

Влияние скорости циклического нагружения на глубину зоны пластической деформации сплава ВНС-25

Т. Ю. Яковлева, Л. Е. Матохнюк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Исследована глубина зоны пластической деформации в вершине усталостной трещины в сплаве ВНС-25 (03X12H10MT), испытанном на циклическую трещиностойкость в условиях симметричного растяжения–сжатия с частотой 20, 170, 600 Гц и 3, 10 кГц. Показано, что повышение частоты нагружения приводит к уменьшению скорости роста усталостной трещины и глубины зоны пластической деформации под поверхностью разрушения при одинаковых значениях коэффициента интенсивности напряжений. Вместе с тем зависимость глубины зоны пластической деформации от скорости роста трещины инвариантна к частоте нагружения.

Ключевые слова: усталостная трещина, зона пластической деформации, частота нагружения, скорость развития трещины.

Введение. Развитие усталостной трещины обусловлено возникновением в ее вершине зоны пластической деформации. Размер зоны зависит от вида материала, его структуры, напряженного состояния, а также механизма разрушения материала [1]. Поэтому исследование зоны пластической деформации имеет большое значение для описания и разработки моделей усталостного разрушения.

В работах Ирвина, Дагдайла, Екобори, а также в исследованиях, проводимых в течение последних лет, анализу формы и размеров зоны пластической деформации в вершине усталостной трещины уделялось достаточно много внимания. В качестве параметров, влияющих на геометрию и размеры зоны пластической деформации, рассматривают величину коэффициента интенсивности напряжений [2], длину трещины [3], толщину образцов [4], температуру [5], значение коэффициента асимметрии цикла нагружения [4], свойства окружающей среды [6]. Указанные параметры относятся к наиболее важным характеристикам условий циклического нагружения, однако среди них отсутствует не менее существенный – скорость циклического нагружения. Авторами настоящей работы проведены исследования по влиянию частоты циклического деформирования на глубину зоны пластической деформации под поверхностью разрушения образцов из сплава ВНС-25.

Материалы и методики исследования. Сплав ВНС-25 (03X12H10MT) относится к нержавеющей мартенситностареющим сталям, основными легирующими элементами которого являются никель и хром [7].

Заготовки для образцов, испытываемых на циклическую трещиностойкость, вырезали из листового проката толщиной 35 мм таким образом, чтобы направление прокатки совпадало с продольной осью образца. Для испытаний при всех частотах нагружения использовали образцы с прямоугольным поперечным сечением рабочей части размером 24 × 6 мм и центральной

начальной трещиной. Геометрия образцов обеспечивала распространение усталостной трещины в условиях плоской деформации.

Испытания образцов проводили при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия с частотой 20, 170, 600 Гц и 3, 10 кГц. Частота 20 Гц обеспечивалась электрогидравлической машиной, 170 Гц – машиной с электромагнитным возбудителем колебаний, 600 Гц – машиной на базе электродинамического вибростенда, 3 и 10 кГц – магнитострикционными испытательными установками.

Во время испытаний поддерживали постоянными заданные величины коэффициента интенсивности напряжений [8].

Для обнаружения зоны пластической деформации боковую поверхность образцов, перпендикулярную плоскости разрушения, после испытаний подвергали химической полировке в растворе $\text{HNO}_3\text{--3HCl--HF--H}_2\text{O}$ и последующему ионному травлению в среде спектрально чистого аргона. Учитывая, что скорость и эффективность ионного травления металлов зависят от степени пластической деформации, предшествующей травлению, специально подобранный режим травления позволил выявить зону наибольшей пластической деформации под поверхностью разрушения (рис. 1).

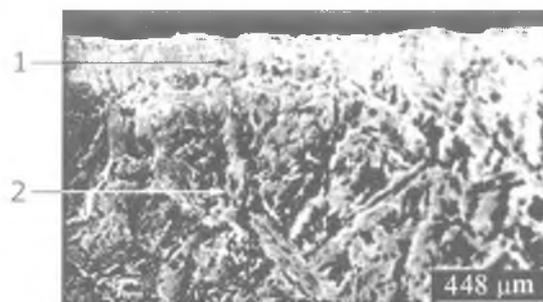


Рис. 1. Структура материала под поверхностью разрушения: 1 – зона пластической деформации; 2 – основной материал.

Глубину зоны пластической деформации h измеряли непосредственно в растровом электронном микроскопе в режиме фазового контраста. При определенных значениях коэффициента интенсивности напряжений ΔK величину h находили как среднее 20–30 измерений на базе 300 мкм.

Результаты измерений и их анализ. По результатам испытаний образцов на циклическую трещиностойкость и измерений глубины зоны пластической деформации строили диаграммы усталостного разрушения и графики зависимости глубины зоны пластической деформации h от ΔK (рис. 2). Как видно, с ростом ΔK глубина пластической зоны увеличивается при всех частотах нагружения. Причем частота не оказывает влияния на скорость увеличения глубины зоны пластической деформации: графики, описывающие эту зависимость в логарифмических координатах, практически параллельны. Однако с повышением частоты нагружения существенно уменьшается глубина зоны пластической деформации при одинаковых значениях ΔK .

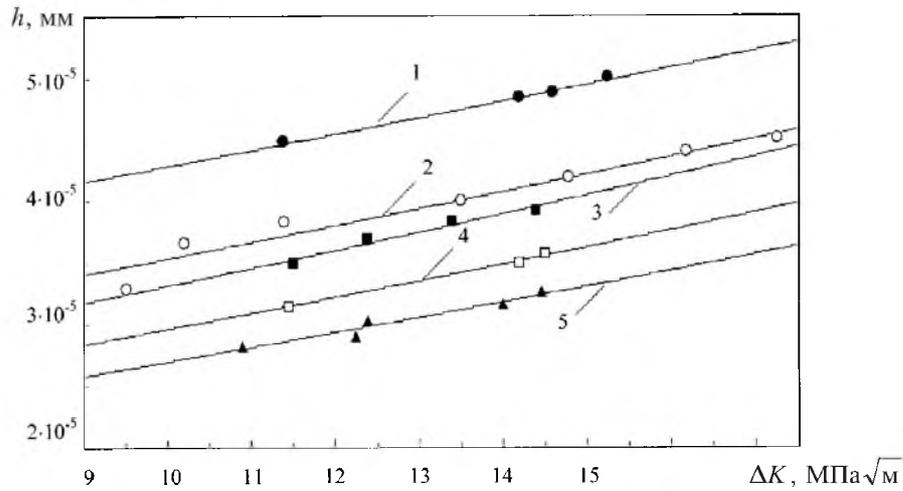


Рис. 2. Зависимость глубины зоны пластической деформации h от величины коэффициента интенсивности напряжений ΔK при разных значениях частоты нагружения: 1 – $f = 20$ Гц; 2 – $f = 170$ Гц; 3 – $f = 600$ Гц; 4 – $f = 3$ кГц; 5 – $f = 10$ кГц.

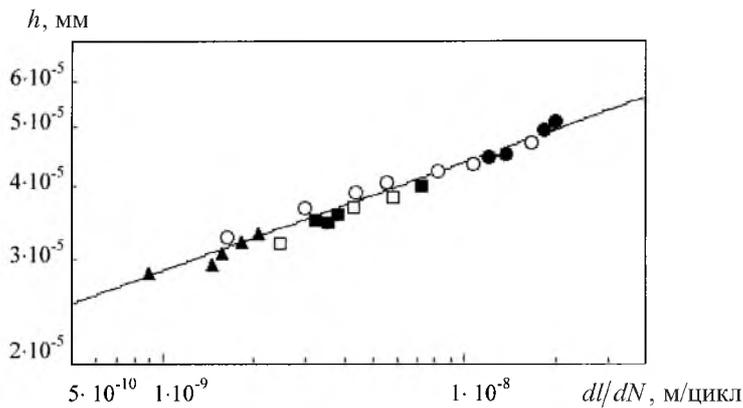


Рис. 3. Зависимость глубины зоны пластической деформации h от скорости роста усталостной трещины dl/dN .

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. С увеличением частоты нагружения время нахождения материала под действием нагрузки, близкой к максимальным значениям, уменьшается, поэтому пластическая деформация за цикл не успевает произойти в той мере, в какой это возможно при низкочастотном деформировании. Вследствие этого уменьшаются как скорость роста усталостной трещины, так и глубина зоны пластической деформации. Причем указанный характер влияния скорости циклического деформирования количественно оказывается одинаковым и в отношении скорости роста трещины и в отношении глубины зоны пластической деформации. Об этом свидетельствует график, построенный в координатах глубина зоны пластической деформации h – скорость роста усталостной трещины dl/dN (рис. 3). Видно, что независимо от частоты нагружения все экспериментальные данные описываются единой линейной зависимостью в логарифмических координатах.

Заключение. Таким образом, повышение частоты нагружения приводит к уменьшению скорости роста усталостной трещины и глубины зоны пластической деформации под поверхностью разрушения при одинаковых значениях коэффициента интенсивности напряжений. Вместе с тем зависимость глубины зоны пластической деформации от скорости роста трещины инвариантна к частоте нагружения.

Резюме

Досліджено глибину зони пластичної деформації у вістрі тріщини від утомленості у сплаві ВНС-25 (03Х12Н10МТ), який випробовували на циклічну тріщиностійкість при симетричному розтязі–стиску з частотою 20, 170, 600 Гц і 3, 10 кГц. Показано, що підвищення частоти навантажування приводить до зниження швидкості росту тріщини від утомленості та зменшення глибини зони пластичної деформації під поверхнею руйнування за умови однакових значень коефіцієнта інтенсивності напружень. Разом із тим залежність глибини зони пластичної деформації від швидкості росту тріщини інваріантна до частоти навантажування.

1. *Bathias C.* Retrospective view on the role of plastic zone at a fatigue crack tip // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1996. – **19**, No. 11. – P. 1301 – 1306.
2. *Uguz A. and Martin J. W.* Plastic zone size measurements in Al–Zn–Mg alloys by means of selected area channelling patterns // *Z. Metallik.* – 1992. – **83**, No. 4. – P. 270 – 275.
3. *Nisitani H. and Kawagoishi N.* Relationship between fatigue crack growth low and reversible plastic zone size in Fe–30%Si alloy // *Int. Conf. Exp. Mech. (Poland, Ore, 5–10 June, 1988).* – London: Bethel, 1988. – Vol. 2. – P. 795 – 800.
4. *Клевцов Г. В., Жижерин А. Г., Кудряшов В. Г.* Влияние асимметрии цикла нагружения на кинетику зоны пластической деформации в сплаве Д16 // *Пробл. прочности.* – 1986. – № 5. – С. 58 – 61.
5. *Потоков Е. Г.* Определение глубины зоны пластической деформации в усталостных изломах измерением микротвердости // *III науч. конф. Тамбов. гос. техн. ун-та (Тамбов, 16–17 апр., 1995 г.): Тез. докл.* – Тамбов, 1996. – С. 115.
6. *Bininjet A., Diass A., and Lebrun S. L.* X-ray fractography analysis of the plastic zones of fatigue cracks // *Int. Conf. Residual Stresses (ICRS): Proc. 2nd Int. Conf. (Nancy, 23–25 Nov., 1988).* – London; New York, 1989. – P. 826 – 832.
7. *Солнцев Ю. П., Степанов Г. А.* Конструкционные стали и сплавы для низких температур. – М.: Металлургия, 1985. – 271 с.
8. *Матохнюк Л. Е., Ордынский В. С.* Влияние частоты нагружения на закономерности и микромеханизмы роста усталостной трещины в титановых сплавах. *Сообщ. 1 // Пробл. прочности.* – 1988. – № 1. – С. 17 – 21.

Поступила 19. 09. 2001