

Клевцов Г.В., Фролова О.А., Клевцова Н.А., Алиджанов Э.К.
Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена кинетике и механизму усталостного разрушения, влиянию сжимающих циклов нагружения на долговечность и механизм разрушения конструкционных материалов. Изучено влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения R в широком интервале значений на общую долговечность и механизм усталостного разрушения образцов из алюминиевого сплава АК6 и стали 110Г13Л. Для изучения механизмов усталостного разрушения образцов использованы физические методы исследования изломов: растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ.

Введение

Большинство промышленных конструкций и деталей машин из алюминиевых сплавов и других конструкционных материалов подвержены знакопеременным, растягивающим и сжимающим циклам нагружения. Долговечность таких конструкций будет зависеть не только от сопротивления материала усталостному разрушению, но и от параметров нагружения [1]. Известно, что существенное влияние как на скорость распространения усталостной трещины, так и на механизм усталостного разрушения металлических материалов оказывает коэффициент асимметрии цикла нагружения R ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) [2-3]. К сожалению, в литературе крайне мало данных о влиянии сжимающих циклов нагружения на усталостную прочность и механизм разрушения конструкционных материалов. Это затрудняет наше представление о влиянии на вышеуказанные характеристики материала коэффициента асимметрии цикла нагружения R в широком диапазоне значений от $-\infty$ до ∞ .

Целью настоящей работы является изучение влияния коэффициента асимметрии циклов нагружения R в широком диапазоне значений на усталостную долговечность и механизм разрушения образцов из конструкционных материалов.

Материалы и методики исследования

В качестве исследуемых материалов использовали алюминиевый ковочный сплав АК6 и аустенитную сталь 110Г13Л. Химический состав исследуемых материалов представлен в таблицах 1 и 2.

Алюминиевый сплав АК6 использовали в состоянии поставки (горячекатанное состояние). Призматические образцы толщиной $1,2 \cdot 10^{-2}$ м с V-образным концентратором напряжения

изготавливали из плиты толщиной $2 \cdot 10^{-2}$ м. Образцы из стали 110Г13Л толщиной $4 \cdot 10^{-3}$ м с V-образным концентратором напряжения изготавливали из гомогенизованных при 1200°C отливок и закаливали от 1100°C в масле. После закалки данная сталь имела однофазную аустенитную структуру. Механические свойства сплава АК6 и стали 110Г13Л представлены в таблице 3.

Усталостные испытания консольно закрепленных образцов проводили на чистый изгиб по жесткой схеме нагружения при постоянном для каждого материала значении амплитуды деформации. Образцы из алюминиевого сплава АК6 нагружали с помощью возбудителя перемещений ВП 20-00.00.00 при полностью растягивающем ($R = 0,5$), симметричном ($R = -1$), преимущественно сжимающих ($R = -2; -3; -7; -19$), отнулевом сжимающем ($R = -\infty$) и полностью сжимающих ($R = 11,5$) циклах нагружения (рис. 1 а). Образцы из стали 110Г13Л испытывали на специально разработанной установке при полностью растягивающем ($R = 0,5$), отнулевом ($R = 0$) и симметричном ($R = -1$) циклах нагружения (рис. 1 б). Все усталостные испытания были проведены согласно рекомендациям РД 50-345-82 [4].

Полученные изломы исследовали методами макро- и микрофрактографического, а так-

Таблица 1. Химический состав алюминиевого сплава АК6 (в % по массе)

Cu	Zn	Mg	Fe	Ni	Si	Mn
2,22	0,30	0,60	0,70	0,10	0,90	0,60

Таблица 2. Химический состав стали 110Г13Л (в % по массе)

C	Mn	Cr	Ni	Si	Cu
1,06	15,18	0,20	0,40	0,18	0,10

Таблица 3. Механические свойства исследуемых материалов

Материал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_{s1} , МПа
АК6	420	300	12	40	-
110Г13Л	820	380	40	45	185

же рентгеноструктурного анализа. Длину усталостных зон на поверхности изломов замеряли штангенциркулем с точностью 10^{-4} м. Микрорельеф усталостных изломов изучали в растровом микроскопе JSM-T20. О степени искаженности кристаллической структуры материала на поверхности изломов судили по ширине рентгеновской дифракционной линии (311) K_{α} . Съемку поверхности изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 согласно методике [2, 5].

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 2 представлена зависимость от коэффициента асимметрии цикла нагружения R общего количества циклов нагружения N до разрушения образцов из сплава АК6 и стали 110Г13Л. Видно, что на вышеуказанной зависимости можно выделить три области значений R : 1) $-\infty < R = -1$; 2) $-1 < R < 1$; 3) $1 < R < \infty$.

При увеличении коэффициента асимметрии цикла нагружения R от $-\infty$ до -1 общая долговечность образцов из сплава АК6 увеличивается. Причем наиболее интенсивное увеличение долговечности образцов наблюдается в области значения R от -3 до -1 (см. рис. 2). В интервале значений R от -1 до $0,5$ наблюдается резкое снижение долговечности образцов как из сплава АК6, так и из стали 110Г13Л. В области значений R от 1 до ∞ экспериментальную зависимость долговечности образцов из сплава АК6 от коэффициента асимметрии цикла нагружения установить не удалось, т. к. в образцах, испытанных при $R=5$ (см. рис. 1), усталостная трещина зарождалась с противоположной стороны от надреза. Такие результаты испытаний в дальнейшем анализировали, поэтому в данной области имеет место только одно экспериментальное значение (при $R = 11$) (см. рис. 2).

Легко видеть, что максимальная долговечность образцов имеет место при $R = -1$, что соответствует схеме нагружения, при которой максимальное и минимальное напряжения цикла в образцах имеют минимальные отклонения от нулевого значения (см. рис. 1). Минимальная долговечность образцов имеет место при $R \rightarrow 1$, когда в образцах максимальное напряжение цикла при полностью растягивающих циклах нагрузки, а по-видимому, и минимальное напряжение цикла при полностью сжимающих циклах нагрузки (последний случай на рис. 2 отмечен пунктиром) достигают макси-

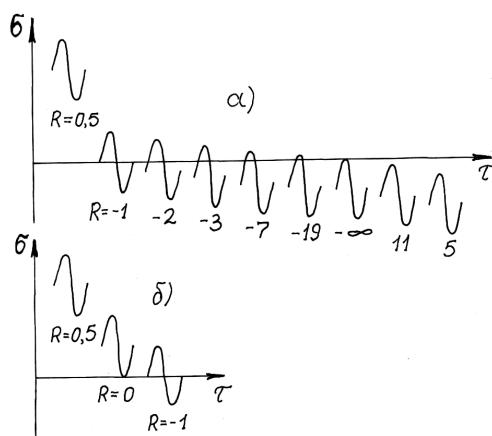


Рисунок 1. Схемы нагружения образцов из алюминиевого сплава АК6 (а) и стали 110Г13Л (б) при различном значении коэффициента асимметрии цикла нагружения R

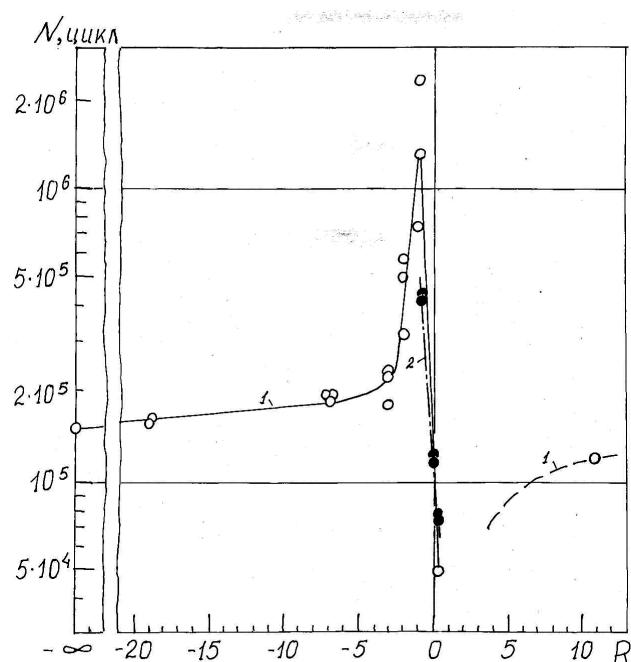


Рисунок 2. Зависимость общей долговечности образцов N из сплава АК6 (1) (светлые точки) и стали 110Г13Л (2) (темные точки) от коэффициента асимметрии циклов нагружения R

мального отклонения от нулевого значения. При $R \rightarrow -\infty$ или $R \rightarrow \infty$ долговечность образцов составляет какое-то промежуточное значение от вышеуказанных (см. рис. 2).

Полученные результаты позволяют представить обобщенную схему влияния на долговечность образцов коэффициента асимметрии цикла нагружения R во всем интервале значений от $-\infty$ до ∞ . На рис. 3 представлена такая обобщенная схема для случая постоянного значения размаха напряжений (или деформаций) цикла ($\Delta\sigma = \text{const}$).

Из приведенной схемы видно, что увеличение сжимающих напряжений оказывает на долговечность образцов такое же влияние, как и увеличение растягивающих напряжений, т. е. снижает общую долговечность образцов.

Для того чтобы оценить вклад в общую долговечность образцов стадии зарождения и стадии распространения усталостной трещины при различных значениях R , рассмотрим макрофотографические особенности строения полученных изломов.

Все полученные изломы образцов из сплава АК6 имеют на своей поверхности характерные макрозоны: зону стабильного роста трещины l_s , зону ускоренного развития l_r и зону долома (рис. 4 а). Зона l_s – более темная по сравнению с другими зонами, но блестящая; имеет ступеньки, указывающие на многоочаговый характер зарождения усталостной трещины. Зона ускоренного развития трещины l_r – светлая, мелкозернистая, матовая. Зона долома – светлая, матовая, что указывает на вязкий характер разрушения (рис. 4 б). Зоны l_s и l_r образуют зону усталостного развития трещины l_f ($l_f = l_s + l_r$) (см. рис. 4 а). Кроме того, усталостные изломы сплава АК6, полученные при $R = -1$ ($N = 4,8 \cdot 10^4$ цикл.), имеют вблизи боковых поверхностей губы среза, размер которых составляет 5-10%.

На поверхности изломов стали 110Г13Л можно было выявить две макрозоны: зону усталостного развития трещины l_f и зону долома.

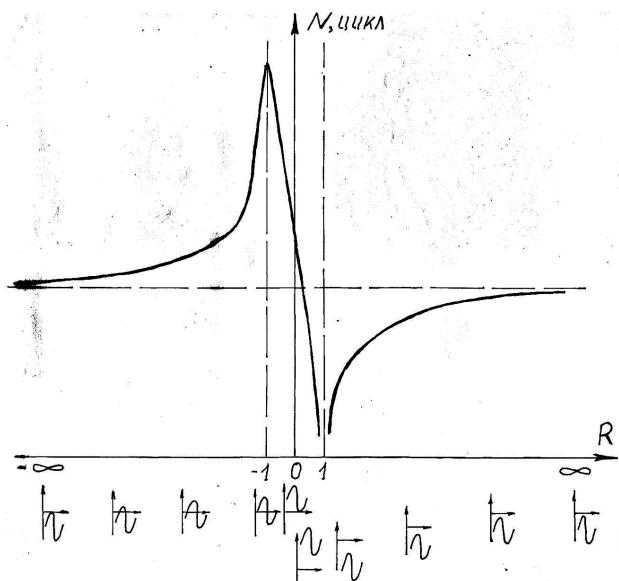
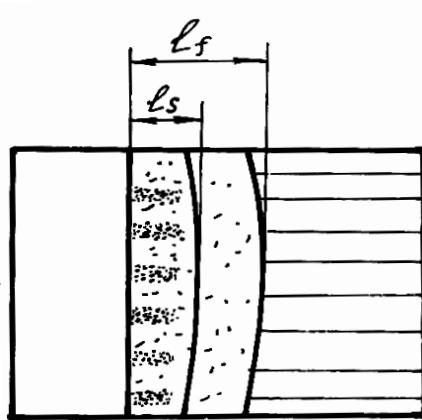


Рисунок 3. Обобщенная схема влияния коэффициента асимметрии цикла нагружения R на долговечность образцов N для случая постоянного значения размаха напряжений ($\Delta \sigma = \text{const}$) или деформации цикла

ма. Зона усталостного развития трещины сравнительно гладкая, со ступеньками; зона долома имеет мелкозернистое кристаллическое строение.

На рисунке 5 представлена зависимость длины зоны стабильного роста трещины l_s и зоны усталостного развития трещины l_f на поверхности изломов образцов из сплава АК6 и стали 110Г13Л от коэффициента асимметрии цикла нагружения R . Видно, что характер из-



а)



б)

Рисунок 4. Схема строения усталостных изломов образцов из сплава АК6 (а), а также характерный вид изломов (б)

менения длины данных зон аналогичен характеру изменения в зависимости от R общей долговечности образцов N (см. рис. 2).

Известно, что общая долговечность образцов до разрушения N включает в себя: количество циклов нагружения до образования усталостной трещины и количество циклов нагружения, затраченное на распространение трещины [1]. Сопоставляя рисунки 2 и 5, можно предположить, что коэффициент асимметрии цикла нагружения R в данном случае оказал влияние на стадию распространения усталостной трещины. Однако это не значит, что коэффициента R не оказывает влияния и на стадию зарождения усталостной трещины.

Рассмотрим влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения R на микрофрактографические особенности строения усталостных изломов образцов из сплава АК6.

Микрорельеф излома образца, испытанного при $R = -19$, представлен на рисунке 6. Медленный рост усталостной трещины под действием сжимающих напряжений привел к образованию усталостных бороздок в зоне l_s , которые при небольшом увеличении видны плохо, а также многочисленных вторичных трещин и ступенек (рис. 6 а). При большом увеличении (рис. 6 б) хорошо видны нерегулярные усталостные бороздки, вторичные трещины и ступеньки. В зоне ускоренного развития трещины l_r (рис. 6 в) микрорельеф незначительно отличается от выше рассмотренного, однако выглядит более рельефным. Усталостные бороздки нерегулярные и слабо различимые; хорошо видны вторичные трещины. При небольшом увеличении микрорельеф в зоне

долома (рис. 6 г) напоминает микрорельеф в зоне ускоренного развития трещины. Однако при большом увеличении хорошо видны участки внутризеренного квазискола.

В зоне стабильного роста трещины l_s излома образца, испытанного при $R = -1$ (рис. 7 а), имеет место смешанный характер разрушения в результате вязкого среза, межзеренного квазискола и усталостного разрушения с образованием нерегулярных усталостных бороздок, плохо видимых при небольшом увеличении. В зоне ускоренного развития трещины l_r (рис. 6 б) трудно различимые усталостные бороздки на плоских участках излома окружены рассредоточенными ямками; видны вторичные трещины. Микрорельеф в зоне долома (рис. 7 в) такой же, как и в случае окончательного разрушения образца, испытанного при $R = -19$ (см. рис. 6 г).

Микрорельеф усталостного излома образца из сплава АК6, испытанного при $R = 0,5$, представлен на рисунке 8. В зоне стабильного роста трещины l_s (рис. 8 а) видны нерегулярные, слабо различимые бороздки, окруженные ямками различных размеров. Такой микрорельеф должен отличаться хорошо развитой пластической деформацией. Более высокая скорость распространения усталостной трещины в зоне ускоренного развития l_r (рис. 8 б) по сравнению с зоной стабильного роста трещины приводит к образованию микрорельефа со сравнительно регулярными, лучше выявляемыми усталостными бороздками, наблюдаемыми на плоских участках излома, окруженных ямками. Видны вторичные трещины. В зоне долома (рис. 8 в) микрорельеф с мелкими ямками чередуется с участками квазискола; хорошо видны вторичные трещины по границам зерен.

Таким образом, видим, что при изменении цикла нагружения образцов из сплава АК6 от сжимающего ($R = -19$) к симметричному ($R = -1$) и растягивающему ($R = 0,5$) циклу в микрорельефе зоны стабильного роста трещины l_s и в зоне ускоренного развития трещины l_r начинает преобладать вязкая составляющая. Микрорельеф зоны долома практически не зависит от асимметрии цикла нагружения образцов.

Рассмотрим влияние коэффициента асимметрии циклов нагружения R на степень искаженности кристаллической структуры материала на поверхности усталостных изломов сплава АК6 в пределах зоны стабильного роста трещины l_s , где, как известно [2], искаженность кри-

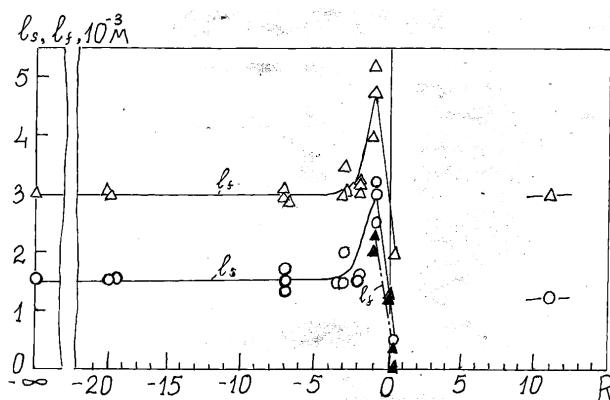


Рисунок 5. Зависимость длины зоны стабильного роста трещины l_s и зоны усталостного развития l_r от общей долговечности образцов из сплава АК6 при различных значениях R

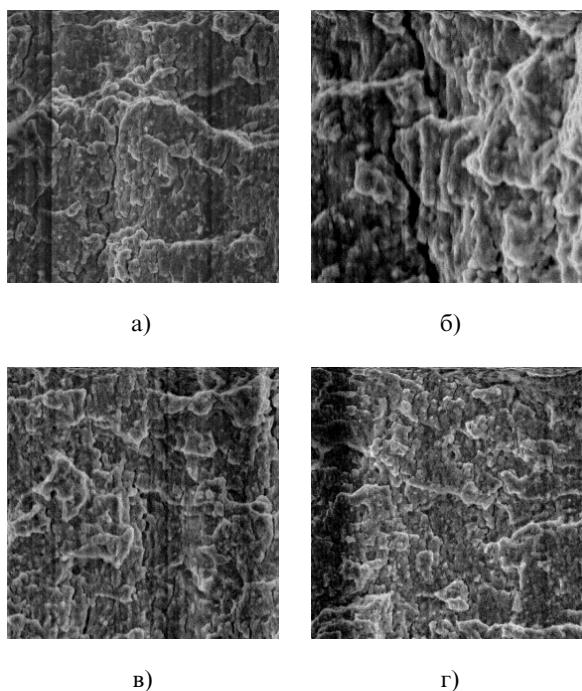


Рисунок 6. Микрорельеф усталостного излома образца из сплава АК6, испытанного при $R = -19$, в зоне стабильного роста трещины l_s (а, б), зоне ускоренного развития l_r (в) и в зоне долома (г).

Увеличение: а, в, г – $\times 1000$; б – $\times 2000$

сталлической структуры материала не зависит от длины усталостной трещины. О степени искаженности кристаллической структуры материала будем судить по ширине рентгеновской дифракционной линии (311) $K\alpha$ (рис. 9).

Из рисунка 9 видно, что с увеличением коэффициента асимметрии циклов нагружения R от -19 до -1 (уменьшением сжимающих напряжений в образце) ширина рентгеновской дифракционной линии, полученной при рентгенографировании изломов в зоне l_s , уменьшается, что указывает на снижение степени искаженности кристаллической структуры материала на поверхности данной зоны. Ширина дифракционной линии достигает минимального значения при симметричном цикле ($R = -1$), что соответствует схеме нагружения, при которой максимальное и минимальное напряжения цикла в образцах имеют минимальные отклонения от нулевого значения (см. рис. 1). Затем при $R=0,5$ ширина дифракционной линии вновь увеличивается (см. рис. 9). Обращает на себя внимание тот факт, что искаженность кристаллической структуры материала на поверхности зоны l_s , оцененная по ширине дифракционной линии, может быть выше искаженности кристалличес-

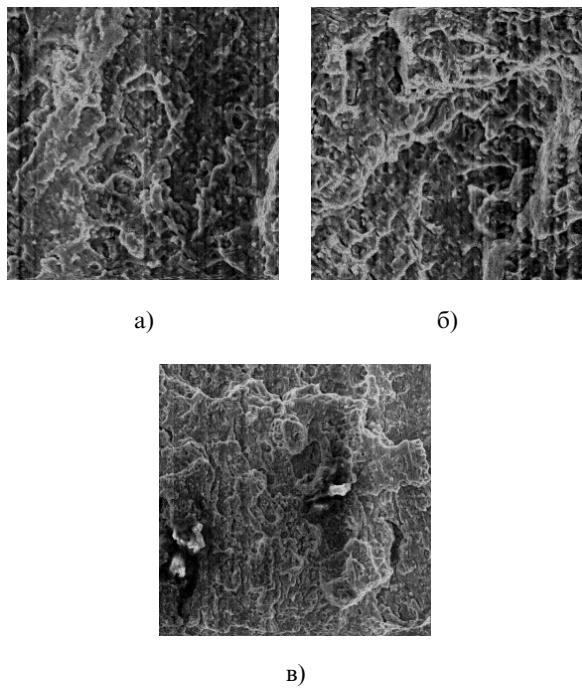


Рисунок 7. Микрорельеф усталостного излома образца из сплава АК6, испытанного при $R = -1$, в зоне стабильного роста трещины l_s (а), зоне ускоренного развития l_r (б) и в зоне долома (в).

Увеличение: а, б – $\times 1000$; в – $\times 500$

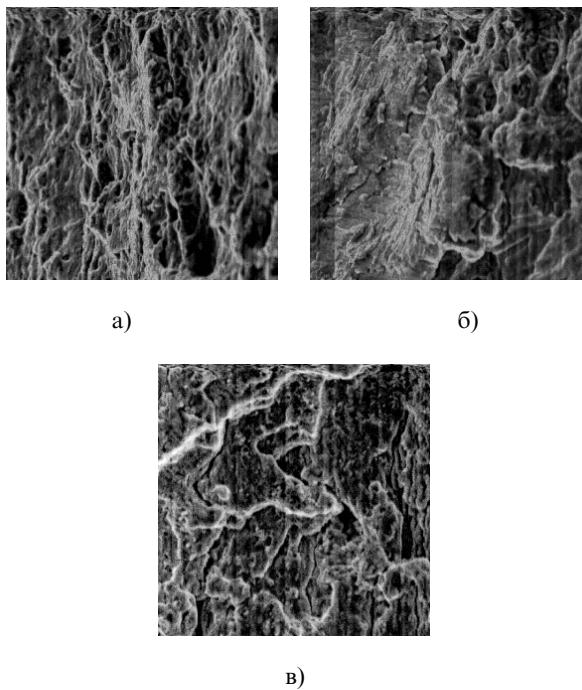


Рисунок 8. Микрорельеф усталостного излома образца из сплава АК6, испытанного при $R = 0,5$, в зоне стабильного роста трещины l_s (а), зоне ускоренного развития l_r (б) и в зоне долома (в).

Увеличение: а, б – $\times 1000$

кой структуры в зоне долома, что имеет место при $R = -19$ и $0,5$ (см. рис. 9).

По-видимому, увеличение степени искаженности кристаллической структуры материала на поверхности зоны l_s при $R = 0,5$ связано с большими растягивающими напряжениями и, как следствие, в основном с вязким характером разрушения. Высокая степень искаженности кристаллической структуры материала в данной зоне при больших сжимающих напряжениях ($R = -19$) связана, по-видимому, с дополнительным наклепом материала на поверхности изломов от сжимающих напряжений уже после прохождения трещины.

Выводы

1. На основании результатов усталостных испытаний образцов из алюминиевого сплава АК6 и стали 110Г13Л предложена обобщенная схема влияния на долговечность образцов коэффициента асимметрии цикла нагружения R во всем интервале значений от $-\infty$ до ∞ .

2. Увеличение сжимающих напряжений оказывает на долговечность образцов такое же влияние, как и увеличение растягивающих напряжений, т. е. снижает общую долговечность образцов.

3. Характер изменения длины зоны стабильного роста трещины l_s и зоны усталостного развития трещины l_f на поверхности изломов образцов из сплава АК6 и стали 110Г13Л в зависимости от R аналогичен характеру изменения общей долговечности образцов N .

Список использованной литературы:

1. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. Пер. с польск. / Под ред. С.Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
2. Клевцов Г.В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов. – М.: МИСИС, 1999. – 112 с.
3. Клевцов Г.В., Постников Н.С., Жижерин А.Г., Гоцеев И.С., Бакиров Ж.Т. Кинетика и фрактография усталостного разрушения сплава ВАЛ15 при различной асимметрии цикла // Проблемы прочности, 1988. – №7. – С. 31-33.
4. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Госстандарт СССР, 1983. – 96 с.
5. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988. – 24 с.

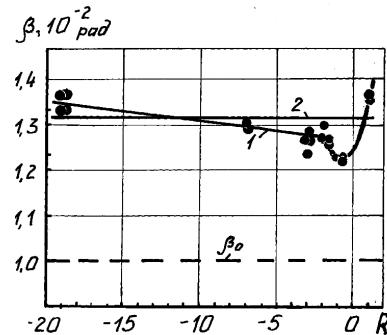


Рисунок 9. Зависимость ширины дифракционной линии (311) Ка, полученной при рентгенографировании поверхности усталостных изломов образцов из сплава АК6 в зоне l_s (1) и в зоне долома (2). b_0 – ширина линии эталона, полученная с поверхности образца до его нагружения

4. При изменении коэффициента асимметрии цикла нагружения R образцов из сплава АК6 от -19 до $0,5$ в микрорельфе зоны стабильного роста трещины l_s и в зоне ускоренного развития трещины l_f начинает преобладать вязкая составляющая. Микрорельф зоны долома практически не зависит от асимметрии цикла нагружения образцов.

5. Степень искаженности кристаллической структуры сплава АК6 в зоне l_s , определенная по ширине рентгеновской дифракционной линии, с увеличением коэффициента асимметрии циклов нагружения R от -19 до -1 уменьшается, достигая минимального значения при симметричном цикле ($R = -1$). При $R = 0,5$ степень искаженности кристаллической структуры вновь увеличивается.