

Упругость и усталость деформированных сплавов системы Ti—Si при высокочастотном нагружении

С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговской, Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак,
С. А. Спиридонов

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича
НАН Украины, Киев, e-mail: lugovskoi u@ukr.net

Методами резонансных колебаний исследованы упругие и усталостные свойства при изгибе на частоте нагружения 2,4 кГц известных титановых сплавов (BT1 и BT6 (Ti—6Al—4V)), а также титановых деформированных сплавов системы Ti—Si с содержанием кремния 0,1—6% (мас.). Показано, что свойства сплавов BT1 и BT6 соответствуют известным результатам, это указывает на достоверность примененных методик испытаний. В сплавах системы Ti—Si упругие и усталостные свойства возрастают с увеличением содержания кремния и превышают усталостные свойства широко используемого сплава BT6 по пределу выносливости и другим показателям на 6—48%.

Ключевые слова: титановые сплавы, кремний, упругость, предел выносливости.

Успехи в области машиностроения, в частности транспортного, в значительной мере зависят от свойств применяемых в этой отрасли материалов. Важным условием работы таких материалов и элементов конструкций является длительная и надежная эксплуатация в условиях циклических нагрузок. Для их экономичности важно также, чтобы масса таких изделий была минимальна. Поэтому значительный интерес представляют работы по созданию новых титановых сплавов с высокими механическими свойствами.

Обзор литературы

В 50—90 годы прошлого века разработка новых титановых сплавов была основана на создании структур, состоящих из смеси ГПУ (α) и ОЦК (β) фаз титана. В результате были получены высокопрочные сплавы на основе титана, которые имеют при комнатной температуре предел прочности 1000—1300 МПа. Это показано, например, в работах Глазнова С. Г., Моисеева В. Н. [1], Колачева Б. А. [2]. По данным Гриднева В. Н. с соавторами [3], предел прочности титановых сплавов достигал даже 1800 МПа при относительном удлинении до 3%.

Новый шаг в создании высокопрочных титановых сплавов сделан в работах Crossman F. W. [4], Мазура В. И. и других [5], Тарана Ю. Н. и других [6], где было показано, что в системе Ti—Si упрочняющая фаза возникает в процессе эвтектической кристаллизации, формируя структуру из титановой матрицы и силицидного каркаса. В дальнейшем эти исследования были продолжены в Институте проблем материаловедения. Так, в публикациях Фирстова С. А. и других [7, 8] обращено внимание на

© С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговской, Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак,
С. А. Спиридонов, 2013

сходство диаграммы фазовых равновесий системы Ti—Si с аналогичной и хорошо изученной диаграммой Чернова Fe—C. Отмечено, что в сплавах сопоставляемых систем присутствуют эвтектическое, эвтектоидное и мартенситное превращения, ограниченная растворимость легирующего элемента. Это позволило прогнозировать и установить структуры материалов, соответствующие характерным линиям и точкам сопоставляемых диаграмм фазовых равновесий, и, таким образом, создать научную основу для разработки нового класса титановых сплавов на базе системы Ti—Si.

В последние годы в Институте проблем материаловедения НАН Украины добились существенного улучшения пластических свойств сплавов системы Ti—Si в диапазоне содержания кремния 0—6% (мас.) с помощью термомеханической обработки [9—11]. При этом предел прочности исследуемых материалов достигал 1180 МПа, а относительное удлинение — 9%. Однако сопротивление усталости указанных материалов не было исследовано.

Цель данной работы — исследовать упругие и усталостные свойства деформированных сплавов системы Ti—Si.

Материалы и методы испытаний

Исследовали следующие материалы на основе титана. Во-первых, технически чистый титан ВТ1. Испытывали листовой материал толщиной 3 мм вдоль и поперек прокатки. Во-вторых, известный из литературы титановый сплав ВТ6, который использовали как базовый для сравнения сопротивления усталости с новыми материалами. Испытывали листовой материал толщиной 1 мм вдоль прокатки. В-третьих, четыре новых сплава на основе титана с различным содержанием кремния. Новые сплавы получали литьем, ковкой и прокаткой по технологиям, описанным в работах [9—11]. Образцы для усталостных испытаний вырезали из деформированных заготовок толщиной 5 мм в виде полосок размерами 50 x 5 x 1 мм алмазным кругом в условиях водяного охлаждения с последующей ручной обработкой поверхности образцов до зеркального блеска. Острые кромки затупляли и полировали.

Плотность сплава ВТ6 (4,43 г/см³), а также Ti (4,54 г/см³) и Si (2,33 г/см³) брали из справочника, а для других материалов рассчитывали по правилу смеси. Модуль упругости E материалов определяли по методикам работы [12] путем возбуждения в образцах ультразвуковых продольных колебаний. Величину модуля упругости материалов рассчитывали как среднее значение измерения модуля упругости трех образцов. Измерения сопротивления усталости исследованных материалов при консольном изгибе на частоте 2,4 кГц проводили по методике и на оборудовании, описанных в работе Луговского Ю. Ф. [13]. Максимальное напряжение в опасном сечении образца рассчитывали, используя измерения амплитуды колебаний образца в двух точках — на его конце W_0 и в закреплении W_1 :

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

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

$$P = -T((\alpha x)/U(\alpha x)) = [-S(\alpha x) - W_0/W_1]/T(\alpha x), \quad (2)$$

а величина $\alpha = 3,14$. Анализ величин, входящих в формулу для расчета напряжений по данной методике, показал, что основной вклад в погрешность расчета 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 (2), слабо влияют на точность расчетов. Суммарная систематическая погрешность расчета напряжений по формуле (1) составляет 4,5%.

Экспериментальные результаты и их анализ

Результаты определения модуля упругости и сопротивления усталости исследованных материалов представлены в таблице и на рис. 1.

Как видно на рис. 1, сопротивление усталости сплава Ti—0,1Si достаточно близко к усталостной кривой сплава ВТ6 и существенно превышает предел выносливости σ_{-1} сплава ВТ1. Кроме того, по показателю качества структуры — величине σ_{-1}/σ_B все деформированные сплавы системы Ti—Si примерно в 1,5 раза превосходят основной промышленный сплав ВТ6. По данным рис. 1 построена зависимость σ_{-1} титановых сплавов системы Ti—Si от массового содержания кремния (рис. 2). Она показывает, что даже небольшие добавки кремния и углерода в титановой матрице после соответствующей деформации резко увеличивают σ_{-1} . При содержании кремния 0,1% (мас.) предел выносливости выходит на уровень 510 МПа и далее медленно увеличивается до 710 МПа при содержании Si 6% (мас.).

Сравним эти результаты с данными М. Ninomi [14] на рис. 3 в координатах σ_{-1} — E . Как видно, известная зависимость между σ_{-1} и E характеризуется возрастанием предела выносливости конструкционных материалов с уменьшением модуля Юнга. Однако наши экспериментальные точки показывают рост σ_{-1}

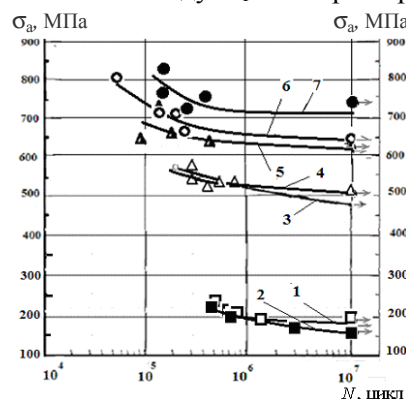


Рис. 1. Кривые усталости титановых сплавов: 1 — ВТ1 вдоль прокатки; 2 — ВТ1 поперек прокатки; 3 — ВТ6; 4 — Ti—0,1Si; 5 — Ti—2Si; 6 — Ti—4Si; 7 — Ti—6Si.

Состав и свойства деформированных титановых сплавов

Материал	ρ , г/м ³	E , ГПа	σ_B , МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа	σ_{-1}/σ_B	$\varepsilon_{-1} \cdot 10^{-3}$
ВТ1	4,53	111	400	30	190	0,475	1,71
		103	—	—	168	—	1,63
ВТ6 (Ti—6Al—4V)	4,43	115*	1100	7	480	0,436	4,17
Ti—0,1Si	4,52	110	800	30	510	0,637	4,64
Ti—2,1Si	4,49	113	980	16	620	0,633	5,49
Ti—4Si	4,45	125	1050	11	650	0,619	5,20
Ti—6Si	4,41	127	1150	10	710	0,617	5,59

*Вдоль прокатки листа ВТ6.

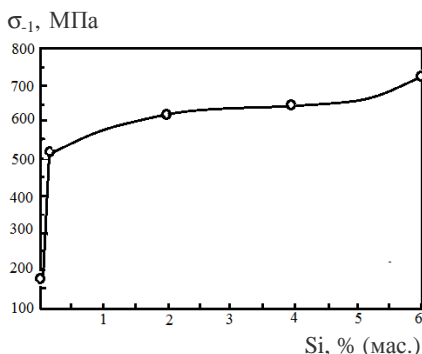


Рис. 2. Зависимость предела выносливости титановых сплавов системы Ti—Si от содержания кремния.

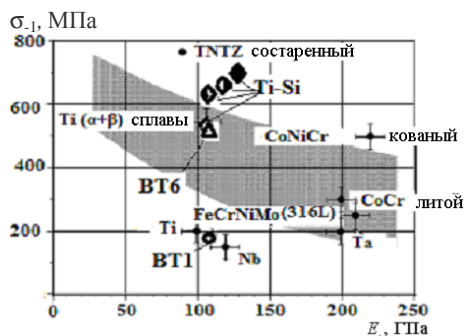


Рис. 3. Предел выносливости и модуль Юнга отдельных металлических материалов из работы [14], а также результаты авторов: ○ — BT1 (вдоль прокатки); △ — BT6 (вдоль прокатки); ◇ — 0,1Si; ◇ — 2Si; ◇ — 4Si; ◆ — 6Si.

при увеличении E для системы Ti—Si. Очевидно, что эта тенденция обусловлена иным механизмом упрочнения сплавов Ti—Si по сравнению с известными результатами на рис. 3. Для исследованных материалов системы Ti—Si, очевидно, работает правило смеси для упругих и прочностных свойств композиционного материала, состоящего из пластичной матрицы Ti—Si и частиц более прочной и высокомодульной упрочняющей фазы Ti_5Si_3 . Кроме того, полученный результат дает основания ожидать увеличения предела выносливости материалов системы Ti—Si при добавлении элементов, снижающих модуль Юнга, — β -стабилизаторов.

Кроме того, отношение $\sigma_{1.1}/\sigma_b$, характеризующее однородность структуры и отсутствие дефектов [15], показывает стабильные и высокие значения — на 40% больше, чем у промышленного сплава BT6. Следует отметить высокие значения предельной циклической деформации $\varepsilon_{1.1} = \sigma_{1.1}/E$ исследованных материалов системы Ti—Si по сравнению со сплавом BT6 (таблица). Эти данные могут быть важны при расчете предельных циклических деформаций в конструкциях со значительными прогибами, например в различных пружинах.

Выводы

Данные о модулях Юнга и пределах выносливости известных титановых сплавов BT1 и BT6 (лист), полученные по методикам высокочастотных испытаний, соответствуют известным результатам усталостных испытаний этих материалов, полученным по общепринятой методике.

Сопротивление усталости при изгибе на базе 10^7 циклов деформированных титановых сплавов Ti—Si с увеличением содержания кремния от 0,1 до 6% возрастает от 510 до 710 МПа, что существенно превышает усталостные свойства известного титанового сплава BT6.

Показатель бездефектности и однородности структуры $\sigma_{1.1}/\sigma_b$ исследованных материалов, их предельная циклическая деформация $\varepsilon_{1.1}$ и

модуль Юнга заметно превышают соответствующие величины широко используемого сплава ВТ6, что делает деформированные сплавы системы Ti—Si перспективными для применения в условиях циклического нагружения.

В сплавах системы Ti—Si наблюдается повышение предела выносливости с ростом модуля Юнга, а в известных титановых ($\alpha + \beta$) сплавах эта зависимость противоположна.

1. Глазунов С. Г. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. — М. : Metallurgia, 1974. — 338 с.
2. Колачев Б. А. Физическое металловедение титана. Серия "Успехи современного металловедения". — М. : Metallurgia, 1976. — 184 с.
3. Гриднев В. Н. Физические основы скоростного термоупрочнения титановых сплавов / В. Н. Гриднев, О. М. Ивасишин, С. П. Ошкадеров. — К. : Наук. думка, 1986. — 256 с.
4. Crossman F. W. Unidirectional solidified Ti—TiB and Ti—Ti₅Si₃ eutectic composites / F. W. Crossman, A. S. Yue // Met. Tras. — 1971. — 2, No. 6. — P. 1545—1555.
5. Мазур В. И. Влияние химического состава на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплавов для теплонапряженных деталей ДВС / [В. И. Мазур, С. В. Капустникова, И. Я. Демьянец и др.] // Двигателестроение. — 1989. — № 2. — С. 32—33.
6. Таран Ю. Н. Новые металлокерамические материалы на основе титана / [Ю. Н. Таран, В. И. Мазур, С. В. Капустникова и др.] // Металлы и литьё Украины. — 1999. — № 11—12. — С. 42—46.
7. Фирстов С. О. Нове покоління матеріалів на базі титану // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій/ Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Львів : ФМІ НАН України, 2004. — С. 609—616.
8. Фирстов С. А. Титановые "чугуны" и титановые "стали" / С. А. Фирстов, С. В. Ткаченко, Н. Н. Кузьменко // Металловедение и терм. обработка металлов. — 2009. — № 1 (613). — С. 14—20.
9. Кузьменко М. М. Розробка термомодеформованих титанових композитів системи Ti—Si—(Al, Zr) конструктивного призначення для використання в інтервалі температур 20—700 °С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К. : Ин-т пробл. металловедення НАН України, 2006. — 21 с.
10. Кузьменко М. М. Вплив пластичного деформування на структуру та механічні властивості сплавів системи Ti—Si // Современные проблемы физического металловедения. — К. : Ин-т пробл. металловедення НАН України, 2006. — Вып. 16. — С. 118—121.
11. Кузьменко М. М. Дослідження структури та механічних властивостей литих сплавів системи Ti—Si // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2008. — 44, № 1. — С. 45—48.
12. Кузьменко В. А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. — К. : Изд-во АН УССР, 1963. — 152 с.
13. Луговской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.
14. Nipoti M. Fatigue characteristics of metallic biomaterials // Internat. J. of Fatigue. — 2007. — 29. — P. 992—1000.
15. Тетельман А. С. Разрушение высокопрочных материалов / А. С. Тетельман, А. Дж. Мк. Эвили // Разрушение металлов / Пер. с англ. — М. : Metallurgia, 1976. — Т. 6. — 496 с.

Пружність і втома деформованих сплавів системи Ti—Si при високочастотному навантаженні

С. О. Фірстов, Ю. Ф. Луговський, М. М. Кузьменко, Л. Д. Кулак,
С. А. Спірідонов

Методами резонансних коливань досліджено пружні та втомні властивості при згині на частоті навантаження 2,4 кГц відомих титанових сплавів VT1 і VT6 (Ti—6Al—4V) та деформованих сплавів системи Ti—Si із вмістом кремнію 0,1—6%. Показано, що властивості сплавів VT1 и VT6 відповідають відомим результатам, це вказує на достовірність застосованих методик випробувань. У сплавах системи Ti—Si пружні та втомні властивості зростають з підвищенням вмісту кремнію і перевищують втомні властивості широко відомого сплаву VT6 за показником границі витривалості та іншим на 6—48%.

Ключеві слова: титанові сплави, кремній, пружність, границя витривалості.

Elasticity and fatigue of Ti—Si system deformed alloys at highfrequency load

S. A. Firstov, U. F. Lugovskoi, N. N. Kuzmenko, L. D. Kulak, S. A. Spiridonov

Elastic and fatigue properties, with the frequency of the load 2,4 kHz of known titanium alloys VT1(Ti) and VT6 (Ti—6Al—4V)), and also the deformed alloys of system Ti—Si with the content of silicon from 0,1 to 6% by resonance methods are investigated . It is shown, that the properties of alloys VT1 and VT6 correspond to known results, which indicates the authenticity of the used test procedures. In the alloys of system Ti—Si elastic, fatigue properties grow with an increase in the content of silicon and exceed the same properties of alloy VT6 from 6 to 48%.

Keywords: titanium alloys, silicon, elasticity, fatigue limit.