

Усталостные изломы и микроструктура деформированных сплавов системы Ti—Si

С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговской, Л. Д. Кулак, Н. Н. Кузьменко,
А. Ю. Коваль, В. Н. Нищенец

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

Исследованы усталостные изломы и микроструктура деформированных титановых сплавов системы Ti—Si с содержанием кремния 0,1—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 : 1. Повышение содержания кремния приводит к увеличению глубины зародышевых поверхностных полуэллиптических трещин нормального отрыва от 25 до 50 мкм.

Ключевые слова: титановые сплавы, кремний, структура, усталостные изломы, полуэллиптические трещины.

Титановые сплавы представляют значительный интерес в связи с их высокими удельными прочностными свойствами. Они часто используются там, где материал должен длительно и надежно работать в условиях циклических нагрузок как без трещины, так и с дефектами в виде трещин.

Обзор литературы и постановка задачи

Известны обобщающие работы В. Т. Трощенко [1] и О. П. Остаха [2], посвященные сопротивлению конструкционных материалов рассеянному (нелокализованному) и локализованному (от трещины) усталостному разрушению. Изучение зародившихся в материале трещин принципиально важно потому, что информация об их форме и размерах позволяет обосновать использование той или иной теоретической основы анализа результатов усталостных испытаний. Для характеристики усталости материала на гладких образцах наиболее часто используют величину предела выносливости при симметричном цикле нагружения $R = -1$, то есть σ_{-1} в моделях механики и физики твердого тела без трещин. Для характеристики локализованного усталостного разрушения применяют величины циклической трещиностойкости на образцах с трещиной $K_{th \max}$, K_{If} и другие в моделях коротких и длинных усталостных трещин.

В работах В. Т. Трощенко [1, 3] показано, что размер таких нераспространяющихся в гладких образцах трещин для среднеуглеродистых сталей составляет 50 мкм и уменьшается с ростом прочности сплавов. В работах О. М. Остаха [2, 4] введено понятие структурно-механической постоянной материала d^* , близкое по физическому смыслу нераспространяющейся трещине, но в вершине концентратора напряжений — надрезе. Показано

© С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговской, Л. Д. Кулак, Н. Н. Кузьменко,
А. Ю. Коваль, В. Н. Нищенец. 2013

для алюминиевых сплавов, что $d^* \approx 200$ мкм. Для титановых сплавов такие данные не найдены.

В монографии Б. А. Колачева и А. В. Малькова обобщены исследования по механизмам зарождения, развития и торможения микро- и макротрещин ряда конструктивных титановых сплавов [5]. Однако авторы не исследовали вопрос о форме и размерах нераспространяющихся усталостных трещин в гладких образцах.

В литературе отсутствует информация об усталости и усталостных изломах новых деформированных сплавов системы Ti—Si, представленных в работах С. А. Фирстова [6], а также Н. Н. Кузьменко [7].

В связи с этим цель данной работы — исследовать усталостные изломы и микроструктуру деформированных титановых сплавов системы Ti—Si.

Материалы и методы исследований

Исследовали четыре сплава на основе титана с различным содержанием кремния. Эти сплавы получали плазменно-дуговой плавкой в атмосфере аргона. Затем из слитка точением изготавливали заготовки диаметром 60 мм, длиной 100 мм и герметизировали их в капсулах. Заготовки с капсулой подвергали ковке со степенью деформации 90% при температурах 900—1050 °С. Затем их отжигали при температуре 800 °С в течение 2 ч [7].

Образцы для усталостных испытаний изготавливали из деформированных заготовок в виде полосок размерами 50 x 5 x 1 мм. Острые кромки образцов закругляли, а поверхности полировали.

Усталостные изломы плоских образцов постоянного поперечного сечения исследованных материалов получали после их испытаний в резонансном режиме колебаний при консольном изгибе на частоте 2,4 кГц [8] по методике Ю. Ф. Луговского [9]. Нагрева образцов при испытаниях даже в области больших амплитуд нагрузки не обнаружено. Испытания на усталость широко известного титанового сплава ВТ6 по данной методике подтвердили результаты, известные из литературы. Систематическая погрешность определения максимальных напряжений на рабочей поверхности образца составляла 4,5%.

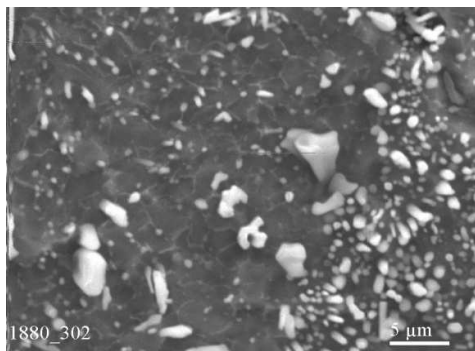
Микроструктуру и механизмы разрушения изучали с помощью бинокулярного оптического микроскопа МБС-9 и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL.

Экспериментальные результаты и их анализ

Структура исследованных материалов описана в работе Н. Н. Кузьменко [7]. Установлено, что сплавы системы Ti—Si имеют полухрупкую матрицу, состоящую из первичных β -зерен. Зерна, в свою очередь, состоят из пластинок β -Ti и прослоек α -Ti между ними. Для деформированного на 90% сплава Ti—2,1Si (% (мас.))^{*} установлено относительно равномерное распределение раздробленных первичных силицидов по всему объёму материала. Большие вытянутые частицы силицидов имеют размер примерно 5 x 1 мкм, мелкие частицы силицидов равноосной формы — размер менее 1 мкм и хаотично распределены по объёму.

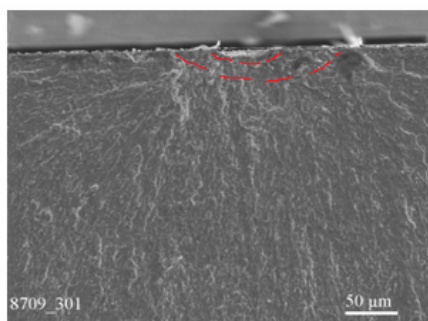
^{*}Здесь и далее составы сплавов приведены в % (мас.).

Рис. 1. Структура (СЭМ) деформированного ковкой на 90% сплава Ti—5,7Si.

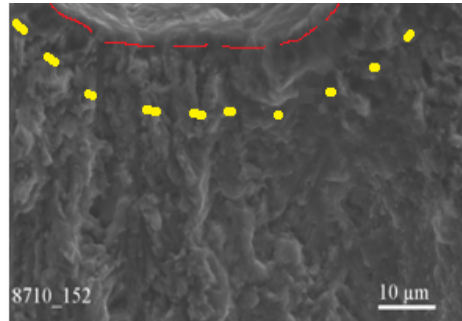


Увеличение содержания кремния до 5,7% (мас.) в деформированном сплаве (рис. 1) приводит к появлению отдельных, не связанных между собой фрагментов, по скоплениям которых видны места первичного расположения сплошного эвтектического каркаса по границам зерен. При этом крупные частицы силицидов имеют равноосную форму и размер около 5 мкм, а размер мелких частиц силицидов изменяется от 2 до >1 мкм. Расположение силицидных частиц по объёму менее равномерное, чем для сплава титана с меньшим содержанием кремния.

Результаты исследования усталостных изломов представлены на рис. 2 и 3. Также приведены данные об амплитудном значении разрушающего напряжения σ_a и числе циклов до разрушения N . Структура на усталостном изломе сплава Ti—Si, наблюдавшаяся в оптическом и электронном микроскопах, мелкая, ровная, без следов роста трещины от дефектов в виде пор и неоднородностей. Трещины начинают свой рост от плоской поверхности образца, что указывает на отсутствие влияния концентрации напряжений на его гранях. Развиваясь, они образуют четвертьэллиптическую трещину глубиной до 0,9 от толщины образца. При этом амплитуда резонансных колебаний образца уменьшалась примерно в 5 раз и усталостные испытания прекращались.

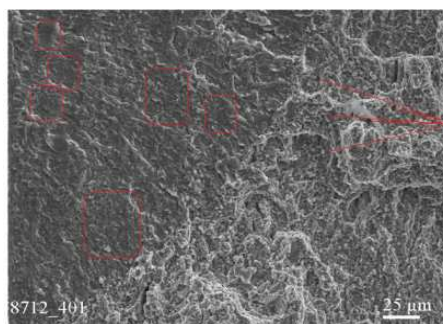


a



б

Рис. 2. Усталостный излом сплава Ti—2,0Si ($\sigma_a = 627$ МПа, $N = 4,5 \cdot 10^6$ циклов): *a* — начало зарождения полуэллиптической усталостной трещины; *б* — увеличенная область начала зарождения трещины; *в* — характерные области микроструктуры в месте остановки усталостной трещины (СЭМ).



в

Общая и типичная картина начала роста трещин представлена на рис. 2. Важным признаком при их определении является наличие тонких светлых линий на поверхности излома — ручьистого рельефа — характерного признака квазихрупкого разрушения [5, 10], которые как лучи сходятся в область зарождения усталостного разрушения (рис. 2, *a*). Более детальная картина области зарождения усталостного разрушения представлена на рис. 2, *б* при большем увеличении. На нем светлыми точками выделена область, от которой начинают расходиться светлые линии — начинается зона квазихрупкого излома. Главным признаком определения его границ является начало роста вертикальных бороздок — границ соседних микротрещин [5]. Интерес представляют также особенности усталостного и статического излома, которые удобно сравнивать в месте остановки усталостной трещины (рис. 2, *в*).

Как видно на рис. 2, *в*, вытянутые и сравнительно ровные участки движения усталостной трещины (УТ) (левый верхний угол) имеют площади $4,2 \times 25 = 105$ и $6 \times 30 = 180$ $\mu\text{м}^2$ соответственно, а в области статического долома темные равноосные пятна на более светлой поверхности — площадь $4 \times 4 = 16$ $\mu\text{м}^2$.

На рис. 3 усталостный излом материала Ti—4,0Si характеризуется участками хрупкого разрушения от поверхности образца, расположенной снизу. В отличие от предыдущего случая, на рис. 3, *a* показан целый ряд темных пятен — зародившихся трещин полуэллиптической формы, общая глубина которых выделена светлыми горизонтальными пунктирными линиями. От этих пунктирных линий, как от краевых трещин, и начинается рост микротрещин веером или перпендикулярно поверхности образца. При большем увеличении этих областей, кроме полуэллиптической формы на рис. 3, *б*, видно, что ручьистый рельеф

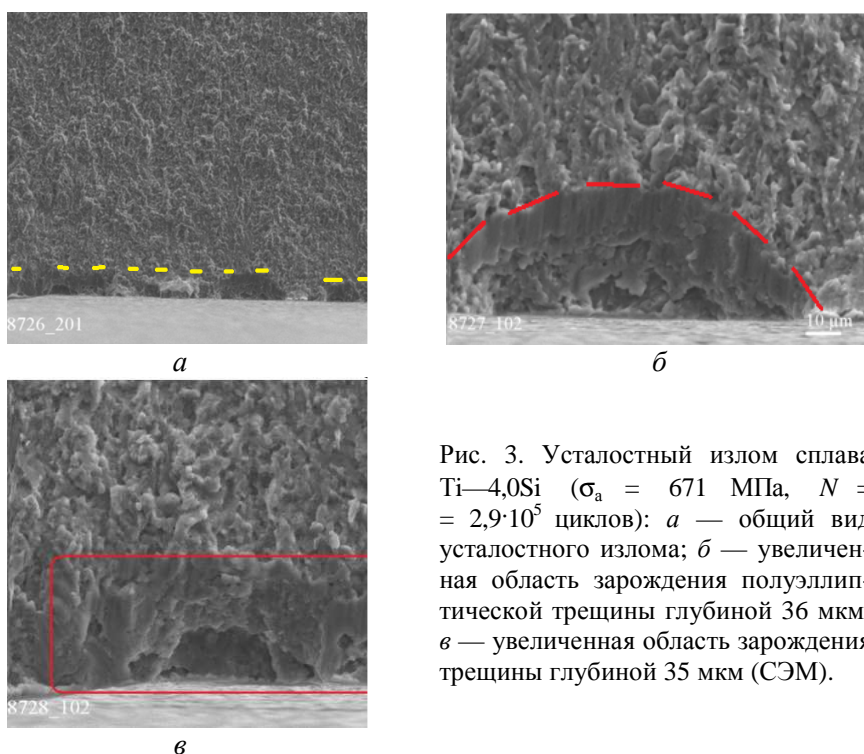


Рис. 3. Усталостный излом сплава Ti—4,0Si ($\sigma_a = 671$ МПа, $N = 2,9 \cdot 10^5$ циклов): *a* — общий вид усталостного излома; *б* — увеличенная область зарождения полуэллиптической трещины глубиной 36 $\mu\text{м}$; *в* — увеличенная область зарождения трещины глубиной 35 $\mu\text{м}$ (СЭМ).

Рис. 4. Схема типичной поверхности усталостных изломов титановых сплавов, предложенная в работе [5].



излома (след роста трещины в глубину образца) начинается непосредственно от края темного пятна

полуэллиптической формы на глубину 36 мкм. На рис. 3, в для нескольких рядом расположенных полуэллиптических трещин ситуация несколько иная. Сначала от небольшого темного пятна полуэллиптической формы продолжается область серого цвета практически прямоугольной формы. Она имеет внутри выделенного вытянутого прямоугольника одинаковую структуру — крупные фасетки скола глубиной 36 мкм, что свидетельствует о хрупком изломе и большой скорости роста трещины. От края этой выделенной области в глубь образца идут микротрещины в виде вертикальных извилистых полосок, образующих растущую усталостную макротрещину. Как видно на рис. 3, а, следов её остановки нет.

Сопоставление поверхностных дефектов в виде полуэллиптической (рис. 3, б) или иного вида трещины (рис. 3, в) указывает на то, что условия их движения были одинаковыми — хрупкий излом. Это дало основание выделить глубину этой и соседней области штриховыми линиями на рис. 3, а.

Отметим, что в монографии Б. А. Колачева и А. В. Малькова [5] для титановых ($\alpha + \beta$) сплавов с равноосной и пластинчатой структурой представлена схема роста усталостной макротрещины в направлении большой стрелки (рис. 4). Этот рост осуществляется путем одновременного движения нескольких малых трещин по направлению малых стрелок,

Размеры полуэллиптических трещин на усталостных изломах деформированных на 90% титановых сплавов системы Ti—Si

Материал	Размеры характерных участков в области зарождения УТ*
Ti—0,1Si ($\sigma_a = 572$ МПа, $N = 4,2 \cdot 10^5$ циклов)	$b_1 = 25$ мкм, $2a_1 = 100$ мкм
Ti—2,0Si ($\sigma_a = 627$ МПа, $N = 4,5 \cdot 10^6$ циклов)	$b_1 = 16$ мкм, $2a_1 = 64$ мкм; $b_2 = 31$ мкм, $2a_2 = 130$ мкм; $b_3 = 10$ мкм, $2a_3 = 80$ мкм. $b_{cp} = 19$ мкм
Ti—4,0Si ($\sigma_a = 671$ МПа, $N = 2,9 \cdot 10^5$ циклов)	$b_1 = 36$ мкм, $2a_1 = 126$ мкм, $b_2 = 33$ мкм, $2a_2 = 80$ мкм. $b_{cp} = 35$ мкм
Ti—6,0Si ($\sigma_a = 752$ МПа, $N = 1,9 \cdot 10^5$ циклов)	$b_1 = 60$ мкм, $2a_1 = 250$ мкм; $b_2 = 38$ мкм, $2a_2 = 125$ мкм, $b_{cp} = 49$ мкм

* $b_1, 2, 3, \dots$, $2a_1, 2, 3, \dots$ — значения глубин и длин поверхностных трещин, наблюдававшихся на поверхности исследуемого усталостного излома; 1, 2, 3 — количество указанных трещин.

которые образуют ручьистый узор веером, или перпендикулярно поверхности образца. Очевидно, что результаты на рис. 2, а и 3, а соответствуют схеме на рис. 4 для макротрещин. При этом, в дополнение к данным работы [5], на рис 2, б и 3, б, в представлены области зарождения усталостных трещин, уточняющие схему на рис. 4.

Результаты определения размеров характерных зон усталостных изломов исследованных материалов представлены в таблице. Из таблицы следует, что с ростом содержания кремния в исследованных материалах глубина b зародившихся полуэллиптических трещин увеличивается. При этом повышенный разброс значений b , особенно для сплава Ti—2,0Si, требует уточнения полученных результатов.

Выводы

Усталостные трещины зарождаются от угла образца или от широкой плоскости или чаще всего одновременно в нескольких местах и имеют форму полуэллипса. Магистральная трещина образуется при слиянии нескольких локальных полуэллиптических трещин.

Соотношение между длиной $2a$ и глубиной b большинства выделенных поверхностных трещин, от которых начинается разрушение, составляет 4 : 1. Это соотношение повторяет известные из литературы результаты, полученные на других материалах для полуэллиптических трещин. Следовательно, в исследованных титановых сплавах полуэллиптическая трещина развивается в соответствии с моделями линейной механики разрушения, то есть в гомогенной среде под действием нормальных напряжений, приложенных на бесконечно большом удалении от её берегов. Иное соотношение между $2a$ и глубиной b выделенных трещин указывает на вероятное слияние нескольких поверхностных дефектов в магистральную трещину, от которой начинается её стабильный рост.

Увеличение содержания кремния от 0,1 до 6% в деформированных титановых сплавах системы Ti—Si приводит к росту глубины зародившихся поверхностных полуэллиптических трещин от 25 до 50 мкм.

1. Трощенко В. Т. Нелокалізоване втомне пошкодження металів і сплавів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 26—38.
2. Остап О. П. Нові підходи в механіці втомного руйнування // Там же. — 2006. — № 1. — С. 13—25.
3. Трощенко В. Т. Зарождение и развитие усталостных трещин в конструкционных сталях / В. Т. Трощенко, В. И. Драган // The Techn. University for Heavy Industry. Ser C. — Miskolc. — 1983. — 39. — P. 211—224.
4. Ostash O. P. Fatigue process zon at nothes / O. P. Ostash and V. V. Panasyuk // Int. J. Fatigue. — 2001. — 23, No. 7. — P. 627—636.
5. Колачев Б. А. Физические основы разрушения титана / Б. А. Колачев, А. В. Мальков. — М. : Металлургия, 1983. — 160 с.
6. Фірстов 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.
7. Кузьменко М. М. Вплив пластичного деформування на структуру та механічні властивості сплавів системи Ti—Si // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2007. — Вып. 16. — С. 118—121.

8. Фирстов С. А. Упругие и усталостные свойства деформированных сплавов системы Ti—Si / [С. А. Фирстов, Л. Д. Кулак, Ю. Ф. Луговской и др.] // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Збір. наук. праць. — 2013. — Вип. 137. — С. 107—109.
9. Луговской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.
10. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. РД 50-672-88. — М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. — 19 с.

Злами втоми та мікроструктура деформованих сплавів системи Ti—Si

С. О. Фірстов, Ю. Ф. Луговський, Л. Д. Кулак, М. М. Кузьменко,
О. Ю. Коваль, В. М. Нищенець

Досліджено злами втоми та мікроструктуру деформованих сплавів системи Ti—Si з вмістом кремнію 0,1—6% (мас.). 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 : 1. Підвищення вмісту кремнію приводить до підвищення глибини поверхневих напівеліптичних тріщин від 25 до 50 мкм.

Ключові слова: титанові сплави, кремній, структура, злами втоми, напівеліптичні тріщини.

Fatigue fracture and microfracture of Ti—Si system deformed alloys

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

Fatigue fracture and microfracture the deformed alloys of system Ti—Si with the content of silicon from 0,1 to 6% are investigated. It is shown, that the fatigue cracks when bending sample rectangular cross section merging on the surface simultaneously in several places in the appearance of the and semi-elliptic cracks with the ratio of the length to the depth of, mainly, 4 to 1. Increase of the content of Silicon leads to increase the depth of the surface cracks of semi-elliptic normal cracks is from 25 to 50 microns.

Keywords: titanium alloys, silicon, structure, fatigue fractures, semi-elliptic cracks.