

Влияние состава, структуры и термообработки новых жаростойких титановых сплавов на основе системы Ti—Al—Si—Zr на их механические свойства

Ю. Ф. Луговской, Л. Д. Кулак, Н. Н. Кузьменко,
О. В. Дацкевич, С. А. Спиридонов

Институт проблем материаловедением им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: lugovskoi_U@ukr.net

Исследовано влияние состава, структуры и термообработки жаростойких титановых сплавов на основе системы Ti—Al—Si—Zr на их механические свойства при статическом и циклическом нагружениях. Закалка повышает пластичность исследованных материалов до 8%. После термоциклирования до 710 °С сопротивление усталости нового сплава выше аналогичной величины сплава Ti6242 на 27%.

Ключевые слова: состав, структура, титановые сплавы, прочность, усталость.

Повышение жаростойкости и жаропрочности конструкционных материалов на основе титана непосредственно влияет на эффективность работы авиакосмических изделий и поэтому является важной задачей. В работах [1, 2] показано, что новые сплавы на основе системы Ti—Al—Si—Zr имеют высокие характеристики жаростойкости и жаропрочности. В частности, установлено, что жаростойкость сплава состава Ti—(6,5—7,5)Al—(1,1—1,3)Si—(3—4)Zr существенно превышает таковую известного сплава Ti6424 (США). Однако исследования структуры и механических свойств указанных материалов проведены в недостаточном объеме.

Цель работы — изучить влияние состава, структуры и термообработки исследованных материалов на их механические свойства при статическом и циклическом нагружениях при комнатной температуре.

Материалы и методы испытаний

Материалы для исследования получали плавкой исходных компонентов в электронно-лучевой литейной установке на базе вакуумной индукционной печи ИСВ-004. В качестве литейных форм использовали цилиндрические графитовые и стальные кокили диаметром 65 мм. Деформирование заготовок проводили в три этапа: одноразовой осадкой на гидропрессе, ковкой и конечной деформацией прокаткой на прокатном стане при температуре существования α -фазы. Общая степень деформации 94—96%. Температура прокатки 950—960 °С, степень прокатки за один цикл 5—8%.

Структуру сплавов исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии на оптическом микроскопе Jenaphot-2000 и электронном микроскопе Jeol с рентгеновским микроанализатором Superprobe-733.

© Ю. Ф. Луговской, Л. Д. Кулак, Н. Н. Кузьменко, О. В. Дацкевич,
С. А. Спиридонов, 2015

Механические свойства при растяжении определяли на электромеханической испытательной установке УТМ-100 с максимальным нагружением 100 кН со скоростью движения захватов 2,5 мм/мин. Модуль упругости E материалов рассчитывали по методикам работы [3] путем возбуждения в образцах ультразвуковых продольных колебаний. При этом фиксировали резонансные колебания на первой форме указанных колебаний и рассчитывали модуль упругости по формуле

$$E = 4\rho l^2 f^2, \quad (1)$$

где ρ — плотность; l — длина образца; f — частота собственных продольных колебаний. Величину модуля упругости материалов определяли как среднее значение модуля упругости трех образцов.

Сопротивление усталости материалов при консольном изгибе на частоте 2,4 кГц исследовали по методике и на оборудовании, описанном в работе [4]. Максимальное напряжение в опасном сечении образца рассчитывали, используя измерение его амплитуды колебаний в двух точках — на его свободном конце W_0 и в месте закрепления W_1 :

$$\sigma = 2\pi f W_0 (3E_2\rho_2)^{1/2} [U(\alpha x) + PV(\alpha x)], \quad (2)$$

где коэффициент P и аргумент αx функций А. Н. Крылова определяли из выражения

$$P = -T(\alpha x) / U(\alpha x) = [-S(\alpha x) - W_0/W_1] / T(\alpha x), \quad (3)$$

а величина $\alpha = 3,14$. Анализ погрешностей величин, входящих в формулу для расчета напряжений по данной методике, показал, что основной вклад вносят измерения амплитуды W_0 (2%), модуля Юнга (1,5%) и плотности (0,7%) исследуемого материала. Погрешности определения величин α и P , входящих в формулу (3), слабо влияют на точность расчетов. Суммарная систематическая погрешность расчета напряжений по формуле (2) составляет порядка 4,5%.

Образцы для усталостных испытаний получали из деформированных заготовок толщиной 5 мм в виде полосок размерами 50 x 5 x 1 мм. Образцы вырезали алмазным кругом в условиях водяного охлаждения с последующей ручной обработкой поверхности образцов до зеркального блеска. Острые кромки затупляли и полировали.

Экспериментальные результаты и их анализ

Химический состав и свойства исследованных материалов представлены в табл. 1 и на рис. 1. Анализ химического состава материалов показал, что исследованные сплавы содержат 6—7,3% (мас.) алюминия, который является стабилизатором α -фазы. При этом промышленный сплав № 1 содержит (при 6% Al) β -стабилизаторы: 2% Sn и 2% Mo (то есть имеет смешанную $\alpha + \beta$ структуру), а также 4% Zr для увеличения жаропрочности.

Сплавы № 2—4 отличаются от сплава № 1 тем, что в них не присутствуют β -стабилизаторы. В них использованы добавки нейтрального Si, а также Al в качестве стабилизатора α -фазы и применена термомеханическая обработка.

Сопоставление свойств материалов, приведенных в табл. 1 и на рис. 1, показало, что предел прочности материала № 1 на 30% меньше,

Т а б л и ц а 1. Состав и свойства жаропрочных титановых сплавов в исходном и после прокатки состоянии

| Номер сплава | Состав сплава, % (мас.) | ρ , г/см ³ | E , ГПа | $\sigma_{в}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta_{общ}$, % | σ_{-1} , МПа |
|--------------|------------------------------|----------------------------|-----------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | Ti—6242 (Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo) | 4,54 | 120 | 1082 | 996 | 11,8 | 730 |
| 2 | (Ti—6,2Al—1,1Si—3,3Zr | 4,49 | 126 | 1128 | 1070 | 10,2 | 500 |
| 3 | Ti—6,7Al—1,26Si—3,7Zr | 4,45 | 128 | 1285 | 1220 | 4,1 | 610 |
| 4 | Ti—7,3Al—1,36Si—3,7Zr | 4,45 | 121 | 1321 | 1260 | 3,5 | 720 |
| 5 | Ti—6Al—4V | 4,43 | 112 | | | | 480 |

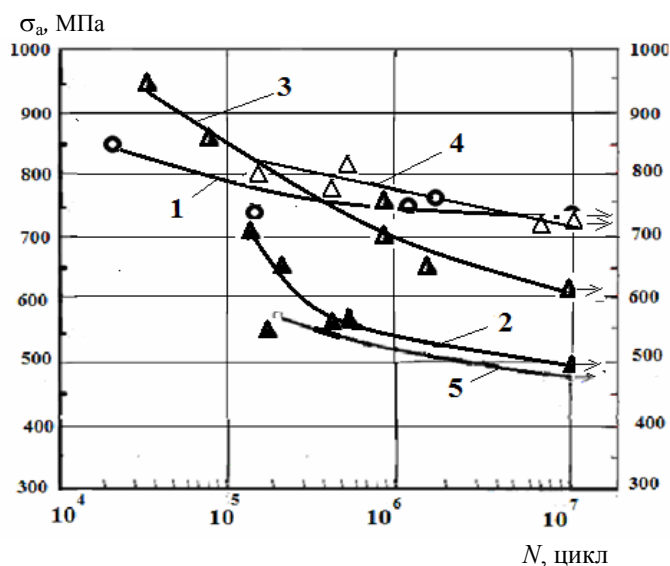


Рис. 1. Кривые усталости титановых сплавов: 1 — о — Ti6424; 2 — ▲ — Ti—6,2Al—1,1Si—3,3Zr; 3 — ▲ — Ti—6,7Al—1,26Si—3,7Zr; 4 — Δ — Ti—7,3Al—1,36Si—3,7Zr; 5 — Ti—6Al—4V.

относительное удлинение в 3 раза больше, чем у материала № 4, а выносливость указанных материалов на базе 10^7 циклов одинакова — 720—730 МПа в пределах погрешности методики их определения. При этом в диапазоне 10^5 — 10^6 циклов материал № 4 имеет небольшое преимущество по сравнению с материалом № 1. Данные о сопротивлении усталости наиболее часто используемого титанового сплава Ti—6Al—4V (№ 5), полученного по указанной методике испытаний, совпадают с известными из справочника [5] результатами. Это подтверждает корректность примененной методики усталостных испытаний титановых сплавов при высокой частоте нагружения.

Поиск оптимального сочетания таких ключевых для конструкционных материалов характеристик, как $\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$, δ и σ_{-1} , привел к дополнительному изучению влияния отпуска и закалки исследуемых материалов на

Т а б л и ц а 2. Режимы термообработки и свойства жаропрочных титановых сплавов системы Ti—Al—Si—Zr

| Состав сплава | Термообработка | ρ , г/см ³ | E , ГПа | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta_{общ}$, % | σ_{-1} , МПа | |
|----------------------|------------------------|----------------------------|-----------|------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----|
| Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr | Отпуск при 800 °С, 2 ч | 4,45 | | 1112 | 1088 | 0,6 | | |
| | Закалка от 900 °С, 1 ч | | | 120 | 1100 | 1034 | 7,7 | 740 |
| | Закалка от 950 °С, 1 ч | | | | 1100 | 1035 | 7,6 | |
| Ti—6,5Al—1,6Si—1,8Zr | Отпуск при 800 °С, 2 ч | 4,45 | 128 | 1163 | 1110 | 1,4 | | |
| | Закалка от 950 °С, 1 ч | | | | 1154 | 1066 | 6,8 | |
| | Закалка от 900 °С, 1 ч | | | 118 | 1154 | 1103 | 7,9 | 660 |

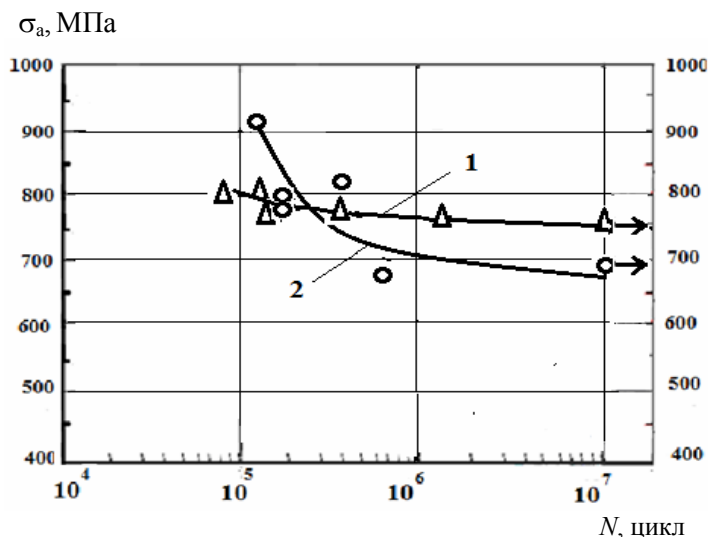


Рис. 2. Кривые усталости титановых сплавов после закалки от 900 °С, 1 ч: 1— Δ —Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr; 2— \circ —Ti—6,5Al—1,6Si—1,8Zr.

указанные механические свойства. В табл. 2 и на рис. 2 представлены результаты соответствующих исследований. Анализ результатов табл. 2 показал, что прочность указанных сплавов после отпуска и закалки отличается незначительно, а пластичность увеличивается от 0,5 до 8%.

По данным рентгеновского анализа, структура представленных в табл. 2 материалов состоит из равноосных зерен α -фазы со средним размером 16 мкм и частиц силицидов Ti_5Si_3 и Ti_3Si . При этом в структуре материала Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr наблюдается заметно большее количество частиц силицидной фазы, чем в материале Ti—6,5Al—1,6Si—1,8Zr. Частицы имеют вид светлых равноосных образований одинакового размера диаметром ~ 2 мкм, расположенных преимущественно цепочками, вероятно, по контуру границ зерен. Различие в их

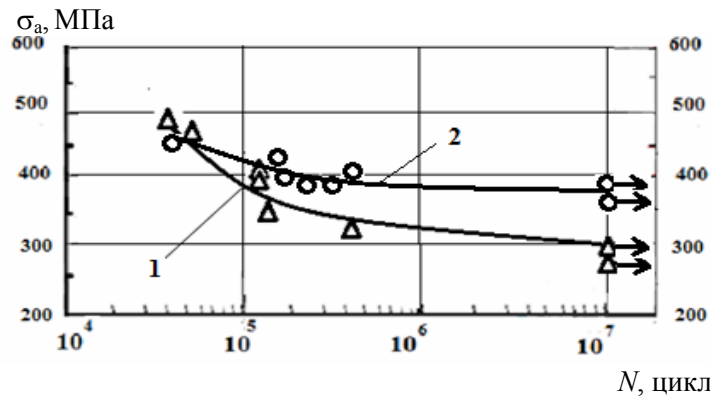


Рис. 3. Кривые усталости сплавов титана после термоциклирования: 1 — Δ — Ti6242; 2 — \circ — Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr.

количестве, возможно, обусловлено несколько меньшим содержанием кремния и более высоким — легированием твердого раствора.

Важное практическое значение имеет циклическая прочность жаропрочного и жаростойкого материала после периодических циклов нагрева и охлаждения при эксплуатации. Для оценки такого свойства два из исследуемых материала подвергли термоциклированию, а именно нагреву в течение 15 мин до 710 °С, а затем охлаждению до комнатной температуры в течение 5 мин с помощью вентилятора. Число циклов N составило 500.

Результаты механических усталостных испытаний титановых сплавов при комнатной температуре после термоциклирования, представленные на рис. 3, показали, что предел выносливости сплава Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr выше такового сплава Ti6242 на 27%.

Выводы

Структура исследованных материалов состоит из равноосных зерен α -фазы со средним размером зерна 16 мкм и равномерно расположенных по всему объёму частиц силицидов Ti_5Si_3 и Ti_3Si .

Прочность указанных сплавов после отпуска и закалки отличается незначительно, а пластичность увеличивается от 0,5 до 8%.

После термоциклирования до 710 °С предел выносливости сплава Ti—7,5Al—1,5Si—2,5Zr при комнатной температуре выше аналогичной величины сплава Ti6242 на 27%.

1. *Порядченко Н. Ю.* Дослідження поведінки сплаву BT1-0, легованого алюмінієм, кремнієм і цирконієм при окисненні на повітрі / [Н. Ю. Порядченко, М. М. Кузьменко, І. В. Оришич, Л. Д. Кулак] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2005. — 41, № 2. — С. 81—89.
2. *Фирстов С. А.* Изучение влияния пластической деформации на механические свойства эвтектических сплавов системы Ti—Si—Al—Zr / [С. А. Фирстов, Ю. Н. Подрезов, Н. Н. Кузьменко и др.] // Физика и техника высоких давлений. — 2002. — № 3. — С. 48—56.
3. *Кузьменко В. А.* Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. — Киев : Изд-во АН УССР, 1963. — 152 с.

4. Луговской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.
5. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: (Справ.) Ч. 2. / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. — К. : Наук. думка, 1987. — 1100 с.

Вплив складу, структури і термообробки нових термостійких титанових сплавів на основі системи Ti—Al—Si—Zr на їх механічні властивості

Ю. Ф. Луговський, Л. Д. Кулак, М. М. Кузьменко, О. В. Дацкевич,
С. А. Спиридонов

Досліджено вплив складу, структури й термообробки жаростійких титанових сплавів на основі системи Ti—Al—Si—Zr на їх механічні властивості при статичному та циклічному навантаженнях. Гартування підвищує пластичність досліджуваних матеріалів до 8%. Після термоцикування до 710 °C опір утоми нового сплаву вище аналогічної величини сплаву Ti6242 на 27%.

Ключові слова: склад, структура, титанові сплави, міцність, втома.

The influence of the composition, structure and thermal treatment titanium alloys on the basis of the system Ti—Al—Si—Zr to their mechanical properties

U. F. Lugovskoi, L. D. Kulak, N. N. Kuzmenko, O. V. Dackevich,
S. A. Spiridonov

The influence of the composition, structure and thermal treatment titanium alloys on the basis of the system Ti—Al—Si—Zr to their mechanical properties in static and cyclic loading were investigated. Quenched raises plasticity of investigated materials up to 8%. After temperature cycling to 710 °C with new alloy fatigue resistance higher than above similar magnitude alloy Ti—6242 at 27%.

Keywords: composition, structure, titanium alloys, strength, fatigue.