

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Р.М. Кашаев^{1,2*}, М.И. Нагимов¹, А.М. Хуснуллин¹

¹ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, г. Уфа, Россия

² Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, 450077, Уфа, Россия

*e-mail: rishat@kashaev.ru

Аннотация. Приведены кинетические диаграммы скорости роста усталостной трещины для титанового сплава Ti-6Al-4V с различной структурой: пластинчатой, глобулярной, бимодальной, а также его соединений, полученных линейной сваркой трением. Пластинчатая структура показала более высокую трещиностойкость, чем глобулярная и бимодальная. Циклическая трещиностойкость соединения, полученного линейной сваркой трением сравнима с трещиностойкостью титанового сплава Ti-6Al-4V с пластинчатой структурой. Для сплава с мелкозернистой глобулярной и бимодальной структурами для коэффициента интенсивности напряжений $< (15-20) \text{МПа м}^{0.5}$ скорость роста усталостной трещины в соединении, полученной линейной сваркой трением меньше, чем в основном металле, а для коэффициента интенсивности напряжений $> (15-20) \text{МПа м}^{0.5}$ скорость роста усталостной трещины в сварном соединении приближается к скорости роста трещины в основном металле.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, линейная сварка трением, титановые сплавы.

1. Введение

При линейной сварке трением две подлежащие сварке заготовки закрепляют в зажимных устройствах сварочной машины и прижимают друг к другу свариваемыми поверхностями с определенным усилием. Одна из заготовок неподвижна, а другой сообщают возвратно-поступательное движение (вибрацию) определенной частоты и амплитуды. В процессе трения в условиях плотного контакта происходит интенсивный разогрев приконтактных слоев материала обеих заготовок, сопротивление деформации металла резко снижается, и пластичный материал выдавливается из стыка с образованием грата. По достижении необходимой степени осадки вибрацию останавливают, генерация тепла прекращается, происходит окончательное формирование твердофазного соединения. Вследствие интенсивной пластической деформации в процессе линейной сварки трением шов имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами [1,2].

Линейная сварка трением перспективна для изготовления блисков (моноколес) газотурбинных двигателей (ГТД), то есть дисков, выполненных как одно целое с лопатками [1,3]. В процессе работы сварное соединение воспринимает воздействие различных силовых факторов. На первое место по силе влияния следует поставить циклический характер нагрузок. С другой стороны, опыт эксплуатации ГТД показывает,

что появления случайных металлургических, технологических или эксплуатационных острых дефектов, приводящих к возникновению трещин, избежать не удастся. Способность сопротивляться развитию трещины соединений, выполненных сваркой трением, имеет большое значение для обеспечения живучести таких конструкций. Поэтому, характеристики циклической трещиностойкости используются при проектировании, а также при эксплуатации ответственных деталей и узлов ГТД.

Таким образом, целью работы является оценка циклической трещиностойкости сварных соединений титанового сплава Ti-6Al-4V с различной исходной структурой: пластинчатой, глобулярной и бимодальной, полученных линейной сваркой трением.

2. Материалы и методика исследования

Материал: горячекатаный пруток из титанового сплава Ti-6Al-4V. Диаметр прутка 120 мм. Структура металла прутка – крупнозернистая пластинчатая с размером исходных β -зерен (0,5-1,5) мм. Для измельчения структуры прутки подвергали изотермической деформации при температуре 920°C. После отжига при температуре 800°C в течении 4 часов и охлаждения с печью сплав имел глобулярную структуру с размером зерен α -фазы около 10 мкм. После осадки на степень деформации 90% с температуры 940°C до 920°C сплав приобрел бимодальную структуру.

Испытания образцов были проведены по схеме трехточечного изгиба на сервогидравлической испытательной машине Schenck при комнатной температуре. Испытания были проведены с частотой нагружения $f=7$ Гц при синусоидальной форме нагружения с коэффициентом асимметрии цикла $R=0,2$. Измерение приращения длины трещины на боковой грани образца проводилось оптическим методом с применением оптического микроскопа и предметного столика микротвердомера ПМТ-3М. Использованы образцы размером 60x11x6 мм. Сварку трением осуществляли на лабораторной установке линейной сварки трением [3,4] по двум режимам. Режим А: частота вибрации – 19 Гц, амплитуда вибрации – 1 мм, время сварки – 9 сек, усилие сварки – 1,4 кН, усилие проковки – 4,4 кН; режим В: частота – 34 Гц, амплитуда - 1 мм, время сварки – 3 сек, усилие сварки и проковки – 1,7кН. Вид образцов показан на Рис. 1. Надрез выполняли на электроискровом станке. Для сварных образцов надрез был ориентирован вдоль сварного шва.



Рис. 1. Образцы титанового сплава Ti-6Al-4V после линейной сварки трением.

Методика обработки результатов испытаний. Для каждого образца по результатам измерений удлинения трещины были получены таблицы, содержащие значения длины трещины l_i (i – номер измерения), расположенные в порядке возрастания и соответствующие им числа циклов нагружения N_i . Затем, определяли скорость роста трещины по формуле:

$$v_i = \frac{l_{i+1} - l_i}{N_{i+1} - N_i},$$

соответствующей средней длине трещины $(l_{i+1} + l_i)/2$.

Для каждой скорости роста трещины по соответствующим значениям максимальной нагрузки P_{max} и средней длины трещины $l=(l_{i+1}+l_i)/2$ определяли наибольшее значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по формуле [5]:

$$K_{max} = \frac{3 \cdot S \cdot P_{max}}{2 \cdot t \cdot W^2} \sqrt{\pi \cdot l} \cdot F_1(\alpha),$$

где S – расстояние между опорами; t – толщина образца; W – ширина образца; $\alpha = l/W$, $S = 4W$,

$$F_1 = \frac{1,99 - \alpha(1 - \alpha)(2,15 - 3,93 \cdot \alpha + 2,7 \cdot \alpha^2)}{(1 + 2 \cdot \alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}.$$

3. Результаты и обсуждение

На основании обработки первичных данных построены кинетические диаграммы скорости роста трещины. Экспериментальные значения скоростей распространения трещин для основного металла титанового сплава Ti-6Al-4V с различной структурой представлены на Рис. 2.

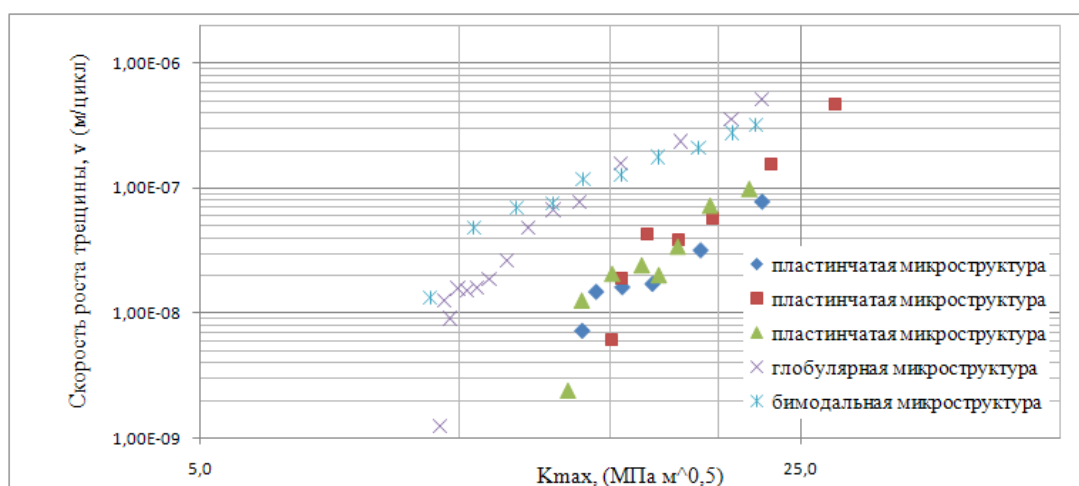


Рис. 2. Влияние типа микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V на скорость роста усталостной трещины.

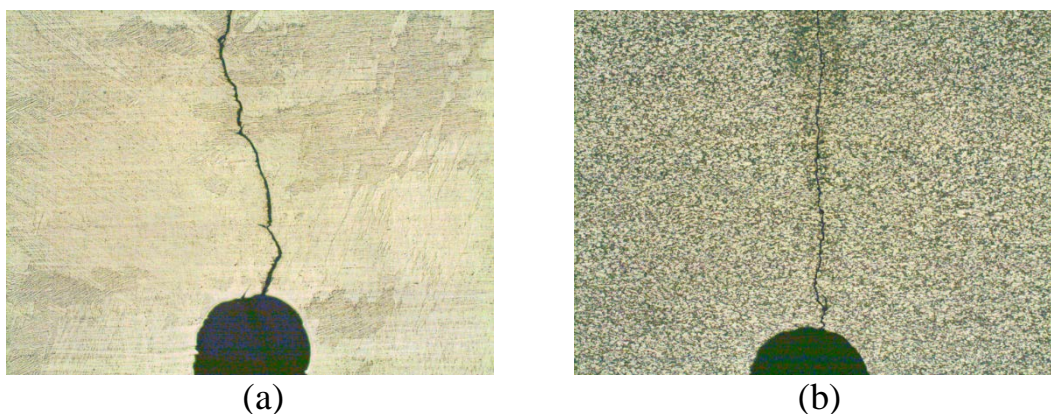
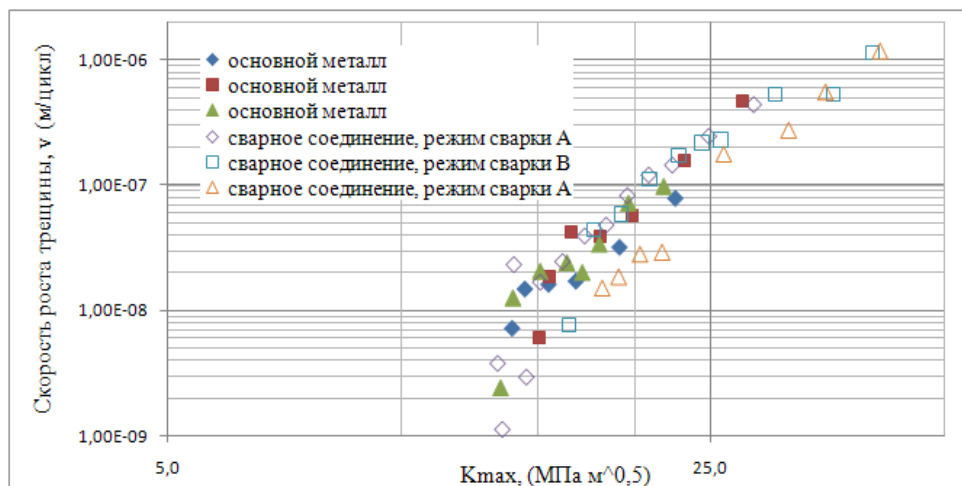
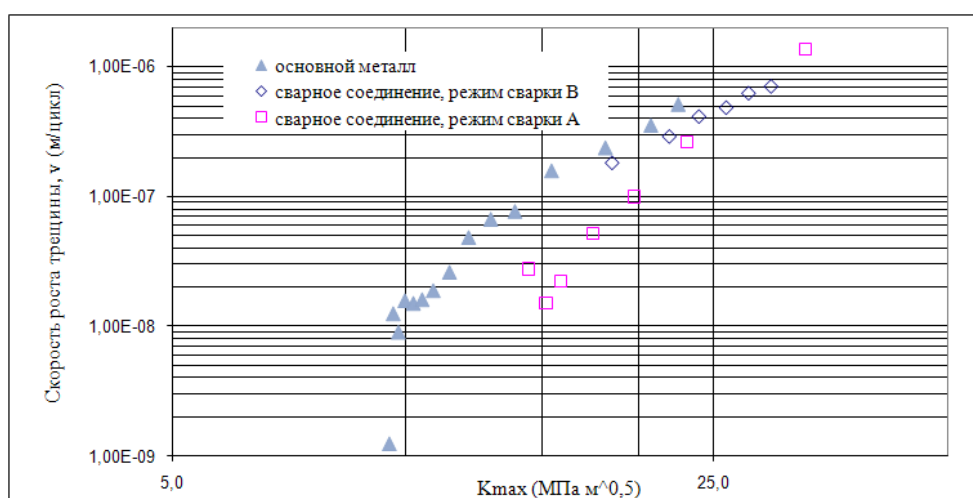


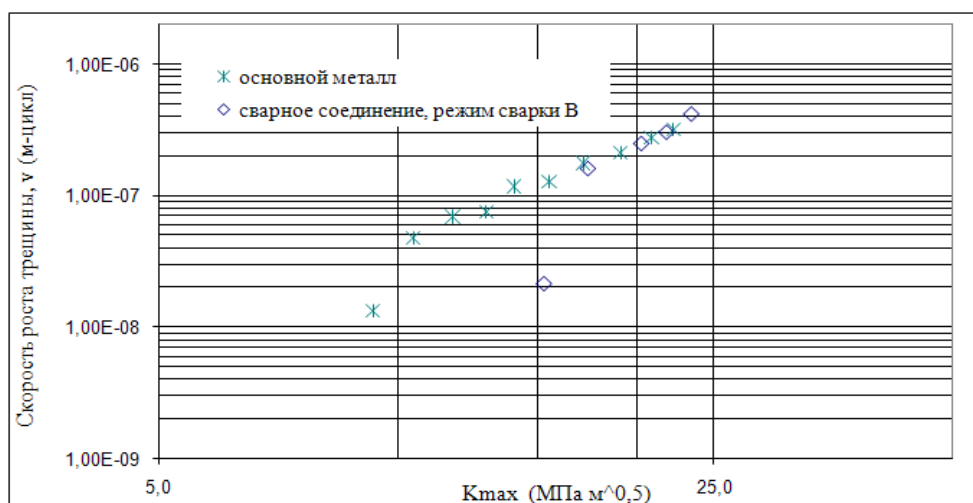
Рис. 3. Развитие трещины в титановом сплаве Ti-6Al-4V в зависимости от типа структуры: (а) пластинчатая, (б) глобулярная. Ширина надреза 0,3 мм.



(a)



(b)



(c)

Рис. 4. Кинетические диаграммы роста трещины усталости сварных соединений титанового сплава Ti-6Al-4V с различной исходной структурой: (а) пластинчатая (b) глобулярная; (с) бимодальная.

Анализ этих данных (Рис. 2) показывает, что изменение типа структуры в результате горячей обработки давлением от крупнозернистой пластинчатой до равноосной глобулярной или бимодальной сдвигает зависимость: «скорость роста трещины v - КИН K_{\max} » в сторону более низких КИН, то есть снижает трещиностойкость титанового сплава Ti-6Al-4V при циклическом нагружении. Например, для $K_{\max}=15\text{МПа м}^{0,5}$ скорость распространения усталостной трещины при пластинчатой структуре примерно в 10 раз меньше, чем при мелкозернистой. Затруднение распространения трещины в сплаве с крупнозернистой пластинчатой структурой связано с нелинейным направлением развития трещины. Извилистость и вторичное растрескивание вызывают уменьшение скорости роста трещины по сравнению с мелкозернистым металлом (Рис. 3).

На Рис. 4 приведены кинетические диаграммы скорости роста трещины в сварных образцах после линейной сварки трением титанового сплава Ti-6Al-4V с различной исходной структурой.

Сравнение диаграмм скорости роста трещин в титановом сплаве Ti-6Al-4V и в его сварных соединениях, полученных линейной сваркой трением показывает, что для металла с пластинчатой структурой циклическая прочность соединений находится на уровне основного металла (Рис. 4а). Для сплава с мелкозернистой глобулярной (Рис. 4б) и бимодальной структурой (Рис. 4с) для КИН не превышающих (15-20) МПа м^{0,5} скорость развития трещин в сварных соединениях меньше, чем в основном металле, а при КИН превышающем (15-20) МПа м^{0,5} скорость распространения трещин в сварном соединении близка к скорости роста трещины в основном металле. Характер развития трещины в шве, полученном линейной сваркой трением, показан на Рис. 5.

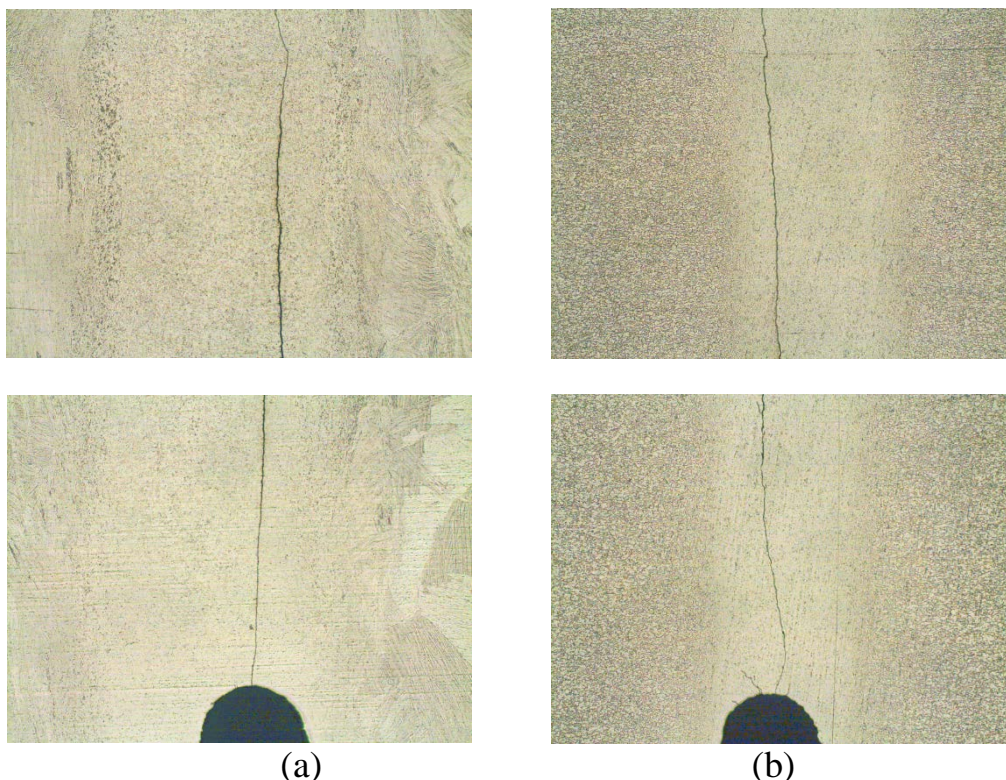


Рис. 5. Развитие трещины в сварном соединении титанового сплава Ti-6Al-4V в зависимости от типа структуры: (а) пластинчатая; (б) глобулярная. Ширина надреза 0,3 мм.

Высокий уровень циклической прочности сварных соединений можно объяснить влиянием текстуры сварного шва, которая формируется в результате высокотемпературной деформации в процессе сварки трением. Известно, что трещины в титановых сплавах наиболее легко распространяются по плоскостям базиса под действием касательных напряжений. В шве, полученном линейной сваркой трением, плоскость базиса располагается перпендикулярно плоскости соединения [6]. На Рис. 5 видно, что в процессе развития трещины происходит ее отклонение от направления надреза и стремление расти вне сварного шва.

Выводы

1. Изменение структуры сплава Ti-6Al-4V от пластинчатой к глобулярной или бимодальной приводит к снижению его циклической трещиностойкости.
2. Циклическая трещиностойкость соединений, выполненных линейной сваркой трением, не уступает трещиностойкости основного металла.

Исследования проведены на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Литература

- [1] Н. Wilhelm, R. Furlan, K.C. Moloney, *Linear friction bonding of titanium alloys for aeroengine application*. In: Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium Held at the International Convention Centre, ed. by P.A. Blenkinsop, W.J. Evans, H.M. Flower (Birmingham, UK, 22-26 Oct. 1995) 620.
- [2] Р.М. Кашаев, А.М. Хуснуллин, В.В. Николаев, *Линейная (вибрационная) сварка трением титанового сплава VT9*. В: Неделя металлов в Москве 11-14 ноября 2008 г. (Сборник трудов конференций, М. 2009) 121.
- [3] Р.М. Кашаев, А.М. Хуснуллин, В.В. Николаев // *Газотурбинные технологии* **2** (2009) 24.
- [4] А.М. Хуснуллин, Р.М. Кашаев // *Письма о материалах* **3** (2016) 227.
- [5] Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ. Под ред. Ю. Мураками (Мир, М. 1990).
- [6] M. Karadge, M. Preuss, P.J. Withers, S. Bray // *Materials Science and Engineering: A* **459** (2007) 182.

CYCLIC CRACK RESISTANCE OF LINEAR FRICTION WELDED Ti-6Al-4V ALLOY JOINTS

R.M. Kashaev^{1,2,*}, M.I. Nagimov¹, A.M. Husnullin¹

¹ Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St., 450001, Ufa, Russia

² Ufa State Aviation Technical University, 12 Karl Marx St., 450077, Ufa, Russia

*e-mail: rishat@kashaev.ru

Abstract. Kinetic diagrams of the fatigue crack growth rate of Ti-6Al-4V with various structures, namely lamellar, globular, bimodal and its linear friction welds, are presented. The lamellar structure showed a better crack growth resistance than the globular and bimodal structures. Cyclic crack growth resistance of linear friction weld is comparable to that of Ti-6Al-4V titanium alloy with lamellar structure. For an alloy with fine-grained globular and bimodal structures for stress intensity $< (15-20) \text{ MPa m}^{0.5}$, the fatigue crack growth rate in linear friction weld is less than in base metal and for stress intensity $> (15-20) \text{ MPa m}^{0.5}$ crack growth rate in linear friction weld is close to the crack growth rate in base metal.

Keywords: cyclic crack resistance, linear friction welding, Ti-alloys.

References

- [1] H. Wilhelm, R. Furlan, K.C. Moloney, *Linear friction bonding of titanium alloys for aeroengine application*. In: Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium Held at the International Convention Centre, ed. by P.A. Blenkinsop, W.J. Evans, H.M. Flower (Birmingham, UK, 22-26 Oct. 1995) 620.
- [2] R.M. Kashaev, A.M. Khusnullin, V.V. Nikolaev, *Linear (vibration) friction welding of titanium alloy VT9*. In: Week of metals in Moscow 11-14 November 2008 (Proceedings of conferences. M. 2009) 121.
- [3] R.M. Kashaev, A.M. Khusnullin, V.V. Nikolaev // *Gas Turbine Technologies* **2** (2009) 24.
- [4] A.M. Khusnullin, R.M. Kashaev // *Letters on materials* **3** (2016) 227.
- [5] *Stress intensity factors handbook. In 2 volumes. T. 1: Trans. with English*. Ed. by J. Murakami (Mir, Moscow, 1990).
- [6] M. Karadge, M. Preuss, P.J. Withers, S. Bray // *Materials Science and Engineering: A* **459** (2007) 182.