

Національна академія наук України  
Інститут проблем міцності

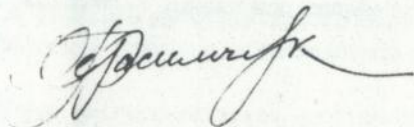
На правах рукопису

ГЕРАСИМЧУК Олег Миколайович

ВИТРИВАЛІСТЬ І ЦИКЛІЧНА ТРИЩИНІСТОЇКІСТЬ  
ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТЗ-1 У РІЗНИХ СТРУКТУРНИХ СТАНАХ

05.02.09 - Динаміка, міцність машин,  
приладів та апаратури

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Київ 1996

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем міцності  
Національної академії наук України.

Наукові керівники: академік НАН України  
Трошенко Валерій Трохимович,  
доктор технічних наук  
Грянов Борис Олексійович

Офіційні опоненти - член-кореспондент НАН України  
доктор фізико-математичних наук  
Красовський Арнольд Янович,  
кандидат технічних наук  
Погребняк Анатолій Дмитрович

Провідна установа - підприємство "Мотор Січ"

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00760318 (P)

захист відбудеться: " 27 " червня 1996 р. о  
930 год. на засіданні Спеціалізованої вченої ради  
Д 01.99.01 по захисту дисертацій на здобуття наукового  
ступеня доктора (кандидата) наук в Інституті проблем міцності  
НАН України за адресою: 252014, Київ-14, вул.Тимірязєвська, 2

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем  
міцності НАН України.

Автореферат розісланий " 23 " травня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук

Гіриняк Ф.Ф.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

4B - 34.957

## 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Одними з найчутливіших матеріалів до змін структури по відношенню до механічних характеристик, особливо до характеристик опору втомі, є титанові сплави, такі як ВТЗ-1, ВТ8, ВТ6 і т.п., які широко застосовуються в аерокосмічній промисловості для виготовлення робочих лопаток газотурбінних двигунів.

Результати досліджень впливу структури на механічні властивості титанових сплавів та й інших матеріалів, що є в літературі, носять якісний характер. Крім того, відсутність комплексних досліджень всіх характеристик механічних властивостей конкретного сплаву в різних структурних станах поряд з розрізненими окремими результатами, отриманими різними авторами з даної проблеми, не дозволяють виявити загальні закономірності впливу фактора структури на поведінку матеріалу при його циклічному навантаженні. Це й зумовило вибір теми й основних напрямків дисертаційного дослідження.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення взаємозв'язків між механічними характеристиками і параметрами структури матеріалу, на основі яких можна буде прогнозувати характеристики опору руйнуванню від втоми.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні наукові завдання:

- провести експериментальні дослідження характеристик опору втомі, циклічної тріщиностійкості, статичної міцності двофазного титанового сплаву ВТЗ-1 у різних структурних станах, що отримані в результаті варіювання режимів термомеханічної обробки сплаву;
- провести мікроструктурний і текстурний аналіз отриманих структурних станів сплаву;
- виявити взаємозв'язки між механічними характеристиками сплаву і параметрами його структури;
- розробити розрахункову модель для прогнозування характеристик опору втомі матеріалу з урахуванням структурного фактора.

Наукова новизна. Науковою новизною відзначаються такі результати:

- проведено комплексне експериментальне дослідження характеристик опору втомі, циклічної тріщиностійкості, статичної міцності і пластичності титанового сплаву ВТЗ-1 у різних структурно-текстурних станах;
- розроблена і обґрунтована розрахункова модель границі витривалості матеріалу, яка дозволяє за наявними даними про розміри структурних параметрів і модуль пружності сплаву прогнозувати величину границі витривалості гладких зразків;

- виявлений оптимальний режим термомеханічної обробки сплаву ВТЗ-1, після якого сплав має найвищі характеристики опору руйнуванню від втоми в поєднанні з досить високою статичною міцністю і пластичністю.

Практичне значення роботи. Практичне значення даного дисертаційного дослідження полягає в тому, що воно розширює уявлення про граничні можливості сплавів, які традиційно використовуються, і дозволяє оптимізувати технологію їх виготовлення. Зокрема, розроблений метод прискореного визначення характеристик опору втомі конструкційних матеріалів та елементів конструкцій дозволяє в стислий термін отримати необхідну інформацію про циклічну міцність чи тріщиностійкість матеріалу з достатнім ступенем точності для прийняття конструкторського чи технологічного рішення.

Особистий внесок дисертанта в проведені дослідження. Особисто дисертантом проведено комплексне експериментальне дослідження характеристик опору втомі, циклічної тріщиностійкості, статичної міцності і пластичності титанового сплаву ВТЗ-1 у різних структурно-текстурних станах. На підставі цього дисертантом розроблена й обґрунтована розрахункова модель границі витривалості матеріалу, яка дозволяє за наявними даними про розміри структурних параметрів і модуль пружності сплаву прогнозувати величину границі витривалості гладких зразків.

Зв'язок дисертації з планом науково-дослідних робіт. Дисертаційна робота виконувалася в рамках планових тем відділу втоми і термічної втоми Інституту проблем міцності НАН України.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертації доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: "Текстури и рекристаллизация в металлах и сплавах" (Свердловск, 1991), "Поверхностный слой, эксплуатационные свойства деталей машин и приборов" (Москва, 1991), "Новые конструкционные сплавы и стали и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" (Запоріжжя, 1992), XXV Международное научно-техническое совещание по проблемам прочности двигателей (Москва, 1994), а також на семінарах відділу.

#### Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, списку основних позначень та прийнятих скорочень, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, що містить 143 найме-

нування. Робота викладена на 131 сторінках машинописного тексту, включає 31 малюнок і 6 таблиць.

## П. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі /оглядовому/ наведені загальні уявлення про руйнування матеріалів від втоми. Представлені основні характеристики матеріалу, що визначають його опір втомі і циклічну тріщиностійкість. Основна увага в даному розділі зосереджена на питанні впливу структури матеріалу на процес його руйнування від втоми, особливо на таку його характеристику, як границя витривалості.

Цьому питанню присвячена велика кількість робіт як зарубіжних, так і вітчизняних вчених: Армстронга Р., Петча Н., Крекнела А., Форсайта П., Фореста П., Танаки К., Хаддада М., Іванової В.С., Троценка В.Т., Покровського В.В., Грязнова Б.О., Романіва О.М., Трефілова В.І та інших.

Проте до цього часу не побудовано єдиної теорії, що дозволяє досить точно прогнозувати вплив структури матеріалу на його опір втомі. Отримані залежності границі витривалості від розміру зерна, що є одним з основних параметрів структури, мають чисто емпіричний характер і можуть бути застосовані тільки в обмежених випадках.

Питанням впливу текстури на циклічну міцність матеріалів приділялось мало уваги, і до сих пір немає однозначної уяви про характер цього впливу.

Вищесказане ще більшою мірою торкається оцінки явищ і пошкоджень від втоми дво- і тим більш багатофазних сплавів, теорія міцності і руйнування яких знаходиться сьогодні в зародковому стані.

Розглянуто також деякі уявлення механіки руйнування, завдяки яким можна встановити взаємозв'язки між характеристиками опору втомі, циклічної тріщиностійкості та параметром структури.

Наведені деякі результати дослідження впливу структури на механічні властивості та характер руйнування різних титанових сплавів. Оскільки механічні властивості двофазних титанових сплавів, у першу чергу характеристики опору втомі, в порівнянні з іншими конструкційними сплавами, найбільш піддаються впливові типу і геометричних параметрів структури. Виходячи з вищесказаного, в даній роботі робиться спроба на прикладі двофазного титанового сплаву ВТЗ-І виявити загальні закономірності

впливу структури і текстури на характеристики опору руйнуванню від втоми.

У другому розділі викладені методики експериментального дослідження характеристик опору втомі та циклічної тріщиностійкості титанових сплавів, описані установки та апаратура для проведення експериментів.

Вибір розмірів і форми зразків, а також способу їх навантаження /циклічний згин/ зумовлювався специфікою застосування титанових сплавів для виготовлення компресорних лопаток авіаційних турбінних двигунів.

При побудові кривих втоми за довговічність до руйнування гладкого консольного зразка приймалась кількість циклів навантаження до моменту падіння резонансної частоти коливань зразка на 1%, що відповідало появі поверхневої макротріщини глибиною  $\sim 0,5$  мм.

Викладена також методика визначення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{IH}$  в консольних зразках з односторонньою тріщиною при симетричному й асиметричному циклах навантаження, яка ґрунтується на зв'язку розмаху вільного кінця зразка з напруженням в "небезпечному" січенні. Врахування зміни податливості зразка під час росту тріщини дозволяє визначити напруження в "небезпечному" січенні при наявності згинних та розтягуючих складових навантаження.

Хибність визначення амплітуди напружень і коефіцієнта інтенсивності напружень за описаними методиками не перевищує  $\pm 2\%$ .

У третьому розділі описані матеріали, що є об'єктом дослідження, та методи їх термомеханічної обробки /ТМО/. В даній роботі об'єктом дослідження служив двофазний  $-\alpha + \beta$ -титановий сплав ВТЗ-І, що широко застосовується в аерокосмічній техніці як конструкційний і жаростійкий матеріал. Його хімічний склад у вагових %: осн.  $Ti - 6,6 Al - 2,6 Mo - 0,4 Fe - 1,5 Cr - 0,3 Si$ .

Як відомо, рівень фізико-механічних властивостей  $-\alpha + \beta$ -титанових сплавів задається не тільки хімічним складом, але і структурою, яка є наслідком деформаційного і термічного впливу. Температура і ступінь деформації грають також важливу роль і у формуванні кристалографічної текстури, тим самим роблячи вплив на деякі важливі механічні характеристики сплаву

В результаті застосування різних режимів ТМО всього було отримано для дослідження 7 структурно-текстурних станів сплаву ВТЗ-І /табл. І/.

Таблиця І

№ стр. стану	Режим ТМО	Хар-ка структури	Хар-ка текстури	Середній розмір струк. елементу	
				діаметр глоб. мкм	товщ. - пласт. мкм
1	Вихідний пруток /матеріал у стані поставки, без ТМО/	Глобулярна первинна $\alpha$ -фаза і пластинчаста / $\alpha + \beta$ /-матриця	слабо виражена	2	0,1
2	1/ Загартовка у воду від 1323 К після витримки 0,5 г 2/ Прокатка при 1073К зі стисненням 50% 3/ Рекристалізаційний відпал при 1073 К, 5 г	"-"	БП - текстура $\alpha$ -фази	3	0,7
3	1/ "-" 2/ при 1123 К 3/ "-"	"-"	"-"	2,5	1,5
4	1/ "-" 2/ при 1173 К 3/ "-"	"-"	"-"	1,8	-
5	1/ "-" 2/ при 1223 К 3/ "-"	"-"	слабо вираж.	4	4
6	Режим ТМО, що застосовується в промисловості для виготовлення крупногабаритних поковок /імітація/	"-"	"-"	10	-
7	"Швидкісна" термообробка: нагрів зі швидкістю 50 К/с до 1323 К, загартовка у воду; відпал при 1073 К, 4 г	$\beta$ -зеренна з внутрізеренною пластинчастою $\alpha$ -фазою і дограничною $\alpha$ -фазою	не вираж.	-	0,4

Представлено мікроструктурний і текстурний аналіз досліджуваних матеріалів і дана характеристика структури і текстури, а також визначені середні розміри структурних складових для кожного з досліджуваних станів сплаву /табл. 1/. Аналіз мікроструктури і текстури проводився в Інституті металофізики НАН України за стандартними методиками, а також за допомогою оригінальних установок і програм на ПЕОМ, розроблених у цьому інституті.\*

Механічні характеристики  $G_{02}$ ,  $G_{\beta}$ ,  $S_k$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  для всіх досліджуваних станів сплаву, отримані в результаті випробувань на статичний розтяг стандартних плоских зразків, а також твердість  $HV$ , представлені в табл. 2.

Таблиця 2

№ струк. стану	$G_{02}$	$G_{\beta}$	$S_k$	$\delta$	$\psi$	$HV$
	МПа	МПа	МПа	%	%	МПа
1	1065	1114	1597	15	48	3540
2	1009	1069	1341	15	22	3600
3	1027	1084	1355	15	25,3	3590
4	1011	1070	1427	16	30	3503
5	1100	1210	1482	12,5	19,5	3673
6	998	1026	1216	9,3	17	3568
7	1030	1544	1728	3	11	4530

У четвертому розділі представлені результати дослідження характеристик опору втомі і циклічної тріщиностійкості сплаву ВТЗ-І у різних структурно-текстурних станах і дано їхній аналіз.

За результатами випробувань на втому гладких зразків сплаву ВТЗ-І побудовані 50%-ні криві втомі в координатах: амплітуда напружень  $G_a$  - кількість циклів до руйнування  $N$  для всіх структурних станів сплаву, що досліджувались.

Показано, що причиною відмінності характеристик опору втомі є утворення в результаті різних режимів ТМО структури різної дисперсності та текстури різної інтенсивності і переважної кристалографічної направленості. Так, глобулярні струк-

\* Висловлюю щиро подяку Інституту металофізики НАНУ за надану можливість проведення цього аналізу.

тури /1-6/ можна розділити на дві групи: 1-а група, в яку входять структури 1, 5, 6, що характеризуються практично безтекстурним станом /або іншими словами, приблизно однаково невираженою текстурою/, і 2-а група - це структури 2, 3, 4, що мають базисно-призматичну текстуру різної інтенсивності, яка підсилюється від 2-ї до 4-ї з одночасним збільшенням призматичної складової цієї текстури.

Встановлено, що, якщо на границю витривалості визначальний вплив робить розмір структурного параметра, то на нахил кривих втому поряд з розміром структурного параметра визначальний вплив чинить текстура матеріалу. Невиражена текстура призводить до розсіювання результатів випробувань на втому, і, навпаки, яскраво виражена /або інтенсивна/ текстура зменшує їхнє розсіювання.

Проведений мікроструктурний аналіз зон руйнування зразків після випробувань на втому, в результаті якого встановлено, що лімітуючою ланкою по відношенню до характеристик опору втомі для глобулярних структур сплаву ВТЗ-І є глобулярна  $\alpha$ -фаза. Тому характеристики опору втомі даного сплаву в глобулярних структурних станах визначаються властивостями глобулярної  $\alpha$ -фази.

Проте для стану 4, що має найвищі характеристики опору втомі, властивості глобулярної  $\alpha$ -фази і пластичності  $1/\alpha + \beta$  - матриці є близькими. Про це свідчить той факт, що зародження тріщини втомі для цього стану сплаву локалізувалось як в  $\alpha$ -глобулях, так і в  $\alpha$ -пластинах, на відміну від інших глобулярних структур, де локалізація тріщини відбувалась тільки в глобулярній  $\alpha$ -фазі.

Результати випробувань зразків з односторонньою боковою тріщиною на циклічну тріщиностійкість сплаву ВТЗ-І у досліджуваних структурних станах при симетричному циклі навантаження представлені у вигляді діаграм руйнування від втоми у координатах: швидкість росту тріщини  $dl/dN$  - коефіцієнти інтенсивності напружень  $K_{I \max}$ .

При порівнянні цих результатів з результатами випробувань на втому можна зробити висновок, що, якщо на етапі зародження тріщини втомі сплав ВТЗ-І в глобулярних станах /1-6/ поводить себе по-різному, то на етапі розвитку магістральної тріщини істотних відмінностей у поведінці матеріалу в даних станах не спостерігається. Винятком є тільки стан 7, що має дрібнопласт-

тинчасту будову структури і різко відрізняється від перших іншими характеристиками механічних властивостей /табл. 2/.

Таку відмінність у поведінці даного матеріалу на різних етапах руйнування від втоми можна пояснити локалізацією тріщини в одній з фазових складових на стадії зародження тріщини і розвитком її по обох фазах на стадії росту магістральної тріщини, а також накладанням на цей процес ефекту закриття тріщини втоми.

За одержаними експериментальними результатами побудовані кореляційні залежності, що зв'язують границю витривалості  $\sigma_{-1}$  та пороговий КІН  $K_{th}$  з іншими механічними характеристиками сплаву ВТЗ-І. Характер отриманих залежностей дозволив дійти висновку, що для даного сплаву немає однозначного взаємозв'язку між величиною границі витривалості та іншими характеристиками механічних властивостей, і визначальний вплив на величину  $\sigma_{-1}$  роблять характеристики структури матеріалу, які по-різному проявляються при різних режимах навантаження /статичне, циклічне і т.д./. Проте разом з цим зі збільшенням міцності і твердості пороговий КІН знижується.

Встановлено також, що оптимальною термомеханічною обробкою сплаву ВТЗ-І є ТМО за режимом 4 /див. табл. 1/, після якої сплав має найвищі характеристики опору руйнуванню від втоми в поєднанні з досить високими статичною міцністю і пластичністю.

У п'ятому розділі, на підставі проведеного аналізу результатів дослідження характеристик механічних властивостей сплаву ВТЗ-І в різних структурно-текстурних станах, розглянуто залежність границі витривалості сплаву від розміру структурного параметра, що визначає його циклічну міцність.

Викладки, що стосуються розробки моделі для прогнозування границі витривалості з урахуванням фактора структури, проведені на підставі даних про глобулярні структури, тобто стани сплаву /І-6/, бо структурним параметром для цих структур є власне розмір структурного елементу  $\mathcal{L}$  -глобулю на відміну від пластинчастої структури 7, де структурним параметром може бути як розмір елементу - товщина пластини, так і товщина пакету сприятливо розташованих одна до одної пластин. Коректне визначення величини структурного параметру в останньому випадку дуже проблематичне, бо вона є випадковою величиною.

Експериментальна залежність границі витривалості  $\sigma_{-1}$  від середнього розміру  $\mathcal{L}$  -глобулів  $d$  для даного сплаву п

казу монотонне зниження  $G_{-1}$  зі збільшенням  $d$ . Ця залежність, побудована у координатах  $G_{-1} - 1/\sqrt{d}$ , задовільно описується рівнянням

$$G_{-1} = A \cdot d^{-1/2}, \quad /1/$$

де  $A = 1,02 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

З іншого боку, тобто з позицій механіки руйнування, границя витривалості може розглядатись як максимальне напруження, при якому тріщина втоми, що з'явилась в матеріалі, не розповсюджується. Багато авторів, виходячи з цих позицій, прийшли до виразу границі витривалості  $G_R$  у формі

$$G_R = \frac{\Delta K_{th}}{Y\sqrt{l_0}}, \quad /2/$$

де  $\Delta K_{th}$  - порогове значення розмаху КІН;  $Y$  - функція, що враховує геометричні розміри тріщини і тіла та умови навантаження;  $l_0$  - Т.З. "Критичний розмір тріщини, що відповідає границі витривалості".

Для багатьох різноманітних сплавів і сталей була встановлена лінійна залежність  $l_0$  від середнього розміру зерна матеріалу  $d$  :

$$l_0 = \eta \cdot d. \quad /3/$$

Враховуючи /3/, формулу /2/ для випадку симетричного циклу навантаження /тобто  $R = -1$ / можна записати у вигляді

$$G_{-1} = \frac{U' \cdot K_{th}}{Y\sqrt{d}}, \quad /4/$$

де  $U' = \eta^{-1/2}$ .

Підстановка отриманих в даній роботі експериментальних даних  $G_{-1}$  і  $d$  в рівняння /4/ показала, що добуток  $U' \cdot K_{th}$  змінюється в незначних межах і, очевидно, є сталою величиною для даного сплаву /див.табл.3/. Можна припустити, що такою сталою величиною сплаву є ефективний розмах порогового КІН  $\Delta K_{th}^{eff}$ .

У відповідності з концепцією закриття тріщини втоми швидкість її росту є функцією ефективного розмаху КІН

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K, \quad /5/$$

де  $U$  - коефіцієнт відкриття тріщини, що залежить від механічних властивостей матеріалу.

Таблиця 3

№ струк. стаму	$G_{-1}$ МПа	$K_{th}$ МПа $\sqrt{м}$	$l_0$ м · 10 <sup>-6</sup>	$\eta$	$U'_{\eta-1/2}$	$U' \cdot K_{th}$ МПа $\sqrt{м}$	$G_{-1}^{пр}$ МПа	$\Delta G_{-1}$ %
1	700	4,74	11,6	5,8	0,415	1,97	725	+3,5
2	500	5,06	18	6,013	0,408	2,06	591	-1,5
3	650	4,6	12,7	5,07	0,444	2,04	648	-0,3
4	750	5,06	11,5	6,4	0,384	2,00	764	+2,8
5	500	4,11	17	4,28	0,483	1,99	512	+2,4
6	320	5,06	64	6,4	0,395	2,00	324	+1,0
7	750	2,37	2,5	-	-	-	-	-

Багатьма вченими було встановлено, що для різних класів матеріалів ефективний розмах порогового КІН  $\Delta K_{th\text{eff}} = \Delta K_{th}$  при асиметриях циклу  $R \geq 0,7$ . Крім того, деякі з них встановили, що для будь-якого металу ефективний розмах порогового КІН залежить, в першу чергу, від модуля пружності  $E$  матеріалу і приблизно дорівнює

$$\Delta K_{th\text{eff}} = B \cdot E, \quad /6/$$

де  $B \approx 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1/2}$ .

Для перевірки зробленого припущення були проведені випробування на циклічну тріщиностійкість при асиметрії  $R = 0,7$  сплаву ВТЗ-І у стані 4, що дали значення порогового розмаху КІН  $\Delta K_{th} = 2,055 \text{ МПа}\sqrt{м}$ . Це значення практично співпадає зі значеннями  $U' \cdot K_{th}$  /див.табл. 3/.

З іншого боку, для сплаву ВТЗ-І  $\Delta K_{th\text{eff}}$ , який був розрахований за формулою /6/ /при цьому брався динамічний модуль пружності  $E = 12,75 \cdot 10^4 \text{ МПа/}$ , має значення  $2,04 \text{ МПа}\sqrt{м}$ , тобто також практично співпадає зі значеннями  $\Delta K_{th}$  при  $R = 0,7$  і  $U' \cdot K_{th}$  з табл. 3.

На підставі сказаного вище формула /4/ може бути представлена в наступному вигляді

$$G_{-1} = \frac{\Delta K_{th\text{eff}}}{Y \sqrt{d}}. \quad /7/$$

Підстановка  $\Delta K_{th\text{eff}} = 2,04 \text{ МПа}\sqrt{м}$ , розрахованого за формулою /6/, і  $Y = 1,99$  або  $Y = 1,12 \sqrt{\pi}$  /в загальному випадку для згину

$$Y = 1,99 - 2,47 \frac{l}{b} + 12,97 \left(\frac{l}{b}\right)^2 - 27,13 \left(\frac{l}{b}\right)^3 + \dots$$

але при довжині тріщини  $l = l_0$  достатньо взяти тільки перший член ряду, оскільки іншими можна знехтувати/ у вираз /7/ дає рівняння, аналогічне рівнянню /1/, отриманому експериментальним шляхом, тобто

$$G_{-1} = A' \cdot d^{-1/2}, \quad /8/$$

де  $A' = 1,025 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Цей результат підтверджує правильність зробленого припущення, що  $U' \cdot K_{th} \cong \Delta K_{th \text{ eff}}$ . Очевидно також, що коефіцієнт  $U'$  є в нашому випадку коефіцієнтом відкриття тріщини, аналогічним  $U$  у формулі /5/.

В табл. 3 представлені границі витривалості  $G_{-1}$  і порогові КІН  $K_{th}$ , отримані з експериментів, і границі витривалості  $G_{-1}^{розр.}$ , розраховані за формулою /7/ із застосуванням формули /6/, які показали задовільний збіг результатів експерименту й розрахунку  $-1,5\% \leq \Delta G_{-1} \leq +3,5\%$ . Крім того, в цій таблиці наведені значення  $l_0$ , розраховані за експериментальними результатами з допомогою формули /2/, коефіцієнта  $\eta = l_0/d$ , коефіцієнта  $U' = \eta^{-1/2}$ , що є коефіцієнтом відкриття тріщини.

На підставі літературних даних для інших матеріалів: двофазних титанових сплавів Ti-6Al-4V і 6242 і однофазного сплаву на нікелевій основі ЗИ437БВД були розраховані границі витривалості  $G_{-1}$  за формулами /6/ і /7/. В табл. 4 наведені результати цього розрахунку, які також показують задовільну відповідність експериментальних результатів і розрахунку.

Таблиця 4

Матеріал	$E \cdot 10^{-4}$ МПа	Середній розмір струк. елемента, мкм ( $\alpha$ -глоб. зерна)	$G_{-1}$ МПа	$G_{-1}^{розр.}$ МПа	$\Delta G_{-1}$ %
/аналог спла- ва ВТ-6/	11,9	2	620	677	+9
6242 /аналог спла- ва ВТ18У/	13,2	5	500	475	-5
ЗИ437БВД	19,8	20	350-370	352	-1+6

Примітка: випробування на втому при круговому згині в повітрі;  
база випробувань -  $N = 10^7$  циклів.

Слід також відзначити, що між коефіцієнтом відкриття тріщини  $U' = (l_0/d)^{-1/2}$  і твердістю  $HV$  для дослідженого сплаву ВТЗ-І був виявлений лінійний взаємозв'язок у вигляді

$$U' = C_1 \cdot HV + C_2, \quad / 9/$$

де  $C_1 = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ ,  $C_2 = -1,29$ .

Таким чином, можна зробити висновок, що рівняння /7/ можна застосовувати для прогнозування границі витривалості як двофазних титанових сплавів, що мають дисперсну глобулярну структуру, так і однофазних сплавів, але тільки тих, в яких тріщина втомі зароджується і розвивається по тілу зерна, бо у випадку зародження і розвитку тріщини вздовж границь зерен неможливо визначити середній характеристичний розмір структурного параметру, і прогнозування границі витривалості за формулою /7/ для такого класу матеріалів буде некоректним. Очевидно також, що розроблена модель /7/ не може застосовуватись для монокристалів /тобто коли  $d \rightarrow \infty$ /.

### III. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексне експериментальне дослідження характеристик опору втомі, циклічної тріщиностійкості, статичної міцності, пластичності і мікроструктури двофазного титанового сплаву ВТЗ-І в різних структурно-текстурних станах, отриманих в результаті варіювання режимів термомеханічної обробки сплаву.

2. Показано, що причиною відмінності характеристик опору втомі є утворення в результаті різних режимів ТМО структури різної дисперсності і текстури різної інтенсивності. Для структурних станів сплаву, що досліджувались, границя витривалості монотонно підвищується зі зменшенням середнього розміру структурного параметру, що відповідає за циклічну міцність сплаву. Встановлено, що такими параметрами для даного сплаву є середній діаметр  $d$  -глобулів у глобулярних структурах і товщина пакету  $d$  -пластин для дрібнопластинчатих структур.

3. На довговічність гладких зразків при амплітудах напружень вище границі витривалості поряд з розміром структурного параметру визначальний вплив робить текстура матеріалу.

4. Якщо на етапі зародження тріщини втомі сплав ВТЗ-І з глобулярними структурами веде себе по різному, то в процесі її розвитку суттєвих відмінностей у поведінці матеріалу не спостерігається, що пояснюється локалізацією тріщини в одній фазі на стадії її зародження і її розвитком на обох фазах, а також

ефектом закриття тріщини на стадії росту магістральної тріщини.

5. Використовуючи отриману експериментальну залежність  $G_{-1} = f(d)$ , а також підходи лінійної механіки руйнування, розроблена розрахункова модель границі витривалості полікристалічного матеріалу, що заснована на припущенні про наявність тріщин, які не розвиваються при діючих рівнях амплітуд напружень, рівних границі витривалості. Модель дозволяє за даними про розміри структурних параметрів і модуля пружності сплаву прогнозувати величину границі витривалості.

6. Оптимальною термомеханічною обробкою сплаву ВТЗ-І є ТМО за режимом 4 /табл. І/, після якої сплав має найвищі характеристики опору руйнуванню від втоми в поєднанні з досить високою статичною міцністю і пластичністю.

#### ІУ. ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

І. Богуслаєв В.А., Герасимчук О.Н., Городецкий С.С. и др.

Влияние технологических факторов на сопротивление усталости титанового сплава ВТЗ-І // Всесоюз. сем. "Поверхностный слой, эксплуатационные свойства деталей машин и приборов". - Тез. докл. - М., - 1991. - С. 63-67.

2. Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Герасимчук О.Н. и др.

Влияние термо-механической обработки на сопротивление усталости титанового сплава ВТЗ-І // Пробл. прочности. - 1992. - № 6. - с. 12-19,

3. Богуслаєв В.А., Ивасишин О.М., Герасимчук О.Н. и др. Оптимизация физико-механических свойств конструкционных и жаропрочных титановых сплавов путем регламентации режимов термо-механической и термической обработок // У науч.тех. конф.

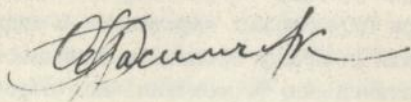
"Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий". - Тез. докл. - Запорожье. - 1992. - с.92.

4. Герасимчук О.Н., Грязнов Б.А., Налимов Ю.С. и др. Сопротивление усталости жаропрочных титановых сплавов с различной структурой // XXV Междунар.научно-технич.совещ. по проблемам прочности двигателей. - Тез. докл. - М. - 1994. с.22.

5. Троценко В.Т., Грязнов Б.А., Герасимчук О.Н. и др. Сопротивление усталости и циклическая трещиностойкость титанового сплава ВТЗ-І в различных структурных состояниях. Сообщ. I.

Методика исследования и экспериментальные результаты // Пробл. прочности. - 1995. - № 5,6. - с. 3-II.

6. Троценко В.Т., Грязнов В.А., Герасимчук О.Н. и др. Сопротивление усталости и циклическая трещиностойкость титанового сплава BT3-I в различных структурных состояниях. Сообщ. 2. Методика учета влияния структуры на предел выносливости // Пробл.прочности. - 1995. - № 5,6. - с.12-17.



Герасимчук О.Н. Виносливість і циклічна тріщиностійкість титанового сплава ВТЗ-1 в різних структурних станах.

Дисертація на соискание ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.02.09. - Динаміка, міцність машин, приборів і апаратури. Інститут проблем міцності НАН України. Київ, 1996.

В дисертації представлені і проаналізовані експериментальні результати дослідження характеристик опору втоми, циклічеської тріщиностійкості, статическої міцності і структури титанового сплава ВТЗ-1 в різних структурно-текстурних станах. Розроблена і обґрунтована розрахункова модель межі виносливості матеріала, що враховує фактор структури і заснована на припущенні про наявність нерозвиваючихся тріщин на рівнях амплітуд напружень, рівних межі виносливості.

Herasyrchuk O.M. Fatigue of titanium alloy BT3-1 in different structural states.

Thesis for competition of candidate's degree in Mechanics under the specialization cod 05.02.09. - Dynamics, strength of machines, instruments and apparatus. Institute for problems of strength of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 1996.

The experimental results of fatigue, fatigue fracture, static strength, plasticity and structure research of titanium alloy BT3-1 in different structural and textural states are presented and analyzed. The fatigue limit calculating model considering structural factor are developed and proved. The model is based on the assumption of non-propagating cracks presence under fatigue limit loading level.

Ключові слова: витривалість і циклічна тріщиностійкість, структура і кристалографічна текстура, границя витривалості, пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень, структурний параметр.

ЛНБ ім. В. Стефанива  
АН України

Підп. до друку 16.05.96. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 0,81. Ум. фарбо-відб. 0,89.  
Обл.-вид. арк. 1.01. Тираж 100 прим. Сам. 141.  
Дільниця ротапринтного друку ВНТІ ПМІП. НАН України  
252014, Київ-14, вул.Тімірязєвська, 2.

133000

447264

AB 34.951

**AB 34.951**