводжується впливом газонасиченого поверхневого шару або іншими технологічними факторами (груба механічна обробка, наявність глибоких рисок, шліфувальні припіки та інше)» [11 стр. 18]. Саме тому до титанових сплавів, особливо жароміцних, пред'являють високі вимоги щодо чіткого виконання технологічного виробництва для забезпечення надійності виробів з них.

Як об'єкт дослідження обрано жароміцний титановий сплав ВТ8. Сплав ВТ8 жароміцний $\alpha+\beta$ сплав призначений для виготовлення лопаток компресора, кріплення та інших деталей, що працюють в загальнокліматичних умовах тривало до температури 400 °С і до 1000 год при температурі 450 °С,

відноситься до групи деформованих жароміцних сплавів на титановій основі [12, 13].

Таблиця 2.1

Хімічний склад титанового сплаву ВТ8, ГОСТ 19807 - 91

Легуючий елемент	Ti	Al	Mo	Si	Zr	Fe	O	C	N	H
Вміст, %	87.55-90	5.8-7	2.8-3.8	0.2-0.4	0.5	0.3	0.15	0.1	0.05	0.015

Таблиця 2.2

Механічні властивості титанового сплаву ВТ8, ГОСТ 26492-85

	σв, МПа	σв, %	Ψ, %	КСУ, кДж/м ²	Термообробка
Пруток, ГОСТ 26492-85	930-980	6-8	15-20	200-300	Відпал при 850 °С, повітря
Пруток, підвищеної якості, ГОСТ 26492-85	930-1230	7-9	19-30	300	Відпал при 850 °С, повітря

2.2 Дослідження на багатоциклічну втому

Для розрахунку ресурсу виробів, які працюють в екстремальних умовах необхідно для кожного матеріалу мати певний набір характеристик міцності, в тому числі і характеристики багатоциклової втоми.

Для встановлення цих характеристик буде проведено ряд випробувань. Досліджувані схеми навантаження (одновісне «розтягування-стиснення» і

«чистий згин з обертанням») мають на увазі різні напружено-деформовані стани. Так, при схемі навантаження «чистий вигин з обертанням» концентрація максимальної напруги знаходиться на поверхневій частині поперечного перерізу робочої частини зразка, а при схемі навантаження «розтягування-стиск» максимальні напруги розподілені рівномірно по всій площі поперечного перерізу зразка. Вважається, що при випробуваннях за схемою навантаження «розтягування-стиск» матеріал знаходиться в найбільш напружених умовах, що більшою мірою дозволяє оцінити здатність матеріалу до опору багато циклової втоми. Тому в даний час світові стандарти вимагають використовувати в розрахунках результати випробувань за схемою навантаження «розтягування-стиснення» [14].

Випробування на багато циклову втому за схемою навантаження «чистий вигин із обертанням» проводили на односекційних випробувальних машинах МВІ611-М (рис. 2.1 а). Машина МВІ611-М за принципом випробувань відноситься до типу втомних машин, здійснюючих сталість заданої програми випробувань протягом усього часу випробування. При цьому зміна напружень у випробовуваному зразку відбувається за симетричним циклом. За способом і характером збудження сил, що деформують зразок, машина відноситься до типу випробувальних машин з системою важеля навантаження при співвідношенні плечей важеля 1:14,4. Випробуваний зразок, закріплений в шпindelних бабках, навантажується і при обертанні реалізується схема навантаження «чистий вигин з обертанням». Для випробувань на багато циклову втому за схемою навантаження «розтягування-стиснення» використовували універсальну гідравлічну АГ LФV 100-НН (рис. 2.1, б) з цифровою системою керування. При проведенні порівняльних випробувань зі схемою навантаження «чистий вигин з обертанням», випробування на «розтягування-стиснення» необхідно також проводити при симетричному навантаженні, коли амплітуда прикладеного навантаження при розтягуванні зразка дорівнює амплітуді прикладеного навантаження. Сумарна похибка

навантаження становила не більше 1%. Висока точність навантаження забезпечується вбудованою системою керування.



а)



б)

Рисунок 2.1 - Односекційні випробувальні машини MBI611-M (а) та випробувальна машина LFV 100-НН фірми Walter+Bai AG (б) [14]

Основною складністю проведення випробувань за схемою одновісного «розтягування-стискання» є перехід через нуль навантаження у процесі циклування. У сучасних випробувальних машинах (у тому числі і в випробувальній машині LFV 100-НН) для забезпечення реалізації точності осьового навантаження, що прикладається, при випробуваннях на багато циклічну втому застосовуються захоплення з регульованим гідравлічним підтисканням для виключення люфту різьбової частини зразка в оснащенні при переході. Перед кожним випробуванням також проводилося регулювання співвідношення відповідно до вимог стандарту ASTM E1012 «Практика для перевірки силової рами та вирівнювання зразків при прикладеній осьовій розтягувальній або стискаючій сили».

Випробування проводили на двох видах стандартних гладких циліндричних зразків з робочою частиною змінного перерізу. Точність вимірювання перерізу робочої частини зразка повинна бути не менше ніж 0,01 мм.

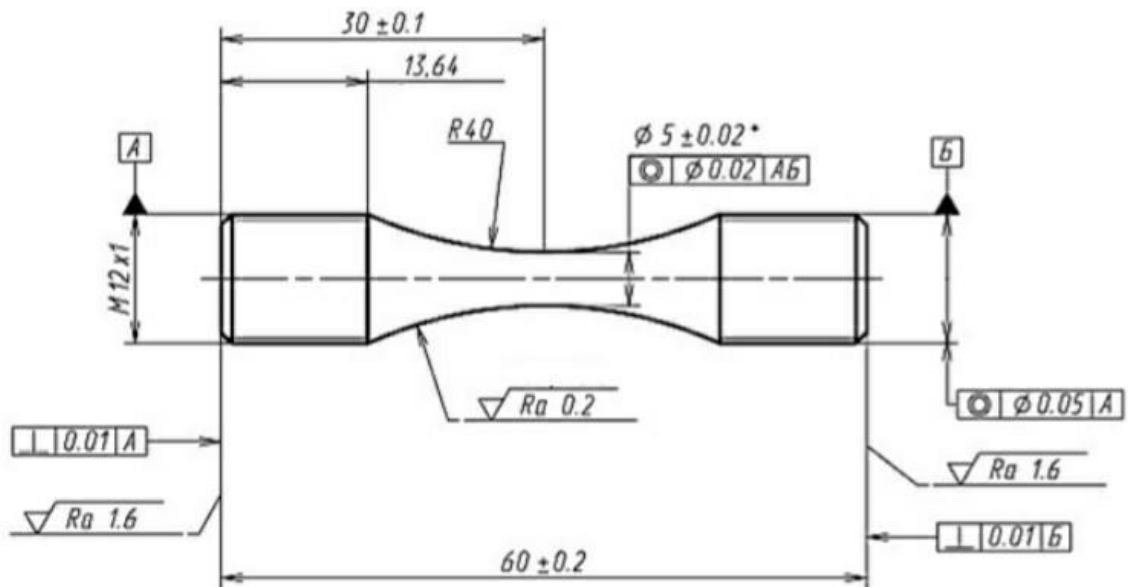


Рисунок 2.2 - Гладкий циліндричний зразок з робочою частиною змінного перерізу для випробувань за схемами навантаження «розтягування-стиснення»

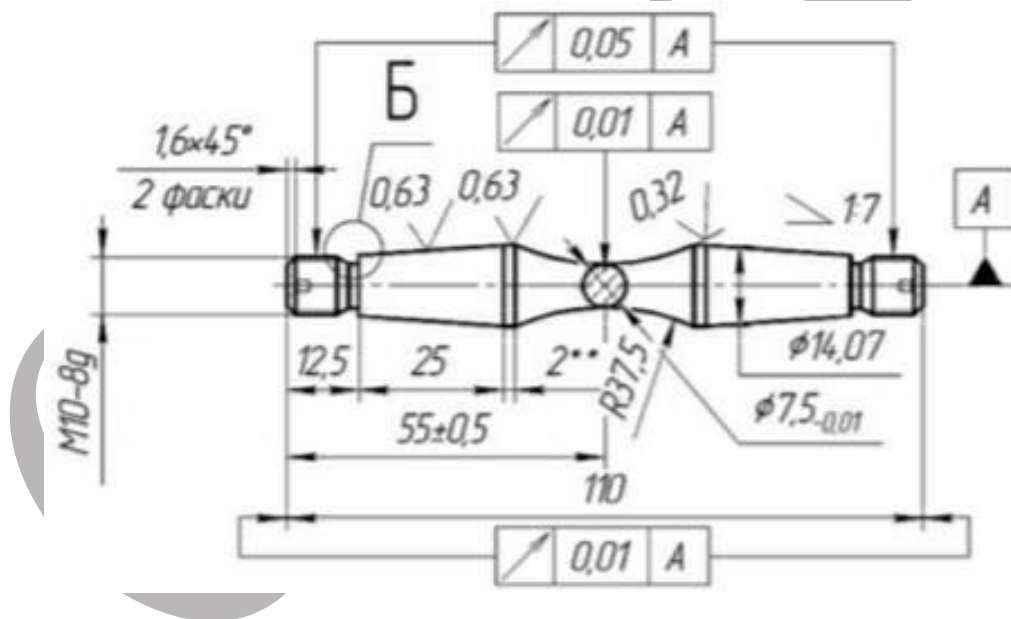


Рисунок 2.3 - Гладкий циліндричний зразок з робочою частиною змінного перерізу для випробувань за схемами навантаження «чистий вигин з обертанням»

Режими випробувань жароміцного титанового сплаву ВТ8 на багаточислову втому наведено у табл. 2.3.

Режими випробувань на багатоциклічну втому при частоті 50 Гц

Марка сплаву	Температура випробувань, °С	Схема навантаження	R_σ	Цикл навантаження	База випробувань, цикл
BT8	20 та 450	чистий вигин з обертанням, розтягування-стиснення	-1	Синусоїдальний	$10^5 - 10^7$

Після отримання результатів втомних випробувань в умовах «розтягування-стиснення» і при «чистому вигині з обертанням», побудовані криві втом, які зображені на рис. 2.4.

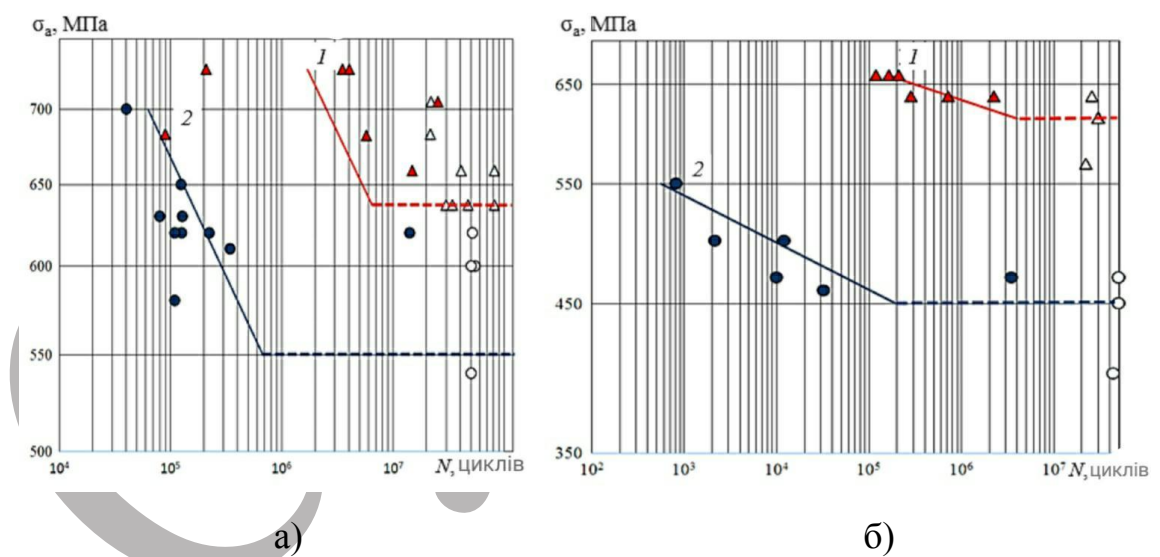


Рисунок 2.4 - Криві багатоциклової втоми жароміцного титанового сплаву BT8 при навантаженні за схемами «чистий вигин з обертанням» (1) і «розтягування-стиснення» (2) при температурах 20 (а) і 450 °С (б); \circ , Δ – зразок знятий без руйнування; \bullet , \blacktriangle – зразок зруйнований у робочій частині

Після проведення випробувань здійснювали розрахунок межі обмеженої витривалості, відповідної ймовірності руйнування 50%, на рівнях 10^7 і $2 \cdot 10^7$ циклів. Розраховані межі обмеженої витривалості на базі 10^7 і $2 \cdot 10^7$ циклів наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Розраховані межі обмеженої витривалості при навантаженні за схемами «чистий вигин з обертанням» та «розтягування-стиск»

Марка сплаву	Вид навантаження	Температура випробувань, °С	σ ₋₁ , МПа, на базі циклів	
			10 ⁷	2•10 ⁷
ВТ8	чистий згин з обертанням	20	650	650
	розтягування-стиснення		550	550
	чистий згин з обертанням	450	614	614
	розтягування-стиснення		450	450

Розраховані межі обмеженої витривалості для зразків, випробуваних за схемою навантаження «розтягування-стиснення» виявилися нижчими за межі обмеженої витривалості для зразків, випробуваних за схемою навантаження «чистий вигин з обертанням». У табл. 3 представлена різниця між межами обмеженої витривалості, які отримані для схем «розтягування-стиснення» і «чистий вигин з обертанням», у відсотковому співвідношенні.

Зниження межі обмеженої витривалості для схеми «розтягування-стиснення» щодо схеми «чистий вигин з обертанням» у відсотковому співвідношенні

Марка сплаву	Температура випробувань, °С	$\frac{\sigma_{-1}^{\text{ВИГ}} - \sigma_{-1}^{\text{РОЗ}}}{\sigma_{-1}^{\text{ВИГ}}} \cdot 100$, % на базі циклів	
		10^7	$2 \cdot 10^7$
ВТ8	20	15	15
	450	27	27

Внаслідок досліджень вдалось отримати результати зниження межі обмеженої витривалості на базі випробувань 10^7 та $2 \cdot 10^7$ циклів для схеми навантаження «розтягування-стиск» щодо схеми «чистий вигин з обертанням» для жароміцного деформованого сплаву ВТ8 при кімнатній температурі 15 % та при робочій температурі 27 %.

Зниження межі обмеженої витривалості при схемі навантаження щодо схеми «чистий вигин з обертанням» обумовлено тим, що при випробуваннях за схемою навантаження «чистий вигин з обертанням» виникає неоднорідний напружений стан у поперечному перерізі робочої частини зразка, у той час як при випробуваннях за схемою навантаження «розтягування-стиснення» - у перерізі робочої частини зразка однорідний напружений стан і максимальна напруга постійні по всьому перерізу. Таким чином, відмінність меж обмеженої витривалості обумовлена різницею однорідності напруженого стану в поперечному перерізі робочої частини зразків, випробуваних за схемою навантаження «чистий вигин з обертанням» і «розтягування-стиск».

Дане перевищення меж обмеженої витривалості впливає з того, що при випробуваннях за схемою «розтягування-стиснення» більша кількість матеріалу працює при максимальному навантаженні в порівнянні зі схемою «чистий вигин з обертанням».

2.3 Металографічний аналіз

В різних галузях промисловості широко застосовується металографія [15]. Шляхом отримання збільшених зображень структури металів та сплавів за допомогою спеціального обладнання та подальшого їх аналізу вивчається морфологія та фазові складові.

Як відомо [15] завданням металографічних досліджень є встановлення впливу особливостей структури й фазового складу металевих матеріалів на їх фізичні та механічні характеристики. Такі дослідження проводять використовуючи методи оптичної та електронної мікроскопії. Інформацію пов'язану зі структурою металів та сплавів можуть доповнювати рентгеноскопією. Дослідження мікроструктури за допомогою мікроскопів називається мікроаналізом.

Мікроструктура - це структура (форма і розмір зерна) металів і сплавів під мікроскопом. Для мікроаналізу вирізають зразок з досліджуваного матеріалу, його поверхню шліфують, полірують, гравірують і потім досліджують під металографічним мікроскопом [16].

В результаті металографічного аналізу можна визначити:

1. Величину зерна
2. Наявність фаз, структурних складових, дисперсних частинок; їх кількість, величину, взаємне розташування, будову.

Фаза – відокремлена частина структури, відокремлена від сусідньої межею розділу, під час переходу через яку можуть змінюватися склад, будову та властивості.

Структурна складова - більш загальне поняття, може включати 2 і більше фази, також є відокремленою частиною структури.

Дисперсні частинки - дрібні частки, розподілені структурою і які мають хімічні сполуки Me з Me, чи Me з неметалами (нітриди, оксиди, карбіди тощо.).

Формуються у структурі в процесі додаткової обробки матеріалів з метою зміни властивостей.

3. Спосіб виготовлення деталі
4. Вид руйнування металу
5. Крайові дислокації, що вийшли на поверхню металу
6. Наявність та вид тріщини після руйнування матеріалу під впливом різних зовнішніх факторів
7. Перетворення, що відбуваються в металах у процесі різних обробок, у тому числі термічної обробки
8. Визначити рух, розмноження та щільність дислокацій (з використанням електронних мікроскопів).

Для вивчення кристалічної структури металевих матеріалів використовується рентгеноструктурний аналіз (РСА). В основі цього методу лежить взаємодія рентгенівського випромінювання з електронами металу, внаслідок якого виникає дифракція рентгенівських променів (довжина хвилі 0,02 – 0,2 нм).

Крім того, метод РСА застосовується для розпізнавання фаз і частинок за їх кристалоструктурними параметрами. Для проведення рентгеноструктурного аналізу використовуються рентгенівські камери та дифрактометри. Дослідження структури металевих матеріалів різними методами дозволяє вивчити внутрішню будову матеріалів, процеси перетворення, які у структурі під час зовнішніх обробок.

Зображення мікроструктури отримують використовуючи шліфовану поверхню зразка. Попередньо такий зразок оброблюється абразивними матеріалами для зняття поверхневого шару й отримання шліфувального перерізу. Наступним кроком зразки полірують механічним або електролітичним шляхом. Оптичні дослідження проводяться далі на таких зразках методами оптичної мікроскопії при збільшенні до близька 1 тис. разів.

Такі дослідження є найважливішими при виборі матеріалів, оскільки саме структура металів та сплавів визначає та обумовлює властивості матеріалів.

2.4 Дослідження мікротвердості

Вимірювання мікротвердості відбувається використовуючи твердомір ПМТ-3.



Рисунок 2.5 – Твердомір ПМТ-3 [16]

Розглянемо вимірювання мікротвердості за методом Віккерса. Метод Віккерса часто простіше у використанні, ніж інші випробування на твердість, тому що необхідні розрахунки не залежать від розміру алмазного індентора, а індентор може використовуватися для всіх матеріалів. Основний принцип метод Віккерса, як і для всіх загальних заходів твердості, полягає в тому, щоб спостерігати здатність матеріалу чинити опір пластичної деформації зі стандартного джерела. Метод Віккерса може використовуватися для всіх металів і має один з найширших масштабів серед випробувань на твердість. Одиниця вимірювання твердості, дана тестом, відома як показник Віккерса (HV) або твердість алмазної піраміди (DPH).

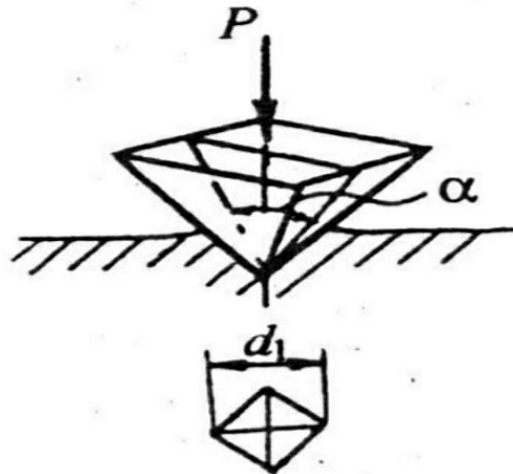


Рисунок 2.6 – Схема вимірювання мікротвердості за методом Віккерса [16]

де P - навантаження на піраміду, Н;

d_1 - діагональ відбитка;

α - кут між протилежними гранями піраміди

При випробуванні на твердість за методом Віккерса в поверхню матеріалу вдавлюється алмазна чотиригранна піраміда з кутом при вершині = 136° (Рис. 2.6). Після зняття навантаження вдавлення вимірюється діагональ відбитка d_1 . Число твердості за Віккерсом HV підраховується як відношення навантаження P до виміряного значення діагоналі відбитка (M):

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1.854 \frac{P}{d_1^2} \quad (2.1)$$

Число твердості за Віккерсом позначається символом HV із зазначенням навантаження P і часу витримки під навантаженням, причому розмірність числа твердості ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставиться. Тривалість витримки індентора під навантаженням приймають для сталей 10 – 15 с, а для кольорових металів – 30 с.

2.5 Висновки

В даному розділі була розглянута методика та матеріали для дослідження. Матеріалом для дослідження обраний титановий сплав ВТ8. Сплав ВТ8 -

жароміцний $\alpha+\beta$ сплав призначений для виготовлення лопаток компресора, кріплення та інших деталей, що працюють в загальнокліматичних умовах тривало до температури 400 °С і до 1000 год при температурі 450 °С, відноситься до групи деформованих жароміцних сплавів на титановій основі [12, 13]. Основними легувальними елементами є цирконій, молібден і алюміній.

До основних методів досліджень відносять: дослідження макроструктури (макроаналіз); дослідження мікроструктури (мікроаналіз); випробування матеріалу на багатоциклічну втому; випробування механічних властивостей. Після ряду досліджень в розділі були наведені їх результати.

Проаналізувавши ряд наукових робіт, ми розглянули сучасну проблематику вибору матеріалів для їх використання у виробництві конструкторських деталей, що працюють при високих температурах.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Дослідження впливу легувальних елементів на жароміцні титанові сплави

Розвиток науки і техніки постійно висуває нові вимоги до матеріалів, які повинні відповідати сучасним тенденціям. Існує кілька шляхів вирішення поставленої задачі. Одним з них, з точки зору оптимального співвідношення економічного та технологічного обґрунтувань, є модернізація існуючих сплавів шляхом легування їх новими елементами в невеликій кількості (мікролегування) [17]. Це дозволяє істотно змінювати характеристики матеріалу при незначній зміні існуючого технологічного процесу.

Основною метою легування титанових сплавів є підвищення міцності, жароміцності та корозійної стійкості. Широке застосування знайшли сплави титану з алюмінієм, хромом, молібденом, ванадієм, марганцем, оловом та деякими іншими елементами.

Титанові вироби у відповідальних вузлах комерційної та військової техніки часто експлуатуються в екстремальних умовах, коли великі зовнішні навантаження прикладаються до них з досить високими швидкостями та в екстремальних температурах.

Основні принципи легування жароміцних сплавів зводяться до положень, які наведені в [1, 18,].

Встановлення зв'язків конкретних механічних властивостей (короткочасні властивості, опір втоми і повзучості, характеристики жароміцності тощо) з хімічним складом, типом і параметрами структури є актуальним і дуже важливим завданням.

Для проведення досліджень впливу легувальних елементів на титанові сплави обрано типовий сплав типу α - β (Ti-4.5Al-4Cr-0.5Fe-0.15C) – Ti-4Cr. Для

визначення впливу різних легуючих елементів на даний сплав було створено декілька зразків. Хімічний склад зразків наведений в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Хімічний склад легованих сплавів

Зразок	Al	Cr	Fe	C	Інші елементи
Ti-4Cr	4.5	4	0.5	0.15	-
5%Mo	4.5	-	0.5	0.15	Mo 5%
7.5%V	4.5	-	0.5	0.15	V 7.5%
2Fe-1Cr	4.5	1	2	0.15	-
4%Ni	4.5	-	0.5	0.15	Ni 4%
3%Mn	4.5	-	0.5	0.15	Mn 3%
3%Co	4.5	-	0.5	0.15	Co 3.0
7.5Sn-2Al	2	4	0.5	0.15	Sn 7.5

Шість сплавів, що містять Fe, Mo, V, Ni, Mn і Co, причому ці елементи є заміниками Cr; і один сплав, що містить Sn як заміник Al. Хром був замінений, щоб запобігти випаданню TiC і призупинити процеси старіння, TiCr₂. Алюміній було замінено, оскільки очікується, що заміна ще більше знизить стійкість до деформації при підвищених температурах.

Випробувані матеріали були розплавлені за допомогою вакуумно-дугового плавлення, щоб отримати злитки розміром приблизно 40 × 20 мм, і кожен злиток був викуваний у розмір приблизно 25 × 55 мм. Щоб більш детально прояснити вплив легуючих елементів на оброблюваність, бажано мати бета-відпалену мікроструктуру, яка складається з багатьох альфа-рейок у бета-матриці.

Щоб досягти цього, усі композиції були відпалені при температурі 1100 °C, що вище, ніж точка поліморфного перетворення, утримуючи при цій температурі протягом 2 годин. І згодом охолодженням на повітрі.

Також ще два сплава, які, як очікується, будуть кращими за оброблюваністю (табл. 3.2), були розплавлені в печі індукційної плавки з холодним тиглем для отримання зливок розміром приблизно 155 × 165 мм. Кожен злиток був викований у круглий брусок діаметром 60 мм, і брусок був відпалений при 800 °С протягом 1,5 години.

Таблиця 3.2

Хімічний склад легованих титанових сплавів

Зразок	Al	Cr	Fe	C
Ti-4Cr	4.5	4	0.5	0.15
F-1	4.5	2.5	1.25	0.15
F-2	4.5	1	2	0.15

Кожен відпалений брусок досліджували на його здатність до гарячої обробки, механічну обробку та поведінку під час старіння. Зразки сплавів з таблиць та Ti-4Cr, останній буде використано як еталонний матеріал, були виготовлені з комерційно доступних круглих прутків діаметром 60 мм.

Оброблюваність кожної композиції оцінювалася за допомогою оптичного мікроскопа для визначення ширини зносу бокового краю ріжучої кромки стружки після різання. Деталі умов різання показано на діаграмах. На кожному зразку під оптичним мікроскопом спостерігали мікроструктури, які були дзеркально відполіровані та протравлені (вода : азотна кислота = 80 : 15). Твердість вимірювали тестером Віккерса з навантаженням 10 кг.

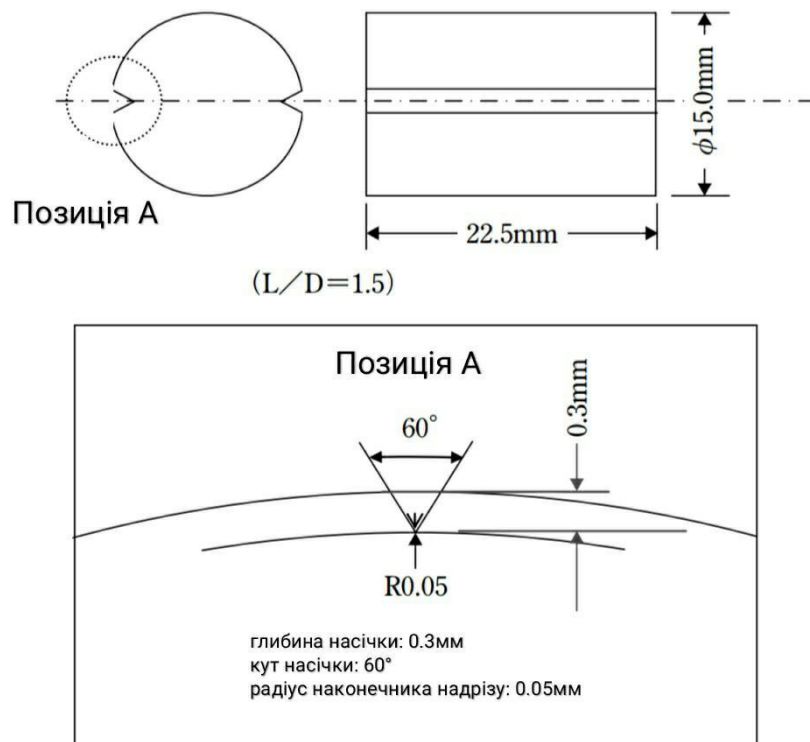


Рисунок 3.1 - Випробування зразка на межі стискування

Гарячу оброблюваність оцінювали на зразках, як показано на рис. 3.1, кожен з яких мав розмір $15 \times 22,5$ мм з виїмками глибиною 0,3 мм з обох боків. Зразки нагрівали до 875 °C або 810 °C в електричній печі, витримували при відповідних температурах протягом 50 хвилин і виконували гаряче пресування при 700 °C або 650 °C, відповідно, на 600-тонному гідравлічному пресі. Верхню матрицю витримували при температурі від 120 °C до 130 °C, а нижню – при температурі від 150 °C до 170 °C. Кінці кожного зразка були закріплені під час пресування. Швидкість деформації контролювалася від $1/с$ до $2/с$. Потім зразки були досліджені на наявність або відсутність тріщин у нижній частині виїмок. Симулятор гарячої обробки використовувався для оцінки стійкості до деформації на стандартних зразках, кожен з яких має розміри 8×12 мм, при робочих температурах у діапазоні від 400 °C до 800 °C. Швидкість повзунка тестера була встановлена на 15 мм/с, а максимальне напруження деформації було прийнято як значення опору деформації.

Для вивчення поведінки старіння кожен відпалений зразок повторно нагрівали до температури від 300 °C до 700 °C, витримували при цій

температурі протягом 8 годин, а потім охолоджували повітрям. Були проведені випробування на розтяг, щоб вивчити зміну міцності та пластичності.

Загалом знос інструменту зростає зі збільшенням твердості оброблюваного матеріалу. Усі композиції, наведені в таблиці 3.1, мають майже однакову твердість за Віккерсом $310 \pm 10 \text{HV}$, отже, вплив твердості вважається незначним у цьому дослідженні. Мікроструктура кожної композиції демонструє структуру β -відпалу, з невеликою кількістю TiC , що залишилася.

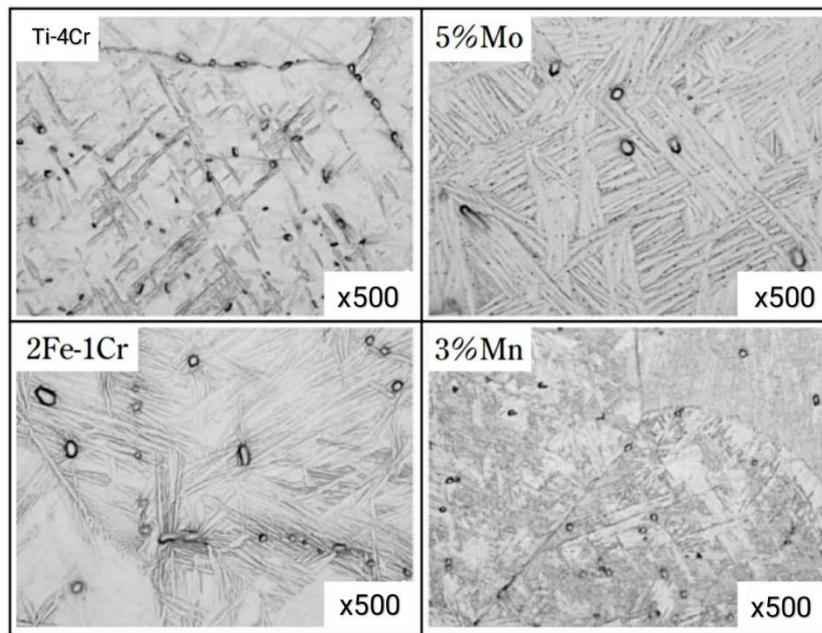


Рисунок 3.2 – Мікроструктура досліджуваних зразків

Різання проводили з наступними параметрами: швидкість - 100м/хв; швидкість подачі - 0,1 мм/об; глибина різання - 0,5 мм і відстань різання - 50м. Ширина зносу бокової поверхні після різання показана на рис. 3.3.

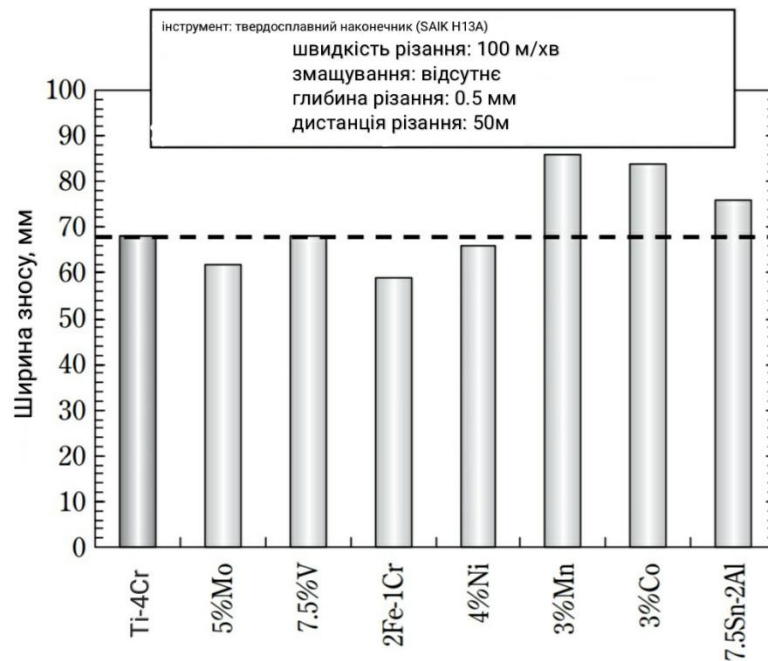


Рисунок 3.3 - Знос тестових сплавів під час оброблюваності

Порівняно зі зносом інструменту еталонним складом Ti-4Cr, матеріали, позначені як 5% Mo та 2Fe-1Cr, демонструють сприятливо малий обсяг зносу. З іншого боку, матеріали, позначені як 7,5 % V і 4 % Ni, демонструють обсяг зносу інструменту майже такий, як і Ti-4Cr, і ті, що позначаються як 3 % Mn, 3% Co і 7,5 Sn- 2Al показують обсяги зносу більші, ніж у контрольного матеріалу.

Як показано на рис. 3.2, 5% Mo і 2Fe-1Cr матеріали, кожен з яких має невеликий об'єм зносу, мають альфа-рейки, які трохи більші. Загалом, більша концентрація деформації у вторинній зоні зсуву полегшує утворення стружки, покращуючи оброблюваність. Оскільки вважається, що великі альфа-рейки зменшують концентрацію деформації, дана структура, що містить таку фазу, спочатку вважалася несприятливою для механічної обробки.

В ході дослідження, було виявлено, що заміна Cr на Mo або Fe ефективно покращує оброблюваність Ti-4Cr. Заміна Fe є кращою, оскільки цей елемент більш поширений і менш дорогий.

Серед легуючих елементів Fe значно відокремлюється під час фактичного виробництва, що включає плавлення та лиття. Беручи це до уваги, композиції, наведені в таблиці 3.2, були підготовлені для оцінки придатності до гарячої обробки. На рис. 3.4 показано мікроструктури зразків цих сплавів. Зразки мають майже однакову твердість за Віккерсом $340 \pm 10 \text{HV}$.

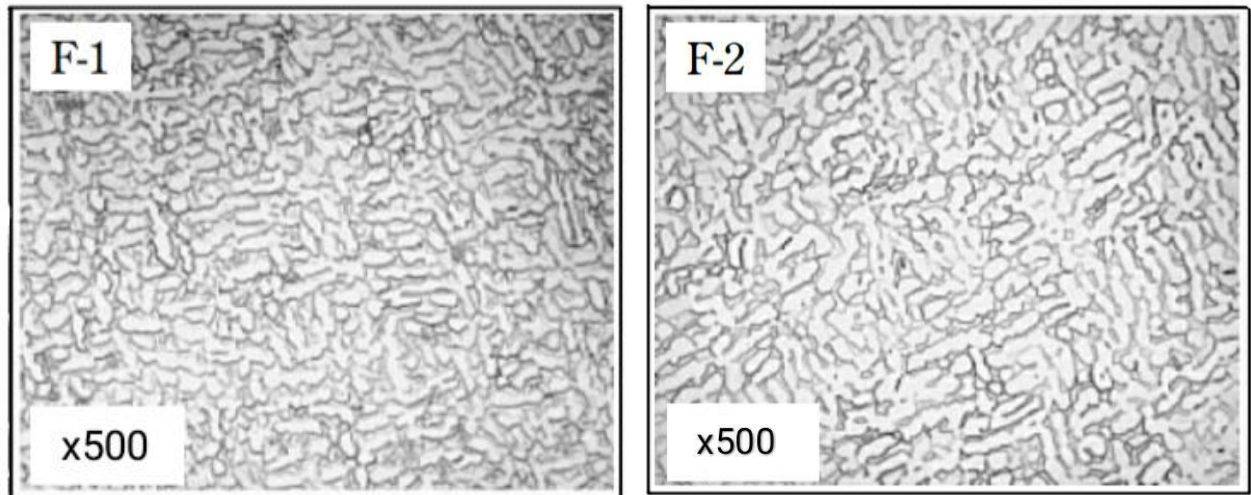


Рисунок 3.4 – Мікроструктура досліджуваних зразків з підвищеним вмістом Fe

Випробування на стиск були проведені з закріпленням кінців кожного зразка, щоб побачити, чи не відбулося у зразках тріщин. На рис. 3.5 показано результати оцінювання.

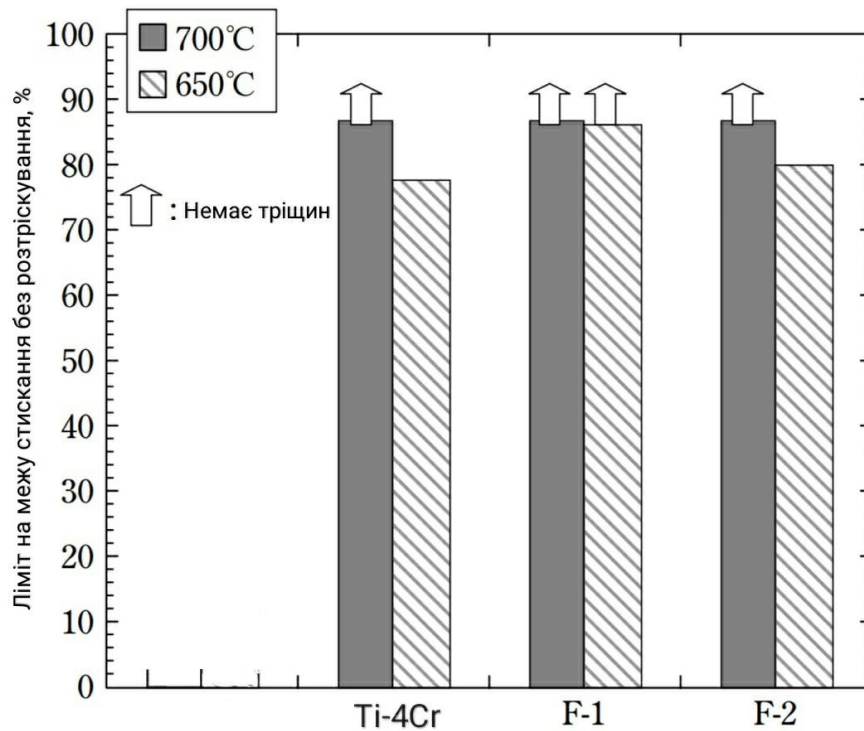


Рисунок 3.5 - Межа стискання звичайного і сплавів з високим вмістом Fe системи

У порівнянні зі звичайним титановим сплавом типу α - β , Ti-4Cr і сплави з високим вмістом заліза, наприклад F-1 і F-2, мають дуже високі межі розтріскування. Зокрема, композиції з високим вмістом заліза мають межі розтріскування навіть вищі, ніж у Ti-4Cr. Також досліджувалася стійкість до деформації кожного сплаву.

Стійкість до деформації Ti-4Cr і сплавів з високим вмістом заліза (F-1, F-2) мають стійкість до деформації, яка значно зменшується при підвищених температурах. При 600 °C F-1 і F-2 мають стійкість до деформації майже на 10% меншу, ніж у Ti-4Cr. При 600 °C Fe в α -фазі має коефіцієнт дифузії приблизно на два порядки величини вищий, ніж у Cr, а в β -фазі на три-чотири порядки вищий. Отже, передбачається, що знижений вміст Cr і підвищений вміст Fe сприяють дифузії, що більше знижує опір деформації.

Сплав Ti-4Cr і сплави з високим вмістом Fe, показані в таблиці 3.2, були піддані старінню, після чого були проведені випробування на розтяг. Кожен сплав має високу міцність при температурі близько 500 °C зі зниженою пластичністю. Порівняно з Ti-4Cr, F-1 і F-2 демонструють набагато менше зниження пластичності. В ході експерименту було встановлено, що знижений вміст Cr у F-1 і F-2 зменшує значення крихкості при старінні. Також слід зазначити, що сплави F-1 і F-2 мають невелику різницю в діапазоні температур, де відбуваються зміни як міцності так і пластичності даних сплавів.

3.2 Дослідження впливу термічної обробки на жароміцні титанові сплави

3.2.1 Дослідження впливу термічної обробки на сплав VT3-1

Дослідники продовжують вивчати способи використання якомога ефективніше термічної обробки для підвищення комплексу властивостей титанових сплавів можна при оптимізації температурно-часових параметрів з урахуванням особливостей фазових перетворень у кожному із сплавів.

У процесі їх термічної обробки відбуваються вкрай складні фазові перетворення з перерозподілом легуючих елементів та формуванням численних метастабільних фаз різного ступеня легованості [19], що суттєво впливає на фізичні, механічні, технологічні та експлуатаційні властивості титанових сплавів. Можливість варіювання співвідношення фаз, ступеня їх легованості, морфології структурних складових, обумовлена природою титанових сплавів, дозволяє змінювати властивості виробів у широкому діапазоні.

Мета даного експерименту - встановлення закономірностей фазових перетворень у складнолегованому титановому сплаві для оптимізації температурно-часових режимів термічної обробки.

Для проведення досліджень були виготовлені зразки, які були вирізані з технологічних промислових напівфабрикатів деформованого сплаву VT3-1. Хімічний склад сплаву VT3-1 наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Хімічний склад сплаву ВТЗ-1

Ti	Mo	Cr	Fe	Al	Si	C	N	Zr	Домішки Н та О
85,95- 91,05	2-3	0,8-2	0,2- 0,7	5,5-7	0,15- 0,4	До 0,1	До 0,05	До 0,5	До 0,015

В ході дослідження вивчались фазові перетворення в широкому температурному інтервалі (200-1100 °С) після нагрівання до зазначених температур від кімнатної та охолодження після витримки в однофазній області для нівелювання впливу структури вихідних зразків і нерівномірного розподілу легуючих елементів.

Режими зміцнюючої термічної обробки титанового сплаву ВТЗ-1 наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Режими зміцнюючої термічної обробки титанового сплаву ВТЗ-1

Марка сплаву	$T_{пп}, °C$	$T_{зак}, °C$	$T_{стар}, °C$	Тривалість старіння, год
ВТЗ-1	960-1000	860-900	500-620	1-6

Використовували рентгенографічний, металографічний метод аналізу, мікрорентгеноспектральне зондування.

Фазовий склад зразків залежно від режимів термічної обробки наведено в таблицях 3.5 та 3.6. З наведених даних ясно випливає, що на фазовий склад впливали параметри термічної обробки.

Таблиця 3.5

Фазовий склад зразків титанового сплаву в залежності від температури
гартування

Температура	Фазовий склад	Кількість β -фази
100	α - β	24,0
200	α - β	17,0
300	α - β	13,0
400	α - β	9,0
500	α - β	6,0
600	α - β	4,0
700	α - β	14,0
800	α - $\beta_{\text{нест}}$	20,0
820	α - $\beta_{\text{нест}}$	50,5
840	α - $\beta_{\text{нест}}$	41,0
860	α - α'' - β	34,0
900	α - α'' - β	4,0
930	$\alpha(\alpha')$ - α'' - β	-
980	α'	0
1050	α'	0
1100	α'	0
1200	α'	0

Таблиця 3.6

Фазовий вміст зразків титанового сплаву в залежності від температури
температури

Обробка в β -області	Температура витримки, °C	Час витримки, хв	Фазовий склад	Кількість β -фази, %
----------------------------	--------------------------	------------------	---------------	----------------------------

Продовження таблиці 3.6

980 °С, 10 хв	960	5	$\alpha-\alpha'-\beta$	-
		90	$\alpha-\alpha'-\beta$	-
	930	5	$\alpha-\alpha'-\alpha''-\beta$	10
		30	$\alpha(\alpha')-\alpha''-\beta$	8
		60	$\alpha-\alpha''-\beta$	7
	900	3	$\alpha-\alpha'-\alpha''-\beta$	10
		5	$\alpha-\alpha'-\alpha''-\beta$	6
		20	$\alpha-\alpha''-\beta$	9
		30	$\alpha-\alpha''-\beta$	7
	600	5	$\alpha-\beta$	25
		60	$\alpha-\beta$	23

В ході експериментальних досліджень було встановлено такі особливості фазових перетворень:

- формування $\alpha-\beta$ - фаз у всіх досліджених зразках при температурах нижче 700 °С і при нагріванні, і при охолодженні;
- утворення при нагріванні та охолодженні безлічі метастабільних перехідних станів, які при гартуванні фіксуються у вигляді $\beta_{\text{нест}}$ і мартенситних фаз (α' , α'');
- зміна фазового складу зразків сплаву ВТЗ-1, попередньо оброблених при температурах β -області, в залежності від часу витримки при температурах 930 °С і 900 °С (сплав ВТЗ-1);

Фазові перетворення в титанових сплавах пов'язані з перерозподілом компонентів між α - і β -фазами через їхню різну розчинність. Значення розчинності легуючих елементів за даними [20] наведено у таблиці 3.7.

Розчинність легуючих елементів в α - та β - фазах титану

Елемент	Розчинність, % мас	
	α -фаза	β -фаза
Al	6,0 (500 °C)	35,5 (1460 °C)
Zr	0-100 (>545 °C)	0-100 (> 662 °C)
Mo	0,75 (600 °C)	0-100
V	3,3 (600 °C)	0-100
Fe	0.02 (390 °C)	25,5 (1085 °C)
Si	0,2 (600 °C)	3 (1330 °C)

У процесі фазових переходів дифузійний перерозподіл легуючих елементів не встигав відбуватися, формувалися збагачені та збіднені β -стабілізаторами мікрооб'єми. При гартуванні останні перетворювалися на α' -фазу, а збагачені - на α'' - фазу; ті, в яких вміст β -стабілізаторів перевищував критичний, зберігалися у вигляді β -фази. Факторами, що зумовлюють утворення мікрооб'ємів β -фази різного ступеня легованості при високих температурах, є:

- висока концентрація легуючих елементів у титанових сплавах; так, сумарний вміст легуючих елементів становило сплаві ВТЗ-1 – 8,7-13,9;
- багатоконпонентність сплавів і наявність елементів, які різко відрізняються за своєю природою – α -стабілізаторів (Al, O), ізоморфних β -стабілізаторів (Mo, V), евтектоїдоутворюючих β -стабілізаторів (Fe, Si) і нейтральних зміцнювачів (Zr);
- утворення твердих розчинів заміщення титану з кожним з його легуючих елементів;
- значення розчинності, що різко відрізняються, легуючих елементів у фазах, наявність градієнта концентрацій між фазами;
- низькі значення коефіцієнтів дифузії елементів у титані.

Механічні властивості зразків з титанового сплаву ВТЗ-1 після зміцнюючої термічної обробки по різних режимах і фазовий склад після високотемпературного її етапу представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Механічні властивості, фазовий склад і кількість β -фази зразків до та після термічної обробки

Режими термічної обробки	Механічні властивості			Фазовий склад	Кількість β -фази, %
	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %		
Вихідний зразок	1030	9	20,3	α - β	
Режим 1	1370	2,5	10,0	α - α' - β	-
Режим 2	1200	7,0	14,8	α - α'' - β	8
Режим 3	1130	5,0	13,0	α - β	25-28
Режим 4	1100	6,0	21,0	α - β	~20

Зміцнювальна термічна обробка деформованого сплаву ВТЗ-1 за режимами 2-4 забезпечувала підвищення межі міцності при задовільній пластичності. Після термічної обробки за режимом 1 сплав ВТЗ-1 мав вкрай низькі значення відносного подовження та відносного звуження. Це зумовлено утворенням після гартування великогальчастої α' - фази, розпад якої при старінні приводив до формування голчастих виділень вторинної α - фази. Отже, необхідно уникати виникнення при гартуванні мартенситної α' - фази.

3.2.2 Дослідження впливу термічної обробки на сплав ВТ41

У діапазоні температур 550 °С - 600 °С найбільш жароміцними є сплави псевдо- α - класу. Одним із недоліків, що суттєво ускладнюють їх застосування, є зниження пластичності після тривалих витримок при робочих температурах,

пов'язане з дифузійним перерозподілом легуючих елементів між α - та β -фазами [1], виділенням силіцидів $Ti(Zr)_xSi_y$ та α_2 -фази $Ti_3Al(Sn)$ [21,22].

Метою даного дослідження є встановлення характеру впливу тривалих витримок при робочій температурі на термічну стабільність жароміцного титанового сплаву VT41. Хімічний склад сплаву VT41 наведений в табл. 3.9

Таблиця 3.9

Хімічний склад сплаву VT41

Mo	Sn	Fe	Al	Si	C	W	Nb	Zr	O ₂
1,2	4,0	0,07	6,4	0,2	0,03	0,3	0,9	3,6	0,1

Температура повного поліморфного перетворення, визначена при металографічному аналізі $T_{\text{пн}}=1025$ °С. Для досліджень були підготовлені зразки. Злиток піддавали ковці в β -області, потім заготовки прокатували в (α - β)-області. Діаметр механічно оброблених прутків 18 мм. Мікроструктура прутка в гарячекатаному стані – глобулярно-пластинчаста, об'єм первинної α -фази у поздовжньому та поперечному перерізах знаходиться в межах 15 - 40 %.

Для напівфабрикатів зі сплаву VT41, виготовлених методом (α + β)-деформації, найбільш доцільним є застосування термічної обробки при температурах першого ступеня відпалу у верхній частині (α + β)-області. Шляхом підбору режимів термічної обробки було отримано різновиди глобулярно-пластинчастої мікроструктури, які утворюють набір найбільш типових структур при промисловому виробництві напівфабрикатів (прутків та штампованих заготовок) на галузевих підприємствах. Пруток піддавали двоступінчастому відпалу за режимами, які наведені в табл. 3.10

Режими термічної обробки титанового сплаву VT41

№ зразка	Режими термічної обробки
1	1000 °С, 1 год, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі
2	980 °С, 2 год, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі;
3	1000 °С, 1 год, охолодження з піччю до 980 °С, витримка 30 хв, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі.

Високотемпературний відпал проводили при температурах на 25 °С і 45 °С нижче $T_{\text{пт}}=1025$ °С (1000 °С і 980 °С відповідно). Другий етап відпалу (620 °С, 6 год) здійснювали в одній садці.

Попередні дані щодо зміцнюючої термічної обробки прутків зі сплаву VT41 дозволяють говорити про перспективність застосування гартування для підвищення службових властивостей як при кімнатній, так і при підвищених температурах. У зв'язку з цим було проведено попереднє дослідження термічної стабільності сплаву при 600 °С, 100 год. Вихідним станом у цьому випадку була гартування в маслі від 985 °С ($T_{\text{пт}} - 40$ °С) і старіння при 650 °С.

Мікроструктура зразків після термічної обробки за різними режимами розрізняється за обсягом первинної α -фази, розміром і морфологією частинок первинної та вторинної α -фаз. Мікроструктури наведені на рис. 3.6

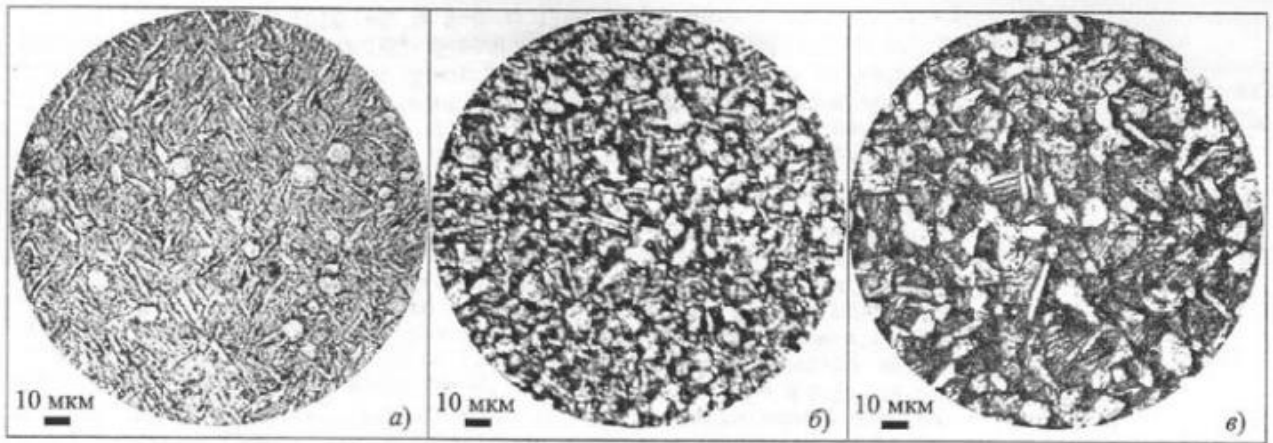


Рисунок 3.6 - Мікроструктура зразків зі сплаву VT41 у поперечному перерізі після термічної обробки за режимами 1(а), 2(б) та 3(в)

При обробці за режимом 1 (температура першого високотемпературного ступеня $t_1=1000$ °С) у структурі сплаву спостерігається мінімальна об'ємна частка первинної α - фази (10 - 20 %), розмір глобулів 8 - 10 мкм. Товщина пластин вторинної α - фази, як правило, не перевищує 1,5 мкм. По межах β - зерен та субколоній вторинної α -фази зустрічаються більші пластинки товщиною до 3 мкм (рис. 3.6, а).

Мікроструктура прутка, термічно обробленого за режимом 2 ($t_1=980$ °С), складається з виділень первинної α - фази об'ємною часткою не більше 40%, розташованих на тлі розорієнтованих пластинок вторинної α - фази товщиною близько 3 мкм. Середній розмір глобулів первинної α - фази становить 10 мкм (рис. 3.6, б).

Після термічної обробки за режимом 3 були отримані найбільші складові мікроструктури. Половину структури дроту займають великі глобулі первинної α -фази із середнім розміром частинок близько 12 мкм. Значну частку структури (15-35%) складають великі пластинки вторинної α - фази товщиною 3-5 мкм. Великі частинки утворюють контури, які зазвичай є межами β -зерна, всередині яких знаходяться колонії з дрібнішими пластинками вторинної α -фази товщиною до 1,5 мкм (рис. 3.6, в).

Мікроструктура сплаву в термічно зміцненому стані (після гартування в маслі від 985 °С і старіння при 650 °С, 2 год) являє собою частинки глобулярної

α - фази, що займають до 40 % площі перерізу мікрошліфа, і дрібнодисперсні голчасті пластинки вторинної α - фази. Для оцінки термічної стабільності прутків проводили витримку заготовок в одній садці безперервно протягом 100, 300 та 500 год при 600 °С.

Мінімальний рівень механічних властивостей після двоступінчастого відпалу (вихідний стан) наведено у табл. 3.11. Видно, що при приблизно однакових значеннях міцності та ударної в'язкості після ізотермічного відпалу сплав має найменшу пластичність.

Таблиця 3.11

Механічні властивості титанового сплаву ВТ41 після відпалу

№ режиму	Режими термічної обробки	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
1	1000 °С, 1 год, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі	1015	18	40	0,22
2	980 °С, 2 год, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі;	1020	19	38	0,22
3	1000 °С, 1 год, охолодження з піччю до 980 °С, витримка 30 хв, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі.	1020	18	31	0,23

Термічна обробка зразків зі сплаву ВТ41 проводиться за графіками термічної обробки, які наведені на рис. 3.7

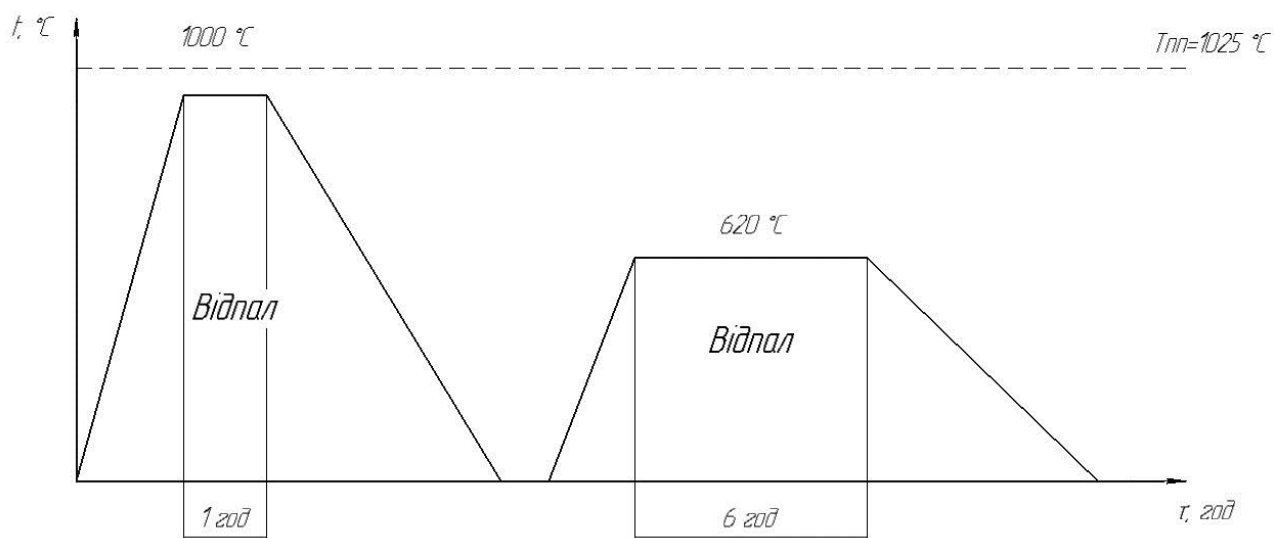


Рисунок 3.7 – Графік термічної обробки зразку зі сплаву ВТ41 за режимом 1 (охолодження-повітря)

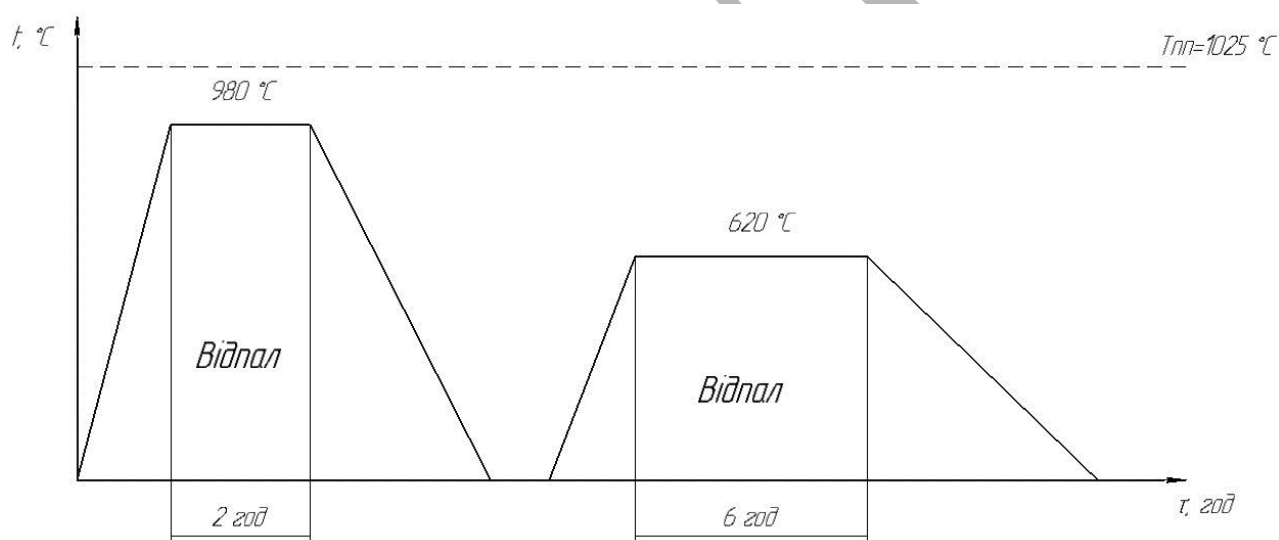


Рисунок 3.8 – Графік термічної обробки зразку зі сплаву ВТ41 за режимом 2 (охолодження-повітря)

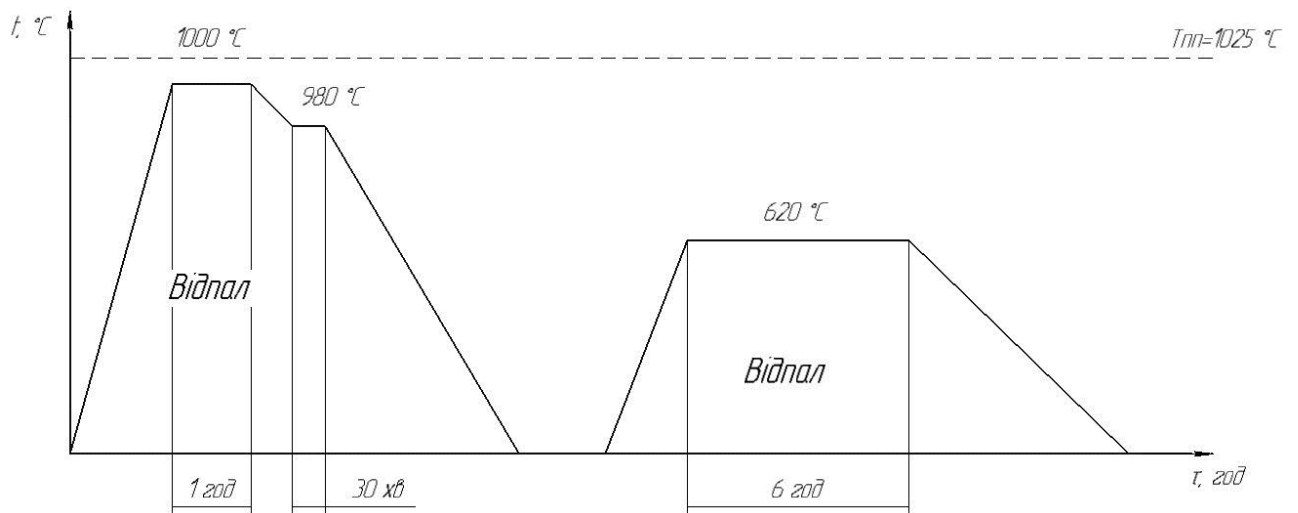


Рисунок 3.8 – Графік термічної обробки зразку зі сплаву ВТ41 за режимом 3 (охолодження-повітря)

Мінімальні значення пластичності та ударної в'язкості після випробувань відпалених зразків на термічну стабільність при $600 ^\circ\text{C}$ наведені у табл. 3.12. Сплав, термічно оброблений за режимом 1, має найменшу пластичність після витримки при $600 ^\circ\text{C}$, 100 год.

Слід зазначити велику дисперсію результатів оцінки щодо звуження при цій термічній обробці. Так, максимальне відносне звуження зразка після витримки при $600 ^\circ\text{C}$, 100 год відповідає його мінімального вихідного значення при однаковій міцності.

Термічна обробка по режиму 1 характеризується найбільшою мірою зміцнення сплаву після витримки при $600 ^\circ\text{C}$, 100 год: тимчасовий опір розриву $\sigma_{\text{в}}$ збільшується не менше ніж на 60 МПа порівняно з вихідним значенням. При збільшенні часу витримки при $600 ^\circ\text{C}$ до 300 і 500 год міцність, пластичність і ударна в'язкість металу практично не змінюються. Прутки, термічно оброблені за режимами 2 і 3 після витримки при $600 ^\circ\text{C}$, 100 год мають однакову величину $\sigma_{\text{в}} = 1045\text{-}1060 \text{ МПа}$, яка не змінюється зі збільшенням часу витримки.

Таблиця 3.12

Характеристики пластичності та ударна в'язкість сплаву ВТ41 після двоступінчастого відпалу та тривалої витримки при 600 °С протягом 100, 300 та 500 год

Режим відпалу	δ, %	ψ, %	КСУ, МДж/м ²	δ, %	ψ, %	КСУ, МДж/м ²	δ, %	ψ, %	КСУ, МДж/м ²
	100 год			300 год			500 год		
1	12,5	23,5	0,21	14,0	26,0	0,22	12,5	30,5	0,20
2	17,5	31,0	0,22	16,0	28,5	0,25	14,0	31,0	0,19
3	16,5	27,0	0,22	14,0	24,5	0,20	12,0	17,0	0,23

Мінімальний рівень отриманих в ході досліджень механічних властивостей сплаву в термічно зміцненому стані та після витримки при 600 °С наведено в табл. 3.13

Таблиця 3.13

Механічні характеристики сплаву ВТ41 після термічного зміцнення та тривалої витримки при 600 °С

Режим термічного зміцнення	σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	КСУ, МДж/м ²
гартування в маслі від 985 °С і старіння при 650 °С	1100	14,5	39,0	0,25
гартування в маслі від 985 °С і старіння при 650 °С + витримка при 600 °С, 100 год	1160	9,5	23,0	0,20

Мікроструктура металу у відпаленому стані показано на рис. 3.9. Після витримки при 600 °С, 100 год незалежно від режиму відпалу на першому

ступені в мікроструктурі чітко виявляються силіциди та інтерметалідна α_2 -фаза. Основна частка виділень силіцидів припадає на межі розділу пластівок вторинної α - фази та β - фази, розмір частинок, що виділилися за межами, становить у середньому 0,16 мкм. Інтерметалідна α_2 -фаза виявлена як у первинній, так і у вторинній α -фазах. Більші силіциди зустрічаються у первинній α -фазі, проте їх кількість мінімальна. Відмінною особливістю термічної обробки по режиму 3 є більший обсяг виділення силіцидів та їх більший розмір, що, мабуть, пов'язано з перерозподілом кремнію при зміні співвідношення α - та β - фаз у верхній частині двофазної області.

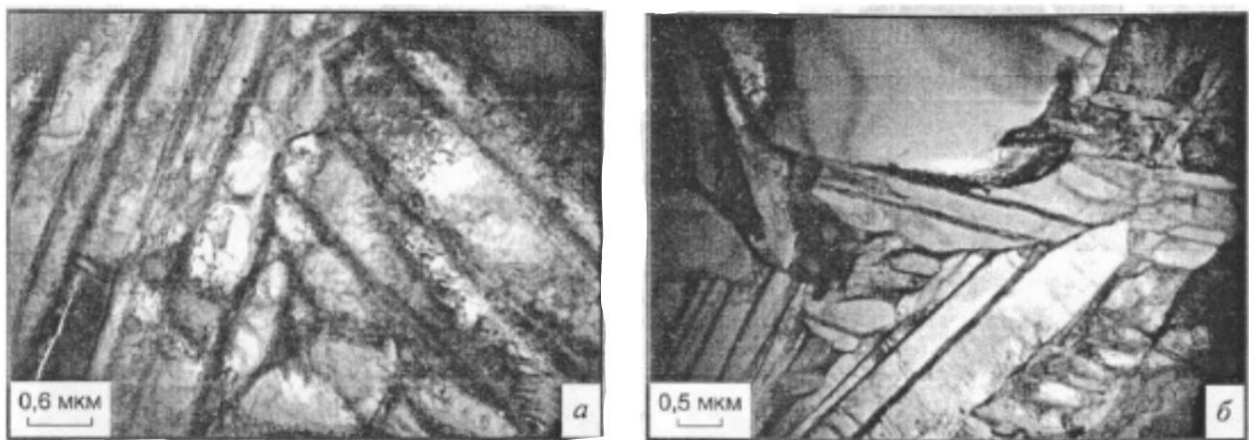


Рисунок 3.9 - Мікроструктура сплаву VT41 (пруток) у різному стані: а – відпал при 1000 °С, 1 год, охолодження на повітрі; б - відпал при 1000 °С, 1 год, охолодження з піччю до 980 °С, 30 хв, далі на повітрі;

При дослідженні сплаву в термічно зміцненому стані після витримки при 600 °С, 100 год α_2 -фаза виявлена як первинної, так і у вторинній α -фазах (рис. 3.10, а). Частки силіцидів у цьому випадку найбільш дрібнодисперсні (рис. 3.10, б). Слід зазначити, що температура старіння загартованих зразків була вищою, ніж температура другого ступеня при відпалі.

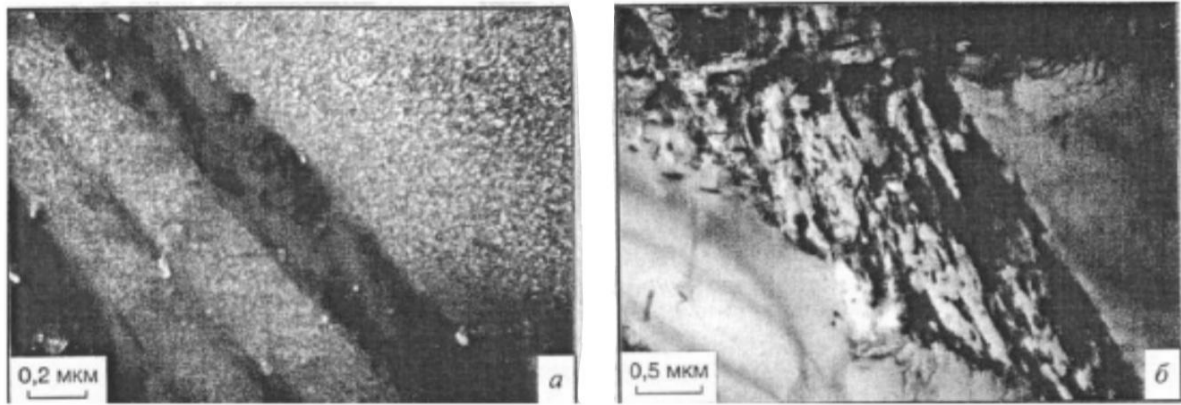


Рисунок 3.10 - Мікроструктура сплаву VT41 (пруток) у термічно зміцненому стані (гартування від 985 °С (1 год) у маслі + відпуск при 650 °С, 2 год, повітря) після витримки при 600 °С, 100 год

Отримані дані оцінки фазового складу підтвердились результатами рентгеноструктурного фазового аналізу. З використанням дифрактометра визначили параметри решітки первинної α - і β - фаз після одно- і двоступінчастого відпалу і витримки при 600 °С, 100 год. Виходячи із збільшення інтенсивності ліній β -фази після витримки при 600 °С, 100 год сплаву, попередньо підданого високотемпературному відпалу, можна зробити висновок про те, що її кількість збільшується. Максимальний вміст β - фази у сплаві не перевищує 3%. Така незначна кількість β -фази викликає труднощі при її дослідженні та призводить до додаткової похибки результатів.

Для встановлення причин, що впливають на зміну пластичності металу після тривалих витримок, проводили наступний експеримент. Від прутків, термічно оброблених за режимом 1 і підданих витримці при 600 °С, 100 год, відібрали заготовки, які додатково відпалювали за режимом: 700 °С, 6 год, охолодження на повітрі. Після такої обробки сплав має наступні властивості: $\sigma_{\text{в}} \geq 1010$ МПа, $\delta \geq 16,5$, $\psi \geq 33,0$. Таким чином, проведення відпалу при більш високих температурах призводить до збільшення пластичності та зміцнення металу. Мікроструктуру прутка досліджували методом електронної мікроскопії. Після додаткового відпалу за більш високої температури спостерігається укрупнення частинок силіцидів (рис. 3.11, а, б). Значно

збільшується кількість виділень α_2 -фази, яка може займати площу по всьому перерізу частинок первинної та вторинної α -фази (рис. 3.11, в, г).

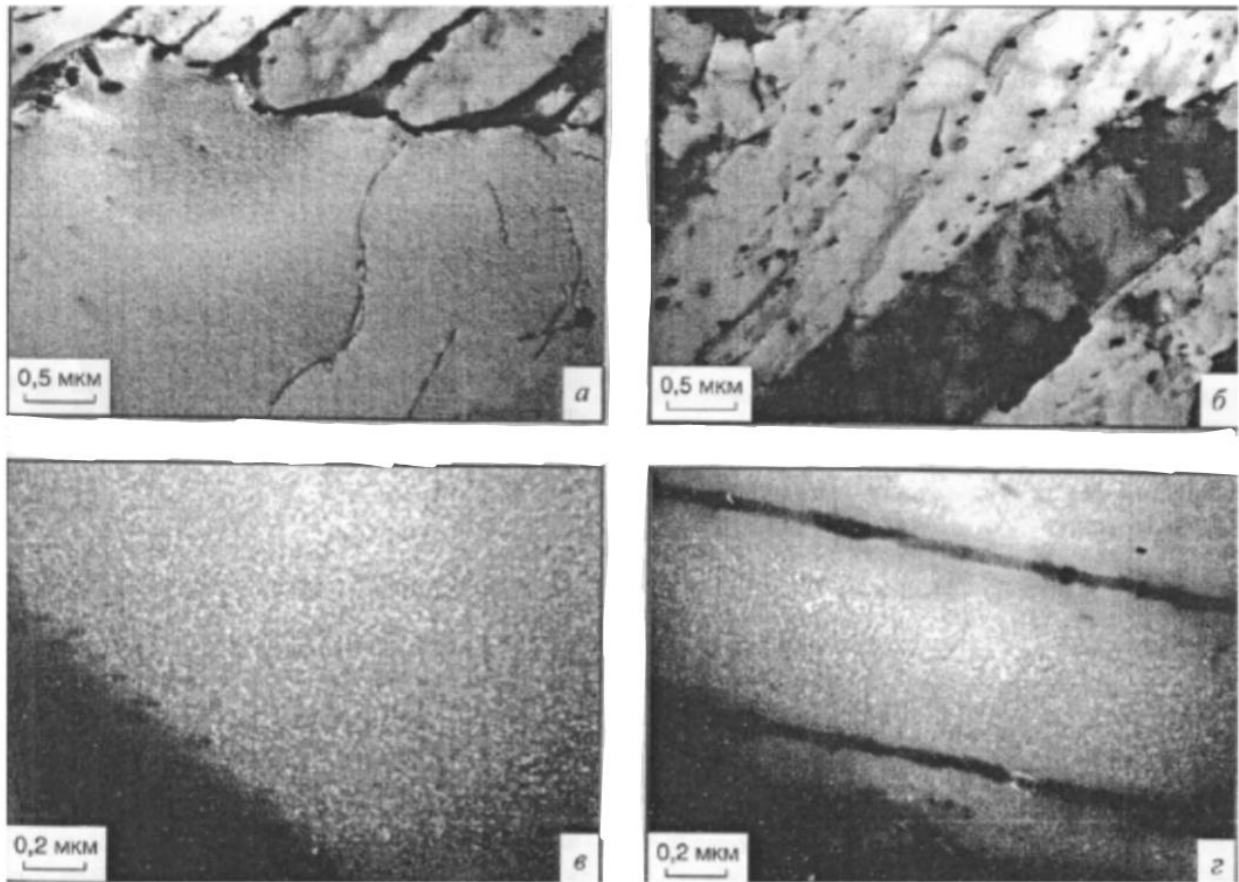


Рисунок 3.11 - Мікроструктура сплаву VT41 (пруток) після термічної обробки: відпал за режимом 1 (1000 °С, 1 год + 620 °С, 6 год), 100 год + додатковий відпал при 700 °С, 6 год (після кожної витримки – охолодження на повітрі)

З отриманих даних видно, що мінімальна пластичність сплаву спостерігається після «ізотермічного відпалу» і витримки при 600 °С, 500 год. Ударна в'язкість всіх аналізованих режимів відпалу залишається приблизно на одному рівні і мало змінюється зі збільшенням часу витримки при 600 °С.

Витримка при 600°С практично не змінює параметри решіток α - і β -фаз, що свідчить про досить високу стабільність сплаву. Наведені в роботі [1] параметри решітки α - та β -фаз сплаву VT9 у відпаленому стані дуже близькі до результатів, отриманих в ході цього дослідження для сплаву VT41 після відпалу та витримки при 600 °С, 100 год. З урахуванням результатів механічних

випробувань можна зробити висновок про те, що пластичність (в більшій мірі – величина відносного звуження) сплаву VT41 з глобулярно-пластинчастою мікроструктурою визначається ступенем твердорозчинного зміцнення β - та α -фаз кремнієм і слабо залежить від виділень α_2 -фази. При цьому збільшення пластичності до деякого ступеня може бути пов'язане з укрупненням частинок $Ti_3Al(Sn)$ [23]. Ефект збільшення обсягу α_2 -фази при підвищенні температури старіння можна використовувати для збільшення міцності при підвищених температурах.

У термічно зміцненому стані після витримки при 600 °С, 100 год сплав VT41 також має задовільну пластичність. При цьому значна частка α_2 -фази, присутня в сплаві, може бути пов'язана з вищою температурою старіння, ніж з температурою відпалу другого ступеня. Слід зазначити, що зниження швидкості охолодження у верхній частині ($\alpha+\beta$)- області призводить до збільшення вмісту кремнію на міжфазних межах і, як наслідок, збільшення розміру і кількості частинок силіцидів при старінні. Ця обставина в сукупності з параметрами мікроструктури, що отримується при такому режимі термічної обробки, не дозволяє додатково підвищити ударну в'язкість і знижує пластичність сплаву.

Дослідження підтвердили, що сплав VT41 із глобулярно-пластинчастою мікроструктурою має високу термічну стабільність. Висока пластичність сплаву у відпаленому стані забезпечується за рахунок переважання дрібнопластинчастої вторинної α -фази в його мікроструктурі та пластичністю β -фази. Зміна вмісту α_2 -фази при підвищенні температури відпалу до 700 °С свідчить про можливість оптимізації режимів старіння сплаву з метою збільшення характеристик жароміцності в інтервалі робочих температур.

3.3 Висновок

В даному розділі було проведено ряд досліджень з декількома жароміцними титановими сплавами метою яких було проаналізувати вплив мікролегування та проведення ТО сплавів за різними режимами.

У ході експериментальних досліджень було встановлено вплив температури та мікролегування на властивості різних зразків з обраних сплавів.

Так було визначено, що Ti-4Cr і сплавів з високим вмістом заліза (F-1, F-2) мають стійкість до деформації, яка значно зменшується при підвищених температурах. Також було встановлено, що сплави F-1 і F-2 демонструють набагато менше зниження пластичності. В ході дослідження, було виявлено, що заміна Cr на Mo або Fe ефективно покращує оброблюваність Ti-4Cr. Заміна Fe є кращою, оскільки цей елемент більш поширений і менш дорогий.

Також у ході експериментальних досліджень було встановлено характер впливу тривалих витримок при робочій температурі на термічну стабільність жароміцного титанового сплаву VT41. Було встановлено що при приблизно однакових значеннях міцності та ударної в'язкості після ізотермічного відпалу сплав має найменшу пластичність. Взагалі під час проведення дослідів вдалося отримати високу стабільність сплаву.

Внаслідок проведених досліджень можна стверджувати про перспективність застосування гартування для підвищення службових властивостей як при кімнатній, так і при підвищених температурах сплаву VT41.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Економічна ефективність наукових досліджень

Сукупність всіх поточних витрат за виробництво продукції визначається показником собівартості (витрати виробництва). Собівартість продукції – вартісна ціна використовуваних у процесі виробництва продукції (робіт, послуг) природних ресурсів, сировини, матеріалів, палива, енергії, основних засобів, трудових ресурсів, а також інших витрат на її виробництво та реалізацію. Сукупність витрат за статтями калькуляції складає основу їх функціональної участі у виробничому процесі [24].

До першої статті включаються витрати на сировину та основні матеріали, які входять до складу виробленої продукції, утворюючи її основу, або є необхідними компонентами при її виготовленні, а також допоміжні матеріали, що використовуються на технологічні цілі. Вартість основних та допоміжних матеріалів включається до собівартості окремих виробів та замовлень прямим шляхом, виходячи з затверджених норм витрат на одиницю продукції та ціни на ці матеріали.

До другої статті входять витрати на оплату виконання робіт. Вона включає витрати на оплату праці працівників, безпосередньо пов'язаних із виготовленням продукції, виконанням робіт та послуг. Також сюди включається додаткова заробітна плата. Вона враховує виплати, передбачені трудовим законодавством за невідпрацьований виробничий час (відпустки, виконання державних обов'язків, доплати підліткам, матерям, що годують, за роботу в нічний час та ін.). Вона приймається у розмірі 10-20% від основної заробітної плати.

Третя стаття містить в собі амортизаційні відрахування. З одного боку, вони виступають як елемент собівартості, з другого як джерело внутрішнього фінансування підприємства. Збільшення суми амортизаційних відрахувань стає привабливим з погляду створення внутрішніх фінансових ресурсів

підприємства, тим паче, що ці ресурси можна використовувати як інвестиційні, але поточної діяльності підприємства. Проте нарощування амортизаційних відрахувань веде до збільшення витрат виробництва, отже, і ціни продукції, що може бути непривабливим споживачам. Це особливо істотно за умов конкурентної боротьби над ринком, за умов випуску недостатньо конкурентоспроможної продукції.

Також не менш важливою є стаття, яка характеризується вмістом витрат на ремонт обладнання. Ця стаття має безпосереднє відношення до попередньої, оскільки витрати на ремонт обладнання йдуть від амортизаційних відрахувань.

Наступна стаття містить витрати на енергію. У цю статтю включаються витрати на всі види безпосередньо використовуваних в процесі виробництва продукції палива та енергії, як отримані з боку, так і вироблені самим підприємством.

4.2 Оцінка ефективності прикладних досліджень

Економічні розрахунки проводились для сплаву ВТ41 для режиму термічної обробки під номером 1. Даний режим повторно приведений в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Режим термічної обробки для зразка №1

№ зразка	Режими термічної обробки
1	1000 °С, 1 год, охолодження на повітрі + 620 °С, 6 год, охолодження на повітрі

Для визначення вартості технології розраховуються окремі елементи витрат. Вартість зразка визначається за формулою 4.1

$$C_M = (Q \cdot C_M) \cdot a, \text{ (грн)} \quad (4.1)$$

де Q – норма витрати матеріалу (маса заготовки), кг;

$Q_{\text{зразка}} = 1,5$ кг.

C_m – ціна матеріалу заготовки в грн.;

для сплава ВТ41 – 65 грн./кг.

a – коефіцієнт, що враховує витрати на термообробку (умовно приймаємо 1,5).

Відповідно до формули 4.1, проводимо розрахунки:

$$C_m = (1,5 \cdot 65) \cdot 1,5 = 146,25 \text{ (грн)}$$

Основна та додаткова заробітна плата робітника виробництва з відрахуваннями на соціальне забезпечення та інші фонди (на операції) розраховується за формулою 4.2:

$$Z_p = C_{\text{ч}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{t_{\text{шт}}}{60} \cdot K_{\text{мн}} \cdot n, \text{ (грн)} \quad (4.2)$$

де $C_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду, грн. (приймаємо III розряд: ставка 20 грн./год.);

K_1 – коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату (приймаємо $K_1 = 1,7$);

K_2 – коефіцієнт, що враховує багатостаттєве обслуговування (приймаємо $K_2 = 1,4$);

$t_{\text{шт}}$ – час на операцію для однієї заготовки (партії), відпал = 7 годин,

$K_{\text{мн}}$ – коефіцієнт, що враховує обслуговування кількома одиницями обладнання (приймаємо $K_{\text{мн}} = 1$);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, шт

Відповідно до формули 4.2 проводимо розрахунки:

$$Z_p = 20 \cdot 1,7 \cdot 1,4 \cdot \frac{420}{60} \cdot 1 \cdot 1 = 6,8 \text{ (грн)}$$

Із розрахунку 60 садок на рік 408 грн.

Амортизаційне відрахування по обладнанню, віднесені на даний метод розраховуємо за формулою 4.3:

$$A_0 = \frac{S_0 \cdot K \cdot a \cdot n}{N_{\text{год}} \cdot 100} \quad (4.3)$$

де S_0 – вартість одиниці обладнання, грн.; піч для відпалу та приспособи - 120 000 грн.;

K – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж устаткування; приймаємо $K = 1,15$;

a – норма амортизаційних відрахувань (5% від вартості обладнання);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, 1 шт.;

$N_{\text{год}}$ – річна програма експериментальних зразків, шт. (приймаємо 1000 шт.)

Відповідно до формули 4.3 проводимо розрахунки:

$$A_0 = \frac{120\,000 \cdot 1,15 \cdot 6000 \cdot 1}{1000 \cdot 100} = 8\,280 \text{ (грн)}$$

Вартість ремонту обладнання розраховується пропорційно вартості амортизації і розраховується з використанням форми 4.4:

$$P = A_0 \cdot K \text{ (грн)} \quad (4.4)$$

де K – коефіцієнт, що встановлює залежність суми ремонтних витрат від величини амортизації (приймаємо 15%)

Відповідно до формули 4.4 проводимо розрахунки:

$$P = 8280 \cdot 1,5 = 12\,420 \text{ (грн)}$$

Вартість електричної енергії для цих методів розраховується за формулою 4.5:

$$E = [K_1 \cdot N_y \cdot (t_{шт} \cdot t_{маш}) + K_2 \cdot N_y \cdot t_{маш}] \cdot \frac{S_E}{60}, (\text{грн})$$

де N_y – сумарна встановлена потужність одиниці обладнання, кВт;

K_1 – коефіцієнт, що враховує використання встановленої потужності, що втрачається при ненапруженій роботі обладнання (приймаємо $K_1 = 0,4$);

K_2 – коефіцієнт використання встановленої потужності устаткування в процесі термообробки (приймаємо $K_2 = 0,8$);

$t_{шт}$ – час на операцію для однієї заготовки (партії), хв.;

$t_{маш}$ – машинний час на операцію, хв. (приймаємо 0,15 хв.);

S_E – вартість одного кВт/год. електроенергії, грн. (приймаємо $S_E = 3$ грн.)

$$E = [0,4 \cdot 50 \cdot (420 \cdot 0,15) + 0,8 \cdot 50 \cdot 0,15] \cdot \frac{3}{60} = 63,3 (\text{грн})$$

Таблиця 4.2

Витрати на ряд операцій

Найменування операції	Витрати на операцію (грн)
Основна та заробітна плата робітникам за даний вид роботи (1000 зразків)	408
Амортизаційні відрахування по обладнанням	8 280
Витрати на ремонт обладнання	12 420
Витрати на силову електроенергію	63,3
Загальна сума	21 171,3

4.3 Висновок

В економічній частині ми розглянули складові частини економічної доцільності проведення досліджень. Її основою є собівартість. Собівартість – це сукупність усіх витрат на виготовлення конкретного виробу. В нашому випадку вона складається з вартості зразка, основної та додаткової заробітної плати робітників, амортизаційних відрахувань, вартість електроенергії, обладнання та витрати на його ремонт.

Провели розрахунки цих складових для нашого випадку. Результати наведені в табл. 4.2.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Безпека праці людей в цехах і на ділянках термічної обробки

Головною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини і, як наслідок, зниження виробничого травматизму та професійних захворювань.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які виникають при роботі термічного цеху та розробка заходів і засобів, спрямованих на мінімізацію їх несприятливого впливу на працюючих.

Розглянемо охорону праці відповідно до наказу державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 18.12.2007.

Ці правила поширюються на всі суб'єкти господарювання (далі - організації), які здійснюють термічну обробку або проектують у будівництві, реконструкцію та експлуатацію термічних цехів і ділянок, а також при конструюванні, виготовленні, монтажі і налагодженні нового обладнання; експлуатації, технічному обслуговуванні, ремонті і модернізації діючого устаткування для термічної обробки металів.

Працівники під час прийняття на роботу і в процесі роботи проходять перевірку знань відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

При термічній обробці металів можливий вплив на працівників різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, у тому числі:

- незахищені рухливі елементи виробничого устаткування;

- заготовки, готові вироби або деталі, що пересуваються (далі - деталі);
- транспортні засоби, що рухаються;
- аерозолі фіброгенної дії (пилу);
- несприятливий мікроклімат робочої зони;
- підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;
- знижена температура при обробці деталей холодом;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- знижена освітленість робочого місця;
- пожежо- і вибухонебезпека;
- хімічні фактори загальнотоксичного, дратівного,
- канцерогенного впливу на організм працівника;
- важкість і напруженість праці.

З метою контролю процесів підготовки виробів до термічної обробки, контролю та регулювання параметрів термічної обробки металів (температури, тиску в робочому просторі печі, вмісту компонентів у газовому середовищі тощо) необхідно застосовувати блокування, а також засоби світлової та звукової сигналізації про порушення технологічного процесу, які можуть призвести до виникнення аварійної ситуації [25].

При підготовці виробів та деталей до термічної обробки (нанесення захисних паст, травлення, знежирення та ін.) та при проведенні термічної обробки із застосуванням речовин, що володіють токсичними, пожежо- та вибухонебезпечними властивостями (гасу, масел, розплавів солей та металів,

рідких середовищ) повинна бути виключена можливість впливу цих речовин на працюючих. Нагріті в процесі термічної обробки вироби та деталі необхідно розміщувати в місцях, обладнаних ефективною витяжною вентиляцією або спеціально обладнаних охолоджувальних приміщеннях або пристроях. Місця можливого виділення у повітряне середовище виробничих приміщень речовин, токсичних, вибухонебезпечних речовин та пилів мають бути забезпечені витяжною механічною вентиляцією у вибухозахищеному виконанні.

При розробці технологічних процесів термічної обробки металів повинні передбачатися оптимальні режими роботи обладнання, що забезпечують:

- безперервність технологічного процесу;
- раціональний ритм роботи людей, які виконують окремі технологічні операції;
- виключення можливості створення аварійної обстановки.

У всіх випадках виникнення аварійних ситуацій при веденні технологічного процесу роботу слід негайно припинити та вжити заходів щодо усунення аварійної ситуації. Ведення технологічного процесу слід продовжувати лише після того, як буде з'ясовано причину, що створила аварійну обстановку та вживуть заходів щодо її усунення [25].

Усі робітники, службовці та інженерно-технічні працівники термічних цехів та дільниць проходять інструктаж з безпеки праці та пожежної безпеки:

- вступний – на час вступу працювати;
- первинний – на робочому місці;
- повторний – не рідше одного разу на три місяці;
- позаплановий – у разі порушення вимог безпеки праці, нещасного випадку та ін.

5.2 Засоби індивідуального захисту робітників

Ті, хто працює в термічних цехах, повинні використовувати засоби індивідуального захисту. Відповідно до чинного законодавства ці засоби повинні бути надані роботодавцем кожному працівнику за рахунок коштів роботодавця.

Під індивідуальними захисними пристосуваннями та засобами мається на увазі спецодяг (у тому числі спецвзуття, спецбілизна та спеціальні головні убори), окуляри, респіратори, промислові протигази та протишуми, а також захисні мазі та пасти, що видаються підприємством робітнику для захисту від впливу професійних шкідливостей [26].

Спецодяг повинен захищати працюючого від несприятливих впливів довкілля (механічних, хімічних і термічних), не порушуючи при цьому терморегуляції організму.

Спецодяг робочих гарячих цехів у місцях, що піддаються опроміненню, шиється з кількох шарів:

- зовнішній шар - із лляної незаймистої тканини, середній - з легкої вовняної тканини або бавовняної сітки,
- внутрішній - з м'якої бавовняної тканини.

Для захисту від інтенсивного опромінення використовують спецодяг із місцевими накладками з металізованої тканини. Однак накладки з металізованої тканини є непроникними для повітря та пари та можуть знайти обмежене застосування.

Спецодяг працюючих у відділеннях ціанування, рідинного азотування, щоб уникнути отруєння термічних цехів, що працюють на інших ділянках, повинен здаватися в прання знешкодженим і зберігатися окремо від спецодягу працюючих інших ділянок термічних цехів. Заміна спецодягу на чистий, що зберіг свої захисні властивості, не рідше одного разу на 10 днів [26].

5.3 Освітлення в термічних цехах

Також слід розглянути норми освітлення термічних цехів промислових підприємств. Адже від того наскільки якісно організовано освітлення у виробничих цехах та приміщеннях на промислових підприємствах залежить безпека праці працівників, а також їхня продуктивність. Недостатнє освітлення підвищує ризик травматизму на виробництві, сприяє погіршенню самопочуття та здоров'я працівників підприємства. Крім того, погана освітленість може позначитися також на продуктивності підприємства, підвищуючи ймовірність випуску браку.

При проектуванні освітлення в промислових цехах слід приділити увагу наступним факторам [25]:

- конструктивним особливостям приміщення;
- відображає показники поверхонь;
- видам робіт, що виробляються в даному приміщенні.

Особливу увагу слід приділити освітленню робочих місць. При організації освітлення на промислових підприємствах необхідно виконати низку вимог:

- висвітлення виробничих приміщень має відповідати нормативам.
- світильники, що використовуються для промислового освітлення повинні бути надійними, безпечними, стійкими до вібрацій та механічних пошкоджень, а також володіти пило- та вологозахистом.
- необхідно забезпечити високий індекс кольору.
- необхідно мінімізувати пульсацію освітлювальних приладів.
- світильники, що застосовуються, повинні бути енергоефективними, економічними і мати тривалий термін експлуатації.

5.4 Контрольно - вимірювальні прилади термічних цехів

Приміщення термічних цехів, термічне обладнання та комунікації повинні бути оснащені контрольно-вимірювальними приладами для контролю рівнів небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають у цьому процесі.

Контрольно-вимірювальні прилади повинні бути розташовані в місцях, зручних для спостереження, обслуговування та захищені від можливих пошкоджень. Для зміни приладів повинні бути передбачені пристрої, що відключають [27].

У термічних цехах, відділеннях та ділянках на газопроводах на лініях стисненого повітря у легкодоступних місцях для можливості локалізації дії небезпечних та шкідливих виробничих факторів повинні бути встановлені швидкодіючі пристрої, що відсікають і ізолюють вплив небезпеки.

Контролює роботу витяжних вентиляційних пристроїв та систем сигналізації в установленому порядку. Загатовальні масла повинні щотижня піддаватися контролю на вміст у них води. Виявлена вода має бути видалена.

Для вимірювання та регулювання температури в нагрівальних печах, установках та соляних ваннах застосовують наступні контрольно-вимірювальні прилади: термометри, термопари, мілівольтметри, потенціометри, пірометри, міліскопи тощо [27].

Термометри є найпростішими приладами для вимірювання температури в рідких і газових середовищах від -50 до $+600$ °C. Найбільш поширені рідинні термометри, засновані на спостереженні видимої зміни висоти стовпчика ртуті або забарвленого спирту, що знаходяться у скляній кульці.

Термопари призначені для вимірювання температури вище 600 °C. Термопара є приладом, в якому є два різнорідні провідники, спаяні з одного кінця. У ланцюзі двох різнорідних провідників при нагріванні виникає

терморухаюча сила, величина якої зростає зі збільшенням температури нагріву в місці спаю провідників.

Потенціометри застосовують для точних визначень температури (похибка вимірювання не перевищує ± 5 °С. Сутність вимірювання температури потенціометром полягає в тому, що електрорушійна сила термопар врівноважується рівною їй за величиною, але протилежною за знаком електрорушійною силою від стороннього джерела струму).

Міліскопи застосовують для швидкого і точного вимірювання температури нагріву тіла, що рухається. Найбільш широко вони використовуються для контролю та автоматичного регулювання температури при полум'яному поверхневому гартуванні.

5.5 Охорона довкілля

Проблеми охорони навколишнього середовища в цій галузі виробництва насамперед пов'язані з наступним [28]:

- викиди в атмосферу;
- тверді відходи;
- стічні води;
- шум

Пил виділяється при термічних (наприклад, плавильна піч) і фізико-хімічних технологічних процесах — наприклад, формування та виробництво прутків, а також при механічних діях, таких, як навантаження/розвантаження сировини, в основному піску, а також процеси відливки та доведення.

У процесі плавлення викиди твердих частинок у вигляді пилу, частинок металу і парів оксидів металу змінюються залежно від типу печі, палива, металу, що розплавляється, і характеристик плавки. Вагранки викидають найзначніші кількості твердих частинок (наприклад, коксу, летючої золи, кремнезему, іржі та вапняку). Електродугові печі (ЕДП) також служать джерелом значних кількостей ТЧ при завантаженні, на початку плавки, під час

кисневого дуття і на стадії обезуглерожування. Інші типи плавильних печей забезпечують більш низькі викиди, особливо індукційні електропечі. Викиди при завантаженні металу для плавки коливаються від незначних величин для певних кольорових металів до 10 кг/т і вище при плавці чавуну у вагранці [29].

Для запобігання цього потрібно:

- використовувати індукційні печі замість вже застарілих мартенівських
- використання в плавильних печах технологій, які дозволяють знизити споживання енергії (наприклад, встановлення кисневопаливних пальників, створення пінистості шлаку в ЕДП або кисневе дуття, якщо це застосовно).

Викид оксидів азоту викликаний високою температурою печі та окисленням азоту. Зниження викидів можна досягти шляхом зміни основного технологічного процесу і вторинної технології очищення в місці викиду.

Хлориди і фториди присутні в малих кількостях у відпрацьованих газах з плавильних печей і утворюються з флюсу. Запобігання і зниження викидів хлоридів і фторидів слід проводити на стадії сухого видалення пилу або в процесі використання технології мокрих скрубєрів, що встановлюються для боротьби з викидами твердих частинок і оксиду сірки [29].

Процес ТО або ХТО вимагає великих витрат енергії і призводить до суттєвих викидів діоксиду вуглецю (CO_2), пов'язаних в першу чергу зі спалюванням палива. Рекомендовані методи запобігання викидам діоксиду вуглецю (CO_2) і боротьби з ними включають наступне [29]:

- Використання найкращої наявної технології спалювання (наприклад, збагачення киснем повітряного дуття, попередній підігрів завантаження і автоматичне регулювання параметрів спалювання);

- Здійснення необхідного регламенту експлуатації та технічного обслуговування обладнання та виключення часткового завантаження обладнання;
- Вибір палива з низьким ставленням вмісту вуглецю до теплотворної здатності (наприклад, природного газу CH_4). Викиди CO_2 при спалюванні CH_4 приблизно на 60% менше, ніж викиди з кам'яного вугілля або нафтового коксу;

У процесі ТО та ХТО присутні різноманітні джерела шуму, включаючи навантаження/розвантаження металобрухту, завантаження печі та плавку в ЕДП, паливні пальники, вибивання і дробоструминну обробку форм і стрижнів, а також системи транспортування та вентиляції. Рекомендовані методи боротьби з шумом включають наступне [30]:

- Огородження виробничих будівель та/або їх звукоізоляція; забезпечення укриття та огороження ділянок зберігання та навантаження/розвантаження металобрухту, а також процесів вибивання та обробування виливків;
- огороження вентиляторів, ізоляцію вентиляційних труб та використання заслінок;
- введення заходів для боротьби з шумом, включаючи обмеження навантаження/розвантаження та транспортування металобрухту в нічний час.

5.5 Висновок

В даному розділі було розглянуто основні проблематики при роботі в термічних цехах. Робітники на термічних ділянках піддаються впливу різного роду шкідливих речовин та факторів. На термічних ділянках виділяються різні види шкідливих речовин: вуглець та оксид вуглецю, джерелом яких є піч, оксид

вуглецю та пари олії від масляного бака, оксид азоту від селітрової ванни, а також пари хлору та оксид вуглецю від соляної ванни.

Було розглянуто засоби протидії шкідливим факторам роботи в термічних цехах. На даний момент існує ряд правил розміщення обладнання на термічних ділянках. Вже встановлено та зафіксовано вплив шкідливих виділень, які потрапляють в повітря під час проведення робіт в термічних цехах. Розроблено ряд протидій їм. До них входять: спецодяг для персоналу, контрольно-вимірювальні прилади, профілактичні інструктажі робочих.

ВИСНОВКИ

1. У першому розділі було розглянуто зростання вимог до виробів, які працюють в екстремальних температурах набуває необхідності раціональне структурування сплавів, яке залежить від багатьох факторів: хімічного складу, способів модифікації і мікролегування, вмісту шкідливих домішок, способів і режимів термічної обробки. В результаті проаналізованих літературних джерел була виявлена необхідність подальшого вдосконалення жароміцних титанових сплавів. Внаслідок високих температур, які пагубно впливають на властивості титану дослідники продовжують експериментувати з мікролегуванням та режимами термічної обробки титанових сплавів для покращення їх властивостей та досягнення стабільності в їх експлуатації при різних умовах.

2. Проаналізувавши ряд наукових робіт, розглянули важливість коректного вибору матеріалів для їх використання у виробництві конструкторських деталей, що працюють при високих температурах.

Обрано матеріали та методи досліджень. Матеріал – сплав VT8. До основних методів досліджень відносять: дослідження макроструктури (макроаналіз); дослідження мікроструктури (мікроаналіз); випробування матеріалу на багатоциклічну втому; випробування механічних властивостей. Встановлено, що можна підвищити стабільність та рівень механічних і технологічних характеристик ($\alpha+\beta$) - титанових сплавів при зміцнювальній термічній обробці.

3. У ході експериментальних досліджень було встановлено вплив температури та мікролегування на властивості різних зразків з обраних сплавів. Визначено, що Ti-4Cr і сплави з високим вмістом заліза (F-1, F-2) мають стійкість до деформації, яка значно зменшується при підвищених температурах. З'ясували, що сплави F-1 і F-2 демонструють набагато менше зниження пластичності. В ході дослідження, виявили, що заміна Cr на Mo або Fe ефективно покращує оброблюваність Ti-4Cr. Заміна Fe є кращою, оскільки цей елемент більш поширений і менш дорогий.

Також у ході експериментальних досліджень встановлено характер впливу тривалих витримок при робочій температурі на термічну стабільність жароміцного титанового сплаву VT41. При приблизно однакових значеннях міцності та ударної в'язкості після ізотермічного відпалу сплав має найменшу пластичність. Дослідження показали, що сплави характеризуються достатньою стабільністю.

4. В економічній частині проаналізовані основні витрати на проведення досліджень. В процесі виконання роботи виконано розрахунки цих витрат. В нашому випадку розраховувались: вартість досліджуваного зразка, основної та додаткової заробітної плати робітників, амортизаційних відрахувань, вартість електроенергії, обладнання та витрати на його ремонт.

5. В роботі представлений аналіз впливу шкідливих факторів при роботі в термічних цехах. До них відносяться: речовини, які потрапляють в повітря та викликають негативні наслідки на організм людини. Розглянуто засоби протидії шкідливим факторам роботи в термічних цехах та розроблено ряд протидій їм. До них відносяться: спецодяг для персоналу, контрольно-вимірювальні прилади, профілактичні інструктажі робочих.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы - М.: Металлургия, 1976. - 448 с.
2. Авиационные материалы: Справочник. Т. 5. М. / за ред. А.Т. Туманова: ВИАМ, 1973. 583 с.
3. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
4. Титановые сплавы в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. Л.: Машиностроение, 1990. 400 с.
5. Синяева Н.П. Розробка комплексонометричного методу визначення вмісту цирконію у сплавах на основі титану ВТ-9, ВТ-20 та у цирконовому концентраті: сб. науч. тр. Нац. Запорізький. ун-т., 2015. С. 107 – 116
6. B. Jiang, Q. Wang, C. Dong, P.K. Liaw, Exploration of phase structure evolution induced by alloying elements in Ti alloys via a chemical-short-range-order cluster model, Sci. Rep. 9 (1), 2019
7. Березос В. О. Теорія і практика виробництва зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.16.02 Київ, 2001. 321 с.
8. A. Knaislova, P. Novak, F. Průša, M. Cabibbo, L. Jaworska, D. Vojtech, High-temperature oxidation of Ti–Al–Si alloys prepared by powder metallurgy, J. Alloys Compd. 810, 2019
9. R. Kainuma, Y. Fujita, H. Mitsui, I. Ohnuma, K. Ishida, Phase equilibria among α (hcp), β (bcc) and γ (L10) phases in Ti–Al base ternary alloys, Intermetallics 8 (8), 2000
10. Boyer, R.R. and Lutjering, G. (1993) Heat treatment of titanium alloys: overview, in Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing (eds I. Weiss et al.), TMS, Warrendale, PA, с. 349–367

11. Бичков А. С. Концепція підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій агрегатів вітчизняних цивільних літаків спеціальними методами порошкової металургії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.07.02. Київ, 2019. 311 с.

12. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.

13. Гейкин В.А. Разработка технологий для новых материалов в двигателестроении // Двигатель. 2017. №3. С. 10–11.

14. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата звернення: 09.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.

15. Методичні вказівки до лабораторної роботи №2 «Визначення твердості металів» з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів» освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямками 6.050502 «Інженерна механіка», 6.050503 «Машинобудування» та 6.070106 «Автомобільний транспорт» денної і заочної форм навчання. / Укладачі: Молчанов В.Ф., Музичка Д.Г., Часов Д.П. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014р. – 18 стор.

16. Материаловедение: учебное пособие / Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр и др.; под ред. А.Г. Багинского; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 100 с.

17. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС—МАТИ, 2009.

18. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974, с. 544.

19. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. "Конструкционные титановые сплавы". – М.: Металлургия, 1979. – 364 с.
20. Цвиккер У. "Титан и его сплавы". – М.: Металлургия, 1979. – 510 с.
21. Трубочкин А.В. Влияние кремния и выделений частиц интерметаллидов на структуру и свойства жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2004. 24 с.
22. Коллинз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов / Пер. С англ. Под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. М.: Металлургия, 1988. 224 с.
23. Коллинз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов / Пер. с англ. под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. М.: Металлургия, 1988. 224 с.
24. Економіка виробничого підприємства: Навчальний посібник / За ред. І. М. Петровича. — К.: Знання 2001. — 405 с.
25. НПАОП 28.5-1.02-07 – Правила охорони праці при термічній обробці металів.
26. Пістун І.П. Охорона праці при виконанні зварювальних і термічних робіт: навчальний посібник / І.П. Пістун., Р.А. Яцюк, І.О. Трунова. – Львів: УАД, 2011. – 446 с.
27. Соколов В. М. Механизация и автоматизация в термических цехах. Учебн. пособ. для вузов. Москва: Маштиз, 1962. 185 с.
28. Кузін О.А. Матеріалознавство та термічна обробка металів / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. – Львів: Афіша, 2002. – 216 с.
29. Зеркалов Д.В. Екологізація енергоспоживання: Монографія. – К.: – ТОВ Міжнар. фін. агенція, 1998. – 271 с.
30. Величко О.М., Зеркалов Д.В. Контроль забруднення довкілля: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2002. – 256 с.