

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування інституту, факультету)
Кафедра фізичного матеріалознавства
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Оцінка впливу температури на механічні властивості сплаву
ЗМі-3У з спрямованою (мелі) і рівномірною структурою

Виконав: студент(ка) VI курсу, групи ІФ-218

Спеціальності 132 „Матеріалознавство“
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

„Прикладне матеріалознавство“

Залозна М.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник Гайрук С.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Конюх В.В.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Фізико-технічний, Інженерно-фізичний факультет
Кафедра Фізичного матеріалознавства
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 132. Матеріалознавство
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) „Прикладне матеріалознавство”
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20 ____ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Заходна Марина Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Оцінка впливу танталу на механічні властивості сплаву ЗМі-3У зі спрацьованою (моно) і рівноосовою структурою

керівник проекту (роботи) Гайдук С.В., д.т.н., професор, снс
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « _____ » _____ 20 ____ року № _____

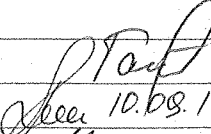
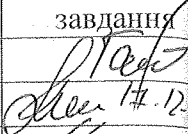
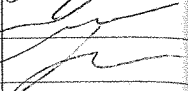
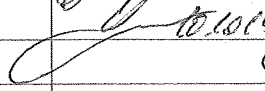
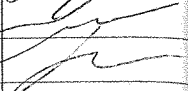
2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) науково-методичні матеріали, що стосуються впливу танталу на механічні властивості сплаву ЗМі-3У

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасний стан в питанні впливу легируючих елементів на механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів. 2. Матеріал і методика досліджень. 3. Експериментальне дослідження впливу танталу на механічні властивості сплаву ЗМі-3У. 4. Технологічне випробування сплаву ЗМі-3У танталу при отриманні різних показателів методу спрямивання (моно) рівноосової кристалізації. 5. Економічна оцінка. 6. Охорона праці безпека у надзвичайних ситуаціях
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Заломність жароміцності нікелевих сплавів від сфери впливу. 2. Тенденції підвищення температурної працездатності жароміцних нікелевих сплавів. 3. Механічний вплив зі зростання в захваті. 4. Порівняльні короткотривалі механічні властивості зразків дослідних сплавів. 5. Вплив танталу на час до руйнування зразків

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	Гайдук Сергій Валентинович, д.т.н. професор		
5 Економіка	Кривикова Валентина Володимирівна, доцент, к.т.н.	10.08.19	17.12.19
6 Охорона праці	Нестров Олександр Васильович, доцент, к.т.н.	10.10.19	
НК	Ткач Д.В., к.т.н. доцент каф. ФМ		

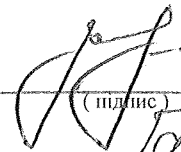
7. Дата видачі завдання « 12 » лютого 2019 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Судасний стан в питанні впливу м'язових елементів на механічні властивості поролічних пілелію сплавів	20.08.19	
2.	Матеріал і методи досліджень	10.10.19	
3.	Експериментальне дослідження впливу температури на механічні властивості сплаву ЗМі-ЗУ	20.11.19	
4.	Технологічне виробництво сплаву ЗМі-ЗУ із 4% титану при отрилюванні м'яких лопаток методом спрямованої ілюю рівності крісталізації.	30.11.19	
5.	Економічна частина	05.12.19	
6.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10.12.19	

Студент(ка)

Керівник проекту (роботи)


 (підпис)
Залозня М.О.
(прізвище та ініціали)Гайдук С.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: с.83 рис., 14 табл., 7 джерел 58 .

Об'єкт дослідження – структуроутворення і механічні властивості при легуванні танталом жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У із рівновіською і спрямованою (моно) структурою.

Мета роботи – дослідити і оцінити вплив танталу в сплаві ЗМІ-3У на механічні властивості дослідних зразків зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою.

В дипломній роботі досліджено особливості впливу тантала на короткочасну і тривалу міцність дослідних зразків зі сплаву ЗМІ-3У, отриманих методами рівноосьової і спрямованої (моно) кристалізації. Зроблено порівняльну оцінку і визначено оптимальний вміст танталу в сплаві ЗМІ-3У за кращими показниками механічних властивостей зразків зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою, в порівнянні з аналогічними зразками промислового сплаву ЗМІ-3У без танталу.

ЖАРОМІЦНИЙ НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ, ТАНТАЛ, СТРУКТУРА,
РІВНООСЬОВА І СПРЯМОВАНА (МОНО) КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ТЕРМІЧНА
ОБРОБКА, ПОВЗУЧІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Сучасний стан в питанні впливу легувальних елементів на механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів.....	7
1.1 Особливості експлуатації ливарних жароміцних нікелевих сплавів і вимог до них.....	8
1.2 Структура, фазовий склад і термічна стабільність жароміцних нікелевих сплавів.....	9
1.3 Вплив легувальних елементів на службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів.....	11
1.4 Особливості легування нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття.....	12
1.5 Особливості термічної обробки жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття.....	16
1.6 Основні перспективи розвитку та застосування ливарних жароміцних нікелевих сплавів зі спрямованою (моно) структурою.....	18
2 Матеріал і методика досліджень.....	22
2.1 Матеріали дослідження.....	23
2.2 Металографічні дослідження.....	25
2.3 Оцінка механічних властивостей.....	26
3 Експериментальне дослідження впливу танталу на механічні властивості сплаву ЗМІ-3У.....	28

3.1 Оцінка впливу танталу на показники короткочасної міцності сплаву ЗМІ-3У зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою.....	28
3.2 Вплив танталу на показники тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою	
3.3 Дослідження кінетики формування структури і механізму високотемпературного руйнування.....	37
4 Технологічне випробування сплаву ЗМІ-3У із 4% танталу при отриманні литих лопаток методом спрямованої (моно) і рівноосьової кристалізації.....	42
5 Економічна частина.....	44
5.1 Характеристика ринку нікелевих ендопротезів.....	44
5.2 Економічне обґрунтування наукового дослідження.....	46
6 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	53
6.1 Аналіз потейційних небезпек.....	53
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки.....	54
6.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	68
6.4 Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій...	70
Висновки.....	73
Список літератури.....	77
Додаток А	

ВСТУП

Зарубіжною та вітчизняною практикою встановлено, що найважливішу роль у формуванні високого комплексу механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів, поряд з легуванням, грає структурний фактор. При цьому, відомо, що перевагою сплавів спрямованої кристалізації, в порівнянні зі сплавами рівноосьової кристалізації, є відсутність поперечних кордонів зерен, розташованих перпендикулярно до діючого навантаження, що істотно підвищує їх жароміцність і знижує темп знеміцнення.

Обсяг виробництва монокристалічних лопаток зростає з кожним роком. Так, американські фірми «Howmet», «General Electric» (GE), «Pratt and Whitney Aircraft» (PWA) впроваджують монокристалічні лопатки як в нові, так і в раніше розроблені двигуни цивільної авіації. Дані фірми автоматизують установки для виробництва лопаток з спрямованою і монокристалічною структурою, постійно вдосконалюючи технологію і хімічні склади сплавів.

Французькі фірми «Snecma» і «Turbomesa» в своїх нових розробках, також орієнтуються на сплави для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття. Ряд фірм, включаючи «Scimens» і «ABB», розглядають можливість перспективного застосування лопаток з спрямованою і монокристалічною структурою в стаціонарних газотурбінних установках. У вітчизняній промисловості нагромаджено певний досвід застосування таких лопаток в перспективних двигунах і стаціонарних установках нового покоління, однак, вони серійно поки не випускаються.

Разом з тим, обсяг наявних даних у вітчизняній і зарубіжній промисловості за комплексом службових характеристик жароміцних нікелевих сплавів для виробництва лопаток методом спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття, явно недостатній.

1 СУЧАСНИЙ СТАН В ПИТАННІ ВПЛИВУ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦННИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

1.1 Особливості експлуатації ливарних жароміцних нікелевих сплавів і вимоги до них

Відомо [1-11], що найбільш напруженим і відповідальним вузлом в турбіні є лопатковий апарат, а найбільш термічно напруженими деталями в гарячому тракті є робочі лопатки турбіни високого тиску, які в сучасних двигунах працюють десятки тисяч годин в широких інтервалах температур і напружень. Слід зазначити, що специфіка умов роботи лопаток газових турбін визначає характер вимог до матеріалів, з яких вони виготовляються. Залежно від призначення (соплові або робочі лопатки) вимоги до рівня тих чи інших властивостей жароміцних сплавів різні.

Тому до матеріалу робочих лопаток висуваються жорсткі вимоги щодо працездатності в широкому діапазоні температур: висока короткочасна і тривала міцність у поєднанні з пластичністю при високому опорі високотемпературної повзучості; структурна стабільність і корозійна стійкість [12-17, 22, 25, 26].

До матеріалів робочих лопаток газових турбін висуваються жорсткі вимоги щодо опору статичному і циклічному руйнуванню; малої схильності до крихкого руйнування; низької чутливості до експлуатаційних перегрівів; втомної і термовтомної міцності при робочих температурах; мінімальної швидкості росту тріщин; технологічними характеристиками, що забезпечує необхідний рівень виходу придатного литва по макроструктурі при отриманні виливків методом спрямованої (моно) кристалізації; мінімальної вартості деталей і т. д. [12, 18, 22, 27-29].

В даний час для базових агрегатів освоєний рівень температур 960°C - 1060°C і 1065°C - 1100°C - для пікових. При цьому звернуто увагу на те,

що статичне руйнування лопаток, внаслідок недостатньої тривалої міцності, може відбуватися в результаті підвищення температури газу, зниження властивостей матеріалу, внаслідок відхилення від регламентованих режимів термічної і механічної обробки [30-34].

До жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої (моно) кристалізації, пред'являються більш жорсткі вимоги, ніж до сплавів для рівноосьової кристалізації за вмістом шкідливих домішок кольорових металів, джерелом яких є вихідні шихтові матеріали, а також газових домішок, зокрема, кисню та азоту, які є джерелом неметалічних включень оксидів і нітридів [1, 3-7, 11-17].

Так як багато з вище перерахованих вимог несумісні між собою, то для задоволення всіх специфічних вимог деталі для газових турбін виготовляють з різних класів жароміцних сплавів із застосуванням різних покриттів і технологічних прийомів [4, 33]. Тому складний хімічний і фазовий склад сплавів є наслідком численних і суперечливих вимог, які слід враховувати [20-22, 33].

Таким чином, подальший розвиток сучасних жароміцних нікелевих сплавів пов'язано з розробкою композицій, що відповідають всім цим вимогам. При цьому, слід враховувати економічну доцільність (вартість сплаву, дефіцитність легуючих елементів і ін.) [6-10, 14-17].

1.2 Структура, фазовий склад і термічна стабільність жароміцних нікелевих сплавів

У більшості робіт [4, 7, 18, 20-22, 28, 29, 35, 38, 40-42] показано, що в залежності від схеми легування, методу виплавки і режиму термічної обробки, в структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть утворюватися різні фази. При цьому, вплив цих фаз на характеристики жароміцності

неоднозначно. Разом з тим, авторами робіт [43-51] зазначено, що великий вплив на характеристики міцності надає γ' - фаза, поведінка якої при високих температурах і тривалих витримках визначає працездатність сплаву в цілому.

У роботах авторів [1, 3-8, 22, 40, 52] проаналізовано вплив різниці параметрів решіток γ - твердого розчину і γ' - фази і показано, що, чим більше ця різниця, незалежно від знака, тим менше час до руйнування сплаву при заданій температурі і напрузі. При цьому, автори відзначають, що титан, ніобій, тантал збільшують розмірне невідповідність (місфіт) Δa між параметрами кристалічних ґраток двох фаз. Дані елементи, входячи до складу γ' - фази, збільшують період її ґратки.

Автори робіт [6-8, 21, 29, 41-43, 55] вважають, що жароміцність сплавів, зміцнених когерентними з γ - твердим розчином виділеннями впорядкованої γ' - фази, залежить від дисперсності частинок, їх об'ємної частки, форми, розподілу, кінетики зміни структури і термодинамічної стійкості системи $\gamma + \gamma'$, аж до температури $0,8 t_{пл}$. При цьому тантал, збільшуючи об'ємну частку γ - фази, входить до її складу в досить великих концентраціях, і одночасно входить до складу γ - твердого розчину, гальмуючи дифузійні процеси, зокрема, коагуляцію γ' - фази.

Автори [1, 3, 4, 40] визначають, що жароміцність сплавів істотно підвищується при об'ємній частці γ' - фази більше 50%. Дослідники [1, 7, 20, 29, 42] вважають, що сумарна концентрація γ' - утворювальних елементів в сучасних жароміцних нікелевих сплавах стала настільки велика, що в їх структурі спостерігається збільшення об'ємної частки евтектики $\gamma + \gamma'$. Евтектичні виділення значно більші частинок основної зміцнюючої γ - фази, але роль їх в механізмі зміцнення сплавів ще до кінця не з'ясована.

Автори [1, 3-7] звертають увагу на те, що велике значення в механізмі зміцнення нікелевих сплавів грають карбіди, які, здебільшого, утворюються із рідини і розташовуються між осями дендритів, що обумовлює їх специфічну морфологію. Показано, що всі γ' - утворювальні елементи (титан,

ніобій, тантал, гафній) здатні утворювати карбіди типу MC, і в залежності від системи легування жароміцних нікелевих сплавів, об'ємна частка карбідів може становити (1,5 - 2,5%). У ряді досліджень [4, 6, 7, 28, 29, 40, 43] показано, що в структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть бути присутніми інтерметаліди типу Ni_3Ti , Ni_3Nb , Ni_3Ta (η - фаза), які можуть утворюватися при підвищеній концентрації титану, ніобію, танталу відповідно, а також ТЦУ - фази типу σ - і μ -, умови утворення яких визначаються схемою легування сплавів. Автори визначають, що ці фази або є менш ефективними зміцнювачами, в порівнянні із γ' - фазою і карбідами, тому, що виділяючись у вигляді пластин мають негативний вплив на пластичність і ряд інших характеристик, що різко знижує в сплавах опір до руйнування при високих температурах.

Більшість дослідників [1-7, 29, 49, 50] вважає, що ускладнення складу сплаву впливає на зміну співвідношення γ - і γ' - фаз, а також перерозподіл елементів між ними, при цьому хром впливає на розчинність титану, ніобію, танталу в γ' - фазі. Автори відзначають, що знеміцнення жароміцних нікелевих сплавів з спрямованої (моно) структурою відбувається внаслідок перерозподілу легуючих елементів поблизу кордонів фаз, що відноситься до найбільш дифузионно рухомим елементам - алюмінію, титану, хрому і домішок, - які сприяють процесу коагуляції γ' - фази і зменшення її кількості.

1.3 Вплив легувальних елементів на службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів

Використання перспективних легуючих елементів, таких як, тантал, ніобій, гафній, реній і інші дефіцитні метали, підвищує характеристики міцності жароміцних нікелевих сплавів, але при цьому значно збільшують їх вартість. Тому промислове використання таких сплавів визначається, в першу чергу, економічною доцільністю [1, 3-7, 14, 28].

Разом з тим, багато технологічних процесів і деякі загальні принципи легування жароміцних нікелевих сплавів, розроблені в авіаційному матеріалознавстві, успішно використовуються в стаціонарному

газотурбобудування [1-7]. Перш за все, це стосується технології отримання лопаток для стаціонарних газових турбін з жароміцних корозійностійких сплавів на нікелевій основі з равноосной, спрямованої і монокристалічні структурами [11-13].

У роботах [29, 31, 51-53] показано, що, з метою підвищення міцності в корозійностійких нікелевих сплавах, рекомендується вміст хрому не більше (6-10%) і збільшення концентрації γ - утворюють елементів (алюмінію, титану, ніобію, гафнію, танталу), які, взаємодіючи з нікелем, утворюють γ -фазу, що забезпечує основний зміцнюючий ефект. При цьому автори звертають увагу на те, що дані елементи знижують пластичність сплавів, а тантал - в меншій мірі.

В даний час відомо [10, 41], що традиційний метод оптимізації міцності жароміцних нікелевих сплавів, що застосовуються для роботи при температурах 1000⁰С і вище, - збільшення об'ємної частки γ - фази, за рахунок підвищення сумарної концентрації γ - утворюють елементів при додатковому легуванні γ - твердого розчину молібденом, вольфрамом, ренієм.

У роботах [4, 47, 50, 54] показано, що для підвищення міцності нікелевих сплавів, в якості перспективних легуючих елементів широко застосовуються гафній, цирконій, ніобій, тантал. Дослідження авторів [6, 45-48] показали, що в жароміцних нікелевих сплавах оптимальні характеристики міцності для робочих температур 800-850⁰С досягаються при співвідношенні елементів, яке визначається умовою: $11,2 \leq (Ti\% + Al\% + Nb\% + 0,5Ta\% + 0,2Cr\%) \leq 11,4$. Відомості про поведінку сплавів даного типу легування в анізотропному стані практично відсутні і відносяться, як правило, лише до сплавів IN-738LC, IN-939, GTD-111, близьким за складом до сплавів ЖС-6К, ЖС-6У, ЦНК-7, ЧС-70, НС-88, ЗМІ-3У [1, 3, 4, 6, 7, 9, 17, 25, 40, 44, 55].

1.4 Особливості легування нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття

У роботах [1-7, 9-16, 25, 29] показано, що легування жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття має свої специфічні особливості, які необхідно враховувати при розробці нових композицій і модернізації складів відомих промислових марок.

У матеріалах [1, 3-7, 9, 16, 23, 25, 40, 42, 50] визначається, що раніше для технології спрямованої кристалізації використовувалися сплави, розроблені стосовно до звичайних методів лиття, без зміни їх складу. Однак, подальший досвід показав, що для успішного застосування високолегованих нікелевих сплавів потрібне коригування їх хімічного складу, з урахуванням специфіки кристалізації. Складний хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів вимагає суворої збалансованості системи легування по кожному компоненту для забезпечення оптимального поєднання механічних властивостей [9-17, 50-55].

Багато дослідників [1-8, 9-17, 25, 40] вважають, що оскільки в монокристалах взагалі відсутні більшокутові границі зерен, то немає необхідності вводити в сплави елементи, які їх зміцнюють (вуглець, бор, цирконій). Однак, автори відзначають, що повне виключення зі складу сплавів зернограничного упрочнителів не рекомендується, так як це викликає зміна температурних інтервалів фазових перетворень. При цьому, за рахунок істотного зміни структури, в монокристалах знеміцнюються малокутові границі, що призводить до зниження довговічності.

На рисунку 1.1. показано, що при рівних умовах випробувань (напруга $\sigma = 140$ МПа; час $\tau = 1000$ годин) в температурному діапазоні 800 - 1000⁰С жаропрочність нікелевих сплавів підвищується і одночасно перебуває в прямій залежності від сумарного вмісту γ' - утворюють елементів і об'ємної частки γ' - фази [1, 3, 4, 6, 7, 40].

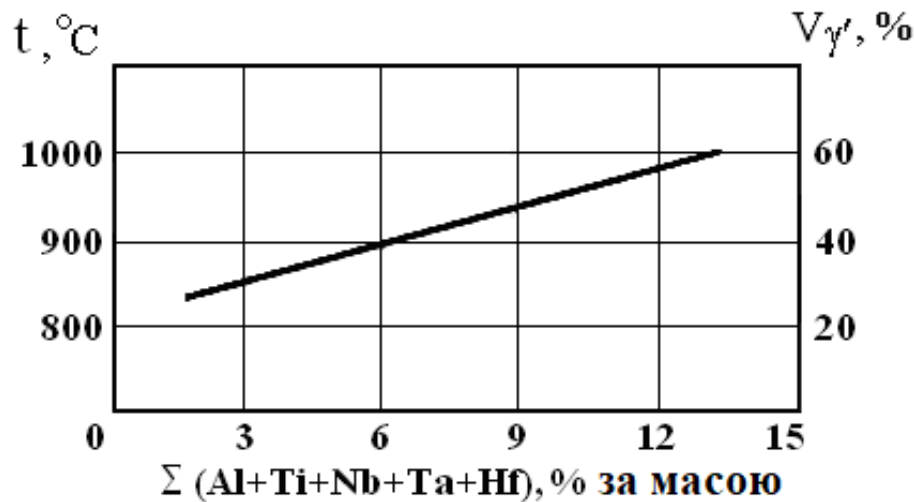


Рисунок 1.1 - Залежність жароміцності нікелевих сплавів від сумарного вмісту γ' - утворювальних елементів і об'ємної частки ($V_{\gamma'}$) γ' - фази [1, 3, 4, 6, 7, 29, 40]

У багатьох дослідженнях [1, 3-7, 40] показано, що для підвищення структурної стабільності жароміцних нікелевих сплавів, призначених для отримання виливків методом спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття, необхідно в їх складі знижувати вміст вуглецю, в порівнянні з його вмістом в сплавах для равноосной кристалізації.

У таблицях 1.1-1.3 наведені хімічні склади відомих вітчизняних та зарубіжних промислових жароміцних нікелевих сплавів, призначених для отримання виливків різними методами кристалізації [1, 3, 4, 6, 27, 34-36].

Аналіз хімічних складів (див. Табл. 1.1) показав, що на відміну від сплавів для равноосной кристалізації, сплави для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття містять тантал в досить широкому діапазоні (4-12)% за масою, що можна пояснити різним вмістом в них хрому, який обмежує розчинність танталу в нікелевої матриці.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів для
равноосной кристалізації [1, 3, 4, 6, 27]

Марка сплаву	Середній вміст елементу, % за масою												
	C	Cr	Al	Ti	Мо	W	Co	Nb	Ta	Zr	B	Hf	Re
ЖС6-К	0,16	11,5	5,5	2,8	4,0	5,0	4,5	-	-	0,04	0,020	-	-
ЖС6-У	0,17	9,0	5,8	2,5	1,9	10,3	9,7	1,0	-	0,05	0,015	-	-
ВЖЛ-12У	0,17	9,5	5,4	4,4	3,0	1,4	14,0	0,7	-	0,02	0,035	V- 0,7	
ЧС70-ВІ	0,10	16,0	3,0	5,5	2,0	4,2	14,0	0,5	-	-	0,015	-	-
ЗМІ-3У	0,12	13,3	3,3	4,8	0,8	7,3	5,0	-	-	-	0,015	-	-
ЦНК-21	0,08	21,0	2,5	3,4	1,5	2,3	10,8	0,7	-	-	0,012	-	-
Rene-80	0,17	14,0	3,0	5,0	4,0	4,0	9,5	-	-	-	-	-	-
IN-738 LC	0,11	16,0	3,5	3,5	1,7	2,6	8,5	0,8	1,7	0,05	0,010	-	-
IN-792	0,08	12,5	3,5	4,1	1,9	3,8	9,0	-	3,9	0,04	0,015	-	-
IN-939	0,15	22,5	1,9	3,7	-	2,0	19,0	1,0	1,4	0,09	0,009	-	-

Таблиця 1.2 - Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів для
спрямованої кристалізації [1, 3, 4, 6, 27]

Марка сплаву	Середній вміст елементу, % за масою												
	C	Cr	Al	Ti	Мо	W	Co	Nb	Ta	Zr	B	Hf	Re
ЖС26-ВІ	0,13	4,4	5,9	0,9	1,1	11,9	8,5	1,7	-	0,05	0,015	V- 0,9	
ЖС32-ВІ	0,15	4,9	5,9	-	1,0	8,5	9,0	1,6	4,0	-	0,015	-	4,0
ЦНК-7	0,09	14,7	3,7	4,2	0,6	7,2	9,0	-	-	-	0,010	-	-
ЖСКС-1	0,10	14,0	4,0	4,0	2,0	4,0	9,0	1,0	0,5	-	0,015	-	-
PWA-1422	0,14	9,0	5,0	2,0	-	12,0	10,0	1,0	-	0,05	0,015	1,5	-
CM186LC	0,07	6,0	5,7	0,7	0,5	8,0	9,0	-	3,0	0,05	0,015	1,4	3,0
Rene-142	0,12	6,6	6,2	-	1,5	4,9	12,0	-	6,4	0,03	0,015	1,5	2,8

IN-792 LC	0,08	12,5	3,4	3,5	1,8	4,1	9,0	-	4,1	0,02	0,015	1,0	-
DS-16	0,06	16,0	3,5	3,5	3,0	-	5,0	-	3,5	0,01	0,015	1,0	-
DSGTD-111	0,10	14,0	3,0	5,0	1,5	3,7	9,4	-	3,0	0,05	0,010	0,1	-

Таблиця 1.3 - Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів для монокристалічного лиття [1, 3, 4, 6, 27]

Марка Сплаву	Середній вміст елементу, % за масою												
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Nb	Ta	Zr	B	Hf	Re
ЖС-30М	-	7,0	5,1	1,8	0,6	11,7	7,5	1,1	-	-	-	0,1	-
ЖС-36	-	4,0	5,8	1,1	1,2	11,7	9,0	1,1	-	-	-	-	2,0
ЖС-40	-	6,3	5,3	-	4,2	7,0	0,5	0,2	7,0	-	-	-	-
ЦНК-8М	-	12,3	4,1	4,5	-	6,7	8,8	-	-	-	-	-	-
ЖСКС-2	-	13,5	4,1	3,8	2,0	4,1	9,5	-	2,0	-	-	-	1,0
Rene-N6	0,05	4,2	5,7	-	1,4	6,0	12,5	-	7,2	-	0,004	-	5,4
SC-16	-	16,0	3,5	3,5	3,0	-	-	-	3,5	-	-	-	-
PWA1483	0,07	12,0	3,6	4,1	1,9	3,8	9,0	-	5,0	-	0,003	-	-
CMSX-11B	-	12,5	3,6	4,2	0,5	5,6	7,0	-	5,0	-	0,002	-	-
CMSX-11C	-	14,9	3,4	4,2	0,4	4,5	3,0	-	5,0	-	0,002	-	-

Слід зазначити, що істотний прогрес в області підвищення жароміцності нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття досягнуто за рахунок легування танталом, який раніше у вітчизняних сплавах, призначених для рівноосьового лиття, не застосовувався [1, 3, 4, 42].

Разом з тим, автори [1, 3, 7, 16] звертають увагу на те, що сплави для монокристалічного литва «Rene» містять невеликі концентрації вуглецю і

бору. На думку розробників, повне виключення цих елементів зі складу призводить до зниження довговічності, а введення їх в невеликих концентраціях (0,04 - 0,08%) необхідно для зміцнення малокутових кордонів субзерен.

У багатьох дослідженнях [1, 4, 6, 7, 19, 29, 32-34, 48-51] показано, що жароміцність нікелевих сплавів визначається високотемпературної фазової стабільністю, яка залежить від значень температур фазових перетворень.

До теперішнього часу пошук оптимальних складів жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття ще не завершений. Тому щорічно в провідних країнах світу з'являються нові патенти і публікації [34, 38, 42, 44-46, 49, 50, 51]: в США, Франції, Великобританії, Японії, Росії, Україні. Роботи спрямовані на вдосконалення складів сплавів, режимів їх термічної обробки для підвищення комплексу службових характеристик і технологічності.

1.5 Особливості термічної обробки жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття

Необхідність вивчення структури і властивостей створюваних нових жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття, а також розробляються модифікацій на базі відомих промислових марок в литому стані, після термообробки і тривалого теплового впливу пов'язано з обмеженою інформацією в літературі [9-17, 45].

Механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів значною мірою визначаються температурою старіння. При цьому в сплавах з спрямованої (моно) структурою стабілізація фазового стану відбувається при більш високій температурі, ніж у сплавів з равноосной структурою. Вивчення основних закономірностей розпаду γ - твердого розчину і виділення фаз необхідно для оптимального вибору режиму старіння, який повинен забезпечити найбільш ефективне зміцнення сплавів. Цей шлях на практиці

реалізовувався для ряду вітчизняних і зарубіжних нікелевих сплавів за допомогою емпіричного підбору ступенів гомогенізації і старіння [26, 29, 33, 39, 43, 48, 49, 51-55].

Існує думка [18, 42, 47], що стандартні режими термообробки, що включають операції двоступеневої гомогенізації і старіння, дозволяють отримувати достатньо високі характеристики жароміцності. Однак, не забезпечують достатнього запасу пластичності, необхідної для застосування цих сплавів в стаціонарному газотурбобудуванні при тривалій експлуатації.

За сучасними уявленнями, оптимальне поєднання міцності і пластичних характеристик в нікелевих сплавах спостерігається при обмеженому перестарюванні γ' - фази і при наявності специфічної структури, коли дискретні виділення карбідів оточені більш пластичною матрицею. Така структура забезпечує затримку розвитку міждендритних тріщин і сприяє збільшенню довговічності сплавів, за рахунок підвищення запасу пластичності, знижуючи чутливість до концентраторів напружень [5, 6, 7, 18, 29].

Відповідно до думки дослідників [25, 26], для забезпечення при робочих температурах експлуатаційних властивостей в жароміцних нікелевих сплавах необхідно сформувати оптимальну структурний стан, що відрізняється високою термічною стабільністю.

Автори робіт [28, 29] представили інформацію про вплив кількості γ' - фази на жароміцні властивості нікелевих сплавів з підвищенням концентрації тугоплавких елементів. Зроблено висновок, що жароміцність і термічна стабільність сплавів в діапазоні робочих температур, в більшій мірі, залежить не стільки від кількості γ' - фази, скільки від її хімічного складу, так як дифузія є відповідальною за високотемпературні процеси.

1.6 Основні перспективи розвитку та застосування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з спрямованої (моно) структурою

На сьогоднішній день однією з актуальних і перспективних завдань є розробка сплавів нового покоління і модернізація складу відомих промислових марок, що поєднують кращі характеристики міцності і пластичності [54, 55].

У матеріалах, поданих в роботах [3, 7, 25, 40, 47-50] відзначається, що технологія спрямованої (моно) кристалізації, підвищуючи службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів, є перспективним процесом, який в даний час дозволяє збільшити ККД газотурбінних установок. Автори повідомляють, що в жароміцних нікелевих сплавах авіаційного призначення з спрямованої і монокристалічної структурою досягнуто таке ж підвищення жароміцності, яке вдалося отримати за останні 15 років шляхом вдосконалення методів легування. При цьому, можливості технології спрямованої (моно) кристалізації, що пов'язано з підвищенням міцності жароміцних нікелевих сплавів, ще далеко не вичерпані.

У більшості досліджень [3-6, 19, 25, 49-52] зазначено, що використання лопаток з спрямованої (моно) структурою, натомість равноосной лиття, дає можливість значно підвищити ресурс експлуатації, за рахунок збільшення опору повзучості і підвищення запасу пластичності. При цьому підвищення робочої температури металу лопатки на 30 - 60⁰С дозволить заощадити витрата повітря на охолодження до 30% з відповідною економією палива. Подібний спосіб лиття відкриває перспективу використання литих охолоджуваних і неохолоджуваних лопаток на енергетичних і газоперекачувальних агрегатах тривалої експлуатації.

У вітчизняній практиці [9-14, 17], в період освоєння техпроцесу спрямованої (моно) кристалізації в стаціонарному газотурбобудування, для виготовлення лопаток використовувалися авіаційні ливарні сплави ЖС-6К, ЖС-6У, ЖС-26, ЖС-32, що мають досить високі властивості міцності і низькі параметри ВТК - стійкості. Надалі для забезпечення необхідного комплексу службових характеристик, з урахуванням умов роботи лопаткового апарату стаціонарних ГТУ, що характеризуються відносно зниженими робочими

температурами, великим ресурсом експлуатації при наявності корозійно-активних середовищ, були розроблені корозійностійкі сплави ЦНК-7, ЦНК-8, ЖСКС-1, ЖСКС-2 і ряд інших.

Автори [44, 53-55] повідомляють, що широкому впровадженню технології спрямованої (моно) кристалізації в авіаційному газотурбобудуванні сприяло проведення комплексних досліджень анізотропних матеріалів, присвячених, зокрема, питанням впливу технологічних факторів і кристалографічної орієнтації на їх структуру і властивості. В даний час найбільш широке застосування анізотропні литі лопатки знайшли в авіаційному газотурбобудуванні, де вони використовуються вже протягом 25 років, причому в останні 15 років - монокристалічні.

У міру вдосконалення і здешевлення технологічного процесу область застосування таких лопаток розширилася в стаціонарному газотурбобудуванні [23, 25].

На рисунку 1.2 показаний прогрес в області розробки і технології отримання ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Видно, що з середини 50-х до початку 60-х років минулого століття сформувалися два класи нікелевих сплавів - авіаційні та наземні (корозійностійкі). Одночасно представлена температурна працездатність ряду зарубіжних (див. рис. 1.2 а) і вітчизняних (див. рис. 1.2 б) промислових жароміцних нікелевих сплавів, призначених для отримання виливків методами рівноосьової і спрямованої кристалізації, а також монокристалічного лиття з кристалографічною орієнтацією (КГО) [001] [1, 3, 5-7, 25, 40].

Багатьма авторами [1, 3, 7-10, 40] відзначено, що близько половини приросту жароміцності досягнуто за рахунок більш ефективної конструкції повітряної охолоджувальної системи робочих і направляючих лопаток турбіни. Інша половина приросту досягнуто за рахунок розробки нових сплавів і модернізації складів відомих промислових марок, а також

вдосконалення ливарних технологій. При цьому середній рівень короткочасної і тривалої міцності за 5 років підвищується на 20 - 30%.

На рисунку 1.2 показано, що найбільший темп зростання жароміцності нікелевих сплавів досягнутий за останні 25 років. Подальше підвищення температури газу на вході в турбіну обмежується температурної здатністю матеріалу зберігати стабільність структури, міцність і пластичність протягом тривалого часу [1, 3-8, 25, 40]. На сьогоднішній день вважається, що використання для спрямованої (моно) кристалізації сплавів, призначених для лиття методом равноосьевої кристалізації із традиційною схемою легування, дозволяє підвищити границі їх тривалої міцності, повзучості, а також пластичність, але не дозволяє в повній мірі реалізувати потенційні можливості цих сплавів [4-7, 9-17, 40, 51, 55].



а



б

а - зарубіжні сплави [6-8, 40]; б - вітчизняні сплави [1, 3-5, 25].

Рисунок 1.2 - Тенденція підвищення температурної працездатності жароміцних нікелевих сплавів для 1000 годин при напрузі 140 МПа

2 МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

На сьогоднішній день вважається, що використання для спрямованої (моно) кристалізації сплавів, призначених для лиття методом равноосной кристалізації з традиційною схемою легування, дозволяє підвищити межі їх тривалої міцності, повзучості, а також пластичність, але не дозволяє в повній мірі реалізувати потенційні можливості цих сплавів.

З урахуванням промислової доступності, сплав ЗМІ-3У був обраний за базовий склад для отримання досвідчених складів, легуваних танталом в досліджуваному діапазоні.

У досліджуваному діапазоні легування (1-5%) вивчали вплив танталу на механічні властивості зразків сплаву ЗМІ-3У, отриманих методом рівноосної і спрямованої (моно) кристалізації. Зіставлення результатів досліджень показників міцності досліджених складів дало можливість визначити оптимальні межі легування танталом сплаву ЗМІ-3У, що забезпечило одночасне підвищення показників міцності і покращення технологічності сплаву при отриманні придатних за макроструктурою литих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації.

Надалі проводили порівняльні механічні випробування зразків із рівновісною і спрямованою (моно) структурою після термічної обробки дослідних сплавів (склади 1-5), що містили тантал в досліджуваному діапазоні легування, в порівнянні з аналогічними зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу (склад 0).

2.1 Матеріали дослідження

В рамках досліджень даної роботи було вивчено вплив танталу на механічні і технологічні властивості ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У.

На основі базового сплаву ЗМІ-3У виготовляли дослідні склади, які містили тантал в дослідженому діапазоні (1-5%), з концентраційним кроком всередині діапазону легування 1%, за масою. В якості шихтових матеріалів використовували стандартні вихідні матеріали.

Хімічний аналіз дослідних плавок проводили за стандартними методами, відповідно до вимог ТУ 14-1689-73 і ОСТ 1.90127-85. Спектральний хімічний аналіз проводили на оптичному емісійному приладі ARL-4460 (квантометр одночасного багатоканального аналізу) в хвильовому діапазоні 170 - 800 нм. Хімічний склад дослідних плавок наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад дослідних плавок

№ складу	Вміст елементу, % за масою											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	B	Y	La	Ni
0	0,08	13,3	3,3	4,8	0,8	7,2	5,0	--	0,009	0,03	0,01	ост.
1	0,07	13,1	3,4	4,7	0,7	6,9	5,1	0,9	0,008	0,03	0,01	ост.
2	0,07	13,2	3,6	4,6	0,8	7,0	4,9	1,9	0,008	0,03	0,01	ост.
3	0,08	13,5	3,5	4,6	0,7	6,9	4,8	2,8	0,009	0,03	0,01	ост.
4	0,06	13,0	3,6	4,4	0,7	7,2	5,0	3,9	0,008	0,03	0,01	ост.
5	0,07	13,2	3,5	4,5	0,8	7,1	5,1	4,8	0,008	0,03	0,01	ост.

Сплав ЗМІ-3У без танталу (склад «0») відповідав середньомарочному паспортному складу [44]. Кожен наступний за номером дослідний склад від «1» до «5» містив, за розрахунком, на 1% танталу більше, ніж попередній.

На першому етапі проводили плавки вагою по 10 кг в вакуумно-індукційній печі УППФ-3М в середовищі аргону. Базовий сплав ЗМІ-3У подшіхтовували за розрахунком необхідною кількістю танталу (табл. 2.1). Злитки відливалися із застосуванням високотемпературної обробки розплаву (ВТОР), що забезпечує зниження вмісту в металі азоту, кисню та інших шкідливих елементів, так як до сплавів спрямованої (моно) кристалізації більш жорсткі вимоги щодо концентрації шкідливих домішок. Обробка розплаву здійснювали в середовищі аргону за температури 1850°C протягом 8 - 10 хвилин в тиглях з основною футеровкою, що забезпечило зниження концентрації кисню та азоту в металі дослідних плавок. Заливка зразків з рівноосьовою структурою з дослідних складів проводили в керамічні форми, попередньо нагріті до 900°C за температури 1540°C.

На другому етапі з дослідних плавок отримували литі заготовки монокристалічних зразків з кристалографічною орієнтацією (КГО) [001]. Заливку здійснювали на високоградієнтній установці для спрямованої кристалізації УВНК-8П в спеціальні керамічні блоки, з попередньо встановленими всередину стартовими кристалами (затравка) відповідно до серійної технології, зі швидкістю переміщення форми $V = 10 \text{ мм / хв}$ в рідиннометалевому кристалізаторі (розплав алюмінію). Для отримання заданої кристалографічної орієнтації [001] застосовувалися важкотопкі затравки зі сплаву бінарної системи Ni-W, які мали відхилення від основного напрямку [001] на кут не більше, ніж $\alpha \leq 3-5^\circ$.

Зростання монокристалу у зразку забезпечували за рахунок розплавлення рідким металом тільки верхньої частині затравки. Заливку проводили одночасно в два блоки по шість зразків. Загальна кількість литих заготовок циліндричної форми (діаметр $\varnothing 16 \text{ мм}$, довжина $l = 180 \text{ мм}$) становило 12 штук для кожного дослідного складу. Контроль кристалографічної орієнтації показав, що монокристалічні зразки всіх дослідних складів мали допустиме відхилення від основного напрямку [001] на кут не більше, ніж $\alpha \leq 10^\circ$.

Вміст танталу в сплаві ЗМІ-3У досліджували в межах діапазону легування (1-5)% за масою. Вміст інших легувальних елементів знаходилося в межах марочного складу ЗМІ-3У [44]. При цьому, з огляду на, що зразки дослідних складів отримували як із спрямованою (моно), так і з рівноосьовою структурою. З хімічного складу повністю не виключали елементи зернограничні зміцнювачі - вуглець і бор. Але, їх концентрація була помітно знижена з метою покращення технологічності при отриманні виливків методом спрямованої (моно) кристалізації (див. табл. 2.1).

2.2 Металографічні дослідження

Дослідження мікроструктури монокристалічних зразків дослідних складів проводили на нетравлений і травлених мікрошліфах, площа яких була орієнтована уздовж і по нормалі до поверхні зразків, на світловому оптичному мікроскопі «Olympus IX-70» з цифровою відеокамерою «ExwaveHAD color video camera Digital Sony» при різних збільшеннях. Мікроструктуру виявляли за допомогою травлення поверхні шліфів реактивом марблит [56, 57] - CuSO_4 - 4 г, HCl - 20 мл, вода - 20 мл по режиму: травлення 10 - 15 секунд, промивка водою, сушка гарячим повітрям. Для виявлення евтектики $\gamma + \gamma'$ і γ - фази використовувався реактив CuSO_4 - 20 г, H_2SO_4 - 5 мл, решта - H_2O , щільність струму - 500 А / м^2 . Для виявлення карбідів, використовувався реактив NaF - 30 г, HCl - 100 мл, лимонна кислота - 100 г, H_2O - 1000 мл, щільність струму - 200 А / м^2 . Для ідентифікації σ - фази і карбідів типу M_6C , що мають схожу игольчатую морфологію, проводилося кольорове травлення за допомогою реактиву: червона кров'яна сіль - 10 г, NaOH - 10 г, H_2O - 100 мл, щільність струму 500 А / м^2 .

2.3 Оцінка механічних властивостей

Для оцінки впливу танталу на характеристики міцності зразки дослідних складів випробовували в умовах короткочасної і тривалої дії різних статичних напружень, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу.

Випробування проводили після термічної обробки на стандартних циліндричних зразках із робочою частиною (діаметр $\varnothing 5\text{мм}$, довжина = 25 мм). При кожному рівні напруг було випробовувано 3-5 шт. зразків.

Випробування на короткочасну міцність проводили на зразках зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою за температур 20° , 800° , 900° і 1000°C на розривних машинах УМЕ-10ТМ і ПММ-20 (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-73, ГОСТ 1497-84).

Випробування на тривалу міцність проводили на аналогічних зразках в діапазоні температур 800° - 1000°C на машинах АІМА-5-2 і ZTZ 3/3 (ГОСТ 10145-81) шляхом одновісьового розтягнення при постійному навантаженні, з одночасним записом кривих повзучості. Відносне подовження зразків фіксували за допомогою механічних тензометрів (рис. 2.1).

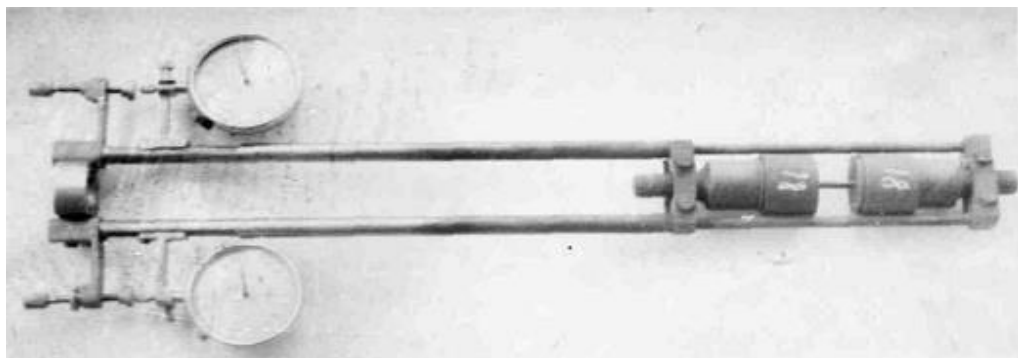


Рисунок 2.1 - Механічний тензометр зі зразком в захватах

З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТАНТАЛУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ ЗМІ-ЗУ

Для матеріалів газових турбін, що витримують тривалий вплив високих температур і напруг, контролюючими факторами є високотемпературна повзучість і стабільність структури. Найбільший інтерес представляє отримання функціональних залежностей повзучості від температури, напруги і часу. Порівняльна оцінка короткочасної і тривалої міцності, швидкості повзучості на різних стадіях, часу до руйнування зразків дослідних складів мало велике значення, з точки зору кращих показників міцності, при визначенні оптимального вмісту танталу в багатокомпонентній системі легування сплаву ЗМІ-ЗУ.

3.1 Оцінка впливу танталу на показники короткочасної міцності сплаву ЗМІ-ЗУ зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою

З метою отримання інформації, якої бракує, необхідної для оптимізації вмісту танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ, з точки зору кращих міцності, в дослідженому діапазоні легування, були проведені випробування на короткочасну і тривалу міцність зразків дослідних складів зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою.

На стовпчастих діаграмах (рис. 3.1, 3.2) наведені результати короткочасних механічних властивостей зразків зі спрямованою (моно) [001] і рівноосьовою структурою дослідних складів, що містили 0,9%, 1,9%, 2,8%, 3,9%, 4,8% танталу, випробуваних за температур 20, 800, 900, 1000°C, в порівнянні з аналогічними зразками сплаву ЗМІ-ЗУ без танталу.

На лівій осі ординат вказані: границя міцності σ_B і границя текучості $\sigma_{0,2}$, МПа; на правій осі - відносне подовження $\delta, \%$; на осі абсцис

представлені дослідні склади «0» - «5».

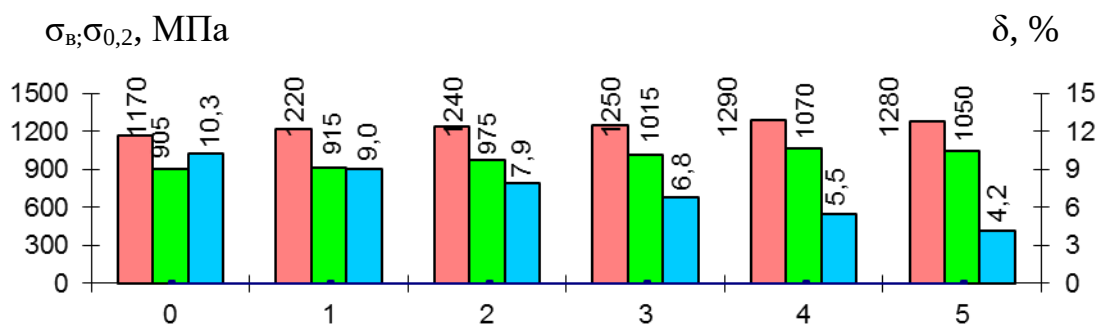
В процесі механічних випробувань зразків дослідних складів було встановлено, що між характеристиками міцності і вмістом танталу в сплаві ЗМІ-3У існує екстремальна залежність.

Порівняльний аналіз результатів показав, що за всіх температур випробування на короточасну міцність кращі показники границі міцності і границі текучості мають зразки дослідного складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу як зі спрямованої (моно), так і рівноосьовою структурою (рис. 3.1, 3.2) .

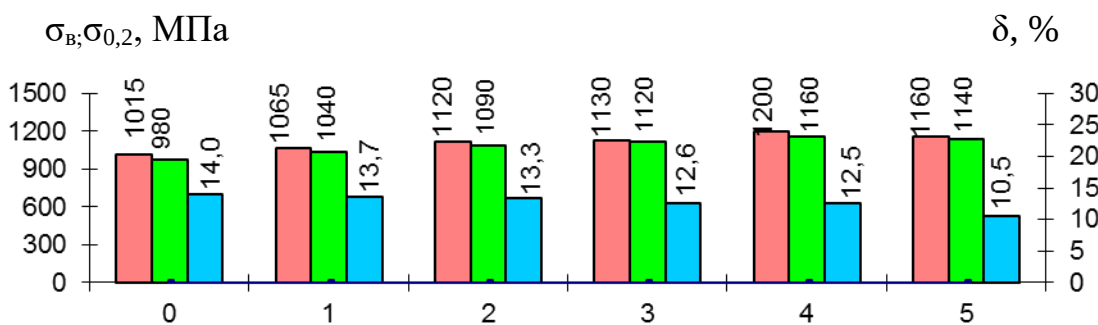
Встановлено, що за температур випробувань 20, 800, 900⁰С монокристалічні зразки сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (див. рис. 3.1 а, б, в) мають границю міцності в 1,1 - 1,3 рази, а границю текучості в 1,2 - 1,4 рази вище, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу. При температурі випробування 1000⁰С у монокристалічних зразків сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу границя міцності в 1,6 рази, а границя плинності в 2,3 рази вище, ніж у аналогічних зразків сплаву ЗМІ-3У без танталу (рис. 3.1 г) .

Слід зазначити, що, в порівнянні з монокристалічними зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу, пластичність зразків дослідного складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу знижується на 4-6% (див. рис. 3.1).

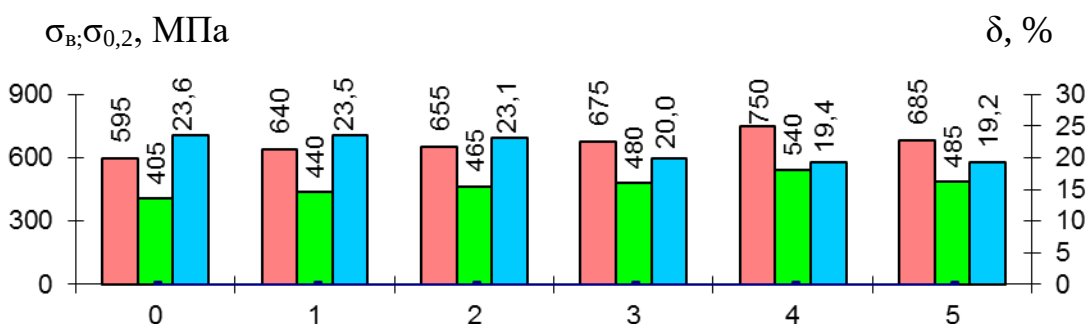
Встановлено, що за температур випробувань 20, 800, 900⁰С зразки складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу з рівноосьовою структурою (див. рис. 3.2 а, б, в) мають границю міцності і границю текучості в 1,2 - 1,4 рази вище, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу. При температурі випробування 1000⁰С границя міцності зразків складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу з рівноосьовою структурою в 1,7 рази, а границя текучості в 2,5 рази вище, ніж у зразків сплаву ЗМІ-3У без танталу (рис. 3.2 г). При цьому слід зазначити, що, в порівнянні зі зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу, пластичність зразків складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу знижується на 6-8%.



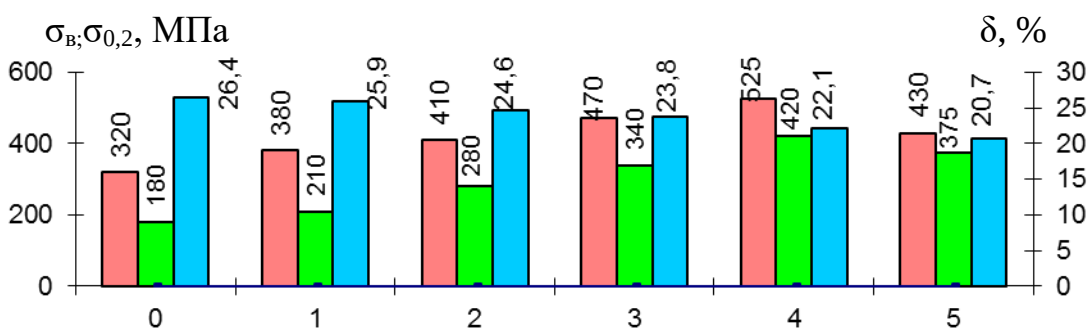
a



б



в



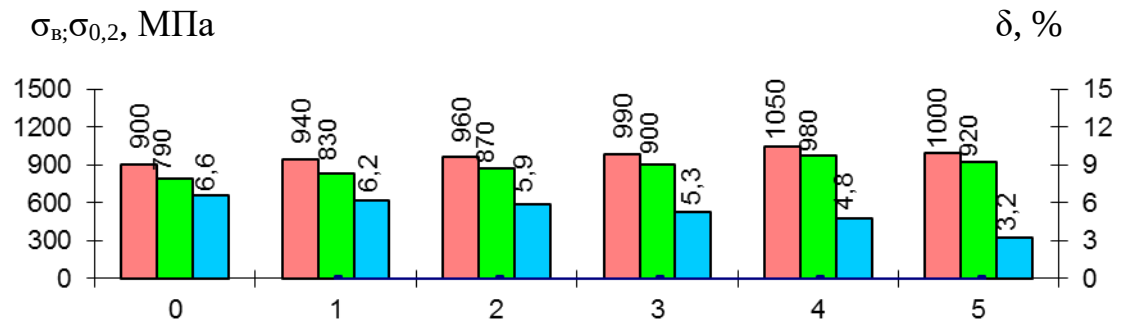
г

Температура випробувань: а - 20⁰С; б - 800⁰С; в - 900⁰С; г - 1000⁰С.

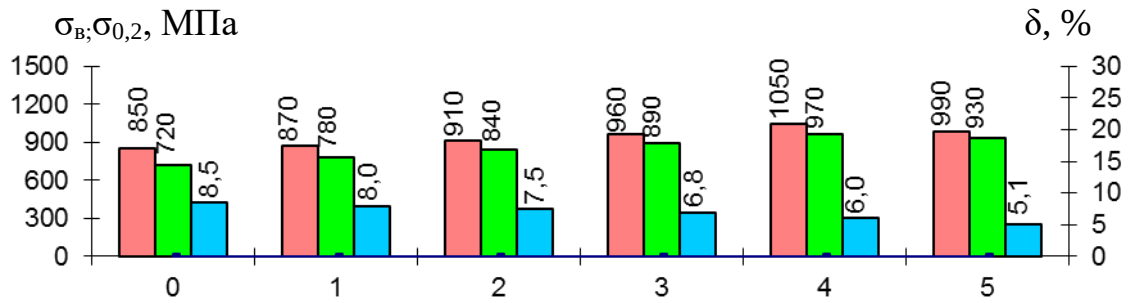
0 - ЗМІ-3У без Та; 1 - ЗМІ-3У + 0,9% Та; 2 - ЗМІ-3У + 1,9% Та;

3 - ЗМІ-3У + 2,8% Та; 4 - ЗМІ-3У + 3,9% Та; 5 - ЗМІ-3У + 4,8% Та.

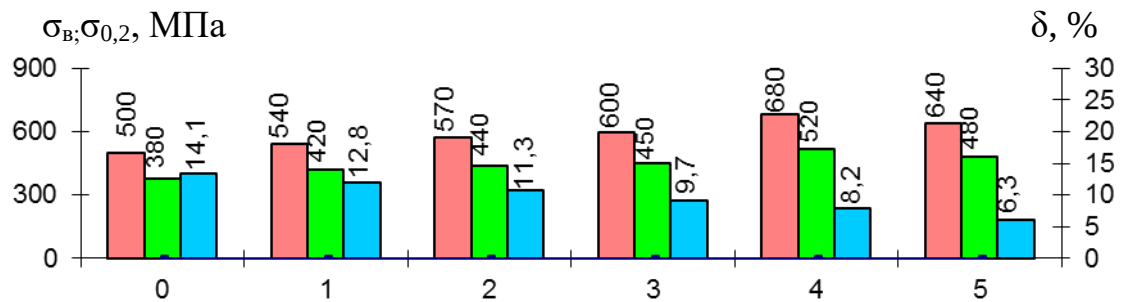
Рисунок 3.1 - Порівняльні короточасні механічні властивості зразків дослідних складів зі спрямованою (моно) [001] структурою [27, 43, 58]



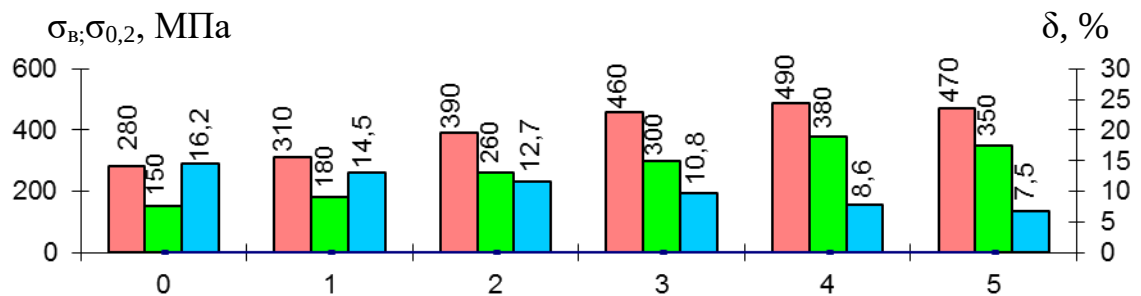
a



б



в



г

Температура випробувань: а - 20⁰С; б - 800⁰С; в - 900⁰С; г - 1000⁰С.

0 - ЗМІ-3У без Та; 1 - ЗМІ-3У + 0,9% Та; 2 - ЗМІ-3У + 1,9% Та;

3 - ЗМІ-3У + 2,8% Та; 4 - ЗМІ-3У + 3,9% Та; 5 - ЗМІ-3У + 4,8% Та.

Рисунок 3.2 - Порівняльні короточасні механічні властивості зразків дослідних складів з рівноосьовою структурою [27, 43, 58]

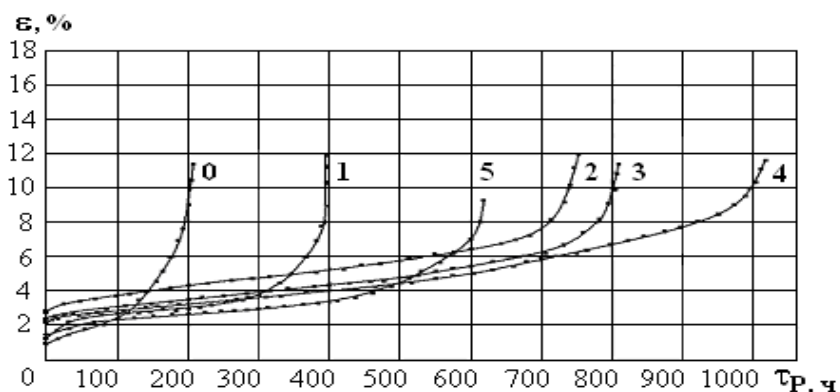
Порівняльний аналіз отриманих результатів (див. рис. 3.1, 3.2) показав, що за всіх температур випробування зразки дослідних складів зі спрямованою (моно) структурою перевершують за показниками короточасних механічних властивостей зразки з рівноосьовою структурою: по границі міцності σ_B і границі текучості $\sigma_{0,2}$ при $t = 20^\circ\text{C}$ на 100 - 130 МПа, при $t = 800^\circ\text{C}$ на 170 - 200 МПа; по показникам границі міцності σ_B при $t = 900^\circ\text{C}$ на 70 - 100 МПа, при $t = 1000^\circ\text{C}$ на 40 - 60 МПа; по показникам границі текучості $\sigma_{0,2}$ при $t = 900^\circ$ і 1000°C на 20 - 40 МПа. При цьому, за рахунок структурного фактора, зразки дослідних складів зі спрямованою (моно) структурою по показникам пластичності δ в 1,5 рази перевершують зразки з рівноосьовою структурою.

3.2 Вплив танталу на показники тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою

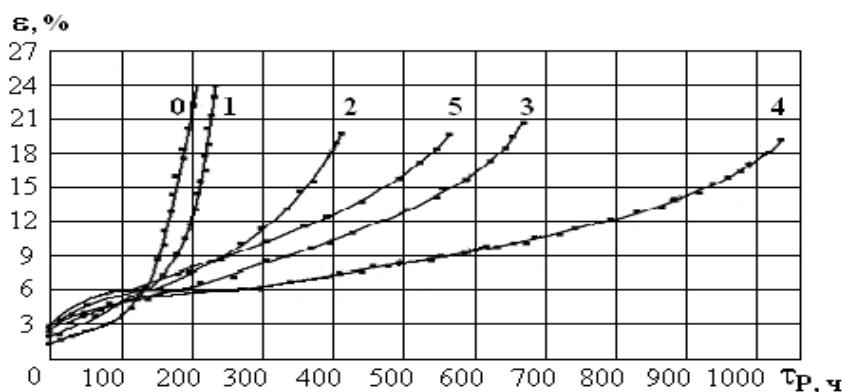
У процесі подальших досліджень додаткова інформація була отримана при аналізі швидкості деформації зразків дослідних складів на різних стадіях високотемпературної повзучості. Слід зазначити, що механізм повзучості на різних стадіях залежить від великої кількості факторів і не залишається постійним, що ускладнює його пояснення в рамках відомих теоретичних залежностей. Разом з тим, підвищена дифузионная рухливість атомів елементів поблизу кордонів фаз обумовлена підвищеною щільністю дислокацій, а також більшою концентрацією дефектів, що визначає характер зміни механічних властивостей в процесі тривалого теплового впливу під напругою. У даних областях раніше розвиваються процеси знеміцнення і осередки руйнування.

На рисунку 3.3 представлені криві повзучості зразків дослідних складів «1» - «5» зі спрямованою (моно) [001] структурою, в порівнянні зі

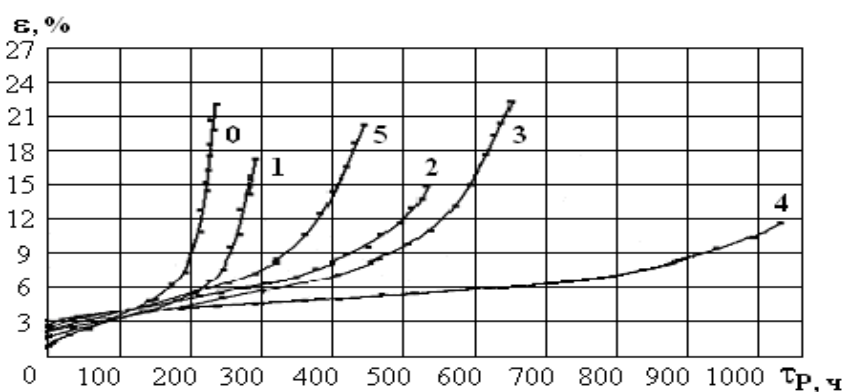
сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»), отриманих в процесі випробувань на тривалу міцність за температур $t = 800, 900$ і 1000°C і напружених $\sigma = 450, 250$ і 120 МПа, відповідно [42, 58].



а



б



в

Температура випробувань: а – $t = 800^{\circ}\text{C}$; б – $t = 900^{\circ}\text{C}$; в – $t = 1000^{\circ}\text{C}$.

0 - ЗМІ-3У Та без; 1 - ЗМІ-3У + 0,9% Та; 2 - ЗМІ-3У + 1,9% Та;

3 - ЗМІ-3У + 2,8% Та; 4 - ЗМІ-3У + 3,9% Та; 5 - ЗМІ-3У + 4,8% Та.

Рисунок 3.3 - Вплив танталу на час до руйнування зразків дослідних складів зі спрямованою (моно) [001] структурою [27, 43, 58]

Порівняльний аналіз результатів показав, вплив танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ в дослідженому діапазоні легування на час до руйнування зразків (τ) неоднозначно.

На рисунку 3.3 показано, що зразки сплаву ЗМІ-ЗУ з 4,8% танталу не показують максимальний час до руйнування, хоча дослідний склад «5» має найбільшу об'ємну частку γ' - фази і містить більшу кількість нерівновісної евтектики $\gamma+\gamma'$, в порівнянні з іншими дослідними складами (1-4). Найбільш верогітно, це пов'язано з тим, що в структурі складу «5» збільшилася неоднорідність, за рахунок виділення в процесі кристалізації більшої кількості нерівноважної евтектики (перитектики) $\gamma+\gamma'$, а також надлишкових фаз, збагачених танталом, типу η - фази на основі Ni_3Ta несприятливої морфології.

Це обумовлює більший розбіг розміру часток γ' - фази, що виділилися, і зміна співвідношення цих різнорозмірних часток у мікроструктурі після термічної обробки. При цьому, ділянки, розташовані поруч з евтектикою $\gamma+\gamma'$ збіднені танталом, що підвищує дифузійне проникнення в цих областях, приводячи до збільшення темпів знеміцнення і зниження показників тривалої міцності. Разом з тим, зниження часу до руйнування зразків складу ЗМІ-ЗУ з 4,8% танталу, порівняно з дослідними складами, що містять 1,9%, 2,8%, 3,9% танталу, пов'язано, також і з границею «евтектика – матриця», яка також має підвищену дифузійну рухливість, порівняно з основною матрицею сплаву.

За першу стадію повзучості відповідає дифузійна повзучість. На цьому етапі повзучості зміну щільності частково можна пов'язати із збільшенням щільності дислокацій.

Друга стадія повзучості контролюється переповзанням дислокацій при рівноважної концентрації вакансій. На другій стадії усталеної повзучості щільність дислокацій перебуває на постійному рівні. Ймовірно, на цьому етапі відбувається нерівномірний розподіл щільності дислокацій в структурі. При цьому, більш висока щільність дислокацій утворюється на субграницях.

Третя стадія повзучості контролюється переповзанням дислокацій в умовах, коли концентрація вакансій перевищує рівноважні значення. Для практичних цілей найбільш важливою є друга стадія усталеної повзучості.

Порівняльний аналіз кривих повзучості (див. рис. 3.3) показав, що при вмісті в сплаві ЗМІ-3У 4,8% танталу (склад «5») інкубаційний період I-ї стадії повзучості зменшується в 3 - 4 рази, порівняно із зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу (склад «0»).

Дія підвищеного деформаційного зміцнення зразків складу «5» на I-й стадії повзучості, ймовірно, обумовлено появою у структурі більш високої концентрації напружень, за рахунок збільшення структурної неоднорідності, що згодом стало причиною зниження часу до руйнування зразків, порівняно із зразками дослідних складів, що містили 1,9%, 2,8%, 3,9% танталу.

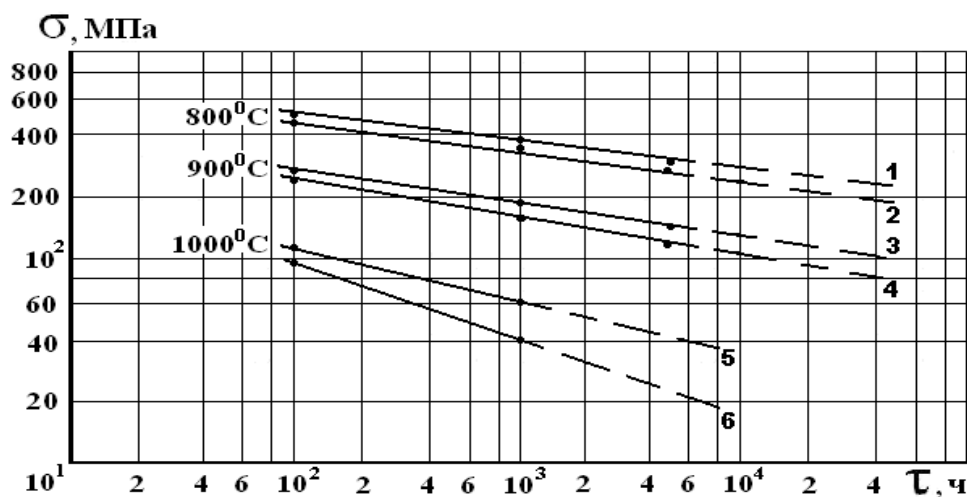
Встановлено, що максимальний інкубаційний період I-ї стадії повзучості спостерігається у зразків сплаву ЗМІ-3У без танталу при всіх температурах випробувань. Це в подальшому призводить до зниження часу до руйнування зразків, за рахунок збільшення швидкості повзучості на II-й і III-й стадіях, порівняно з усіма зразками дослідних складів, що містили тантал (див. рис. 3.3).

Порівняльний аналіз кривих повзучості показав, що час до руйнування зразків складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу збільшується в середньому в 5 разів, порівняно із зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу. Це є наслідком поєднання двох чинників: зниженням швидкості повзучості на II-й сталій стадії (збільшення часу її тривалості в 5-6 разів), і помітним розширенням III-ї стадії повзучості, за рахунок збільшення часу її тривалості в 2-3 рази. У порівнянні із зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу, тривала пластичність зразків складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу знижується на 5-6%. При цьому, слід зазначити, що всі склади, що містили тантал, мали досить високий запас пластичності, за рахунок того, що виділення нерівноважних фаз в междендритних областях знаходяться в оточенні порівняно м'якою монокристалічною матрицею.

На рисунках 3.4, 3.5 представлені криві тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У без танталу і дослідного складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу, отримані на зразках зі спрямованою (моно) і рівноосьовою структурою за температур випробувань 800, 900, 1000°C.

На рисунках 3.4 і 3.5 показано, що за рахунок структурного фактора, за рівних умов випробувань на 100- і 1000- годинну тривалу міцність, зразки зі спрямованою (моно) структурою мають однаковий час до руйнування, але при більшій на 20 - 40 МПа напрузі, в порівнянні із зразками з рівноосьовою структурою за всіх температур випробувань. При цьому, зразки сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу як зі спрямованою (моно), так і рівноосьовою структурою показали однаковий час до руйнування, але при більшій на 60 - 80 МПа напрузі, ніж аналогічні зразки сплаву ЗМІ-3У без танталу.

Разом з тим, при рівних умовах випробувань час до руйнування зразків дослідного складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу як зі спрямованою (моно), так і рівноосьовою структурою збільшується в 4 - 5 разів, в порівнянні із аналогічними зразками сплаву ЗМІ-3У без танталу за всіх температур випробувань.



1, 3, 5 - зразки зі спрямованою (моно) структурою; 2, 4, 6 - зразки з рівноосьовою структурою

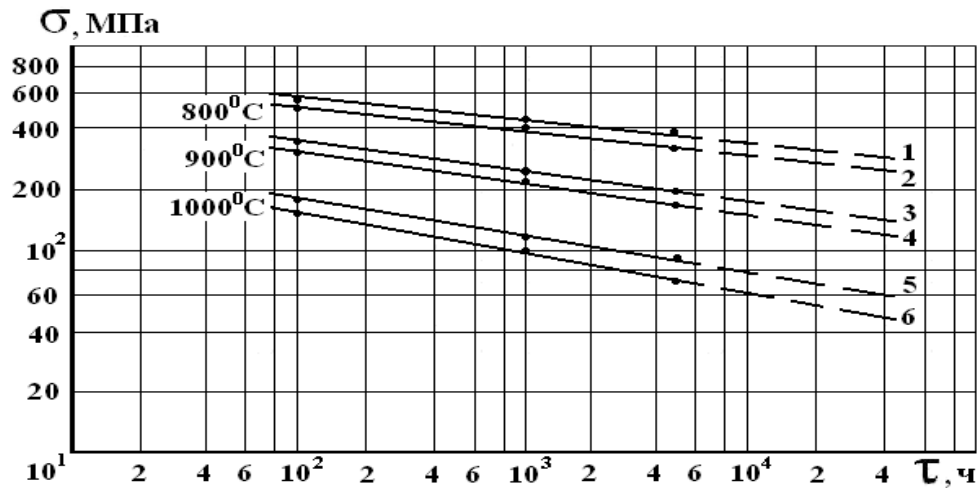
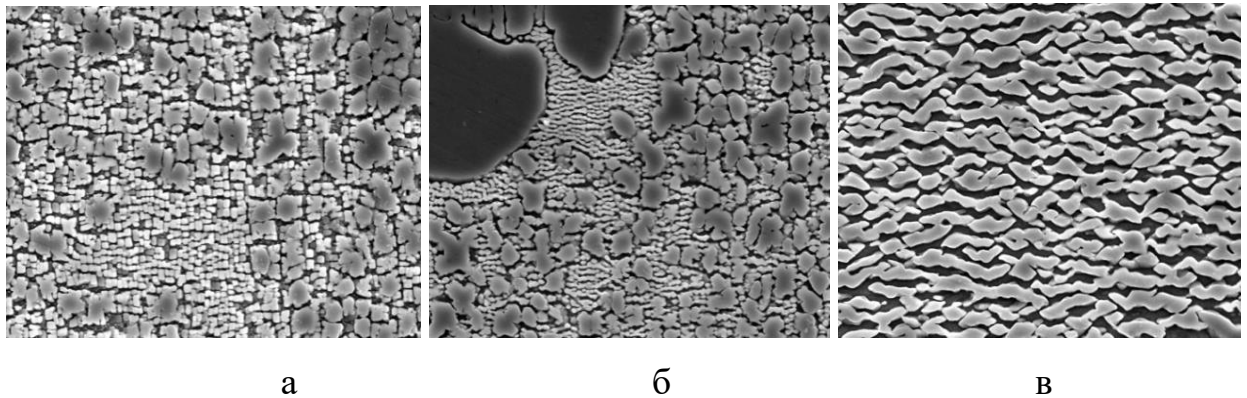


Рисунок 3.4 - Криві тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У без танталу (склад «0»):

Аналіз мікроструктури зразків складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу після 100- часових випробувань на тривалу міцність при температурах $t = 800, 900, 1000^{\circ}\text{C}$ і напружених $\sigma = 600, 450, 180$ МПа показав, що в умовах високотемпературної повзучості частки γ' - фази, зрощуючись у пластини, набувають витягнуту форму у вигляді рафт- структури, орієнтованої перпендикулярно осі прикладеної напруги (рис. 3.6).



а – $t=800^{\circ}\text{C}$, $\sigma=600$ МПа; б – $t=900^{\circ}\text{C}$, $\sigma=250$ МПа; в – $t=1000^{\circ}\text{C}$, $\sigma=180$ МПа.

Рисунок 3.6 - Мікроструктура монозразків [001] сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (склад «4») після випробувань на 100 – годинну тривалу міцність: $\times 5000$

3.3 Дослідження кінетики формування структури і механізму високотемпературного руйнування

Кінетика формування структури залежить від температури випробування і величини напруги. Як правило, дисперсні частинки γ' - фази здатні гальмувати дислокації і перешкоджати розвитку повзучості. При цьому, частинки γ' - фази коагулюють та витягуються в напрямку, перпендикулярному до розтягуючим напруженням.

На рисунку 3.6 показано, що механізм повзучості за різних температур випробувань і напругах не залишається незмінним. Так, після витримки монокристалічних зразків дослідного складу «4» в умовах повзучості за температури $t = 800^{\circ}\text{C}$ і напрузі $\sigma = 600$ МПа рафт - структура практично не формується. В основному, в структурі відбувається спрямована коагуляція більш великих частинок γ' - фази, що не розчинилися після другого ступеня гомогенізації. Частинки набувають неправильну форму, без орієнтації по відношенню до прикладеної навантаженні (рис. 3.6а). Однак, спостерігаються незначні ділянки зрощення дрібнодисперсних частинок γ' - фази, які орієнтовані перпендикулярно чинним напруженням.

Після витримки зразків складу «4» в умовах повзучості за температури $t = 900^{\circ}\text{C}$ при напрузі $\sigma = 250$ МПа аналіз структури показав, що часткове формування рафт - структури відбувається в більшому об'ємі переважно в зонах, які оточують виділення евтектики (перитектики) $\gamma + \gamma'$, за рахунок анізотропного зрощення дрібнодисперсних частинок γ' - фази у напрямку, перпендикулярному до розтягуючих напружень. При цьому, спостерігали коагуляцію більш великих частинок γ' - фази, що не розчинилися після другого ступеня гомогенізації, які набувають неправильну форму, без орієнтування по відношенню до діючого навантаження (рис. 3.6 б).

Після витримки зразків складу «4» в умовах повзучості за температури $t = 1000^{\circ}\text{C}$ при напрузі $\sigma = 180$ МПа, аналіз мікроструктури показав, що морфологія частинок γ' - фази повністю змінюється. Замість кубическо-

сферичної морфології, вони набувають витягнуту форму в напрямку, перпендикулярному до дії розтягуючих напружень. Відбувається повне формування рафт – структури, анізотропна коагуляція (коалесценція) часток γ' - фази і втрата ними правильної геометричної форми (див. рис. 3.6 в).

Встановлено, що рафт - структура монозразків сплаву ЗМП-3У з 3,9% танталу (склад «4») формується, в основному, на I-й стадії несталої повзучості протягом декількох десятків годин, за рахунок істотної зміни розчинності частинок γ' - фази і значного прискорення дифузійних процесів. При цьому решта γ' - фази, верогітно, деградує на II-й стадії усталеної повзучості. Починаючи із середини II-й стадії повзучості, деградація γ' - фази в структурі зразків досягає $\sim 60\%$.

Витягування частинок γ' - фази та формування рафт - структури викликає повзучість при набагато нижчій швидкості, в порівнянні зі швидкістю повзучості матеріалу, в якому частки γ' - фази анізотропно зростаються неправильно. Перпендикулярне розташування пластин γ' - фази відносно напрямку дії прикладеної напруги пов'язане зі знаком невідповідності періодів ґраток Δa γ - і γ' - фаз, а також невідповідності модулів пружності ΔE γ - твердого розчину і γ' - фази. За умови $\Delta a_{\gamma-\gamma'} > 0$, $\Delta E_{\gamma-\gamma'} > 0$, $\sigma > 0$, $\sigma > 0$, зрощення частинок γ' - фази в пластини відбувається перпендикулярно напрямку прикладеної напруги.

В умовах прикладання зовнішнього навантаження, рафт - структура є термодинамічно більш рівноважною системою, оскільки рівень міжфазної поверхневої енергії в ній нижче, ніж у структурі зі сферическо-кубічними дрібнодисперсними виділеннями γ' - фази. При цьому, час утворення рафт-структури різний і залежить як від температури випробування і прикладеної напруги, так і від вмісту танталу в дослідних складах, що пов'язано зі збільшенням невідповідності Δa параметрів кристалічних ґраток γ - твердого розчину і γ' - фази.

При температурі випробування $t = 800^\circ\text{C}$ і напрузі $\sigma = 600 \text{ МПа}$

переважає механізм перерізання і огинання дислокаціями частинок. В цьому випадку швидкість повзучості залежить як від розміру часток γ' - фази, так і від відстані між ними. При цьому, тривала міцність забезпечується переважно дрібнодисперсними частинками γ - фази, які доводяться із пересиченого γ - твердого розчину після другого ступеня гомогенізації.

При температурі випробування $t = 900^{\circ}\text{C}$ і напрузі $\sigma = 250$ МПа тривала міцність, більшою мірою, забезпечується оптимальним розміром частинок γ - фази, яка, в основному, формуються після першого ступеня гомогенізації.

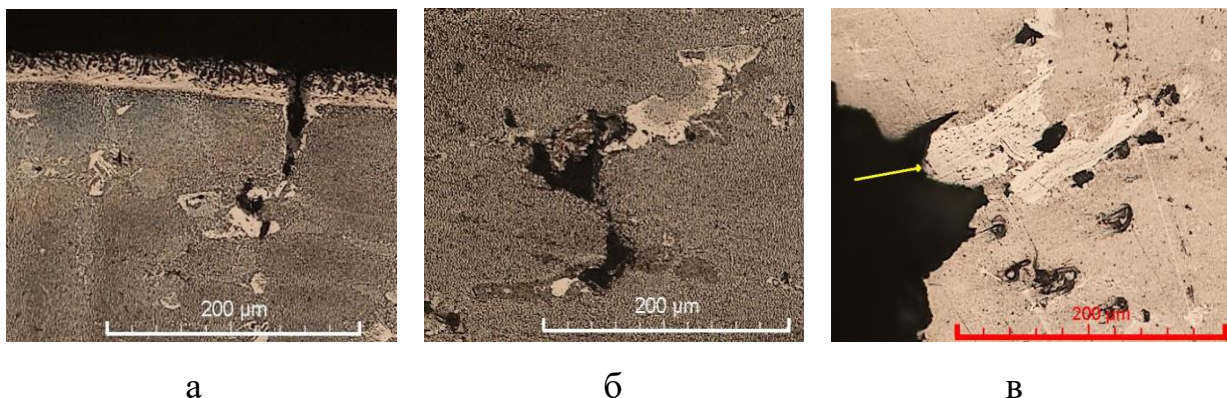
При температурі випробування $t = 1000^{\circ}\text{C}$ і напрузі $\sigma = 180$ МПа, коли переважає механізм переповзання дислокацій, що визначає швидкість повзучості монокристалічних зразків $[001]$, кращі показники тривалої міцності, забезпечуються більшими за розміром частками γ' - фази, які формуються після двоступеневої термічної обробки.

Дослідження механізму високотемпературного руйнування при розтягуванні монокристалічних зразків досвідченого складу «4» показало, що великі виділення евтектики $\gamma + \gamma'$, оточені слабо зміцненими областями, служать основними центрами зародження і росту тріщин (рис. 3.7).

Металографічний аналіз показав, що мікротріщини розвиваються як з поверхні, переважно за міжфазною границею карбід-матриця (рис. 3.7 а), так і всередині об'єму, по границі матриця-евтектика $\gamma + \gamma'$, а також можуть розвиватися з мікропор, що утворилися по границях розчиненої евтектики (перитектики) $\gamma + \gamma'$ (рис. 3.7 б).

Встановлено, що утворення мікропор, передуює формування тонкої не травленої світлої зони навколо карбідів, так і за межами евтектики $\gamma + \gamma'$, внаслідок локального перерозподілу в цих місцях легувальних елементів. В процесі високотемпературної повзучості щільність сплаву зменшується прямопропорційно деформації. Однією з причин зменшення щільності є утворення і поступове накопичення мікропор. Так як пори є ефективним стоком вакансій вздовж карбідних частинок і виділень евтектики $\gamma + \gamma'$, то на

цій стадії в структурі утворюються ланцюжки мікропор, які згодом коагулюють і об'єднуються в магістральну тріщину.



- а – поверхнева тріщина по границі матриця - карбід;
 б – внутрішня тріщина по границі матриця - евтектика $\gamma + \gamma'$;
 в – типова мікроструктура зламу.

Рисунок 3.7 - Кінетика розвитку мікротріщин в монозразках [001] сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (склад «4») в процесі випробувань на тривалу міцність: $\times 100$

Аналіз структури зламу (рис. 3.7 в) показав, що процес руйнування монокристалічних зразків починається з утворення мікротріщин у місцях злиття пор в світлих, нетрених областях, по границям евтектики $\gamma + \gamma'$ і на ланцюжках карбідних частинок, орієнтованих перпендикулярно до діючої навантаження. У зв'язку з тим, що карбідна фаза зосереджена в міждендритних просторах, то саме у карбідних частинок виникають перші порушення суцільності в процесі деформації.

Зі збільшенням ступеня деформації мікротріщини розвиваються, з'єднуючись в тріщину у междендритних просторах. Формування подібної структури призводить до окрихчування і руйнування матеріалу. При цьому, злам має міжфазний характер, на поверхні якого спостерігаються фасетки відколу квадратної і прямокутної форми.

Мікротріщини розвиваються в площинах, перпендикулярних осях

дендритів I-го порядку, паралельними осями дендритів II-го порядку. Відбувається підростання цих мікротріщин і гальмування їх у дендритах I-го порядку.

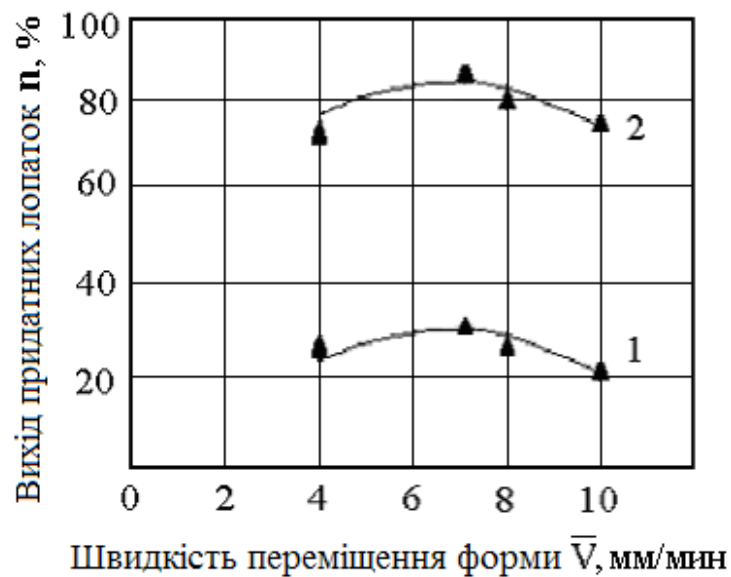
В результаті цього відбувається послаблення робочого перерізу і перерозподіл навантаження між дендритами I-го порядку і міждендритних областях. В підсумку, виникають зони різкої концентрації напружень в осях дендритів I-го порядку у вершині загальмованої тріщини. Внаслідок цього, відбувається надрив дендрита, і тріщина проростає через вісь дендрита I-го порядку.

Ймовірно, цей процес може йти паралельно або послідовно в залежності від рівня прикладеної напруги через всі осі I-го порядку одного перерізу робочої частини зразка. При цьому, евтектичні виділення, розташовуючись в міждендритних просторах, як би заліковують ці зони, де відбувається найбільш ймовірне руйнування в умовах високотемпературної повзучості.

Таким чином, встановлено, що кращі показники короткочасної і тривалої міцності за всіх температур випробувань було отримано на зразках дослідженого складу ЗМІ-3У з 3,9% танталу, за масою, як зі спрямованою (моно), так і рівноосьовою структурою. З точки зору кращих показників, можна вважати оптимальним вмістом танталу є для багатоконпонентної системи легування сплаву ЗМІ-3У. Отримані експериментальні результати дозволили встановити залежність характеристик міцності від вмісту танталу в дослідженому діапазоні (1-5)% за масою в сплаві ЗМІ-3У.

4 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ВИПРОБУВАННЯ СПЛАВУ ЗМІ-3У З 4% ТАНТАЛУ ПРИ ОТРИМАННІ ЛИТИХ ЛОПАТОК МЕТОДОМ СПРЯМОВАНОЇ (МОНО) І РІВНООСЬОВОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

В процесі відпрацювання технології отримання з дослідного сплаву ЗМІ-3У, легованого $\sim 4\%$ танталу за масою, і промислового ЗМІ-3У (без танталу) неохолоджуваних робочих лопаток зі спрямованою (моно) структурою енергетичної установки MS-5001 досліджували вплив швидкості кристалізації, яка дорівнює швидкості переміщення форми на рівень виходу придатних литих лопаток за макроструктурою. Було встановлено, що оптимальною швидкістю переміщення форми, при якій досягається найбільший вихід придатних лопаток за макроструктурою, є швидкість $V_{кр.} = 7 \text{ мм / хв}$ (рис. 4.1).



1 - промисловий сплав ЗМІ-3У без танталу;

2 - дослідний сплав ЗМІ-3У з 3,9% танталу.

Рисунок 4.1 - Залежність виходу придатних монокристалічних лопаток за макроструктурою енергетичної турбіни MS-5001 від швидкості кристалізації (швидкості переміщення форми)

На рисунку 4.1 показано, що, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (крива 1), сплав ЗМІ-3У, оптимально легований танталом (крива 2), має кращу технологічність при отриманні дослідної партії монокристалічних лопаток. Результати порівняльного дослідно-технологічного випробування показали, що вихід придатного литва за макроструктурою для сплаву ЗМІ-3У без танталу склав (30 - 35%), для дослідного сплаву ЗМІ-3У з 4% танталу - (80 - 85%), що в 2,5 рази більше. Слід зазначити, що підвищення або зниження оптимальної швидкості переміщення форми призводило до зниження виходу придатних лопаток за макроструктурою.

У промислових умовах АТ «МОТОР СІЧ» проводили дослідно-технологічне випробування сплаву ЗМІ-3У, легovanого 4% танталу за масою, при отриманні робочих лопаток І-ї ступені турбіни високого тиску (ТВТ) з підвищеним експлуатаційним ресурсом газоперекачувального агрегату ГТК-10І, отриманих за серійною технологією методом рівноосьової кристалізації в вакуумно-індукційній печі УППФ- 3М (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 - Робоча лопатка ТВТ зі сплаву ЗМІ-3У з 4% танталу з підвищеним ресурсом експлуатації газоперекачувальних агрегатів ГТК-10І

Експериментальні дослідження і технологічне випробування показали,

що дослідний сплав ЗМІ-ЗУ, оптимально легований танталом (4% за масою) є перспективним для рівноосьової кристалізації і його рекомендовано як матеріал для виготовлення робочих лопаток ТВТ з підвищеним ресурсом експлуатації для газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10І, замість промислового серійного сплаву ЗМІ-ЗУ без танталу, що теперешнього часу широко застосовується.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Характеристика ринку нікелевих ендопротезів

Світовий ринок виробів медичного призначення по різному оцінюється різними компаніями, проте, в цілому, може бути оцінений в 250-270 млрд. дол. США у 2015 році в залежності від звітності компаній. Так, велика частина великих компаній, представлених в секторі, працює не тільки з виробами медичного призначення, а й з фармацевтичними засобами і послугами в області охорони здоров'я і часто розміри продажів неможливо розділити за сегментами [32]. Значна частина виробів медичного призначення, що виробляються в світі споживається США, Японією і країнами Західної Європи - розподіл одержуваного прибутку за географічним принципом представлено на малюнку 5.1.

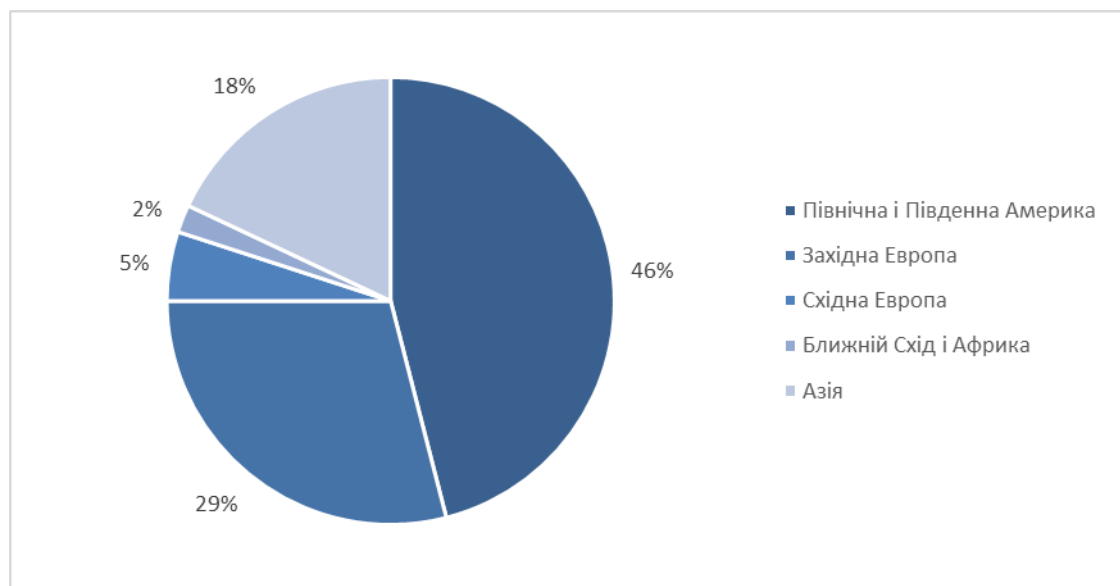


Рисунок. 5.1 - Частки основних регіонів в споживанні виробів медичного призначення

Основними матеріалами, які використовуються для виготовлення імплантатів, є металеві сплави (нікелеві, кобальтові, нержавіючі сталі), полімери та кераміка. Незважаючи на інтенсивне зростання використання в виробках, що імплантуються, полімерів і керамічних матеріалів, металеві

матеріали зберігають свою провідну роль (близько 60% всіх імплантатів). Частку виробів з титанових сплавів можна оцінити приблизно в 28% або 500 тис. грн. (Рисунок. 5.2).

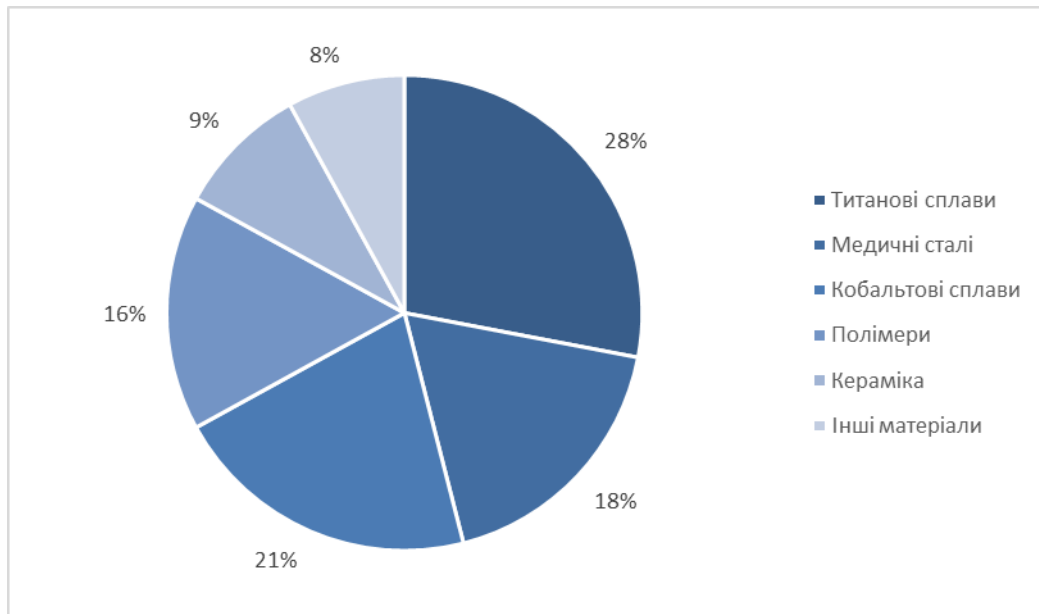


Рисунок. 5.2 – Основні матеріали, які використовуються для виготовлення імплантатів

Металеві матеріали, які використовуються для виготовлення імплантатів, повинні володіти корозійною стійкістю, біологічною інертністю, високим комплексом фізико-механічних властивостей і відносно низькою вартістю. За першими двома показниками нікелеві сплави значно випереджають своїх конкурентів – нержавіючі сталі і кобальтові сплави [33].

За абсолютним значенням міцності сплав не поступається кобальтовим сплавам і перевершує нержавіючі сталі. За питомою міцністю нікелевий сплав перевершує «конкурентів» у 2 - 2,5 рази. Крім того, слід зазначити, що модуль пружності у нікелевих сплавів в два рази нижче, ніж у сталі і кобальтових сплавів. Для медичного застосування (імплантати для остеосинтезу, ендопротези кісткових структур, суглобів і т.д.) це є великою перевагою, так як забезпечує більш високу механічну сумісність імплантату з щільними кістковими структурами організму, у яких модуль пружності складає 5,20 ГПа.

Порівнюючи вартість основних типів напівфабрикатів медичних сплавів, можна відмітити, що нікелеві сплави в цьому відношенні поступаються тільки нержавіючим сталям, перевершуючи кобальтові сплави в кілька разів. Все це дозволяє прогнозувати найкращі перспективи використання нікелевих сплавів в якості матеріалу для імплантатів.

Ринок виробів медичного призначення України скорочується в зв'язку з різким падінням курсу гривні, економічними труднощами в країні і скороченням держпідтримки медичної галузі. Так, в 2012-2013 році ринок виробів медичного призначення України оцінювався в 250-260 млн. дол. США, в 2014 році - в 215 млн. дол. США, в 2015 році - за попередніми оцінками - менше ніж 200 млн. дол. США.

5.2 Економічне обґрунтування наукового дослідження

Метою цього розділу є обґрунтування доцільності використання технології термічної обробки ендопротезів зі сплаву

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники виробів.

Найменування	Базовий виріб	Новий виріб
1. Робоча лопатка газових турбін	ЗМІ-3У	ЗМІ-3У з 4,8% танталу
2. Технологія зміцнення		Вакуумний відпал, гартування, старіння
3. Програма випуску	5000	5000

Вартість сировини і основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 - Вартість основних матеріалів при термічній обробці

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма використання	Ціна, грн	Вартість, грн
Водень	40 л	500 грн.	500 грн.
Вода технічна	0,05 м. куб	250 грн.	12,5 грн.
Разом			512,5 грн.

Собівартість продукції є економічним та фінансовим показником діяльності підприємства, характеризує ефективність управління і є основою розрахунку ціни. Ціна визначається за формулою [34]:

$$Ц = С + П, \text{ грн.}$$

де Ц – ціна виробу, грн.;

С – собівартість виробу, грн.;

П – прибуток, грн.

Собівартість продукції представляє вартісну оцінку природних ресурсів таких як сировина, основні матеріали, паливо, енергія, основні засоби, трудові ресурси, а також інші витрати на виробництво та продаж продукції. Собівартість відображає величину поточних витрат, які мають виробничий, некапітальний характер та забезпечують процес простого відтворення. Собівартість є економічною формою відтворення спожитих факторів виробництва. Повна собівартість виробу розраховується за формулою:

$$С = М + К + ЗО + ЗД + ВС + ЗВВ + АВ + ВЗ, \text{ грн}$$

де М - вартість сировини і основних матеріалів, грн;

К - вартість купівельних комплектуючих виробів, грн;

ЗО - основна заробітна плата основних виробничих робітників, грн;

ЗД - додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, грн;

ВС - відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників, грн;

ЗВВ - загально виробничі витрати, грн;

АВ - адміністративні витрати, грн;

ВЗ - витрати на збут, грн.

Виробнича собівартість виробу (Св) визначається за формулою:

$$Св = М + К + ЗО + ЗД + ВС + ЗВВ, \text{ грн}$$

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Калькуляція собівартості термічної обробки

	Статті витрат	Сума до модернізування, грн	Сума після модернізування, грн
	1	2	3
1	Матеріали на термічну обробку	12,5 грн.	512,5 грн.
2	Електроенергія	2,53грн*(15кВт-год * 0,17 год) = 6,45 грн	2,53грн*(30кВт-год * 0,17 год) = 12,9 грн
3	Основна заробітна плата основних виробничих робітників	40 грн/год	40 грн/год
4	Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	8 грн/год	8 грн/год

	1	2	3
5	Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників	10,56 грн	10,56 грн
6	Загальновиробничі витрати	$40 \times \frac{400}{100} = 160 \text{ грн/го}$ д	$40 \times \frac{400}{100} = 160 \text{ грн/го}$ д
7	Адміністративні витрати	$\frac{40 \times 500\%}{100} = 200 \text{ грн.}$	$\frac{40 \times 500\%}{100} = 200 \text{ грн.}$
8	Собівартість виробнича	1013,47 грн/год	1519,92 грн/год
9	Витрати на збут	$\frac{1013,47 \times 2\%}{100} = 20,27 \text{ грн.}$	$\frac{1519,92 \times 2\%}{100} = 30,4 \text{ грн.}$
10	Повна собівартість	1535,89	2558,92

Повна собівартість виробу до модернізування:

$$C_1 = 12,5 + 6,45 + 40 + 8 + 10,56 + 160 + 200 + 1013,47 + 20,27 = 1471,21 \text{ грн.}$$

Повна собівартість виробу після модернізування:

$$C_2 = 512,5 + 12,9 + 40 + 8 + 10,56 + 160 + 200 + 1519,92 + 30,4 = 2494,28 \text{ грн}$$

Прибуток складає 30% від повної собівартості і розраховується за формулою:

$$П = C \times \frac{P}{100} = 2494,28 \times \frac{30}{100} = 748,28 \text{ грн.}$$

Ціна модернізованого виробу складає:

$$Ц = C + П = 2494,28 + 748,28 = 3242,56 \text{ грн.}$$

Податок на додану вартість згідно законодавства становить 20% від оптової ціни:

$$ПДВ = Ц \times \frac{Н_{\text{пдв}}}{100} = 3242,56 \times \frac{20}{100} = 648,51 \text{ грн.}$$

Ціна продажу розраховується за формулою:

$$\Pi_{\text{пр}} = \Pi + \text{ПДВ} = 3242,56 + 648,51 = 3891,07 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження розробок:

$$E = C_1 * K_{\text{ер}} - C_2$$

де C_2 – собівартість після модернізування, C_1 – собівартість до модернізування, $K_{\text{ер}}$ – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу (коефіцієнт приведення).

За рахунок підвищення показників механічних властивостей і жароміцності сплаву ЗМІ-3У з 4% танталу, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу, збільшено ресурс безперервної експлуатації робочих лопаток ТВТ газоперекачувальних агрегатів ГТК-10І з 30-32 тисяч годин до 48-50 тисяч годин, що більше в 1,5 рази.

В результаті при виготовленні ніжки ендопротеза тазостегнового суглоба по модернізованій технології економічний ефект для підприємства склав 438575 грн. в рік.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні впливу РЗМ на структуру жароміцних сплавів.

6.1 Аналіз потенційних небезпек:

а) Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцем вимог ергономіки стосовно організації робочих зон та робочих місць в приміщенні дослідницької лабораторії, що може призвести до зниження працездатності. Зокрема невідповідності розмірів робочої а також максимальної кількості осіб що можуть там перебувати відповідно до правил СНІП 2.09.04 - 87 «Адміністративні і побутові будівлі», та СНІП 2.09.02 - 85 «Виробничі будівлі», нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання.

б) Можливість ураження електричним струмом при виконанні дослідських робіт в наслідок порушення правил з електричної безпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних заходів безпеки що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) Можливість отримання механічних травм при виготовленні зразків для дослідження структури, зокрема в наслідок порушення правил з охорони праці при використанні абразивного інструменту, зокрема використання абразивного інструменту який не пройшов випробування;

г) Небезпеки які пов'язані з Дослідженням фазового складу структури з використанням реттеноструктурного методу аналізу, а саме негативний вплив іонізуючого випромінювання, що може призвести до тяжких захворювань (лучова хвороба, онкологічні хвороби);

д) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом оптичної металографії, що може бути пов'язано з потужним цикловим потоком, та призведе до ушкодження органів зору;

е) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом

електронної металографії в наслідок впливу потужного електронного випромінювання, що може призвести до розвитку тяжких імунних захворювань. Зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних хвороб.

є) Небезпеки які пов'язані з обробкою отриманих результатів з використанням персонального комп'ютеру, зокрема підвищена напруженість праці, та надмірні статичні навантаження` що може призвести до захворювання рухового апарату та нервово - психічних захворювань.

ж) Незадовільні параметри мікроклімату відносно норм ЦСН 3.3.6042-99із за чого наслідок неефективної роботи систем опалення та повітряного обміну що може призвести до загальних захворювань.

з) Невідповідність якості освітлення вимогам ДБН В 2.5- 28 - 2006в наслідок непрацездатності приладів освітлення і може призвести до погіршення зору.

и) Небезпеки які пов'язані з виконанням певних дій в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема при пожежах.

6.2 Заходи по забезпеченню безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0400 - 7.11 - 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями з охорони праці працівників» основним завданням роботодавців є організація досконалих умов праці для кожного працівника.

Це завдання вирішується шляхом оптимізації:

- санітарно-технічних заходів (нормалізація санітарно-гігієнічних умов виробничого середовища - освітлення, опалення` вентиляції та ін.);
- будівельно-планувальних заходів (реконструкція робочих місць. виробничих ділянок, цехів);
- організаційних заходів (організація праці, виробництва, контроль за параметрами умов праці та ін.).

Заходи, спрямовані на підвищення працездатності людини й поліпшення стану здоров'я шляхом оптимізації:

- організаційно-профілактичних заходів (професійний відбір кадрів` профорієнтація. навчання, раціоналізація прийомів праці тощо);
- організаційних заходів (раціоналізація режимів праці та відпочинку, зміна форм обслуговування робочих місць та ін);
- медико-біологічних та профілактичних заходів (використання засобів підвищення працездатності та онірності організму людини тощо);
- соціально-психологічних заходів (нормалізація психологічного мікроклімату в колективі. формування позитивної мотивації праці тощо);
- захисних заходів (застосування засобів індивідуального захисту),

Працездатність людини в багатьох випадках визначається правильним встановленням режиму праці та відпочинку, що означає зміну періодів праці та відпочинку протягом доби, тижня й тривалого періоду.

Під час розробки режимів праці та відпочинку необхідно встановити:

- тривалість періодів безперервної праці протягом доби (тривалість робочої зміни);
- інтервали між періодами безперервної праці (між змінами);
- кількість змін, які забезпечують чергування;
- тривалість та форму відпочинку.

Організовуючи відпочинок між періодами праці` потрібно передбачити використання різних його форм - активної та пасивної. Під час виробничого процесу доцільно враховувати антропометричні та психофізіологічні особливості людини, її можливості стосовно зусиль, що прикладаються до органів керування машиною, ритму виконуваних операцій, а також анатомо-фізіологічні відмінності між чоловіками та жінками. Комплексна оцінка цих можливостей людини і є ергономічним критерієм. Реалізація основних ергономічних вимог щодо режимів праці та відпочинку дає змогу забезпечити необхідний рівень працездатності, зменшити втому, зберегти здоров'я людей.

б) Ураження електричним струмом організму людини називають електротравмою. На виробництві кількість травм викликаних електричним

струмом. відносно невелика, і становить 11 - 12 % від загального числа, проте із всіх випадків травм зі смертельним наслідком на електротравми припадає найбільша кількість (близько 40 %). До 80 % усіх випадків ураження електричним струмом зі смертельним кінцем припадає на електричну напругу до 1000 В, у першу чергу тих, хто працює під напругою 220 - 380 В. Будова живого організму з різноманітних клітин і розчину солей визначає його різний електричний опір, Вплив електричного струму на організм людини зумовлює порушення нормального біоелектричного та спричиняє параліч. Важкість ураження залежить від роду електричного струму, напруги та сили струму, опору тіла людини, частоти струму, шляху проходження струму через тіло людини, частоти струму, часу дії струму, навколишніх умов (температури, вологості, атмосферного тиску, та інших фізичних і фізіологічних факторів). Проходячи через організм людини, електричний струм зумовлює термічну, електролітичну та біологічну дію. Термічна дія виявляється у нагріванні та опіках різних частин і ділянок тіла, електролітична - у зміні складу (розклад) і властивостей крові та інших органічних речовин. Біологічна дія електричного струму зумовлює подразнення та збудження живих тканин організму, порушує в ньому різні внутрішні біоелектричні процеси. Прикладом таких порушень може бути припинення процесу дихання та зупинка серця. Електротравми поділяють на загальні (електричні удари) і місцеві, під якими розуміють чітко виражені місцеві пошкодження тканин організму викликані впливом електричного струму або електричної дуги. Загальна електротравма (електричний удар) це ураження центральної нервової системи, яке супроводжується судомним скороченням м'язів, зупинкою дихання, фібриляцією та зупинкою серця. Місцеві електротравми – це електричні опіки; електричні знаки на шкірі; металізація шкіри, механічні пошкодження і електрофтальмія (запалення зовнішньої оболонки ока). З метою виключення випадків електротравматизму роботодавець зобов'язан втілити систему захисту від ураження електричним струмом.

Технічні засоби захисту від ураження електричним струмом поділяють на колективні та індивідуальні засоби. які попереджують доторкання до елементів електромережі, що перебуває під напругою. і засоби. які забезпечують від ураження. якщо доторкання все ж таки відбулося.

У відповідності до ДСТУ 7237 : 11 «ССБП, Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» до основних способів і засобів електрозахисту належать:

- ізоляція струмопровідних частин та її" безперервний контроль;
- установка обмежувальних пристосувань;
- попереджуюча сигналізація та блокування;
- використання знаків безпеки і попереджувальних плакатів;
- використання малих напруг;
- електричне розділення мереж;
- захисне заземлення;
- занулення;
- вирівнювання потенціалів;
- захисне відімкнення;
- засоби індивідуального електрозахисту.

Технічні засоби та методи електробезпеки

До частозастосовуваних засобів електробезпеки можна віднести звукову, світлову та плакатну сигналізацію. Наприклад, звуковий сигнал, червоне світло, плакат «Стій, небезпечно для життя» попереджують про небезпеку, зокрема, наявність напруги в електроустановках. Зелене світло сповіщає про зняття цієї напруги. Плакати можуть носити запобіжний, забороняючий і нагадувальний характер («заземлено»). Від електротравматизму ефективно захищають блокувальні пристрої, що відключають подачу напруги, коли людина потрапляє в небезпечну зону. Здебільшого використовують спеціальні запобіжні пристосування (ізолювальні штанги, ізолювальні та струмовимірювальні кліщі. Діелектричні рукавички, килими` калоші), Як запобіжні застосовують також запобіжні пояси, монтерські кігті. драбини.

У чотирипровідній системі трифазного струму між нейтраллю та землею вмикають компенсаційну котушку, водночас заземлюють і передбачають автоматичне вимикання. Контурним заземленням вирівнюють напругу дотику, тим самим понижуючи її небезпечний вплив на людину. В електромережах значної протяжності для зниження ємності застосовують метод їх поділу за допомогою розподільного трансформатора. Найпоширенішим і найнадійнішим засобом електрозахисту вважається захисне заземлення та занулення. Застосовується воно при напрузі змінного струму 380 В і вище, а постійного - 440 В і вище у всьому електроустановці. Занулення обладнання - це навмисне електричне з'єднання з рульовим електричним дротом металевих неструмовідних частин, які можуть опинитись під напругою. Занулення виконують у тих самих випадках, що і захисне заземлення. Згідно вимог НПАОП 40.1 - 1.32 - 01 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» до роботи з електроустановками допускають осіб, які не мають медичних протипоказань і пройшли інструктаж та навчання безпечних методів праці, перевірку знань правил безпеки та інструкцій відповідно до займаної посади стосовно виконуваної роботи з присвоєнням відповідної кваліфікаційної групи з техніки безпеки. Для досягнення безпечності робіт на діючих електроустановках виконуються такі організаційні заходи:

- призначення осіб відповідальних за організацію і ведення робіт;
- оформлення наряду або розпорядження на ведення робіт;
- здійснення допуску до проведення робіт;
- організація нагляду за проведенням робіт;
- оформлення закінчення робіт;
- перерви у роботах;
- переведення на інші робочі місця.

Перелік робіт, які вимагають допуску, встановлюється галузевою нормативно-технічною документацією. Проведення робіт на струмопровідних частинах, що перебувають під напругою або поблизу них,

здійснюються за нарядом не менше ніж двома особами` з застосуванням електрозахисних засобів під безперервним наглядом.

в) У відповідності з НПАОП 28.0 - 1.30 - 12 «Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом» перед установкою абразивні круги повинні бути збалансовані. При виявленні дисбалансу круга після першої правки або в процесі роботи він повинен бути повторно отбалансирован. При установці абразивного круга необхідно між фланцями і кругом установлювати прокладки із картону або іншого еластичного матеріалу товщиною 0,5 -1 мм. Прокладки повинні виступати за фланець по всій окружності на і - 5 мм.

Перед початком роботи круг, встановлений на шліфувальний верстат` повинен бути перевірений на ходу (вхолосту) при робочому числі обертів: круг діаметром до 400 мм - не менше 2 хв, понад 400 мм - не менше 5 хв.

До роботи можна приступати, тільки переконавшись у тому, що коло не має биття, а биття шпинделя шліфувального верстата не перевищує 0.03 мм. Захисний екран повинен бути заблокований з пусковим пристроєм, що виключає можливість пуску верстата при піднятому (відведеному) екрані. Випробування, встановлення і правка абразивних кругів проводиться спеціально підготовленими і призначеними наказом по підприємству працівниками.

При роботі на верстатах з абразивним кругом забороняється:

- стояти проти поворотного круга;
- встановлювати коло без позначки про його випробуванні;
- виробляти правку кругів неспеціальним інструментом;
- застосовувати важелі для збільшення натиску на круг;
- використовувати для охолодження рідини, що шкідливо впливають на здоров'я працюючих або механічну міцність кола;
- виконувати роботу боковими (торцевими) поверхнями кругів, спеціально не призначених для такого виду робіт;

- працювати на верстаті, у якого встановлені два круги-- на одному шпинделі, якщо розмір одного кола по діаметру відрізняється від іншого більш ніж на 10%;
- працювати без захисного екрану.

При зменшенні діаметра круга внаслідок його спрацювання число обертів круга може бути збільшене, але так, щоб не перевищувалася окружна швидкість, допустима для даного кола. На підприємствах, де застосовується абразивний інструмент, повинні бути інструкції:

- по установці і експлуатації абразивного інструменту;
- по випробуванню кіл на міцність.

Для підтримки виробів, що подаються до шліфувального (заточувального) кола вручну, повинні застосовуватись підручники або замінюють їх пристосування. Підручники повинні бути пересувними, що дозволяють встановлювати їх в необхідному положенні в міру спрацювання круга.

Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею круга повинен бути менше половини товщини оброблюваної деталі, але не більше 3 мм` причому край підручника з боку круга не повинен мати вибоїв, відколів та інших дефектів. Підручники встановлюють так, щоб дотик деталі до круга відбувався вище горизонтальної площини, що проходить через центр кола, але не більше ніж на 10 мм. Після кожної перестановки підручник повинен надійно закріплюватися в необхідному положенні.

Перестановка підручника проводиться тільки після припинення обертання кола. Абразивні круги під час роботи повинні захищатися захисними кожухами. Кожух виготовляється із сталевого литва або листової стали. Кола діаметром 30 мм і більше, крім кіл типу ПН, ПР, К, М (ПН-плоскінарошені; ПР-плоскірифлені; К-колія-кільця; М-для розрізання мінералів)` а також всі кола діаметром 150 мм і більше перед установкою на верстат повинні проходити випробування у відповідності з чинним нормативно-правовим актом (п. 49 Додатка 1 до цих правилами). Кола, які зазнали будь-якої механічної переробки, хімічній обробці, що не мають маркування, а

також термін гарантії яких закінчився, безпосередньо перед установкою на шліфувальний верстат повинні бути випробувані на механічну міцність.

У кожного верстата на видному місці повинна бути вивішена таблиця із зазначенням допустимої робочої окружної швидкості використовуваного абразивного круга і числа оборотів в хвилину шпинделя верстата і табличка із зазначенням особи, відповідальної за його експлуатацію.

У відповідності з НРБУ - 92 При виконанні робіт з дослідженням складу структури в рентгенівській лабораторії небезпечними є статична електрика на конструктивних частинах установок` іонізуюче випромінювання. При ввімкненні і роботі навіть однієї установки в лабораторії повинні знаходитись не менше двох працівників.

Працівники зобов'язані:

- виконувати тільки доручену їм керівником роботу;
- турбуватись про власну безпеку, пам'ятати про особисту відповідальність за дотримання правил охорони праці; за невиконання цих правил винні залучаються до адміністративної, дисциплінарної відповідальності у встановленому законодавством порядку в залежності від характеру порушень їхніх наслідків;
- протягом усього робочого часу утримувати в порядку робоче місце; використовувати спецодяг (халат` захисні окуляри)` дотримуватися вимог санітарних норм і правил особистої гігієни;
- знати місця розташування засобів пожежегасіння та збереження медикаментів на робочому місці і вміти користуватися ними;

Працівникам не слід:

- вмикати і вимикати (крімаварійних випадків) установки` робота на яких не доручена;
- відволікатися сторонніми справами;
- працювати на несправних установках;
- торкатися до струмопровідних частин. електричних дротів (навіть ізольованих). кабелів, клсм, наступати на лежачі на підлозі переносні

дроти;

-проводити ремонт установок;

Правила радіаційної безпеки в рентгенівській лабораторії:

- необхідно закрити місця можливого розсіювання рентгенівських променів захисними свинцевими екранами;
- роботу на рентгенівській установці ДРОН-І проводити лише з використанням Додаткових засобів захисту: колімируючих насадків та захисних екранів з просвинцьованого скла;
- при встановленні камер з люмінісцентними екранами для візуального спостереження за юстировкою зразка необхідно користуватися захисним просвинцьованим склом;
- для забезпечення захисту рук оператора від опромінення при юстировці гоніометра необхідно користуватися подовженими торцевими ключами;
- при першому вмиканні рентгенівської установки провести дозиметричний контроль ефективності захисту від рентгенівського випромінювання при максимальних режимах роботи;
- юстирувальні роботи на апараті проводити при мінімально можливих режимах з одночасним контролем потужностей доз;
- під час юстировки апарату при зміні чи заміні щілин і приставок обов'язково перекривати первинний пучок заглушкою;

Правила електробезпеки в рентгенівській лабораторії:

- перед роботою перевіряти справність заземлення. Опір елементів заземлення повинен бути не більше 4 Ом;
- заборонено вмикати установки при несправності блокуючих пристроїв;
- усі профілактичні та ремонтні проводити при вимкненому електропостачанні рентгенівської установки та відключенні електропостачання всієї лабораторії;

Вимоги під час роботи:

- не вмикати та не вимикати без необхідності рубильники, перемикачі, кнопки, не порушувати послідовність операцій щодо ввімкнення/вимкнення установки;
 - забороняється проводити аналіз зразків зі знятими боковими стінками. проводити ремонтні роботи без узгодження і одержання дозволу особи, відповідальної за їх експлуатацію і обслуговування.
 - негайно доповідати зав4 лабораторії про помічені недоліки` ушкодження та про відсутність запобіжних елементів на обладнанні.
 - при відкритих вікнах трубки забороняється знаходитися на шляху розповсюдження рентгенівських променів.
 - при використанні іонізаційного методу реєстрації` гоніометр під час роботи має бути закритий ширмою або іншим захисним пристроєм. що забезпечує зменшення інтенсивності розсіяного випромінювання до припустимих величин.
 - не ходити без потреби по лабораторії. не залишати без уваги свою роботу. не залишатись одному в лабораторії при випробуваннях
- д) Для проведення безпечних робіт по підготовці заходів для дослідження структури передбачено:
- пам'ятати що азотна, пікринова, плавикова кислоти для травлення зразків металів і їх сплавів с токсичними речовинами і впливають на органи дихання, тому працювати потрібно тільки з витяжною шафою;
 - плавникову кислоту зберігати тільки в поліетиленовій посуді, забороняється у скляній;
 - при виготовлені травителю для зразків дослідження потрібно відразу прикріпити відповідний напис та дату виготовлення;
 - мати закриту шафу для зберігання весі в закритому вигляді.
- Шкідливими факторами оптичних мікроскопів є різке світло та оптика. Для запобігання таких шкідливих факторів потрібно вживати наступні заходи:
- коли дивишся в монокулярні окуляри одним оком, то друге око

повинно бути відкритим;

- замість візуального спостереження краще поставити цифрову відеокамеру;

- здійснювати перегляд не тільки однією людиною. а й двома та трьома людьми.

- лампи розжарювання потрібно замінити світлодіодними джерелами світла (такий світ близький до природнього):

Слід пам'ятати, що не можна спирт наливати в азотну кислоту інакше відбудеться вибух. Приміщення повинно бути сухим. опалювальним інакше на механічних деталях може з'явиться корозія і може постраждати оптичні деталі. При роботі з оптикою не в жодному разі не можна торкатися поверхні оптичних лінз окуляра. У разі забруднення окуляра пил видаляється білячими або колонковими пензликами. Забруднення потрібно видалити ватною паличкою змоченою у розчині 40% спирту, 30% ефіру та 30% очищеного бензину.

е) Небезпечними факторами в лабораторії при роботі з електронними мікроскопами є статична електрика на конструктивних частинах установок, рідкий азот та іонізуюче випромінювання,

Основними заходами радіаційної безпеки на електронному мікроскопі є наступні:

- робота повинна вестися на повністю укомплектованих і справних приладах;

- після проведення регламентних або ремонтних робіт, пов'язаних з розбиранням колони електронного мікроскопу необхідно провести дозиметричний контроль поверхні колони, звернувши увагу на місця стикування окремих вузлів. Профілактику проводити під керівництвом особи, яка може проводити налагодження як мікроскопа в цілому, так і його окремих систем;

- необхідно стежити за справністю додаткових захисних пристосувань,

встановлених на електронному мікроскопі (свинцева загорожа нижнього сильфену, який з'єднує колону з вакуумною системою приладу),

Основними заходами електробезпеки на електронному мікроскопі є наступні:

- перед роботою перевіряти справність заземлення, Опір заземлюючих елементів повинен бути не більше 4 Ом;
- забороняється ввімкнення установок при несправних блокуючих пристроях;
- при заміні катода електронної гармати при не справних блокуючих пристроях зняти залишковий заряд з катодного вузла за допомогою заземленої штанги;
- всі профілактичні і ремонтні роботи проводити при вимкненому електро- споживанні приладів і відключенні електропостачання всієї лабораторії;
- при налагодженні блоків живлення електронного мікроскопу використовувати кабелі зі справними контактними роз'ємами;
- при роботі на електронному мікроскопі блоки живлення повинні бути закриті захисною решіткою;
- перевірити надійність заземлення усіх блоків мікроскопу.

Зберігати та транспортувати рідкий азот дозволяється лише в спеціальних ємкостях-посудинах Дюара.

Забороняється розміщувати посудини Дюара біля нагрівальних та вогне-небезпечних приладів.

є) Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувач ПК: підвищений рівень статичної електрики; нерівномірність розподілу яскравості в полі зору; підвищена яскравість світлового зображення; ураження електричним струмом; напруга зору та уваги; тривалі статичні навантаження.

У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати: робочу позу користувача; простір для розміщення користувача; можливість огляду елементів робочого місця; можливість огляду простору поза межами робочого місця; можливість робити записи, розміщувати на робочому столі документацію та матеріали, які використовує користувач. Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та нереміщенню для експлуатування ПК.

Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача.

Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози.

Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

Раціональна поза користувача: ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг; стегна зорієнтовані у горизонтальній площині; верхні ділянки рук вертикальні; кут ліктьового суглоба у межах 70-90°; зап'ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°; нахил голови у межах 15-20°, а часті 'Гі повороти виключені.

ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку.

Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення.

Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перетинати його, скручувати та перев'язувати шнур живлення вузлом. ПК під'єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з'єднань та електророзеток заводського виробництва. Штепсельні з'єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під'єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з'єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з'єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднань при вимкненні має бути зворотнім. Заборонено під'єднувати електрообладнання до звичайної Двошнурової електромережі. При роботі з ПК заборонено: самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо; встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК. Ноутбука або монітора; ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може виникнути пожежа або ураження електрострумом. Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити коротку перерву,

Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

6.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

ж) Згідно з ДСН 33.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» встановлено такі норми допустимих параметрів мікроклімату для робіт в офісних приміщеннях (категорія робіт - легка 1а): для холодного періоду року: температура 21-25 оС, відносна вологість до 75%, швидкість руху повітря до 0,1 м/с; для теплого періоду року: температура 22-28 оС, відносна вологість 55-75%; швидкість руху повітря 0,2-0,1 м/с. Перегрівання та переохолодження організму людини веде до порушення життєвих функцій. Перегрівання призводить до підвищення температури тіла, збільшення частоти пульсу, розширення судин, згущення крові, головокружіння і навіть до втрати свідомості. Тривале переохолодження організму призводить до порушення діяльності капілярів, зниження кровообігу. Місцеве загальне переохолодження є причиною пневмонії, бронхіту, радикуліту, невралгії, ревматизму, запалення верхніх дихальних шляхів та інших захворювань. Засобами нормалізації параметрів мікроклімату є опалення, вентиляція, кондиціонування повітря, засоби автоматичного контролю і сигналізації тощо, Отож, якщо причиною поганого самопочуття на робочому місці, і як наслідок, низької працездатності є порушення норм мікроклімату в приміщенні, варто звернутися до роботодавця з проханням виправити ситуацію. Основні вимоги до вентиляції виробничих приміщень визначені санітарними нормами (СН), а також будівельними нормами і правилами «Опалення, вентиляція і кондиціонування повітря».

Об'єм потрібного повітря має бути достатнім. він визначається розрахунковим шляхом. Розрахунок ведеться відповідно по надлишку явного тепла або вологи, або за кількістю шкідливих надходжень пилу, газів, пари. При їх одночасному виділенні необхідний повітрообмін має встановлюватися за домінуючою шкідливістю. Згідно з СН, кількість

зовнішнього повітря, що потрапляє у приміщення на одного працюючого, має становити не менше 30 м³/год. При роботі у приміщенні об'ємом менше 20 м³ на одну людину і не менше 20 м³/год при об'ємі приміщення понад 20 м³ на одну людину. У приміщеннях без природної вентиляції подача повітря на одну людину має становити не менше 60 м³/год. Баланс припливного і повітря, яке видаляється, має відповідати призначенню вентиляції і умовам її використання. У класичних умовах кількість припливного повітря має відповідати кількості повітря, що видаляється, а різниця між ними має бути мінімальною. На практиці необхідна організація повітрообміну здійснюється з перевагою тієї або іншої кількості повітря у загальному балансі. В багатьох випадках проектують такі схеми організації повітрообміну, коли у всьому приміщенні мають підтримуватися надлишковий тиск по відношенню до атмосферного, а відтак об'єм припливного повітря має бути більшим за об'єм, що видаляється. Позитивний повітряний баланс необхідний при організації вентиляції з надлишковим вологовиділенням для профілактики утворення туману і конденсату внаслідок проникнення холодного повітря ззовні. Припливні витяжні системи мають бути правильно розміщеними. Приплив має забезпечувати максимальну чистоту і оптимальні мікрокліматичні параметри повітря у робочій зоні. Витяжка має максимально видаляти шкідливі виділення. Система вентиляції не повинна викликати перегрів або переохолодження працюючих чи збільшувати рівень виробничого шуму, та бути ефективною в будь-яку пору року за будь-яких кліматичних і погодних умов, а також простою по влаштуванню, надійною в експлуатації і відповідати вимогам електро-, вибухо-пожежобезпеки. Ефективність та надійність роботи вентиляційної установки і всієї системи вентиляції оцінюється на підставі санітарно-гігієнічних випробувань.

6.4 Заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій

и) «Заходи з пожежної безпеки» розробляється відповідно до вимог НАПБ А.01,001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», Розробку заходів з пожежної безпеки починають з аналізу речовин і матеріалів, що використовуються при роботі на об'єкті, з метою визначення класу можливої пожежі (А, В, С, В, Р, Е) згідно ДСТУ ЕМ 222014 «Класифікація пожеж (ЕМ 221992, ЕМ 2:1992/АІ 2004, ІВТ))) та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» та СНиП 2.09.02-85* «Производственныесдания». Тобто указати до якої категорії виробництва з пожежної небезпеки (А, Б, В, Г, Д) належить об'єкт (дослідницька лабораторія, конструкторське бюро, дільниця, підстанція, цех, тощо). Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», указати ступінь вогнестійкості приміщення об'єкта (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, дільниці, підстанції, цеху, тощо). Показати наявність засобів виявлення загорянь і пожеж згідно вимог ДБН В,2,5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»:

- автоматичних сигналізаторів про пожежу;
- системи пожежної сигналізації;

З огляду на пожежну небезпеку, передбачити первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники різних видів), відповідно до вимог «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р, за М: 225/3І677.

Виробничі приміщення можуть бути обладнані стаціонарними установками автоматичного пожежогасіння.

6.4.2 Планування попередження техногенних надзвичайних ситуацій

Причиною надзвичайних ситуацій, таких як загоряння, вибухи і руйнування може бути наявність у виробничих приміщеннях парів легкозаймистих рідин або газів і джерела запалення. Імовірність вибуху і його небезпечність визначаються такими характеристиками парів, рідин і газів, які бувають у виробничих приміщеннях агропромислового комплексу: межами вибухової концентрації в повітрі парів (у відсотках до об'єму); щільністю парів і газів відносно щільності повітря, яка приймається за одиницю; температурою самоспалахування парів і газів; точкою загоряння парів рідин і нижня межа температури, при якій можливе спалахування від стороннього джерела запалювання. Пари деяких рідин і газів можуть загорятися від відкритого вогню, електричної іскри, розжареного предмета, сигарети. Більш небезпечні рідини з низькою точкою загоряння і тому що їхні пари можуть спалахувати при температурі навколишнього повітря. Небезпечні важкі гази, які можуть збиратися до вибухової концентрації в підвалах, погрібах, ярах, долинах; менш небезпечні гази, які мають щільність меншу від щільності повітря, вони швидко піднімаються і розсіюються у верхніх шарах атмосфери. При складанні планів цивільного захисту і прогнозуванні можливої обстановки необхідно звернути увагу на проведення заходів, які зменшують імовірність виникнення спалахування і вибухів легкозаймистих рідин і газів, що є на конкретному виробництві. Імовірність спалахування і вибуху зменшують: ефективна вентиляція обладнання приладів, які попереджують виділення парів і газів і збирання вибухових концентрацій, вилучення потенційних джерел запалювання (електроприлади та ін.), ізоляція або відокремлення вибухонебезпечних приміщень, встановлення пристроїв для придушення вибуху, встановлення полум'ягасних металевих сіток, перфорованих листів металу, сотових структур із гофрованих металевих стрічок і коробів, заповнених галькою або керамічними кільцями, винесення вибухонебезпечних робіт на відкрите

повітря` обладнання вихідних отворів кришками і перегородками, які легко відкидаються або руйнуються, іскроутворююче обладнання (вимикачі, рубильники та ін.) слід встановлювати з пристроями, які гасять іскри (занурювання у мастило).

Температура зовнішніх поверхонь електроустаткування має бути нижчою температури спалахування вибухонебезпечних парів і газів, апаратура має бути герметичною. щоб не допускати атмосфери, що спалахнула до нагрітих, деталей, а також викидання полум'я та іскр у навколишнє середовище.

Залізницею у цистернах перевозять хлор, кислоти` зріджені гази, нафту` бензин та багато інших отруйних. легкозаймистих і вибухових речовин, Під час аварій відбуваються розгерметизація місткостей. потрапляння у навколишнє середовище небезпечних речовин. Такі аварії небезпечні не тільки для працюючих на цих підприємствах і залізницях, а й для розміщених поблизу підприємств. навчальних закладів. установ` населених пунктів, сільськогосподарських полів і лісових масивів. Дуже часто великі жертви, руйнування і пожежі спричиняються вибухами промислового пилу. Швидкому спалахуванню і великій швидкості горіння сприж` те. що пил. заваслий у повітрі. має велику площу поверхні на одиницю маси. Полум'я швидко поширюється, утворюючи попереду себе хвилю тиску гарячих газів. яка руйнує на своєму шляху перепони. піднімає в повітря шари пилу, що лежить, і це призводить до більш сильних, ніж перші. повторних вибухів. Спалахування і вибух пилу залежать від розміру і форми частинок. Зі зменшенням розміру частинок плоскої' форми підвищується можливість спалахування.

ВИСНОВКИ

Метою дипломної роботи було вивчення впливу танталу в сплаві ЗМІ-3У в досліджуваному діапазоні легування (1-5%) на структуру і характеристики міцності зразків, отриманих методом спрямованої (моно) і рівноосьової кристалізації. Отримані результати комплексних досліджень дозволили прийти до наступних висновків:

1. В першому розділі дипломної роботи були розглянуті особливості експлуатації жароміцних нікелевих сплавів та вимоги, що висуваються до них, а також проаналізовано подальший розвиток сучасних жароміцних нікелевих сплавів.

2. Показано, що в залежності від схеми легування, методу виплавки і режиму термічної обробки, в структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть утворюватися різні фази. При цьому, вплив цих фаз на характеристики жароміцності неоднозначно. Зазначено, що великий вплив на характеристики міцності надає основна зміцнююча γ' - фаза, поведінка якої при високих температурах і навантаженнях визначає працездатність сплаву в цілому. Проаналізовано вплив різниці параметрів кристалічних ґраток γ - твердого розчину і γ' - фази і показано, що, чим більше ця різниця, незалежно від знака, тим менше час до руйнування сплаву при заданій температурі і напрузі.

3. Використання перспективних легувальних елементів, таких як, тантал, ніобій, гафній, реній і інших дефіцитних елементів, підвищує характеристики жароміцності нікелевих сплавів, але при цьому значно збільшують їх вартість. Тому, промислове використання таких сплавів повинно визначатися, в першу чергу, економічною доцільністю.

4. Аналіз хімічних складів показав, що на відміну від сплавів для рівноосьової кристалізації, сплави для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття містять тантал в досить широкому діапазоні (4-12)% за масою, що можна пояснити різним вмістом в них хрому, який обмежує розчинність танталу в нікелевій матриці. Пошук оптимальних складів жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої

кристалізації і монокристалічного лиття ще до кінця не завершений. Тому щорічно в провідних країнах світу з'являються нові патенти та публікації.

5. Механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів значною мірою визначаються температурою старіння. При цьому, в сплавах зі спрямованою (моно) структурою стабілізація фазового стану відбувається при більш високих температурах, ніж у сплавів із рівноосьовою структурою. Жароміцність і термічна стабільність сплавів в діапазоні робочих температур, в значній мірі, залежить не стільки від об'ємної частки γ' - фази, скільки від її хімічного складу, тому що дифузія є відповідальною за високотемпературні процеси.

6. Зазначено, що використання лопаток зі спрямованою (моно) структурою, у порівнянні із литвом із рівноосьовою структурою, дає можливість підвищити ресурс експлуатації, за рахунок збільшення опору повзучості за рахунок підвищення запасу пластичності. Відзначено, що близько половини приросту жароміцності було досягнуто за рахунок більш ефективної конструкції повітряної охолоджувальної системи робочих лопаток газових турбін. Інша половина приросту було досягнуто за рахунок розробки нових складів сплавів або удосконалення (модернізації) складів відомих промислових марок, а також вдосконалення ливарних технологій. При цьому середній рівень короточасної і тривалої міцності за 5 років підвищився на 20 - 30%.

7. Кращі характеристики міцності в діапазоні температур 800 - 1000⁰С і напруги 120 - 600 МПа показали зразки сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (склад «4») як зі спрямованою (моно), так і рівноосьовою структурою. У порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу, час до руйнування зразків збільшилася в 4-5 разів за всіх температур випробувань.

8. У сплаві ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5») характеристики міцності і пластичності істотно знижуються за рахунок збільшення структурної неоднорідності, а також за рахунок присутності більшої кількості нерівноважної евтектики $\gamma+\gamma'$ і наявності надлишкової пластинчастої η - фази

на основі Ni_3Ta несприятливої морфології.

9. Оптимальне легування танталом (4,0%, за масою) сплаву ЗМІ-ЗУ значно покращило технологічність, в порівнянні із серійним сплавом ЗМІ-ЗУ без танталу, при отриманні неохолоджуваних робочих лопаток ТВТ енергетичної турбіни MS-5001 методом спрямованої (моно) кристалізації, за рахунок зниження кількості макроструктурних дефектів, що підвищило рівень виходу придатного литва з (30-35) % до (80-85)%.

10. Дослідний сплав ЗМІ-ЗУ з 4% танталу є також перспективним для отримання робочих лопаток методом рівноосьової кристалізації і рекомендований як матеріал для виготовлення робочих лопаток ТВТ з підвищеним ресурсом експлуатації для газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10І, замість промислового сплаву ЗМІ-ЗУ, який до теперешнього часу широко застосовується. За рахунок підвищення показників механічних властивостей і жароміцності сплаву ЗМІ-ЗУ з 4% танталу, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-ЗУ без танталу, збільшено ресурс безперервної експлуатації робочих лопаток ТВТ газоперекачувальних агрегатів ГТК-10І з 30-32 тисяч годин до 48-50 тисяч годин, що більше в 1,5 рази.

11. Розрахунок собівартості продукції представляє вартісну оцінку природних ресурсів таких як сировина, основні матеріали, паливо, енергія, основні засоби, трудові ресурси, а також інші витрати на виробництво та продаж продукції. Собівартість відображає величину поточних витрат, які мають виробничий, некапітальний характер та забезпечують процес простого відтворення. Собівартість є економічною формою відтворення спожитих факторів виробництва.

12. Аналіз потенційних небезпек, які пов'язані з порушеннями роботодавцем вимог ергономіки стосовно організації робочих зон та робочих місць в приміщенні дослідницької лабораторії. що може призвести до зниження працездатності. Заходи по забезпеченню безпеки. Заходи, спрямовані на підвищення працездатності людини й поліпшення стану здоров'я шляхом оптимізації. Проведення робіт на струмопровідних

частинах, що перебувають під напругою або поблизу них, здійснюються за нарядом не менше ніж двома особами` з застосуванням електрозахисних засобів під безперервним наглядом. Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці та заходи забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Планування попередження техногенних надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. : к 100-летию со дня рождения С.Т. Кишкина / Под общ. ред. М. : Наука, 2006. 272 с.
2. Симс, Ч. В. Хагель У.К. Жаропрочные сплавы: Металлургия, 1976. 567 с.
3. Симс, Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: В 2-х кн. / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля ; Пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с. ; Кн. 2. 384 с.
4. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Государственный научный центр Российской Федерации. М.: МИСИС, 2001. 632 с.
5. Кишкин, С.Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / Машиностроение, 1987. 112 с.
6. Шалин, Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов [и др.]. М. : Машиностроение, 1997. 336 с.
7. Каблов, Е.Н. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2007 Юбилейный научно-технический сборник ; под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. - М.: «ВИАМ», 2007. 438 с.
8. Левин, Е.Е. Перспективные материалы для основных деталей газовых турбин. *Энергомашиностроение*. 1975. № 12. С. 10-13.
9. Котсорадис, Д. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции / Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др.; пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. М. : Металлургия, 1981. - 480 с.

10. Шалин, Р.Е. Новые материалы и технический прогресс / Р.Е. Шалин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1981. - №6. С. 3-8.
11. Левин, Е.Е. Повышение параметров надежности и ресурса жаропрочных сплавов для деталей стационарных газовых турбин / Е.Е. Левин, Е.М. Пивник, Г.В. Ильина // *Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. М. : Наука, 1984. С. 218 223.
12. Михайлов-Михеев, Б.П. *Металл газовых турбин* Москва-Ленинград, МАШГИЗ. 1958. 351 с.
13. Химушин, Ф.Ф. *Жаропрочные стали и сплавы* Металлургия, 1969. 752 с.
14. Никитин, В.И. *Коррозия и защита лопаток газовых турбин* : Машиностроение, 1987. 272 с.
15. Mak Lean, M. *Directionally solidified materials for high temperature service* / M. Mak Lean. – London: Metals Soc., 1983. 337 p.
16. Каблов, Е.Н. Герасимов В.В., Дубровский А.В. Технологические аспекты управления структурой жаропрочных сплавов при направленной кристаллизации *Литейное производство*. 1994. №4. С. 7 8.
17. Каблов, Е.Н. Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации *Газотурбинные технологии*. 2000. №3. С. 10 14.
18. Кишкин, С.Т. Строганов Г.Б., Логунов А.В. [и др.] Особенности легирования жаропрочных никелевых сплавов при направленной кристаллизации *Доклады Академии наук СССР*. 1983. Т. 268. №4. С. 865 867.
19. Кишкин, С.Т. Г.Б. Строганов, А.В. Логунов *Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов* *Литейное производство*. 1984. №4. С. 17 19.
20. Erickson, G.L. DS and SX superalloys for industrial gas turbines / G.L. Erickson, K. Harris // *Materials for Advanced Power Engineering. Part II. Proc. of a Conf. Belgium, Kluwer Academic Publishers*, 1994. P. 1055 1074.

21. Патон, Б.Е. Строганов Г.Б., Кишкин С.Т. и др Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления К.: Наук. думка, 1987. 256 с.
22. Захаров, М.В. Жаропрочные сплавы Металлургия, 1972. 384 с.
23. Масленков, С.Б. Жаропрочные стали и сплавы Металлургия. 1983. 192 с.
24. Коваль, А.Д. Развитие и применение научных основ легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких против высокотемпературной коррозии : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра. техн. наук : 05.16.01 / Коваль Анатолий Данилович. Днепропетровск, 1988. - 33 с.
25. Беліков, С.Б. Розвиток наукових принципів легування ливарних жароміцних никельових сплавів з метою підвищення корозійної стійкості деталей в умовах високотемпературного середовища газотурбінних установок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : 05.02.01 / Беліков Сергій Борисович. Запоріжжя, 1996. 48 с.
26. Каблов, Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов : Машиностроение, 1998. 464 с.
27. Гайдук, С.В. Исследование влияния тантала на структуру и свойства сплава ЗМИ-3У LAP LAMBERT Academic Publishing.- Saarbrucken, Deutschland.- 2012.- 223 p. ISBN: 978-3-8473-3290-9.
28. Монастырская, Е.В., Морозова Г.И., Власов Ю.Б. Структура, фазовый состав и свойства коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 8. С. 39 44.
29. Erickson, G.L. The Development of the CMSX-11B and CMSX-11C Alloys for Industrial Gas Turbine Application / G.L. Erickson // Superalloys. 1996. P. 45 52.
30. Каблов, Е.Н., Толораия В.Н., Орехов Н.Г. Монокристаллические никелевые ренийсодержащие сплавы для турбинных лопаток ГТД / Е.Н.

Каблов, *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 7. С. 7 11.

31. Каблов, Е.Н. Н.В. Петрушин, М.Б. Бронфин Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением *Металлы*. 2006. № 5. С. 47 57.

32. VerSnyder, F.L. High Temperature Materials in Gas Turbines / J.S. Erickson, C.P. Sullivan, F.L. VerSnyder et al. – Amsterdam. – 1974. - P. 315.

33. Choi, B.G. ETA Phase Formation During Thermal Exposure and Its Effect on Mechanical Properties in Ni-Base Superalloy GTD 111 / B.G. Choi, I.S. Kim, D.H. Kim, S.M. Seo, C.Y. Jo // *Superalloys*. - 2004. – P. 163-171.

34. Bhadeshia, H.K. 1st, 2nd and 3rd Generation Single-Crystal Nickel Based Superalloys / H.K. Bhadeshia // University of Cambridge. - 2003. - P. 1-4.

35. Caron, P. Recent Studies at Onera on Superalloys for Single Crystal Turbine Blades / P. Caron, O. Lavigne // *AerospaceLab*. - Issue 3 – November, 2011. – P. 1-14.

36. Caron, P. Third Generation Superalloys for Single Crystal Turbine Blades / P. Caron, T. Khan // *Materials for Advanced Power Engineering Part II Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany (J. Lecomte-Beckers, F. Schubert and P.J. Ennis, eds)*, 1998. - P. 897-912.

37. Caron, P. Development of New High Strength Corrosion Resistant Single Crystal Superalloys for Industrial Gas Turbine Applications / P. Caron, A. Escale, G. McColvin, M. Blacker [et al.] // *PARSONS 2000 - Advanced Materials for 21st Century Turbines and Power Plant*, IOM Communications Ltd, London, UK (A. Strang et al., eds), 2000. - P. 847-864.

38. Кишкин, С.Т. Исследования по жаропрочным сплавам / С.Т. Кишкин, Э.В. Поляк *Труды ИМЕТ. М. : АН СССР*, 1962. Т.7.С. 295.

39. Ртищев, В.В. Перспективные анизотропные материалы лопаток стационарных ГТУ со столбчатой и монокристаллической структурами / 1992. Вып. 270. С. 104 119.

40.Орехов,Н.Г..ГлезерГ.М, Кулешова Е.А. и др. Современные литейные жаропрочные сплавы для рабочих лопаток газотурбинных двигателей Металловедение и термическая обработка металлов. 1993. №7. С. 32 35.

41. Петрушин, Н.В. Монастырская Е.В. Применение направленной кристаллизации к решению проблем разработки и оптимизации жаропрочных материалов Материаловедение. 1998. № 5. С. 2 10.

42. Гайдук, С.В. Исследование динамики структурных превращений на сопротивление высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов, содержащих тантал Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2010. № 2. С.9 15.

43. Беликов, С.Б. Андриенко А.Г., Гайдук С.В. Литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав для монокристаллического литья методом направленной кристаллизации Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. №1. С. 16 20.

44. Паспорт на жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ХН64ВМКЮТ (ЗМИ-3У) / А.Д. Коваль, С.Б. Беликов, А.Г. Андриенко и др. : утв. проректор по научной работе Н.С. Гамов. Запорожье, 1995. 30 с.

45. Ножницкий, Ю.А. Голубовский Е.Р. Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных турбин перспективных Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 9 (35). С. 117 125.

46. Каблов, Е.Н. Герасимов В.В., Висик Е.М. Управление структурой жаропрочных сплавов при изготовлении лопаток ГТД направленной кристаллизацией 1999. №2. С. 18 27.

47. Каблов, Е.Н. Бондаренко, Ю.А. Получение монокристаллических лопаток ГТД высокоградиентной направленной кристаллизацией Авиационная промышленность. 2000. №1. С. 53 56.

48. Каблов, Е.Н. Герасимов В.В., Висик Е.М. Крупногабаритные лопатки ГТУ с направленной и монокристаллической структурой материалы и технологии. 2003. №1. С. 45 53.

49. Бондаренко, Ю.А. Перспективы технологии направленной кристаллизации крупногабаритных рабочих лопаток наземных газовых турбин 1998. № 7. С. 21 25.

50. Братухин, А.Г. Огородников, Б.Е. Карасев [и др.] Рабочие лопатки турбин высокого давления современных двигателей гражданской авиации Авиационное двигателестроение. 1994. № 1. С. 1 27.

51. Строганов Г.Б., Шалин Р.Е.. сертификат на сплав ЖС-26 высокоскоростной направленной кристаллизации ВИАМ, 1984. 11 с.

52. Бондаренко, Ю.А. Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. №7. С. 20 23.

53. Толораия, В.Н. Орехов Н.Г., Каблов Е.Н. Усовершенствованный метод монокристаллического литья турбинных лопаток ГТД и ГТУ Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 11 16.

54. Толораия, В.Н. Орехов Н.Г., Ломберг Б.С. Коррозионностойкие жаропрочные сплавы для крупногабаритных монокристаллических турбинных лопаток Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. №1. С. 30 32.

55. Толорайя, В.Н. Орехов Н.Г., Ломберг Б.С. Коррозионностойкие жаропрочные сплавы для крупногабаритных монокристаллических турбинных лопаток и их технология литья Авиационные материалы и технологии. 2003. №1. С. 12 18.

56. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник; [3-е изд., перераб. и доп.]. М. : Металлургия, 1981. 120 с.

57. Блэнк Д. Т. Гледман. М. : Мир, Количественная металлография. Приборы и методы физического металловедения, 1973. Вып. 1. С. 277 331.

58. Гайдук, С.В. Особенности влияния тантала на структуру и свойства никелевых сплавов. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2004. № 1. С. 16-19.

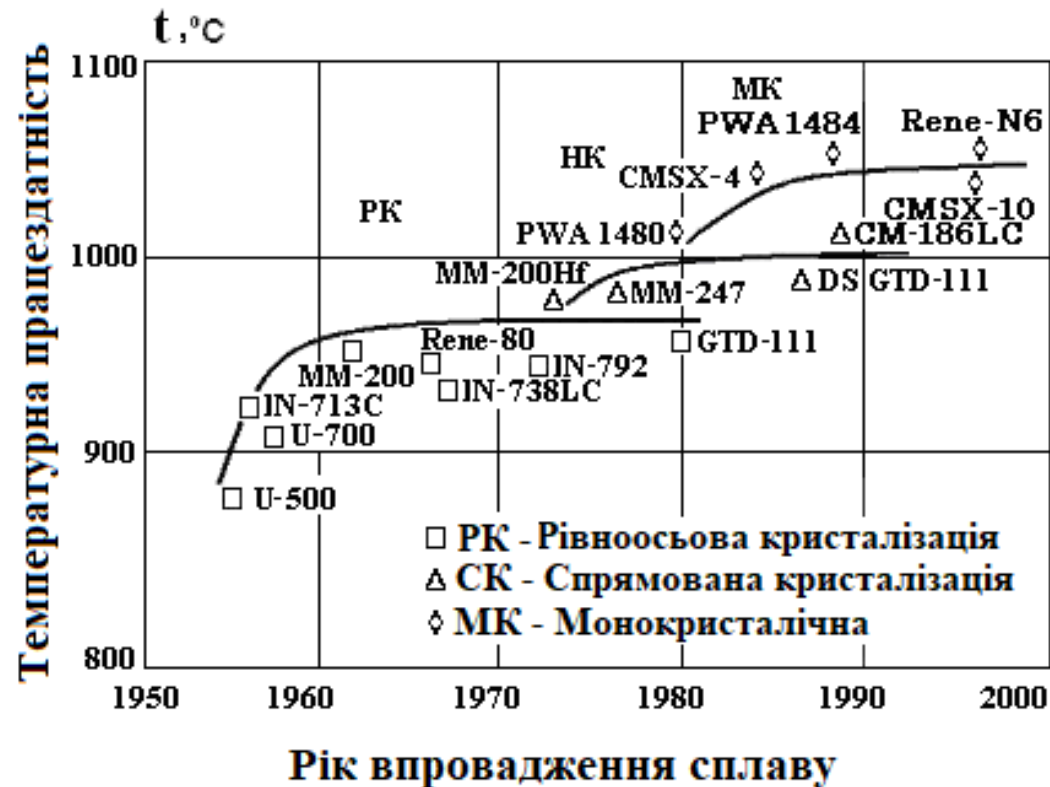
**ОЦІНКА ВПЛИВУ ТАНТАЛУ НА
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
СПЛАВУ ЗМІ-ЗУ
ЗІ СПРЯМОВАНОЮ (МОНО) І
РІВНООСЬОВОЮ СТРУКТУРОЮ**

МЕТА РОБОТИ: дослідити і
оцінити вплив танталу в
сплаві ЗМІ-ЗУ на механічні
властивості дослідних зразків
зі спрямованою (моно) і
рівноосьовою структурою.

У завдання досліджень входило:

- 1. На підставі аналізу літературних даних і практичного досвіду сформулювати основні підходи щодо вибору діапазону легування танталом сплаву ЗМІ-ЗУ.**
- 2. Порівняльна оцінка впливу танталу на характеристики міцності сплаву ЗМІ-ЗУ з спрямованої (моно) і равноосной структурою з аналізом кривих високо-температурної повзучості.**
- 3. Проведення дослідно - технологічної апробації сплаву ЗМІ-ЗУ з 4% танталу по масі, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-ЗУ без танталу в промислових умовах при отриманні виливків методом спрямованої і равноосной кристалізації.**

Прогрес в області розробки ливарних жароміцних нікелевих сплавів ($\sigma = 140$ МПа, $\tau = 1000$ годин)



а

Прогрес в області розробки ливарних жароміцних нікелевих сплавів ($\sigma = 140$ МПа, $\tau = 1000$ годин)



б

а – зарубіжні; б – вітчизняні.

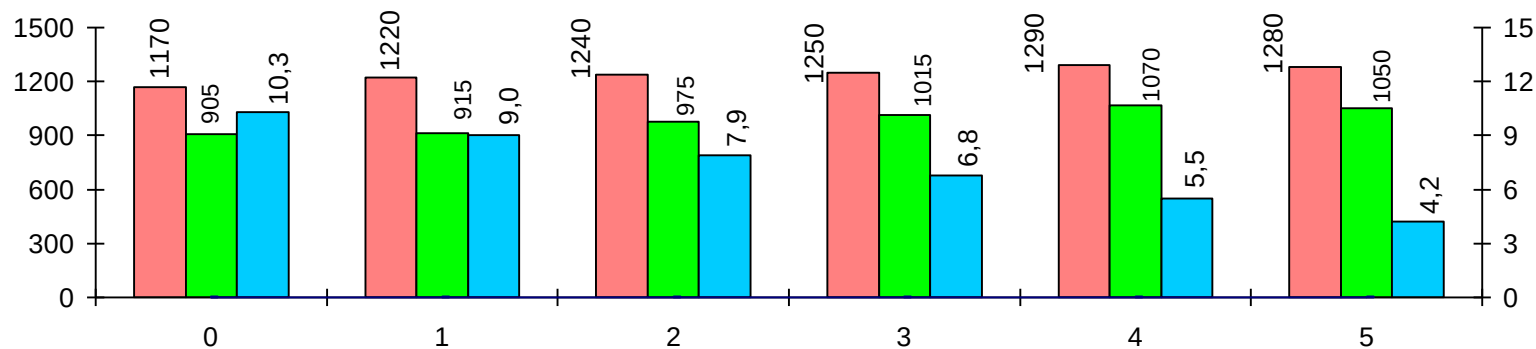
Хімічний склад дослідних сплавів

№ складу	Вміст елементу,% за масою											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	B	Y	La	Ni
0	0,08	13,3	3,3	4,8	0,8	7,2	5,0	--	0,009	0,03	0,01	ост.
1	0,07	13,1	3,4	4,7	0,7	6,9	5,1	0,9	0,008	0,03	0,01	ост.
2	0,07	13,2	3,6	4,6	0,8	7,0	4,9	1,9	0,008	0,03	0,01	ост.
3	0,08	13,5	3,5	4,6	0,7	6,9	4,8	2,8	0,009	0,03	0,01	ост.
4	0,06	13,0	3,6	4,4	0,7	7,2	5,0	3,9	0,008	0,03	0,01	ост.
5	0,07	13,2	3,5	4,5	0,8	7,1	5,1	4,8	0,008	0,03	0,01	ост.

Вплив танталу на механічні властивості дослідних сплавів

$\sigma_B; \sigma_{0,2}, \text{МПа}$

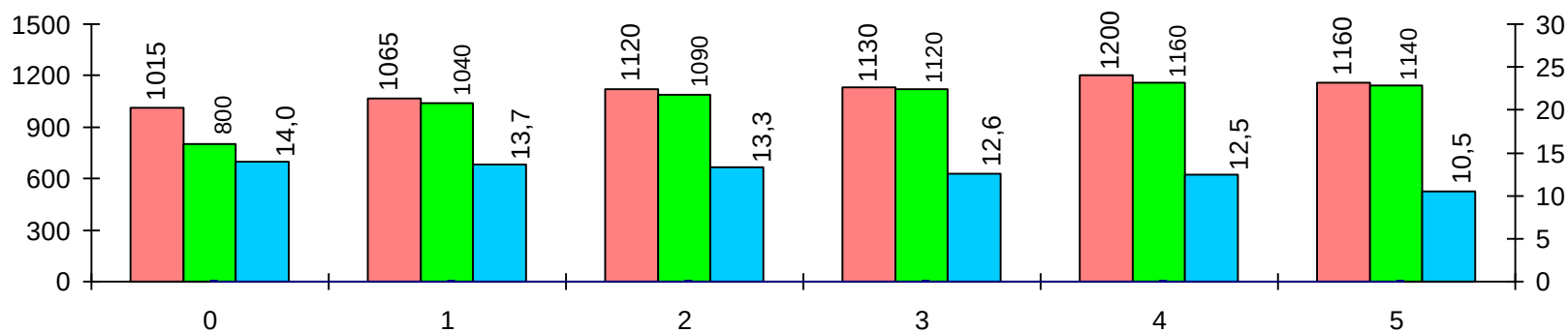
$\delta, \%$



а- 20⁰С

$\sigma_B; \sigma_{0,2}, \text{МПа}$

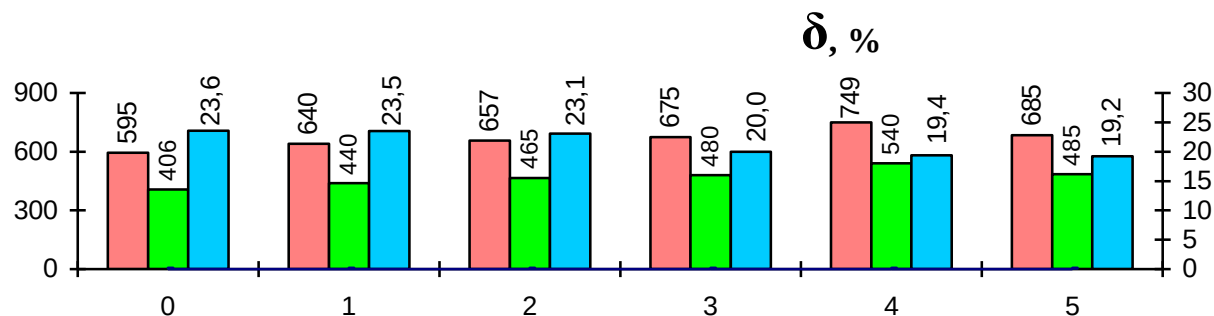
$\delta, \%$



б – 800⁰С

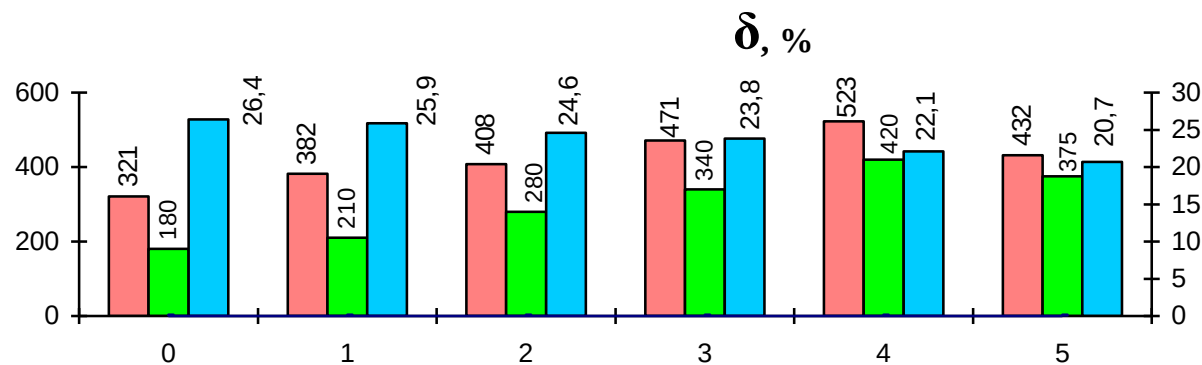
Вплив танталу на механічні властивості дослідних сплавів

$\sigma_B; \sigma_{0,2}, \text{МПа}$



В

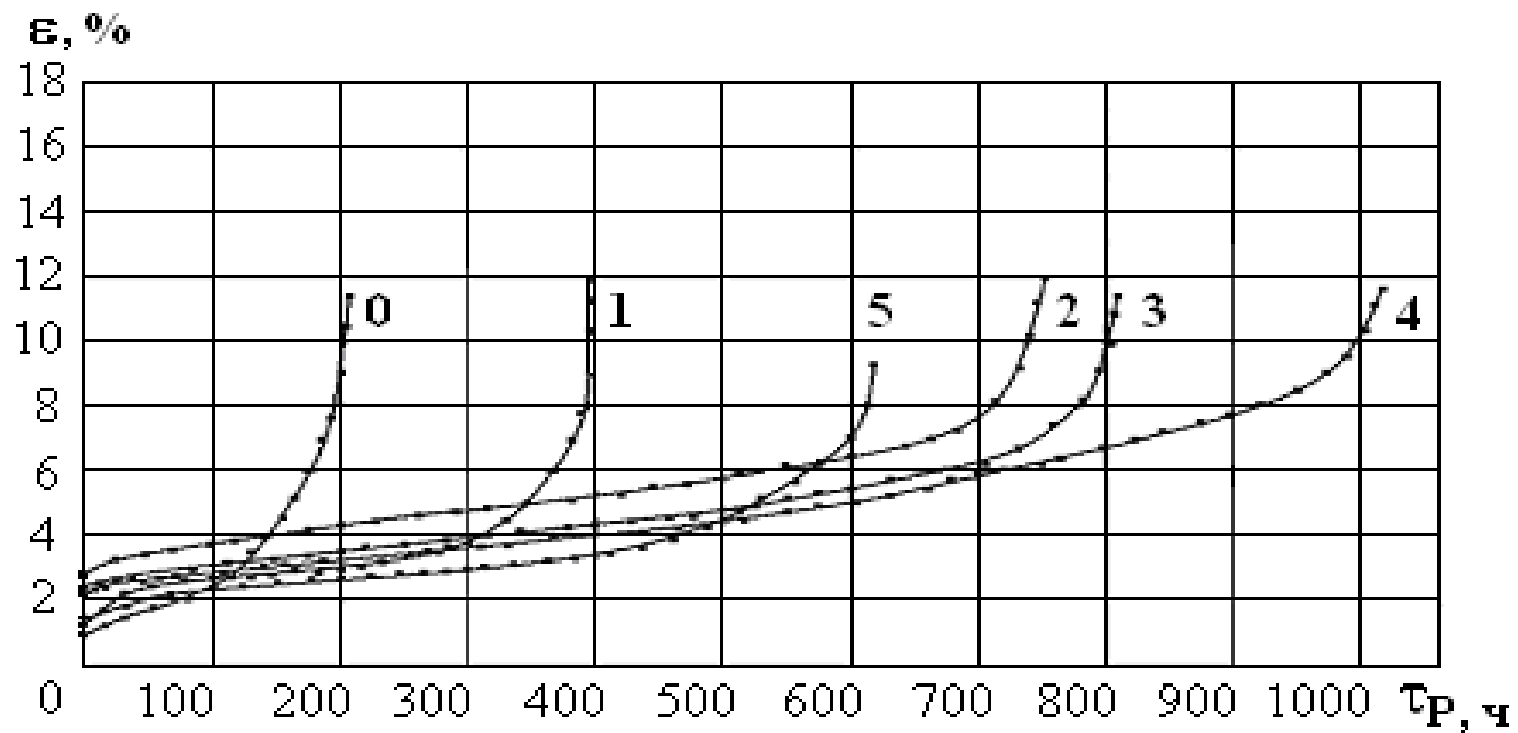
$\sigma_B; \sigma_{0,2}, \text{МПа}$



Г

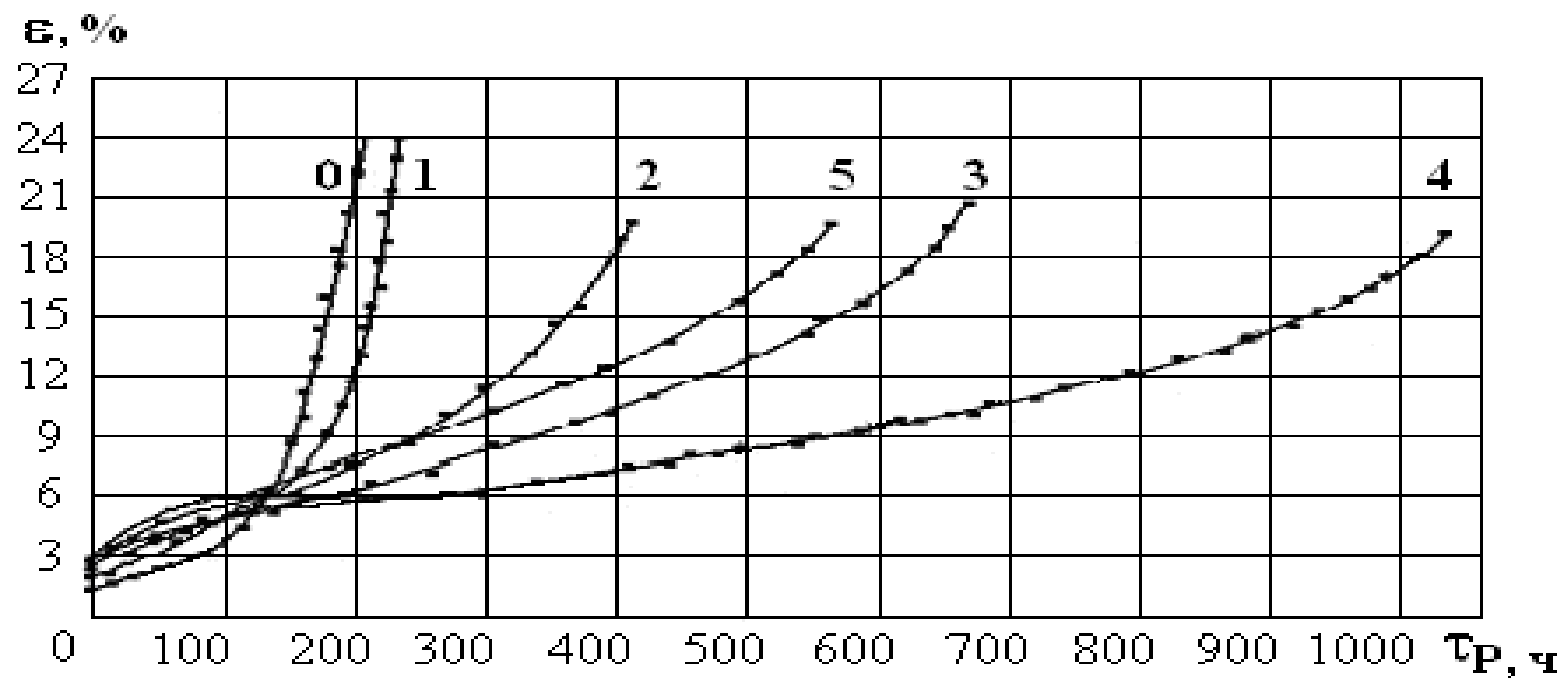
Температура випробувань:
а - 20⁰С; б – 800⁰С; в – 900⁰С; г – 1000⁰С

Вплив танталу на опір повзучості дослідних складів



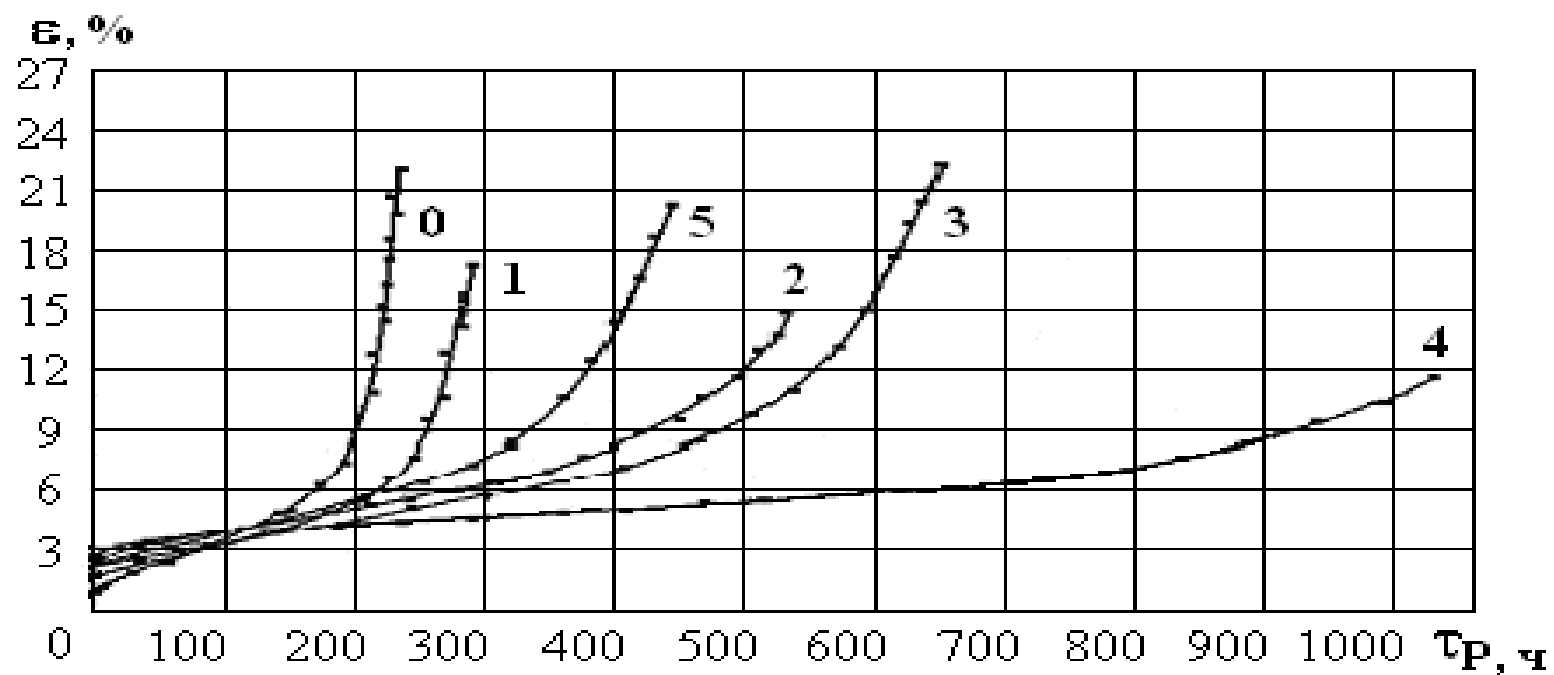
$\alpha - t = 800^{\circ}\text{C}$ и $\sigma = 450 \text{ МПа}$;

Вплив танталу на опір повзучості дослідних складів



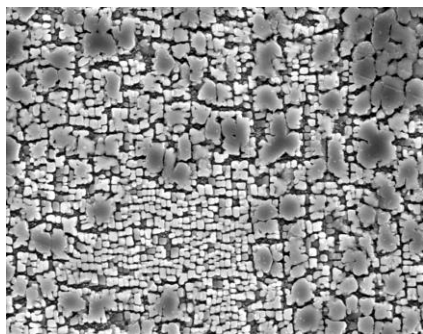
$\sigma - t = 900^{\circ}\text{C}$ и $\sigma = 250 \text{ МПа}$;

Вплив танталу на опір повзучості дослідних складів

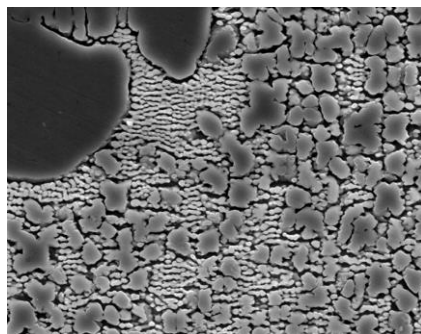


$\sigma = 120$ МПа. $t = 1000^{\circ}\text{C}$

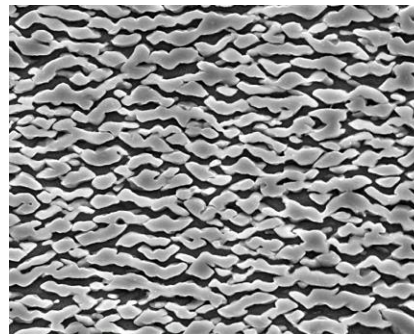
Мікроструктура дослідних складів після випробувань на 100 –годинну тривалу міцність



а



б



в

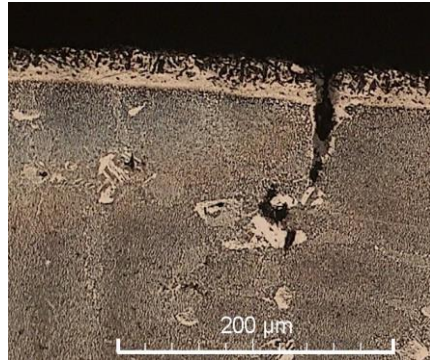
×5000

а - $T = 800^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 600$ МПа;

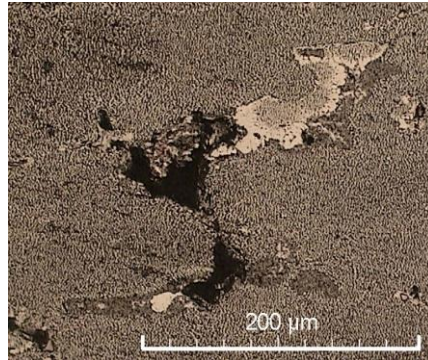
б - $T = 900^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 250$ МПа;

в - $T = 1000^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 180$ МПа.

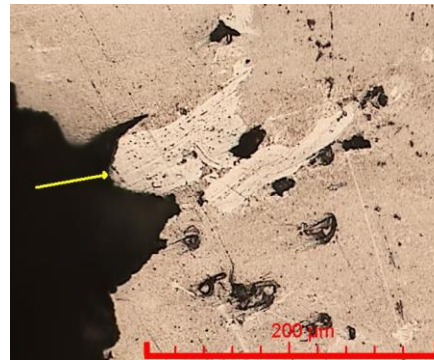
Типи тріщин, що виникають в процесі випробувань на тривалу міцність



а



б



в

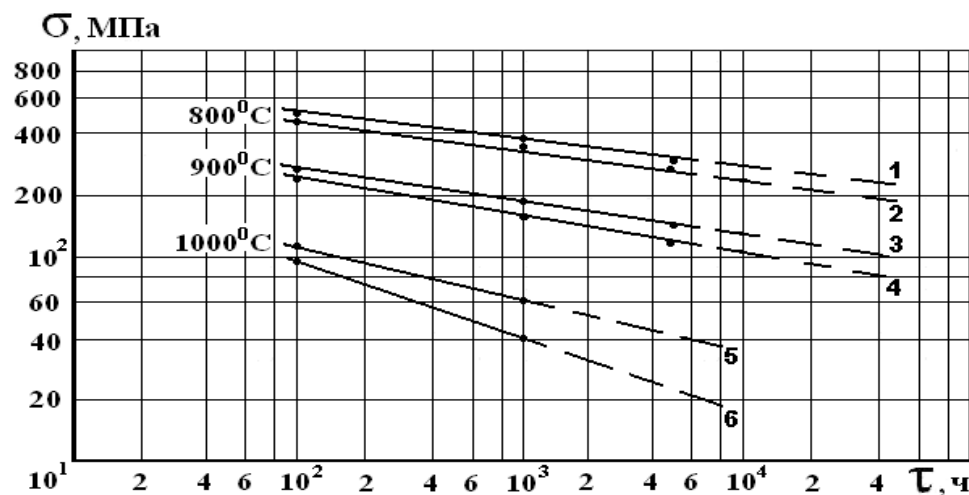
×100

а – поверхнева тріщина по границі γ -матриця - карбідна фаза;

б – внутрішня тріщина по границі γ -матриця - евтектика $\gamma+\gamma'$;

в – структура зламу.

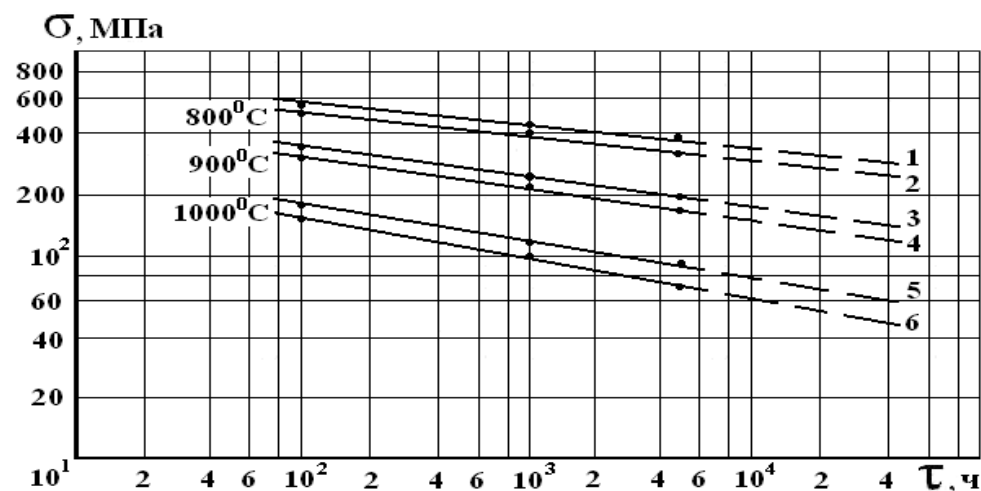
Порівняльні значення тривалої міцності



Криві тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У без танталу

(склад «0»): 1, 3, 5 - зразки зі спрямованою (моно) структурою; 2, 4, 6 - зразки з рівноосьовою структурою.

Порівняльні значення тривалої міцності



Криві тривалої міцності сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (дослідний склад «4»): 1, 3, 5 - зразки зі спрямованою (моно) структурою; 2, 4, 6 - зразки з рівноосьовою структурою.

Висновки

- Метою дипломної роботи було вивчення впливу танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ в досліджуваному діапазоні легування (1-5%) на структуру і характеристики міцності зразків, отриманих методом спрямованої (моно) і рівноосьової кристалізації. Отримані результати комплексних досліджень дозволили прийти до наступних висновків:
- 1. В першому розділі дипломної роботи були розглянуті особливості експлуатації жароміцних нікелевих сплавів та вимоги, що висуваються до них, а також проаналізовано подальший розвиток сучасних жароміцних нікелевих сплавів.
- 2. Показано, що в залежності від схеми легування, методу виплавки і режиму термічної обробки, в структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть утворюватися різні фази. При цьому, вплив цих фаз на характеристики жароміцності неоднозначно. Зазначено, що великий вплив на характеристики міцності надає
- основна зміцнююча γ' - фаза, поведінка якої при високих температурах і навантаженнях визначає працездатність сплаву в цілому. Проаналізовано вплив різниці параметрів кристалічних ґраток
- γ' - твердого розчину і γ' - фази і показано, що, чим більше ця різниця, незалежно від знака, тим менше час до руйнування сплаву при заданій температурі і напрузі.
- 3. Використання перспективних легувальних елементів, таких як, тантал, ніобій, гафній, реній і інших дефіцитних елементів, підвищує характеристики жароміцності нікелевих сплавів, але при цьому значно збільшують їх вартість. Тому, промислове використання таких сплавів повинно визначатися, в першу чергу, економічною доцільністю.
- 4. Аналіз хімічних складів показав, що на відміну від сплавів для рівноосьової кристалізації, сплави для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття містять тантал в досить широкому діапазоні (4-12)% за масою, що можна пояснити різним вмістом в них хрому, який обмежує розчинність танталу в нікелевій матриці. Пошук оптимальних складів жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття ще до кінця не завершений. Тому щорічно в провідних країнах світу з'являються нові патенти та публікації.

Висновки

- 5. Механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів значною мірою визначаються температурою старіння. При цьому, в сплавах зі спрямованою (моно) структурою стабілізація фазового стану відбувається при більш високих температурах, ніж у сплавів із рівноосьовою структурою. Жароміцність і термічна стабільність сплавів в діапазоні робочих температур, в значній мірі, залежить не стільки від об'ємної частки γ' - фази, скільки від її хімічного складу, тому що дифузія є відповідальною за високотемпературні процеси.
- 6. Зазначено, що використання лопаток зі спрямованою (моно) структурою, у порівнянні із литвом із рівноосьовою структурою, дає можливість підвищити ресурс експлуатації, за рахунок збільшення опору повзучості за рахунок підвищення запасу пластичності. Відзначено, що близько половини приросту жароміцності було досягнуто за рахунок більш ефективної конструкції повітряної охолоджувальної системи робочих лопаток газових турбін. Інша половина приросту було досягнуто за рахунок розробки нових складів сплавів або удосконалення (модернізації) складів відомих промислових марок, а також вдосконалення ливарних технологій. При цьому середній рівень короткочасної і тривалої міцності за 5 років підвищився на 20 - 30%.
- 7. Кращі характеристики міцності в діапазоні температур 800 - 1000С і напруги 120 - 600 МПа показали зразки сплаву ЗМІ-3У з 3,9% танталу (склад «4») як зі спрямованою (моно), так і рівноосьовою структурою. У порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу, час до руйнування зразків збільшилася в 4-5 разів за всіх температур випробувань.
- 8. У сплаві ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5») характеристики міцності і пластичності істотно знижуються за рахунок збільшення структурної неоднорідності, а також за рахунок присутності більшої кількості нерівноважної евтектики $\gamma+\gamma'$ і наявності надлишкової пластинчастої η - фази на основі Ni3Ta несприятливої морфології.
- 9. Оптимальне легування танталом (4,0%, за масою) сплаву ЗМІ-3У значно покращило технологічність, в порівнянні із серійним сплавом ЗМІ-3У без танталу, при отриманні неохолоджуваних робочих лопаток ТВТ енергетичної турбіни MS-5001 методом спрямованої (моно) кристалізації, за рахунок зниження кількості макроструктурних дефектів, що підвищило рівень виходу придатного литва з (30-35) % до (80-85)%.
- 10. Дослідний сплав ЗМІ-3У з 4% танталу є також перспективним для отримання робочих лопаток методом рівноосьової кристалізації і рекомендований як матеріал для виготовлення робочих лопаток ТВТ з підвищеним ресурсом експлуатації для газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10І, замість промислового сплаву ЗМІ-3У, який до теперешнього часу широко застосовується. За рахунок підвищення показників механічних властивостей і жароміцності сплаву ЗМІ-3У з 4% танталу, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу, збільшено ресурс безперервної експлуатації робочих лопаток ТВТ газоперекачувальних агрегатів ГТК-10І з 30-32 тисяч годин до 48-50 тисяч годин, що більше в 1,5 рази.