

УДК 620.720

Ю.Ф. Луговской, в. н. с., д-р техн. наук,
Л.Д. Кулак, с. н. с., канд. техн. наук,
Н.Н. Кузьменко, с. н. с., канд. техн. наук,
Н.В. Ульянович, н. с.

Институт проблем материаловедения НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина.
E-mail: ulnata@ukr.net

УСТАЛОСТНЫЕ ИЗЛОМЫ И ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-Si

Исследованы усталостные изломы и оценена трещиностойкость деформированных титановых сплавов системы Ti-Si с содержанием кремния от 0,1 до 6%. Показано, что усталостная трещина при изгибе образца прямоугольного сечения зарождается на его поверхности одновременно в нескольких местах в виде полуэллиптических трещин, которые имеют соотношение длины и глубины, в основном, 4 к 1. Повышение содержания кремния приводит к росту порогового коэффициента интенсивности напряжений от 4 до 7,9 МПа м^{0,5}, а глубина зародышевых поверхностных полуэллиптических трещин нормального отрыва составляет от 25 до 50 мкм.

Ключевые слова: титановые сплавы, кремний, структура, усталостные изломы, коэффициент интенсивности напряжений.

Введение

Новым классом титановых сплавов являются сплавы системы Ti-Si. В отличие от большинства промышленных титановых сплавов с твердорастворным упрочнением, сплавы системы Ti-Si относятся к дисперсно-упрочненным или композиционным материалам в зависимости от содержания кремния, то есть это гетерофазная система. Деформирование таких материалов и формирование их структуры в процессе деформации, существенно отличается от деформирования сплавов с гомогенными структурами. Если во втором случае в процессе деформирования решается задача измельчения размеров зерна, то в случае гетерофазной системы Ti-Si, кроме измельчения зерна, деформирование должно обеспечить разбитие и равномерное распределение по объему силицидов. Это приводит к повышению пластичности и реализации микромеханизма разрушения путем слияния пор. Для практического применения таких сплавов необходимо знать их усталостные характеристики и исследовать структуры усталостных изломов.

Целью работы было определение размеров характерных элементов структуры на усталостных изломах деформированных титановых сплавов системы Ti-Si, и использование их для оценки трещиностойкости исследованных материалов.

Материалы и методы исследований

В работе исследовали четыре сплава на основе титана с различным содержанием кремния. Эти сплавы получали литьем, ковкой и прокаткой [1-3].

Шлифы исследованных сплавов изготавливались путем механического шлифования абразивной бумагой зернистости 180-1000 мкм с постепенным переходом от абразивной бумаги с большей зернистостью к абразивной бумаге с меньшей зернистостью. Полирование образцов осуществлялось абразивной алмазной пастой с постепенным переходом от пасты с размером абразивных частиц 14-20 мкм к абразиву с наименьшим размером частиц 1 мкм. Химическое травление поверхности исследованных сплавов для выявления особенностей структуры проводилось реактивом следующего состава: H₂O – 70 %, HNO₃ – 25 %, HF – 5 %.

Усталостные изломы плоских образцов постоянного поперечного сечения размерами 50×5×1 мм исследованных материалов получали после их испытаний при консольном изгибе на частоте 2,4 кГц [4].

Микроструктуру, механизмы разрушения и распределение химических элементов по структуре изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского микроанализатора «JEOL-Superprobe-733».

Экспериментальные результаты и их анализ

Результаты исследования усталостных изломов представлены на рисунке 1.

Структура на усталостном изломе сплава Ti-0,1Si, наблюдавшаяся в электронный микроскоп мелкая, ровная, без следов роста трещины от дефектов в виде пор и неоднородностей. Трещины начинают свой рост от плоской поверхности образца, а затем образуют четверть эллиптическую

трещину. Начало роста трещин представлено на рисунке 1, б. Характерным признаком при их определении является наличие тонких светлых линий на поверхности излома, выходящих, как из центра, из области зарождения.

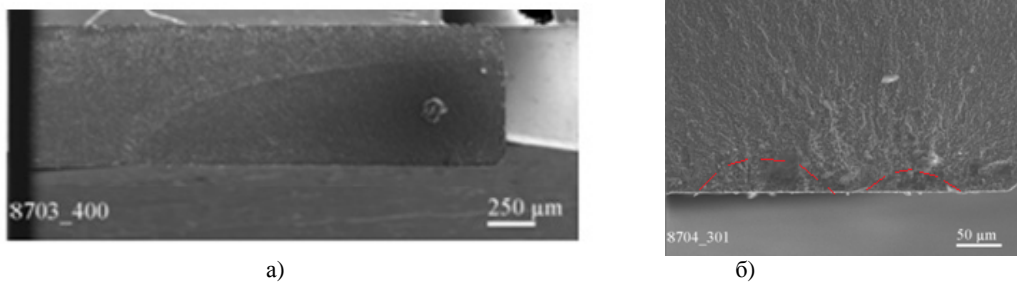


Рисунок 1 – Усталостный излом сплава Ti–0,1Si ($\sigma_a = 572$ МПа, $N = 4,2 \cdot 10^5$ ц):
а) общий вид излома, б) образование полуэллиптических усталостных трещин – глубина $b = 25$ мкм, длина $2a = 100$ мкм под действием нормальных напряжений

Аналогичные признаки усталостного разрушения характерны и для других исследованных деформированных сплавов системы Ti–Si.

Результаты определения размеров характерных зон усталостных изломов исследованных материалов и припороговые коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) представлены в таблице 1.

Расчет коэффициента интенсивности напряжений выполняли с использованием выражения (1) из работы Ньюмена и Раджи [5], приведенного в справочнике Мураками [6]

$$K_1 = H/E(k) \sigma_a (\pi b)^{0,5} F(b/a, b/t, a/W, \varphi). \quad (1)$$

Значения параметров трещины в выражении (1) представлены в таблице 1 при толщине образца $t = 1,0$ мм, ширине образца $2W = 5,0$ мм, координате на фронте трещины при $\varphi = 0^\circ$. При этом длина трещины $2a$, а её глубина – b . В итоге рабочая формула для расчета примет вид

$$K_{th} \approx K_1 = 1,588 \sigma_a (b)^{0,5}. \quad (2)$$

Таблица 1 – Размеры характерных участков на усталостных изломах исследованных материалов

№	Материал	Размеры характерных участков в обл. зарождения усталостных трещин	$K_{th}, \text{МПа м}^{0,5}$ (2)
1	Ti–0,1Si ($\sigma_a = 572$ МПа, $N = 4,2 \cdot 10^5$ ц), $\sigma_{-1} = 510$ МПа	$2a = 100$ мкм $b = 25$ мкм $b/t = 0,025$	4,54
2	Ti–2,0Si ($\sigma_a = 627$ МПа, $N = 4,5 \cdot 10^6$ ц), $\sigma_{-1} = 620$ МПа	$b_1 = 16$ мкм, $2a_1 = 64$ мкм $b_1/t = 0,016$ $b_2 = 31$ мкм, $2a_2 = 130$ мкм $b_2/t = 0,031$ $b_3 = 10$ мкм, $2a_3 = 80$ мкм $b_{cp} = 19$ мкм	3,98 5,54 3,15
3	Ti–4,0Si ($\sigma_a = 671$ МПа, $N = 2,9 \cdot 10^5$ ц) $\sigma_{-1} = 650$ МПа	$2a = 126$ мкм $b = 57$ мкм, из фрагментов $D = 30$ мкм	8,04
4	Ti–6,0Si ($\sigma_a = 752$ МПа, $N = 1,9 \cdot 10^5$ ц), $\sigma_{-1} = 710$ МПа	$2a_1 = 250$ мкм $b_1 = 60$ мкм $b_1/t = 0,060$, а также $2a_2 = 125$ мкм, $b_2 = 38$ мкм. Скол 125×156 мкм.	9,25 7,36

Выводы

Увеличение содержания кремния от 0,1 до 6% в деформированных титановых сплавах системы Ti–Si приводит к росту порогового коэффициента интенсивности напряжений в среднем от 4,0 до 7,9 МПа м^{0,5}, при этом глубина зародышевых поверхностных полуэллиптических трещин нормального отрыва (b) в среднем возрастает от 25 до 50 мкм.

Библиографический список использованной литературы

- Кузьменко М.М. Розробка термдеформованих титанових композитів системи Ti-Si-(Al,Zr) конструктивного призначення для використання в інтервалі температур 20-700 °С: авторефер. дис... канд. техн. наук / М.М. Кузьменко. — К., 2006. — 21 с.
- Кузьменко М.М. Вплив пластичного деформування на структуру та механічні властивості сплавів системи Ti-Si / М.М. Кузьменко // Современные проблемы физического материаловедения. — Киев, 2007. — Вып. 16. — С. 118–121.

3. Кузьменко М.М. Дослідження структури та механічних властивостей литих сплавів системи Ti-Si / М.М. Кузьменко // Фізико-хімічна механіка матер. — 2008. — Т. 44. — № 1. — С. 45–48.

4. Луговской Ю.Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением / Ю.Ф. Луговской // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61–65.

5. Newman J.C. (Jr.) An empirical stress intensity factor equation for the surface crack / J.C. Newman (Jr.), I.S. Raju // Eng. Fract. Mech. — 1981. — 15, No. 1-2. — P. 185–192.

6. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Т. 2: пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — 1016 с.

Поступила в редакцию 9.04.2013 г.

Луговський Ю.Ф., Кулак Л.Д., Кузьменко М.М., Ульянович Н.В. Сталі злами й оцінка тріщиностійкості деформованих титанових сплавів системи Ti-Si

Досліджено злами втоми та оцінена тріщиностійкість деформованих сплавів системи Ti-Si з вмістом кремнію від 0,1 до 6%. Показано, що тріщини втоми при згині зразка прямокутного перерізу зароджуються на його поверхні одночасно у кількох місцях у вигляді напівеліптичних тріщин, які мають співвідношення довжини до глибини, переважно, 4 до 1. Підвищення вмісту кремнію призводить до підвищення порогового коефіцієнту інтенсивності напружень від 4 до 7,9 МПа м^{0,5}, а глибина поверхневих напівеліптичних тріщин зародження нормального відриву складає від 25 до 50 мкм.

Ключові слова: титанові сплави, кремній, структура, злами втоми, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Lugovskoy U.F., Kulak L.D., Kuzmenko N.N., Ulyanchych N.V. Fatigue fracture surfaces and fracture toughness evaluation of deformed Ti-Si alloys

The fatigue fracture surfaces of deformed titanium alloys containing from 0.1 to 6% silicon were studied and their fracture toughness was evaluated. It was shown that bending of rectangular specimen results in simultaneous nucleation of a number of near-surface fatigue cracks in the form of semi-elliptical cracks which have a length-to-depth ratio typically 4:1. The increasing silicon content leads to growth of the threshold stress intensity factor from 4 to 7.9 MPa m^{0.5}, while the depth of nucleating semi-elliptical normal separation surface cracks is within 25-50 μm.

Keywords: titanium alloys, silicon, structure, fatigue fracture, stress intensity factor.